

# 区块链技术背景下风险规避型跨国供应链决策研究

李凡, 陈磊

东华大学旭日工商管理学院, 上海

收稿日期: 2022年12月3日; 录用日期: 2022年12月12日; 发布日期: 2023年3月6日

## 摘要

在跨国供应链的发展历程中, 各跨国企业可能会面临产品质量、贸易安全、税收差异等难题, 一些平台开始利用区块链进行安全认证。本文研究了一个由位于高税收国家的跨国企业和从跨国企业采购并转售货物的电子零售商组成的合作供应链, 电子零售商在低税收国家与跨国企业的零售部门竞争。研究表明, 动态环境下, 跨国企业的风险规避行为导致区块链技术应用程度、批发价格、电子零售商及跨国企业零售部门销售价格降低, 但零售商的风险规避行为会导致批发价格升高。此外, 在跨国企业风险规避时, 区块链投入最低, 决策更加保守, 批发价与跨国企业零售部门销售价均最低。在供应链主体均风险规避且运用成本分担契约时, 区块链投入努力最高, 供应链效用也最高, 该契约可有效协调供应链。

## 关键词

跨国供应链, 区块链技术, 风险规避, 成本共担契约, 微分博弈

# Research on Risk Aversion Multinational Supply Chain Decision under the Background of Blockchain Technology

Fan Li, Lei Chen

Glorious Sun School of Business and Management, Donghua University, Shanghai

Received: Dec. 3<sup>rd</sup>, 2022; accepted: Dec. 12<sup>th</sup>, 2022; published: Mar. 6<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

With the development of multinational supply chain, multinational enterprises may face problems

such as product quality, trade security, and tax differences. Some platforms use blockchain for security certification. This paper studies a cooperative supply chain consisting of multinational enterprises located in high-tax countries and e-retailers that purchase and resell goods from multinational enterprises. E-retailers compete with the retail sector of multinational enterprises in low-tax countries. The research shows that under the dynamic environment, the risk aversion of multinational enterprises leads to the reduction of blockchain technology application, wholesale prices, e-retailers and retail sales prices of multinational enterprises, but the risk aversion of retailers leads to the increase of wholesale prices. In addition, when multinational enterprises are risk aversion, the investment in the blockchain is the lowest, the decision-making is more conservative, and the wholesale price and the retail sales price of multinational enterprises are both the lowest. When the supply chain entities are risk aversion and the cost-sharing contract is used, the blockchain has the highest investment effort and the supply chain has the highest utility. The contract can effectively coordinate the supply chain.

## Keywords

Multinational Supply Chain, Blockchain Technology, Risk Aversion, Cost-Sharing Contract, Differential Game

Copyright © 2023 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

近些年来, 跨境电子商务市场在全球变得越来越重要, 为了更好地满足需求, 许多电子零售商购买国际品牌的产品, 并在 Amazon、eBay、Lazada 以及天猫国际等平台上转售, 然而, 在跨境电商平台上销售的全球品牌产品一直饱受低质量形象和客户的质疑。为解决上述问题, 部分跨国企业引入了区块链技术。Shunko 等[1]调查了跨国企业零售部门的采购策略。Niu 等[2]研究了两个相互竞争的跨国公司的决策。Wu 等[3]总结并讨论了引入区块链技术时供应链数据管理系统面临的关键技术挑战。Malik 等[4]提出了在政府监管下利用区块链技术追溯食品来源。朱建明等[5]重点研究了区块链下 B2B + B2C 的供应链贸易结构图及多部门协同的动态认证模型。Suzuki [6]、Wang [7]、Cha [8]等建立了一套采用区块链技术的可溯源系统。Chen [9]认为, 应用区块链技术防止供应链中产品欺诈行为和仿冒品, 可以降低成本以及提高效率。Choi [10]则阐述了区块链技术在奢侈品供应链中的应用, 并比较了传统的零售模式和运用区块链技术的零售模式。

实际生产中, 由于无法预测资金投入与收益间的对称性极易导致产品生产风险, 或者产品销售过程中引发市场需求不确定风险。Choi [11]分析了缺货机会成本对供应链整体效益的影响。林强等[12]构建了风险规避型供应链的收益共享契约模型, 得出了决策者的最优批发价, 收益共享契约分担了零售商的部分市场风险。李仲飞[13]探究了各参数不确定时的资产配置问题。Agrawal 等[14]建立了风险规避型供应链的定价订购联合决策模型。胡昌峰等[15]构建了风险规避型零售商的决策目标函数, 并探究了不同契约各成员收益情况。

跨国供应链决策相关研究已受到普遍重视, 但仍然面临着若干问题: 一是研究未能顾及到跨国制造商与零售商在连续时间内的博弈决策情况, 因此无法确定企业长期决策问题, 及其对成员间收益的影响; 二是未考虑企业对产品的区块链技术支持是一种连续动态过程, 这将会对跨国供应链的决策产生一定的

影响；三是鲜有文献将成员风险偏好与跨国供应链结合起来，考虑跨国供应链长期动态决策的影响。本文针对以上三点进行创新，由于动态博弈模型适用于研究两个或两个以上主体连续时间内的博弈行为，因此本文从动态角度将微分博弈运用到跨国供应链中更加具有现实意义。鉴于此，本文在供应链中既考虑消费者对区块链技术的偏好，又关注区块链技术水平变化，以跨国供应链为研究对象，引入供应链成员风险偏好(风险中性与风险规避)，探讨跨国供应链下不同成员风险偏好对区块链技术应用水平以及成员决策的影响。

## 2. 问题描述与模型假设

本文假定市场需求随时间变化，研究了一个由位于高税收国家的跨国企业和从跨国企业采购并转售货物的电子零售商组成的动态合作供应链。这家电子零售商在一个低税收国家与跨国企业的零售部门竞争。其中，跨国企业为供应链的主导者，运用区块链技术记录产品质量水平提高消费者的信赖程度。跨国企业决定批发价格和区块链应用程度，跨国企业零售部门和电子零售商决定销售价格。相关符号及说明如表 1 所示。

**Table 1.** Relevant symbols and descriptions

**表 1.** 相关符号及说明

符号	说明
$a$	市场基本需求
$\varepsilon$	市场不确定带来的随机需求
$\sigma$	市场需求随机时的方差
$w(t)$	$t$ 时刻批发价格
$s$	跨国企业零售部门所占的市场份额
$\tau$	高税率国家与低税率国家的税率差额
$\theta$	交叉价格影响系数
$\rho$	区块链技术投入成本系数
$\mu$	消费者对区块链技术投入的敏感度
$k(t)$	$t$ 时刻区块链技术应用水平
$b(t)$	$t$ 时刻区块链技术投入程度
$D_r(t)$	$t$ 时刻零售部门市场需求
$D_e(t)$	$t$ 时刻电子零售市场需求
$p_r(t)$	$t$ 时刻跨国企业零售部门销售价格
$p_e(t)$	$t$ 时刻电子零售商的销售价格
$\eta_e$	电子零售商风险规避系数
$\eta_r$	跨国企业风险规避系数
$\nu$	产品区块链水平衰减系数

Continued

$\gamma$	消费者对应用区块链技术的偏好程度
$r$	贴现率
$\delta$	投资区块链过程中跨国企业的成本分担比例
$E(\Pi_j)$	供应链成员 $j$ 的期望利润, $j \in \{e, r, f\}$
$U(\Pi_j)$	供应链成员 $j$ 的期望效用, $j \in \{e, r, f\}$
$C, D, E, F$	作为上标分别表示电子零售商风险规避、跨国企业风险规避、供应链系统均风险规避以及运用成本共担契约的情形

假设 1: 消费者对产品质量水平的判断受跨国企业区块链技术投入的影响, 但随着时间推移, 设备老化、技术落后等因素将降低区块链技术水平, 因而可以得出区块链技术水平动态轨迹为:

$$k(t) = \mu b(t) - \nu k(t), \quad k(0) = k_0 \tag{1}$$

其中,  $\mu > 0, \nu \in (0, 1)$ ,  $\varphi_0$  为初始水平。

假设 2: 本文渠道市场需求既与产品价格、交叉价格有关, 还与区块链技术应用程度有关。在实践中, 跨国企业零售部门的渠道(商店)优于电子零售商的在线渠道, 因为前者具有独特的渠道(商店)优势, 如店内销售服务。为了捕捉这样的渠道差异, 我们假设跨国企业的零售渠道可以完全替代电子零售商的渠道, 而电子零售商的渠道只能部分替代跨国企业的零售渠道。也就是说, 我们有  $\theta_r = 1$  和  $\theta_e = \theta < 1$ 。

$$D_e(t) = (1-s)(a+\varepsilon) - p_e(t) + \theta p_r(t) + \gamma k(t) \tag{2}$$

$$D_r(t) = s(a+\varepsilon) - p_r(t) + p_e(t) + \gamma k(t) \tag{3}$$

其中,  $a > 0, s \in (0, 1), \theta \in (0, 1), \gamma \in (0, 1)$ 。

假设 3: 由于产品生产成本保持不变, 设产品生产成本为 0, 区块链技术应用成本为  $\frac{1}{2}\rho k^2(t)$ 。

假设 4: 本文使用均值方差理论来度量风险规避水平,  $U(\Pi_j) = E(\Pi_j) - \eta_j \sqrt{Var(\Pi_j)}$ ,  $\eta_j > 0$ , 且  $\eta_j$  越大表示供应链主体风险规避程度越高,  $\eta_e, \eta_r$  分别表示电子零售商和跨国企业的风险规避度。

### 3. 模型构建

#### 3.1. 电子零售商风险规避

具有风险特性的供应链成员目标函数是由期望收益和标准差组成的期望效用, 即均值 - 方差方法。当考虑仅电子零售商风险规避、跨国企业风险中性时, 由假设知贴现因子均为  $r$ , 决策目标为各自利润在无限时区的最大化, 即:

$$\max_{k, w} U_f^C = \int_0^{\infty} e^{-rt} \left\{ (sa - p_r + p_e + \gamma k)(p_r - w) + w[a + (\theta - 1)p_r + 2\gamma k](1 - \tau) - \rho b^2 / 2 \right\} dt \tag{4}$$

利用连续动态规划与微分博弈理论, 将上式决策目标转化为  $t$  时刻跨国企业与电子零售商效用最优值函数满足的 HJB 方程, 得出定理 1。

**定理 1** 仅电子零售商风险规避决策下均衡解为:

1) 电子零售商销售价格、跨国企业零售部门销售价格、批发价格, 区块链技术投入程度为:

$$p_e^{C*} = \frac{(-1+s)\eta_e(-1+\theta)\sigma(8+\theta(-1+\tau)-10\tau)-k\gamma(2+\theta)(9-11\tau+\theta(-3+5\tau))+a(-16+7\theta+18\tau-9\theta\tau-s(-1+\theta)(14-3\theta-14\tau+5\theta\tau))}{2(-1+\theta)(11-12\tau+\theta(-2+3\tau))}$$

$$p_r^{C*} = \frac{-((-1+s)\eta_e(-1+\theta)\sigma(-1+3\tau))-3k\gamma(9-3\theta-11\tau+5\theta\tau)+a(-13+4\theta+15\tau-6\theta\tau+s(-1+\theta+3\tau-3\theta\tau))}{2(-1+\theta)(11-12\tau+\theta(-2+3\tau))}$$

$$w^{C*} = \frac{(-1+s)\eta_e(-1+\theta)\sigma(6+\theta(-1+\tau)-4\tau)-a(-10+\theta-s(-1+\theta)(6+\theta(-1+\tau)-4\tau))+12\tau-3\theta\tau}{2(-1+\theta)(11-12\tau+\theta(-2+3\tau))} + \frac{k\gamma(14+\theta^2(-1+\tau)-20\tau+\theta(5+\tau))}{2(-1+\theta)(11-12\tau+\theta(-2+3\tau))}$$

$$b^{C*} = \frac{\mu(2f_1k+f_2)}{\rho}$$

2) 跨国企业、零售部门和电子零售商的最优值函数为:

$$V_f^C = f_1^C k^{C2} + f_2^C k^C + f_3^C, V_r^C = g_1^C k^{C2} + g_2^C k^C + g_3^C, V_e^C = h_1^C k^{C2} + h_2^C k^C + h_3^C \quad (6)$$

3) 产品应用区块链水平轨迹为:

$$k^C = \left( k_0 + \frac{\mu^2 f_2^C}{2f_1^C \mu^2 - \rho v} \right) e^{\frac{2f_1^C \mu^2 - \rho v}{\rho} t} - \frac{\mu^2 f_2^C}{2f_1^C \mu^2 - \rho v} \quad (7)$$

其中:

$$f_1^C = \frac{\rho(r+2v)}{4\mu^2} + \sqrt{\frac{\rho^2(r+2v)^2}{16\mu^4} + \frac{2\gamma^2\mu^2\rho(-1+\tau)(-37+\theta^2(-1+\tau)+25\tau+2\theta(1+5\tau))}{16\mu^4(-1+\theta)(11-12\tau+\theta(-2+3\tau))}}$$

$$f_2^C = \frac{\gamma\rho(-1+\tau)((-1+s)\eta_e(-1+\theta)\sigma(3+\theta(-1+\tau)+5\tau)+a(-17+15\tau+\theta(-1+3\tau)+s(-1+\theta)(3+\theta(-1+\tau)+5\tau)))}{2(-1+\theta)(2f_1\mu^2-r\rho-v\rho)(11-2\theta-12\tau+3\theta\tau)}$$

$$f_3^C = \frac{f_2^C\mu^2}{2\rho r} - \frac{(-1+\tau)(-1+s)^2\eta_e^2(-1+\theta)\sigma^2(5+\theta(-1+\tau)-\tau)+2a(-1+s)\eta_e(-1+\theta)\sigma(-1+s(5+\theta(-1+\tau)-\tau)+3\tau)}{4r(-1+\theta)(11-12\tau+\theta(-2+3\tau))} + \frac{a^2(s^2(-1+\theta)(5+\theta(-1+\tau)-\tau)+9(-1+\tau)+2s(-1+\theta)(-1+3\tau))}{4r(-1+\theta)(11-12\tau+\theta(-2+3\tau))}$$

$$g_1^C = \frac{\gamma^2(-13+\theta)^2\rho(-1+\tau)^2}{4((r+2v)\rho-4f_1\mu^2)(11-12\tau+\theta(-2+3\tau))^2}$$

$$g_2^C = -\frac{2f_2g_1\mu^2}{2f_1\mu^2-(r+v)\rho} - \frac{a\gamma\rho(-3+s(-7+\theta))+(-1+s)\eta_e(-7+\theta)\sigma(-13+\theta)(-1+\tau)^2}{4(f_1\mu^2-(r+v)\rho)(11-12\tau+\theta(-2+3\tau))^2}$$

$$g_3^C = \frac{f_2g_2\mu^2}{r\rho} + \frac{(a(-3+s(-7+\theta))+(-1+s)\eta_e(-7+\theta)\sigma)^2(-1+\tau)^2}{4r(11-12\tau+\theta(-2+3\tau))^2}$$

$$\begin{aligned}
 h_1^C &= -\frac{\gamma^2 \rho (-2 - \theta + \tau + 2\theta\tau)^2}{(4f_1\mu^2 - r\rho - 2v\rho)(11 - 2\theta - 12\tau + 3\theta\tau)^2} \\
 h_2^C &= -\frac{2f_2h_1\mu^2}{2f_1\mu^2 - (r+v)\rho} - \frac{\gamma(-2 + \tau + \theta(-1 + 2\tau))((-1+s)\eta_e\sigma(-3 + (2+\theta)\tau) + 2a(3(-1+\tau) + s(4-\theta-5\tau+2\theta\tau)))}{(2f_1\mu^2 - (r+v)\rho)(11-12\tau+\theta(-2+3\tau))^2} \\
 &\quad + \frac{(-1+s)\gamma\eta_e\sigma(-2+\tau+\theta(-1+2\tau))}{(2f_1\mu^2 - (r+v)\rho)(11-12\tau+\theta(-2+3\tau))} \\
 h_3^C &= \frac{f_2h_2\mu^2}{\rho r} + \frac{(3a(-1+\tau) + as(4-5\tau+\theta(-1+2\tau)) + (-1+s)\eta_e\sigma(4-5\tau+\theta(-1+2\tau)))(-((-1+s)\eta(-7+\theta)\sigma(-1+\tau)))}{r(11-12\tau+\theta(-2+3\tau))^2} \\
 &\quad + \frac{a(3(-1+\tau) + s(4-\theta-5\tau+2\theta\tau))}{r(11-12\tau+\theta(-2+3\tau))^2} + \frac{(-1+s)\eta_e\sigma((-1+s)\eta_e(-7+\theta)\sigma(-1+\tau) + a(3-3\tau+s(-4+\theta+5\tau-2\theta\tau)))}{(11-12\tau+\theta(-2+3\tau))}
 \end{aligned}$$

根据区块链技术水平函数, 要使其收敛, 有  $\frac{2f_1\mu^2 - \rho v}{\rho} < 0$ , 即

$$\gamma < \frac{\sqrt{2v\rho(r+v)(-1+\theta)(11-12\tau+\theta(-2+3\tau))}}{\mu\sqrt{(-1+\tau)(-37+\theta^2(-1+\tau)+25\tau+2\theta(1+5\tau))}} \text{ 时, 区块链技术水平随时间变化后趋于稳定状态, 即 } t \rightarrow \infty。$$

$$k_\infty^C = \begin{cases} -\frac{\mu^2 f_2}{2f_1\mu^2 - \rho v}, & \gamma < \frac{\sqrt{2v\rho(r+v)(-1+\theta)(11-12\tau+\theta(-2+3\tau))}}{\mu\sqrt{(-1+\tau)(-37+\theta^2(-1+\tau)+25\tau+2\theta(1+5\tau))}} \\ \text{不收敛, 其他} \end{cases} \quad (8)$$

将式(8)代入式(5)、(6)可以得出稳定状态下的  $p_{\infty}^C, p_{r\infty}^C, w_{\infty}^C, k_{\infty}^C$ 。在电子零售商风险规避下, 根据稳态函数, 由定理 1 得出推论 1。

**推论 1** 电子零售商风险规避下关键参数稳态比较分析为:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial k_{\infty}^C}{\partial \eta_e} < 0, \quad \frac{\partial w_{\infty}^C}{\partial \eta_e} > 0, \quad \frac{\partial p_{\infty}^C}{\partial \eta_e} < 0, \quad \frac{\partial p_{r\infty}^C}{\partial \eta_e} < 0; \quad \frac{\partial k_{\infty}^C}{\partial \gamma} > 0, \quad \frac{\partial w_{\infty}^C}{\partial \gamma} > 0, \quad \frac{\partial p_{\infty}^C}{\partial \gamma} > 0, \quad \frac{\partial p_{r\infty}^C}{\partial \gamma} > 0; \\
 \frac{\partial k_{\infty}^C}{\partial \tau} < 0, \quad \frac{\partial w_{\infty}^C}{\partial \tau} < 0, \quad \frac{\partial p_{\infty}^C}{\partial \tau} < 0, \quad \frac{\partial p_{r\infty}^C}{\partial \tau} < 0。
 \end{aligned}$$

在仅电子零售商风险规避下, 区块链技术水平、电子零售商与跨国企业零售部门销售价格随电子零售商风险规避系数增加而降低, 批发价格随电子零售商风险规避系数增加而升高。当区块链应用程度较低, 消费者对产品质量持怀疑态度, 电子零售商风险规避行为导致售价较低, 当区块链技术应用程度较高时, 消费者对产品质量水平有较清晰认知。风险规避程度不断加大时, 电子零售商为了防止出现产品积压会减少进货以及降低售价, 因此跨国企业会提高批发价格避免零售商出现大幅降价的情况。

### 3.2. 跨国企业风险规避

在仅跨国企业风险规避, 电子零售商风险中性的情况下, 利用均值 - 方差法, 由假设知贴现因子均为  $r$ , 决策目标为各自利润在无限时区的最大化, 即:

$$\begin{aligned} \max_{k,w} U_f^D &= \int_0^{\infty} e^{-\rho t} \left\{ (sa - p_r + p_e + \gamma k)(p_r - w) + w[a + (\theta - 1)p_r + 2\gamma k](1 - \tau) \right. \\ &\quad \left. - \rho b^2 / 2 - [w(1 - \tau)\sigma + (p_r - w)s\sigma]\eta_r \right\} dt \\ \text{s.t.} &\begin{cases} \max_{p_e} U_e^D = \int_0^{\infty} e^{-\rho t} \left\{ [(1 - s)a - p_e + \theta p_r + \gamma k](p_e - w) \right\} dt \\ \max_{p_r} U_r^D = \int_0^{\infty} e^{-\rho t} \left\{ (sa - p_r + p_e + \gamma k)(p_r - w) - (p_r - w)s\sigma\eta_r \right\} dt \\ k' = \mu b - \nu k \end{cases} \end{aligned} \quad (9)$$

利用连续动态规划与微分博弈理论, 将上式决策目标转化为  $t$  时刻制造商与零售商效用最优值函数满足的 HJB 方程, 得出定理 2。

**定理 2** 仅跨国企业风险规避决策下均衡解为:

1) 电子零售商销售价格、跨国企业零售部门销售价格、批发价格, 区块链技术投入程度为:

$$\begin{aligned} p_e^{D*} &= \frac{-k\gamma(2 + \theta)(9 - 11\tau + \theta(-3 + 5\tau)) + \eta_r\sigma\left((-8 - 2\theta + \theta^2)(-1 + \tau) + s(-1 + \theta)(8 - \theta - 4\tau + 4\theta\tau)\right)}{2(-1 + \theta)(11 - 12\tau + \theta(-2 + 3\tau))} \\ &\quad + \frac{a(-16 + 7\theta + 18\tau - 9\theta\tau - s(-1 + \theta)(14 - 3\theta - 14\tau + 5\theta\tau))}{2(-1 + \theta)(11 - 12\tau + \theta(-2 + 3\tau))} \\ p_r^{D*} &= \frac{-3k\gamma(9 - 11\tau + \theta(-3 + 5\tau)) + \eta_r\sigma(3(-4 + \theta)(-1 + \tau) + s(-1 + \theta)(1 + 6\tau))}{2(-1 + \theta)(11 - 12\tau + \theta(-2 + 3\tau))} \\ &\quad + \frac{a(-13 + 4\theta + 15\tau - 6\theta\tau + s(-1 + \theta + 3\tau - 3\theta\tau))}{2(-1 + \theta)(11 - 12\tau + \theta(-2 + 3\tau))} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} w^{D*} &= \frac{a(-10 + \theta - s(-1 + \theta)(6 + \theta(-1 + \tau) - 4\tau) + 12\tau - 3\theta\tau) - k\gamma(14 + \theta^2(-1 + \tau) - 20\tau + \theta(5 + \tau))}{2(-1 + \theta)(11 - 12\tau + \theta(-2 + 3\tau))} \\ &\quad + \frac{\eta_r\sigma\left(-(-4 + \theta)^2(-1 + \tau) + s(-1 + \theta)(16 - 3\theta - 8\tau + 2\theta\tau)\right)}{2(-1 + \theta)(11 - 12\tau + \theta(-2 + 3\tau))} \end{aligned}$$

$$b^{D*} = \frac{\mu(2f_1k + f_2)}{\rho}$$

2) 跨国企业、零售部门和电子零售商的最优值函数为:

$$V_f^D = f_1^D k^{D2} + f_2^D k^D + f_3^D, V_r^D = g_1^D k^{D2} + g_2^D k^D + g_3^D, V_e^D = h_1^D k^{D2} + h_2^D k^D + h_3^D \quad (11)$$

3) 区块链技术水平轨迹为:

$$k^D = \left( k_0 + \frac{\mu^2 f_2^D}{2f_1^D \mu^2 - \rho\nu} \right) e^{\frac{2f_1^D \mu^2 - \rho\nu}{\rho} t} - \frac{\mu^2 f_2^D}{2f_1^D \mu^2 - \rho\nu} \quad (12)$$

$$\begin{aligned}
 f_1^D &= \frac{\rho(r+2v)}{4\mu^2} + \sqrt{\frac{\rho^2(r+2v)^2}{16\mu^4} + \frac{2\gamma^2\mu^2\rho(-1+\tau)(-37+\theta^2(-1+\tau)+25\tau+2\theta(1+5\tau))}{16\mu^4(-1+\theta)(11-12\tau+\theta(-2+3\tau))}} \\
 f_2^D &= \frac{\gamma\rho\eta_r\sigma(-1+\tau)(14+\theta^2(-1+\tau)-20\tau+\theta(5+\tau)-2s(-1+\theta)(3+\theta(-1+\tau)+5\tau))}{2(-1+\theta)(2f_1\mu^2-r\rho-v\rho)(11-2\theta-12\tau+3\theta\tau)} \\
 &\quad + \frac{\gamma\rho a(-1+\tau)(-17+15\tau+\theta(-1+3\tau)+s(-1+\theta)(3+\theta(-1+\tau)+5\tau))}{2(-1+\theta)(2f_1\mu^2-r\rho-v\rho)(11-2\theta-12\tau+3\theta\tau)} \\
 f_3^D &= \frac{f_2^2\mu^2}{2\rho r} - \frac{a^2(-1+\tau)(s^2(-1+\theta)(5+\theta(-1+\tau)-\tau)+9(-1+\tau)+2s(-1+\theta)(-1+3\tau))}{(4r(-1+\theta)(11-12\tau+\theta(-2+3\tau)))} \\
 &\quad - \frac{\eta_r^2\sigma^2(-1+\tau)(-4s(-1+\theta)(6+\theta(-1+\tau)-4\tau)+4s^2(-1+\theta)(5+\theta(-1+\tau)-\tau)+(-4+\theta)^2(-1+\tau))}{(4r(-1+\theta)(11-12\tau+\theta(-2+3\tau)))} \\
 &\quad + \frac{2a\eta_r\sigma(-1+\tau)(-10+\theta-s(-1+\theta)(8+\theta(-1+\tau)-10\tau)+2s^2(-1+\theta)(5+\theta(-1+\tau)-\tau)+12\tau-3\theta\tau)}{(4r(-1+\theta)(11-12\tau+\theta(-2+3\tau)))} \\
 g_1^D &= \frac{\gamma^2(-13+\theta)^2\rho(-1+\tau)^2}{4((r+2v)\rho-4f_1\mu^2)(11-12\tau+\theta(-2+3\tau))^2} \\
 g_2^D &= -\frac{2f_2g_1\mu^2}{2f_1\mu^2-(r+v)\rho} - \frac{\gamma(-13+\theta)(a(-1+\tau)^2(-3+s(-7+\theta))+\eta_r\sigma(-4-2s(-7+\theta)+\theta)(-1+\tau)^2)}{(4f_1\mu^2-2(r+v)\rho)(11-12\tau+\theta(-2+3\tau))^2} \\
 g_3^D &= \frac{f_2g_2\mu^2}{r\rho} + \frac{(a(-3+s(-7+\theta))+\eta_r(-4-2s(-7+\theta)+\theta)\sigma)^2(-1+\tau)^2}{4r(11-12\tau+\theta(-2+3\tau))^2} \\
 h_1^D &= -\frac{\gamma^2\rho(-2-\theta+\tau+2\theta\tau)^2}{(4f_1\mu^2-r\rho-2v\rho)(11-2\theta-12\tau+3\theta\tau)^2} \\
 h_2^D &= -\frac{2f_2h_1\mu^2}{2f_1\mu^2-(r+v)\rho} - \frac{(2\gamma(2+\theta-\tau-2\theta\tau)(a(3-3\tau+s(-4+\theta+5\tau-2\theta\tau))+\eta_r\sigma((-4+\theta)(-1+\tau)+s(-3+2\tau+\theta\tau))))}{(2f_1\mu^2-(r+v)\rho)(11-12\tau+\theta(-2+3\tau))^2} \\
 h_3^D &= \frac{f_2h_2\mu^2}{\rho r} + \frac{(a(3-3\tau+s(-4+\theta+5\tau-2\theta\tau))+\eta_r\sigma((-4+\theta)(-1+\tau)+s(-3+2\tau+\theta\tau)))^2}{r(11-12\tau+\theta(-2+3\tau))^2}
 \end{aligned}$$

根据区块链技术水平函数, 要使其收敛, 有  $\frac{2f_1\mu^2-\rho v}{\rho} < 0$ , 即

$$\gamma < \frac{2v\rho(r+v)(-1+\theta)(11-12\tau+\theta(-2+3\tau))}{\mu\sqrt{(-1+\tau)(-37+\theta^2(-1+\tau)+25\tau+2\theta(1+5\tau))}} \text{ 时, 区块链技术水平随时间变化后趋于稳定状态, 即 } t \rightarrow \infty。$$

$$k_\infty^D = \begin{cases} -\frac{\mu^2 f_2}{2f_1\mu^2 - \rho v}, & \gamma < \frac{\sqrt{2v\rho(r+v)(-1+\theta)(11-12\tau+\theta(-2+3\tau))}}{\mu\sqrt{(-1+\tau)(-37+\theta^2(-1+\tau)+25\tau+2\theta(1+5\tau))}} \\ \text{不收敛, 其他} & \end{cases} \quad (13)$$



将式(13)代入式(10)、(11)可以得出稳定状态下的  $p_{e\infty}^D, p_{r\infty}^D, w_{\infty}^D, k_{\infty}^D$ 。在跨国企业风险规避下, 根据稳态函数, 由定理 2 得出推论 2。

**推论 2** 跨国企业风险规避下关键参数稳态比较分析为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial k_{\infty}^D}{\partial \eta_r} < 0, \quad \frac{\partial w_{\infty}^D}{\partial \eta_r} < 0, \quad \frac{\partial p_{e\infty}^D}{\partial \eta_r} < 0, \quad \frac{\partial p_{r\infty}^D}{\partial \eta_r} < 0; \quad \frac{\partial k_{\infty}^D}{\partial \gamma} > 0, \quad \frac{\partial w_{\infty}^D}{\partial \gamma} > 0, \quad \frac{\partial p_{e\infty}^D}{\partial \gamma} > 0, \quad \frac{\partial p_{r\infty}^D}{\partial \gamma} > 0; \\ \frac{\partial k_{\infty}^D}{\partial \tau} < 0, \quad \frac{\partial w_{\infty}^D}{\partial \tau} < 0, \quad \frac{\partial p_{e\infty}^D}{\partial \tau} < 0, \quad \frac{\partial p_{r\infty}^D}{\partial \tau} < 0. \end{aligned}$$

在仅跨国企业风险规避下, 区块链技术水平、批发价格、电子零售商与跨国企业零售部门销售价格随电子零售商风险规避系数增加而降低。当跨国企业具有风险规避行为时, 会根据自身效用而非期望利润进行决策, 考虑到市场需求的不确定性, 跨国企业增加对区块链技术的投入并不一定会带来市场需求的同步增加。当跨国企业风险规避系数较大时, 其对市场需求不确定性的承受程度越小, 因此为规避市场风险, 跨国企业会选择降低区块链技术投入水平从而降低相应的投入成本, 与此同时, 为提高市场需求, 跨国企业选择降低零售部门销售价格促进销售量, 降低批发价格促进电子零售商销售, 而当零售部门销售价格与批发价格均降低且电子零售商表现出风险中性行为时, 理性的电子零售商为提升零售渠道竞争力也会降低其销售价格。当消费者对区块链技术偏好程度较高时, 电子零售商和跨国企业都会提高售价以获取更多盈利。

### 3.3. 供应链主体均风险规避

为了使得供应链整体收益最大化, 跨国企业与电子零售商将进行完全合作, 系统以自身效用最大化为目标, 则得到的微分博弈决策模型为:

$$\begin{aligned} \max_{p_e, p_r, k, w} U^E &= \int_0^{\infty} e^{-\pi t} \{ (sa - p_r + p_e + \gamma k)(p_r - w) + [(1-s)a - p_e + \theta p_r + \gamma k](p_e - w) \\ &\quad + w[a + (\theta - 1)p_r + 2\gamma k](1 - \tau) - \rho b^2 / 2 - w(1 - \tau)\sigma\eta_r - (p_r - w)\sigma\eta_r \\ &\quad - (p_e - w)(1 - s)\sigma\eta_e \} dt \\ \text{s.t. } k' &= \mu b - \nu k \end{aligned} \quad (14)$$

利用连续动态规划与微分博弈理论, 将供应链整体效用函数转化为  $t$  时刻供应链总效用最优值函数满足的 HJB 方程, 得出定理 3。

**定理 3** 集中决策情况下的均衡解为:

1) 电子零售商销售价格、跨国企业零售部门销售价格、批发价格, 区块链技术投入程度为:

$$\begin{aligned} p_e^{E*} &= -\frac{-\eta_e\sigma + \eta_e s\sigma + \eta_r\sigma - s\eta_r\sigma - \eta_e\theta\sigma + \eta_e s\theta\sigma + \eta_r\theta\sigma - s\eta_r\theta\sigma + 2a\tau - a\tau + 3k\gamma\tau + as\theta\tau + k\gamma\theta\tau}{2(-1+\theta)\tau} \\ &\quad - \frac{\eta_e\sigma\tau + \eta_e s\sigma\tau + \theta\sigma\tau\eta_e - \eta_e s\theta\sigma\tau - \eta_r\theta\sigma\tau - \eta_r\sigma\tau}{2(-1+\theta)\tau} \\ p_r^{E*} &= -\frac{-\eta_e\sigma + \eta_e s\sigma + \eta_r\sigma - s\eta_r\sigma + a\tau + 2k\gamma\tau - \eta_e\sigma\tau}{(-1+\theta)\tau} \\ w^{E*} &= -\frac{-3\eta_e\sigma + 3\eta_e s\sigma + 3\eta_r\sigma - 3s\eta_r\sigma - \eta_e\theta\sigma + \eta_e s\theta\sigma + \eta_r\theta\sigma - s\eta_r\theta\sigma + 2a\tau - a\tau + 3k\gamma\tau + as\theta\tau}{2(-1+\theta)\tau^2} \\ &\quad + \frac{k\gamma\theta\tau + \pi\sigma\tau - \pi s\sigma\tau - 3\eta_r\sigma\tau + 2s\eta_r\sigma\tau + \eta_e\theta\sigma\tau - \eta_e s\theta\sigma\tau - \eta_r\theta\sigma\tau}{2(-1+\theta)\tau^2} \end{aligned}$$

$$b^{E*} = \frac{\mu(2h_1k + h_2)}{\rho} \tag{15}$$

2) 系统整体最优值函数为:

$$V^E = h_1^E k^{E2} + h_2^E k^E + h_3^E \tag{16}$$

3) 区块链技术水平最优轨迹为:

$$k^E = \left( k_0 + \frac{\mu^2 h_2^E}{2h_1^E \mu^2 - \rho v} \right) e^{\frac{2h_1^E \mu^2 - \rho v}{\rho} t} - \frac{\mu^2 h_2^E}{2h_1^E \mu^2 - \rho v} \tag{17}$$

其中:

$$h_1^E = \frac{8 + 4r\rho + \sqrt{-32\gamma^2 \mu^2 + (-8 - 4r\rho)^2}}{16\mu^2}$$

$$h_2^E = \frac{\eta_r \rho \sigma \gamma (s(3 + \theta - 4\tau) + (3 + \theta)(-1 + \tau)) + \eta_e (-1 + s) \gamma (3 + \theta) \rho \sigma (-1 + \tau) - as(-1 + \theta) \rho \gamma \tau^2}{2(-1 + \theta)(-1 + 2h_1 \mu^2 - r\rho) \tau^2}$$

$$h_3^E = \frac{\eta_e^2 (-1 + s)^2 \rho \sigma^2 (-3 + \theta(-1 + \tau) - \tau)(-1 + \tau) - 2\eta_r \rho \sigma a (s^2 (-1 + \theta) + 2(-1 + \tau) + s(-3 + \theta)(-1 + \tau)) \tau}{4r(-1 + \theta) \rho \tau^2}$$

$$+ \frac{(-1 + \theta)(2h_2^2 \mu^2 + (as)^2 \rho) \tau^2 + \eta_r^2 \rho \sigma^2 (s(3 + \theta - 4\tau) + (3 + \theta)(-1 + \tau))(-1 + s + \tau)}{4r(-1 + \theta) \rho \tau^2}$$

$$+ \frac{2\eta_e (-1 + s) \rho \sigma (-1 + \tau) (-a(2 + s(-1 + \theta)) \tau + \eta_r \sigma (-3 + s(3 + \theta) + \theta(-1 + \tau) + \tau))}{4(-1 + \theta) \rho \tau^2}$$

根据区块链技术水平函数, 要使其收敛, 有  $\frac{2f_1 \mu^2 - \rho v}{\rho} < 0$ , 即

$\gamma < \frac{\sqrt{2v\rho(r+v)(-1+\theta)(11-12\tau+\theta(-2+3\tau))}}{\mu\sqrt{(-1+\tau)(-37+\theta^2(-1+\tau)+25\tau+2\theta(1+5\tau))}}$  时, 区块链技术水平随时间变化后趋于稳定状态, 即  $t \rightarrow \infty$ 。

$$k_\infty^E = \begin{cases} -\frac{\mu^2 f_2}{2f_1 \mu^2 - \rho v}, & \gamma < \frac{\sqrt{2v\rho(r+v)(-1+\theta)(11-12\tau+\theta(-2+3\tau))}}{\mu\sqrt{(-1+\tau)(-37+\theta^2(-1+\tau)+25\tau+2\theta(1+5\tau))}} \\ \text{不收敛, 其他} \end{cases} \tag{18}$$

将式(18)代入式(15)、(16)可以得出稳定状态下的  $p_{ess}^E, p_{rso}^E, w_\infty^E, k_\infty^E$ 。在跨国企业与电子零售商均风险规避的集中决策下, 根据稳态函数, 由定理3得出推论3。

**推论3** 跨国企业与电子零售商均风险规避的集中决策下关键参数稳态比较分析为:

$$\frac{\partial k_\infty^E}{\partial \eta_e} < 0, \frac{\partial w_\infty^E}{\partial \eta_e} > 0, \frac{\partial p_{ess}^E}{\partial \eta_e} < 0, \frac{\partial p_{rso}^E}{\partial \eta_e} < 0; \frac{\partial k_\infty^E}{\partial \eta_r} < 0, \frac{\partial w_\infty^E}{\partial \eta_r} < 0, \frac{\partial p_{ess}^E}{\partial \eta_r} < 0, \frac{\partial p_{rso}^E}{\partial \eta_r} < 0;$$

$$\frac{\partial k_\infty^E}{\partial \gamma} > 0, \frac{\partial w_\infty^E}{\partial \gamma} > 0, \frac{\partial p_{ess}^E}{\partial \gamma} > 0, \frac{\partial p_{rso}^E}{\partial \gamma} > 0; \frac{\partial k_\infty^E}{\partial \tau} < 0, \frac{\partial w_\infty^E}{\partial \tau} < 0, \frac{\partial p_{ess}^E}{\partial \tau} < 0, \frac{\partial p_{rso}^E}{\partial \tau} < 0。$$

推论 3 表明, 在跨国企业与电子零售商均风险规避的集中决策下, 区块链技术水平、电子零售商与跨国企业零售部门销售价格随跨国企业和电子零售商风险规避程度的增加而降低。批发价格随跨国企业风险规避程度的增加而降低, 但随电子零售商风险规避程度的增加而增加。

### 3.4. 成本共担契约

在跨国企业与电子零售商均风险规避时, 利用成本共担契约加强跨国企业与电子零售商之间的合作, 以协调供应链利润。该契约具体机制如下: 跨国企业与电子零售商分别以  $\delta$  和  $1-\delta$  的比例共同承担区块链技术成本。由此可以得出, 成本共担契约下供应链成员瞬时总效用函数为:

$$\begin{aligned} \max_{k,w} U_f^F &= \int_0^{\infty} e^{-rt} \left\{ (sa - p_r + p_e + \gamma k)(p_r - w) + w[a + (\theta - 1)p_r + 2\gamma k](1 - \tau) \right. \\ &\quad \left. - \delta \rho b^2 / 2 - [w(1 - \tau)\sigma + (p_r - w)s\sigma]\eta_r \right\} dt \\ \text{s.t.} \begin{cases} \max_{p_e} U_e^F &= \int_0^{\infty} e^{-rt} \left\{ [(1 - s)a - p_e + \theta p_r + \gamma k](p_e - w) - (1 - \delta)\rho k^2 / 2 - (p_e - w)(1 - s)\sigma\eta_e \right\} dt \\ \max_{p_r} U_r^F &= \int_0^{\infty} e^{-rt} \left\{ (sa - p_r + p_e + \gamma k)(p_r - w) - (p_r - w)s\sigma\eta_r \right\} dt \\ k' &= \mu b - \nu k \end{cases} \end{aligned} \quad (19)$$

利用连续动态理论和微分博弈方法, 结合 HJB 方程, 得出定理 4。

**定理 4** 成本共担契约下各变量均衡解为:

1) 电子零售商销售价格、跨国企业零售部门销售价格、批发价格, 区块链技术投入程度为:

$$\begin{aligned} p_e^{F*} &= \frac{-k\gamma(2 + \theta)(9 - 11\tau + \theta(-3 + 5\tau)) + a(-16 + 7\theta + 18\tau - 9\theta\tau - s(-1 + \theta)(14 - 3\theta - 14\tau + 5\theta\tau))}{2(-1 + \theta)(11 - 12\tau + \theta(-2 + 3\tau))} \\ &\quad + \frac{\sigma(\eta_e(16 - 18\tau + \theta(-7 + 9\tau)) + s(-1 + \theta)(\eta_e(12 + \theta - 10\tau + \theta\tau) + \eta_r(4 - 3\theta - 4\tau + 4\theta\tau))}{2(-1 + \theta)(11 - 12\tau + \theta(-2 + 3\tau))} \\ p_r^{F*} &= \frac{-3k\gamma(9 - 11\tau + \theta(-3 + 5\tau)) + a(-13 + 4\theta + 15\tau - 6\theta\tau + s(-1 + \theta + 3\tau - 3\theta\tau))}{2(-1 + \theta)(11 - 12\tau + \theta(-2 + 3\tau))} \\ &\quad + \frac{\sigma(s(-1 + \theta)(-5\eta_r + 7\eta_e + 6\eta_r\tau - 3\eta\tau) + \eta_e(13 - 4\theta - 15\tau + 6\theta\tau))}{2(-1 + \theta)(11 - 12\tau + \theta(-2 + 3\tau))} \\ w^{F*} &= \frac{a(-10 + \theta - s(-1 + \theta)(6 + \theta(-1 + \tau) - 4\tau) + 12\tau - 3\theta\tau) - k\gamma(14 + \theta^2(-1 + \tau) - 20\tau + \theta(5 + \tau))}{2(-1 + \theta)(11 - 12\tau + \theta(-2 + 3\tau))} \\ &\quad + \frac{\sigma(\eta_e(10 - 12\tau + \theta(-1 + 3\tau)) + s(-1 + \theta)(-\eta_e(-2 + \theta - 4\tau + \theta\tau) + \eta_r(8 - \theta - 8\tau + 2\theta\tau)))}{2(-1 + \theta)(11 - 12\tau + \theta(-2 + 3\tau))} \\ b^{F*} &= \frac{\mu(2h_1k + h_2)}{\rho} \end{aligned} \quad (20)$$

2) 跨国企业、零售部门和电子零售商的最优值函数为:

$$V_f^F = f_1^F k^{F2} + f_2^F k^F + f_3^F, V_r^F = g_1^F k^{F2} + g_2^F k^F + g_3^F, V_e^F = h_1^F k^{F2} + h_2^F k^F + h_3^F \quad (21)$$

3) 区块链技术水平最优轨迹为:

$$k^F = \left( k_0 + \frac{\mu^2 f_2^F}{2f_1^F \mu^2 - \rho \delta v} \right) e^{\frac{2f_1^F \mu^2 - \rho \delta v}{\rho \delta} t} - \frac{\mu^2 f_2^F}{2f_1^F \mu^2 - \rho \delta v} \quad (22)$$

其中:

$$f_1^F = \frac{\rho(r+2v)}{4(2\delta-\delta^3)\mu^2} + \sqrt{\frac{\rho^2(r+2v)^2}{16(2\delta-\delta^3)^2\mu^4} + \frac{2\gamma^2\mu^2\rho(-1+\tau)(-37+\theta^2(-1+\tau)+25\tau+2\theta(1+5\tau))}{16(2\delta-\delta^3)^2\mu^4(-1+\theta)(11-12\tau+\theta(-2+3\tau))}}$$

$$f_2^F = \frac{\gamma\rho\sigma(-1+\tau)(-17+\theta(-1+3\tau)+15\tau+s(-1+\theta)(3+\theta(-1+\tau)+5\tau))}{2(-1+\theta)(2f_1(2\delta-\delta^3)\mu^2-r\rho-v\rho)(11-2\theta-12\tau+3\theta\tau)} + \frac{2\gamma\sigma\eta_e(-1+\tau)(-1+\theta)+\eta_r(-1+\tau)(14+\theta^2-20\tau)}{2f_1(2\delta-\delta^3)\mu^2-r\rho-v\rho}$$

$$f_3^F = \frac{f_2^2\delta\mu^2}{2\rho r} - \frac{a^2(-1+\tau)(s^2(-1+\theta)(5+\theta(-1+\tau)-\tau)+9(-1+\tau)+2s(-1+\theta)(-1+3\tau))}{(4r(-1+\theta)(11-12\tau+\theta(-2+3\tau)))}$$

$$- \frac{\eta_e^2\sigma^2(-1+\tau)(4s^2(-1+\theta)+(-4+\theta)^2(-1+\tau))-2a\eta_r\sigma(-1+\tau)(8+\theta(-1+\tau)-10\tau)}{(4r(-1+\theta)(11-12\tau+\theta(-2+3\tau)))}$$

$$g_1^F = \frac{\gamma^2(-13+\theta)^2\rho(-1+\tau)^2}{4((r+2v)\rho-4f_1\delta\mu^2)(11-12\tau+\theta(-2+3\tau))^2}$$

$$g_2^F = -\frac{2f_2g_1\delta\mu^2}{2f_1\delta\mu^2-(r+v)\rho} - \frac{\gamma(-13+\theta)(a(-1+\tau)^2+3\eta_e\sigma s(6+(\theta-7)\tau)+\eta_r\sigma s(-13+\theta+14\tau-2\theta\tau))}{(4f_1\delta\mu^2-2(r+v)\rho)(11-12\tau+\theta(-2+3\tau))^2}$$

$$g_3^F = \frac{f_2g_2\delta\mu^2}{r\rho} + \frac{(a(-3+s(-7+\theta))+3\eta_e\sigma s(-1+\tau)+\eta_r(-4-2s(-7+\theta)+\theta)\sigma)^2(-1+\tau)^2}{4r(11-12\tau+\theta(-2+3\tau))^2}$$

$$h_1^F = -\frac{\gamma^2\rho(-2-\theta+\tau+2\theta\tau)^2}{(4f_1\delta\mu^2-r\rho-2v\rho)(11-2\theta-12\tau+3\theta\tau)^2}$$

$$h_2^F = -\frac{2f_2h_1\delta\mu^2}{2f_1\delta\mu^2-(r+v)\rho} - \frac{(2\gamma(2+\theta-\tau-2\theta\tau)(a(3-3\tau+\eta_e s(-4+5\tau-2\theta\tau))+\eta_r\sigma s(-4+\theta)(-1+\tau)))}{(2f_1\delta\mu^2-(r+v)\rho)(11-12\tau+\theta(-2+3\tau))^2}$$

$$h_3^F = \frac{f_2h_2\delta\mu^2}{\rho r} + \frac{(a(3-3\tau+\eta_e s(-4+5\tau-2\theta\tau))+\eta_r\sigma((-4+\theta)(-1+\tau)+s(-14+2\tau+\theta\tau)))^2}{r(11-12\tau+\theta(-2+3\tau))^2}$$

**推论 4** 成本共担契约下相关变量稳态分析为:

$$\frac{\partial k^F}{\partial \delta} < 0, \quad \frac{\partial w^F}{\partial \delta} < 0, \quad \frac{\partial p_e^F}{\partial \delta} < 0, \quad \frac{\partial p_r^F}{\partial \delta} < 0。$$

电子零售商分担跨国企业区块链技术水平成本比例越高, 区块链技术水平、批发价格、跨国企业零售部门与电子零售商销售价格也会越高。因此, 采用成本分担契约对跨国企业提高区块链技术水平有利, 跨国企业可通过改变成本分担比例来激励电子零售商服务, 最终使市场形成“高区块链技术水平、高销售

价格”情形, 对供应链成员均有积极影响。因此, 成本分担契约能够有效协调跨国供应链利润, 使其高于分散决策下情形。

### 3.5. 对比分析

根据定理 1~4, 进一步分析不同情形下跨国供应链中区块链技术应用水平、批发价格、电子零售商和跨国企业零售部门销售价格最优值的影响, 以此确定供应链最优决策。

**推论 5** 区块链技术应用程度存在如下关系:

$$k_{\infty}^F > k_{\infty}^E > k_{\infty}^C > k_{\infty}^B > k_{\infty}^D, w^C > w^B > w^D, p_r^C > p_r^B > p_r^D, U_f^C > U_f^D > U_f^B。$$

在供应链主体都风险规避且运用成本共担契约时, 区块链投入努力最高, 在跨国企业风险规避时, 区块链投入最低, 在供应链主体均风险规避时, 跨国企业会增大区块链技术应用程度, 提高消费者需求, 进而增加电子零售商批发数量, 而在仅跨国企业风险规避决策下, 跨国企业为降低自身风险, 减少区块链技术应用投入, 导致区块链应用程度有所降低。无论是跨国企业, 还是电子零售商, 采取风险规避行为都能有效提升跨国企业最优效用, 且供应链主体都风险规避时的决策更有利于提升跨国企业效用。

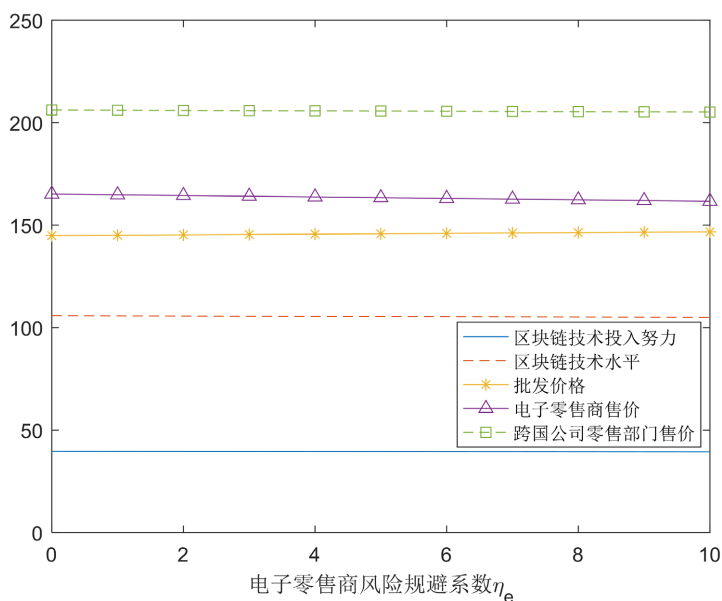
## 4. 数值分析

区块链技术应用程度  $k$ 、批发价格  $w$ 、电子零售商售价  $p_e$ 、跨国企业零售部门售价  $p_r$  与电子零售商风险规避系数  $k$  之间的关系如图 1、图 2 所示, 参数设定如下:  $a=100, s=0.6, \theta=0.5, \rho=5, r=0.2, \sigma=2, \mu=0.8, \gamma=0.4, \eta_e \in (0,10)$ 。

### 4.1. 考虑不同供应链主体风险规避情况

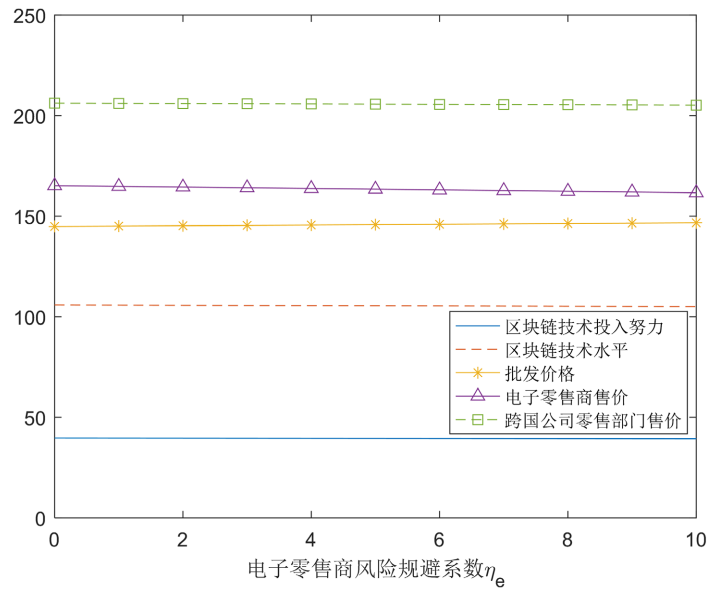
#### 4.1.1. 电子零售商风险规避

当电子零售商风险规避时, 决策变量、跨国供应链主体效用与电子零售商风险规避系数关系如下图 1、图 2 所示。



**Figure 1.** The relationship between decision variables and  $\eta_e$ .

**图 1.** 决策变量与  $\eta_e$  的关系

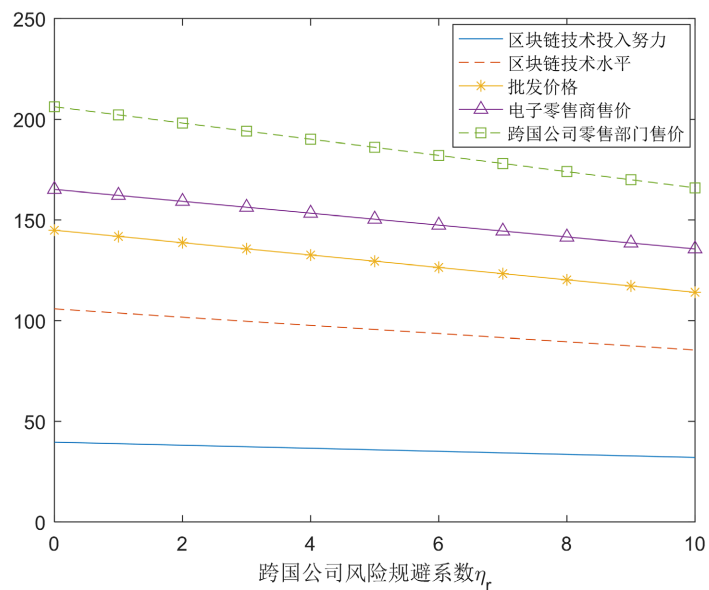


**Figure 2.** The relationship between the utility of multinational supply chain subject and  $\eta_e$   
**图 2.** 跨国供应链主体效用与  $\eta_e$  的关系

在应用区块链技术时, 当跨国企业及其零售部门风险中性, 电子零售商风险规避时, 区块链应用程度、电子零售商销售价格和跨国企业零售部门销售价格都会随着电子零售商风险规避系数的增加而降低, 但批发价格会随着风险规避系数的增加而增加。

#### 4.1.2. 跨国企业风险规避

当跨国企业风险规避时, 决策变量、跨国供应链主体效用与跨国企业风险规避系数关系如下图 3、图 4 所示。



**Figure 3.** The relationship between decision variables and  $\eta_r$   
**图 3.** 决策变量与  $\eta_r$  的关系

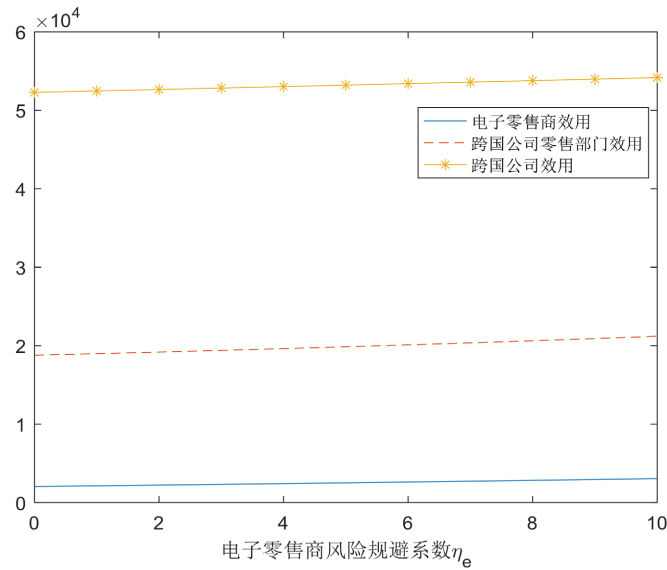


Figure 4. The relationship between the utility of multinational supply chain subject and  $\eta_e$ .

图 4. 跨国供应链主体效用与  $\eta_e$  的关系

在应用区块链技术时, 当跨国企业及其零售部门风险规避, 电子零售商风险中性时, 受跨国企业风险规避行为的影响, 区块链技术的应用会出现一定程度的降低, 批发价格、电子零售商售价和跨国企业零售部门售价都出现一定程度的下降。

#### 4.2. 税率对供应链决策的影响

决策变量、跨国供应链主体效用与税率关系如图 5、图 6 所示。

随着税率差额的增加, 最优批发价格、区块链技术应用程度、电子零售商和跨国企业零售部门销售价格会下降。电子零售商、跨国企业以及跨国企业零售部门的效用均下降, 其中, 跨国企业下降速度更快, 税率增加对跨国企业效用的负面影响更大。

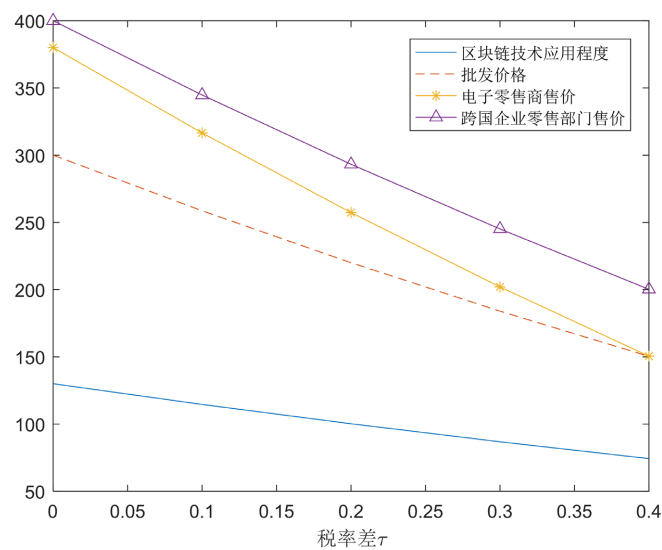
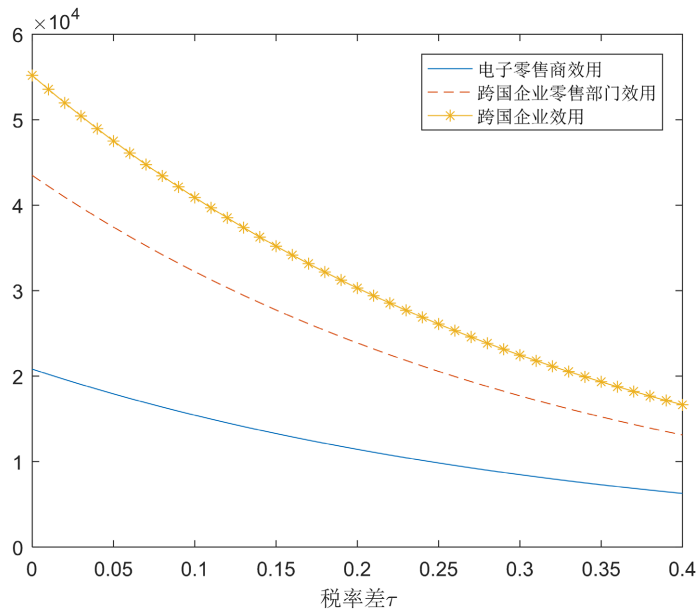


Figure 5. The relationship between decision variables and  $\tau$ .

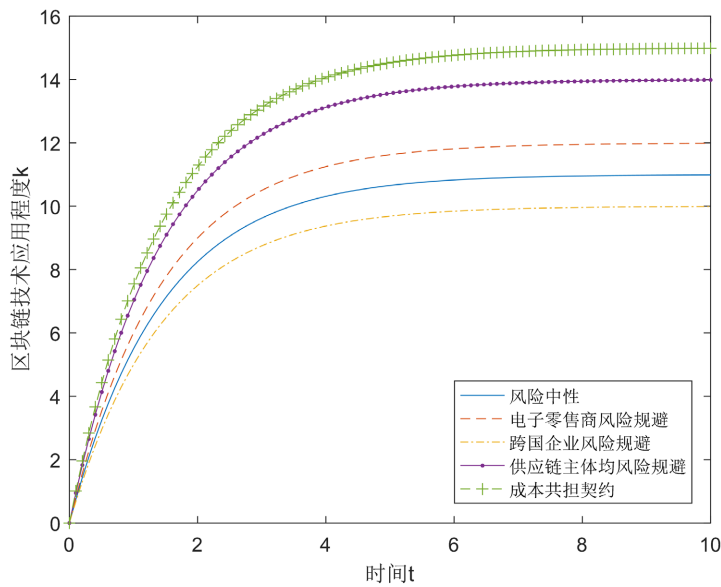
图 5. 决策变量与  $\tau$  的关系



**Figure 6.** The relationship between the utility of multinational supply chain subject and  $\tau$   
**图 6.** 跨国供应链主体效用与  $\tau$  的关系

### 4.3. 区块链技术应用程度变化

区块链技术应用程度随时间变化如图 7 所示。



**Figure 7.** The change of blockchain application degree with time  $t$   
**图 7.** 区块链应用程度随时间  $t$  的变化

不同供应链主体风险规避及运用成本共担契约时的区块链技术水平随时间的增加而提高, 最后趋于稳定状态。在任何时间状态下, 区块链技术应用程度由高到低依次为: 成本共担契约、供应链主体均风险规避, 电子零售商风险规避, 风险中性, 跨国企业风险规避。电子零售商分担区块链技术成本, 可以提高区块链技术应用水平。



## 5. 研究结论

本文以区块链技术为背景,研究了风险规避型跨国企业、跨国企业零售部门以及电子零售商组成的供应链系统在动态环境下的最优决策。其中,跨国企业位于税率较高的国家,而跨国企业零售部门和电子零售商在税率较低的国家,彼此间存在竞争,跨国企业为供应链的主导者。在引入时间因素的动态环境下,分别考虑了电子零售商风险规避、跨国企业风险规避、供应链主体均风险规避以及运用成本分担契约情形下的区块链技术投入程度、批发价格、电子零售商销售价格以及跨国企业零售部门销售价格的最优决策。我们得出以下结论:1)在仅电子零售商风险规避下,批发价格随电子零售商风险规避系数的增加而升高。基于电子零售商的风险规避行为,跨国企业的市场预期反而提升,进而会增加区块链技术投入,并提高批发价格和零售部门销售价格,以分摊成本。2)在仅跨国企业风险规避下,区块链技术投入、批发价格、电子零售商与跨国企业零售部门销售价格均最低。这种风险规避行为对电子零售商更有利。3)在跨国企业与电子零售商均风险规避的集中决策下,批发价格随跨国企业风险规避程度的增加而降低,但随电子零售商风险规避程度的增加而增加。在供应链成员均风险规避时,利用成本共担契约,供应链成员及供应链总效用均最高,表明该契约可有效协调供应链。4)不同决策情况下,决策变量存在如下关系: $k_{\infty}^F > k_{\infty}^E > k_{\infty}^C > k_{\infty}^B > k_{\infty}^D$ ,  $w^C > w^B > w^D$ ,  $p_r^C > p_r^B > p_r^D$ ,  $V_f^C > V_f^D > V_f^B$ ,在跨国企业风险规避时,区块链投入最低,决策更加保守,批发价与跨国企业零售部门销售价均最低。无论是跨国企业,还是电子零售商,采取风险规避行为都能有效提升跨国企业最优效用。5)区块链技术投入随时间推移逐渐增加,最终趋于稳定,表明区块链技术投入具有可控性,跨国企业需要加强对区块链技术投入的控制。6)当市场竞争变得缓和、税收差异减小时,跨国企业更愿意投入区块链技术。本文未考虑上游市场竞争的情形,未来将对跨国供应商之间的竞争将展开进一步的研究。

## 参考文献

- [1] Shunko, M., Debo, L. and Gavirneni, S. (2014) Transfer Pricing and Sourcing Strategies for Multinational Firms. *Production and Operations Management*, **23**, 2043-2057. <https://doi.org/10.1111/poms.12175>
- [2] Niu, B., Liu, Y., Liu, F. and Lee, C.K. (2019) Transfer Pricing and Channel Structure of a Multinational Firm under Overseas Retail Disruption Risk. *International Journal of Production Research*, **57**, 2901-2925. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1516902>
- [3] Wu, H., Cao, J., Yang, Y., et al. (2019) Data Management in Supply Chain Using Blockchain Challenges and a Case Study. 2019 28th International Conference on Computer Communication and Networks (ICCCN), Valencia, 29 July-1 August 2019, 1-8. <https://doi.org/10.1109/ICCCN.2019.8846964>
- [4] Malik, S., Kanhere, S.S. and Jurdak, R. (2018) ProductChain: Scalable Blockchain Framework to Support Provenance in Supply Chains. 2018 IEEE 17th International Symposium on Network Computing and Applications (NCA), Cambridge, 1-3 November 2018, 1-10. <https://doi.org/10.1109/NCA.2018.8548322>
- [5] 朱建明, 付永贵. 基于区块链的供应链动态多中心协同认证模型[J]. 网络与信息安全学报, 2016, 2(1): 27-33.
- [6] Suzuki, J., Kono, M., Fujii, T., et al. (2018) Food Supply Chain Management System for Product History Using Blockchain. In: Chatzigiannakis, I., Tobe, Y., Novais, P. and Amft, O., Eds., *Intelligent Environments 2018*, Vol. 23, IOS Press, Amsterdam, 186-195.
- [7] Wang, S., Li, D., Zhang, Y. and Chen, J. (2019) Smart Contract-Based Product Traceability System in the Supply Chain Scenario. *IEEE Access*, **7**, 115122-115133. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2935873>
- [8] Chan, K.Y., Abdullah, J. and Khan, A.S. (2019) A Framework for Traceable and Transparent Supply Chain Management for Agri-Food Sector in Malaysia Using Blockchain Technology. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, **10**, 10-19. <https://doi.org/10.14569/IJACSA.2019.0101120>
- [9] Chen, R.-Y. (2018) A Traceability Chain Algorithm for Artificial Neural Networks Using Fuzzy Cognitive Maps in Blockchain. *Future Generation Computer Systems*, **80**, 198-210. <https://doi.org/10.1016/j.future.2017.09.077>
- [10] Choi, T.-M. (2019) Blockchain-Technology-Supported Platforms for Diamond Authentication and Certification in Luxury Supply Chains. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, **128**, 17-29. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2019.05.011>

- [11] Choi, T.M., Li, D. and Yan, H. (2001) Newsvendor Problems with Mean-Variance Objectives. *The Proceedings of the 5th International Conference on Optimization: Techniques and Applications*, Vol. 19, 1860-1870.
- [12] 林强, 叶飞, 陈晓明. 随机弹性需求条件下基于 CVaR 与收益共享契约的供应链决策模型[J]. 系统工程理论与实践, 2011, 31(12): 2297-2307.
- [13] 袁子甲, 李仲飞. 参数不确定性和效用最大化下的动态投资组合选择[J]. 中国管理科学, 2010, 18(5): 1-6.
- [14] Agrawal, V. and Seshadri, S. (2000) Impact of Uncertainty and Risk Aversion on Price and Order Quantity in the Newsvendor Problem. *Manufacturer & Service Operations Management*, 2, 410-423.  
<https://doi.org/10.1287/msom.2.4.410.12339>
- [15] 胡昌峰, 胡支军. CVaR 准则下随机需求依赖价格的供应链协调研究[J]. 经济研究导刊, 2009(36): 103-105.