

# 碳关税壁垒下跨境电商供应链协同减排微分博弈研究

李 轩

江西理工大学商学院, 江西 南昌

收稿日期: 2026年4月26日; 录用日期: 2026年5月18日; 发布日期: 2026年5月28日

## 摘 要

在全球碳中和战略推进与欧盟碳边境调节机制(CBAM)正式实施的背景下, 碳关税已然成为制约跨境电商贸易发展的关键因素。针对当前跨境电商供应链存在的主体协同性不足、减排投入意愿偏低等现实问题, 文章引入管理工程的系统优化与协同治理理论, 将绿色合规资产设定为动态变量, 构建由国内制造商与海外零售商构成的跨境电商供应链微分博弈模型, 设计“双向成本分担”协同契约, 并通过算例仿真验证契约有效性。研究表明, 分散决策模式下易出现主体“搭便车”、减排投入不足等问题, 所设计契约能够实现供应链整体效益的帕累托改进; 碳关税强度对供应链减排行为呈现“倒U型”影响特征, 消费者绿色偏好与减排转化系数可有效推动绿色合规资产积累。研究可为跨境电商供应链实现协同减排提供理论依据与实践参考。

## 关键词

碳关税壁垒, 跨境电商供应链, 管理工程, 协同减排, 微分博弈

## Research on Differential Game of Collaborative Emission Reduction in Cross-Border E-Commerce Supply Chain under Carbon Tariff Barrier

Xuan Li

Business School, Jiangxi University of Science and Technology, Nanchang Jiangxi

Received: April 26, 2026; accepted: May 18, 2026; published: May 28, 2026

## Abstract

Against the backdrop of advancing global carbon neutrality strategies and the official implementation of the European Union's Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM), carbon tariffs have emerged as a critical factor constraining the development of cross-border e-commerce trade. To address the current practical issues of insufficient collaboration among entities and low willingness to invest in emission reduction within cross-border e-commerce supply chains, this paper introduces the system optimization and collaborative governance theories of management engineering. By setting green compliance assets as a dynamic variable, this study constructs a differential game model for a cross-border e-commerce supply chain comprising domestic manufacturers and overseas retailers, designs a "two-way cost-sharing" collaborative contract, and verifies its effectiveness through numerical simulation. The research results indicate that the decentralized decision-making mode is prone to issues such as "free-riding" and insufficient investment in emission reduction, whereas the designed contract can achieve a Pareto improvement in the overall performance of the supply chain. Furthermore, the intensity of the carbon tariff exerts an "inverted U-shaped" impact on the supply chain's emission reduction behavior, while consumer green preferences and the emission reduction conversion coefficient can effectively drive the accumulation of green compliance assets. This research provides theoretical foundations and practical references for cross-border e-commerce supply chains to achieve collaborative emission reduction.

## Keywords

Carbon Tariff Barrier, Cross-Border E-Commerce Supply Chain, Management Engineering, Collaborative Emission Reduction, Differential Game

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

## 1. 引言

随着全球气候变暖问题持续加剧，碳中和成为各国推动可持续发展的核心目标。截至 2023 年，全球已有超过 130 个国家和地区明确碳中和发展目标，欧盟、美国、日本等发达经济体均制定了清晰的减排时间表与落地路径。在此环境下，国际贸易保护形式逐渐从传统关税壁垒转向绿色贸易壁垒，隐蔽性与约束性显著提升。欧盟碳边境调节机制(CBAM)于 2023 年 10 月进入过渡期，2026 年将全面落地实施，覆盖钢铁、水泥、铝、化肥、电力等高耗能产业，标志着全球碳关税时代正式到来。

余壮雄等[1]指出，欧美碳关税已成为重构全球贸易规则与应对碳泄漏的重要政策工具，以产品出口隐含碳排放为征税依据，在 60 美元/吨碳价标准下会对中国社会福利、总产出与总出口产生显著负面影响。Fausto Corvino [2]认为，欧盟 CBAM 作为典型碳关税机制，采用统一碳价对境内外产品实施同等约束，违背气候治理中“共同但有区别的责任”原则，叠加历史气候责任差异形成复合不公平，难以通过气候融资实现公平性补偿。董玮等[3]提出，欧盟 CBAM 采取分阶段实施路线，配套严格的碳排放核算、报告与证书清缴制度，使合规成本持续上升。陀才进等[4]发现，碳关税将削弱中国高碳行业全球价值链分工地位与出口国内增加值率，对前向参与度的抑制作用显著强于后向参与度，若欧美形成碳关税同盟，冲击将进一步放大。孟猛等[5]指出，碳关税本质是绿色贸易壁垒，提升低碳技术可从直接技术效应与间接生产效应双重对冲负面冲击，是应对碳约束的核心路径。

跨境电商作为数字经济与国际贸易深度融合的产物，在碳关税壁垒影响下，将受到重大冲击：一是高度依赖航空物流，碳排放强度高，易产生高额碳罚金；二是供应链主体分散，碳足迹追踪难，中小企业合规压力大。全链路的碳成本压力持续压缩跨境电商利润空间，迫使供应链参与方寻求系统性减排路径。张令荣等[6]指出，区块链可实现碳足迹溯源与信息透明，降低企业减排与交易成本，政府产量补贴相较技术补贴更能提升低碳产量与社会福利。孙嘉轶等[7]发现，区块链可将绿色信任系数提至最优、降低期间费用，供应链合作减排效率显著高于独立决策，有效提升碳减排水平以应对碳关税。倪晓然等[8]指出，增值税留抵退税可显著降低企业供应链碳排放强度，主要通过降低供应商集中度、提升对供应商话语权实现，在高碳、非技术密集型行业中效应更突出。黄晨星等[9]基于零售商主导博弈模型指出，零售商主导结构更利于推动供应链减排，高减排效率制造商更易应对碳关税冲击，低减排效率企业可借助零售商竞争实现降碳。

为应对碳关税壁垒，供应链主体需跳出传统成本博弈思维，转向绿色协同治理模式。国内制造商作为生产源头，减排投入决定产品初始碳含量，是获取绿色溢价的基础；海外零售商需在末端通过绿色包装、低碳物流选择及绿色营销等举措，降低流通环节碳足迹。双方投入共同构成供应链绿色合规资产，这类资产积累具有显著动态累积特征，引用微分博弈理论可精准刻画该动态累积过程。王道平等[10]运用随机微分博弈，构建区块链技术驱动下考虑减排积极性的动态低碳供应链模型，指出区块链可解决低碳信息不对称与绿色信任问题，提升零售商利润。卓四清等[11]采用微分博弈方法研究碳补贴与技术时滞效应下的低碳供应链决策。张永明等[12]通过微分博弈研究竞争型低碳供应链的参考效应问题，指出减排与宣传竞争程度越高均衡低碳水平越高，制造商减排对参考点影响比例越高则均衡减排水平越低。Zhang 等[13]通过微分博弈方法，研究政府复合补贴下低碳闭环供应链的利他模式选择与协调，指出制造商适度利他可提升减排与回收效率，发现零售商利他会抑制减排，得到制造商单边利他为最优模式。Yang 等[14]采用两阶段微分博弈法，构建煤炭企业与分销商组成的低碳技术联盟模型，指出时滞效应兼具激励与约束双重作用，发现低时滞下协同合作最优、中时滞适用成本分担、高时滞宜采用纳什非合作，得到时滞阈值、初始技术水平与市场份额共同决定协调机制选择的结论。Kang 等[15]运用微分博弈，研究政府干预下数字供应链区块链投资与减排策略，指出消费者环保意识与信息透明度感知可同步激励区块链与低碳投资，发现双边协同机制能实现供应链经济与环境效益最优。

为落实上述长期协同减排策略，打破分散决策下的局部利益壁垒，多位学者进一步从不同情境与行为特征出发，对低碳供应链的契约机制设计进行了深入探讨。蔡建湖等[17]提到，针对成员因风险规避导致的信息隐匿问题，构建科学的需求信息共享契约机制能够有效消除信息不对称，从而保障低碳供应链整体决策的协同性。张云丰等[18]指出，在面临产出不确定性与低碳补贴交织的环境时，设计合理的融资与减排协调契约，能有效对冲产出波动带来的资金风险，激励制造商坚守减排承诺。张令荣等[19]论证，在碳交易背景下引入区块链技术作为一种新型的“信任契约”，能够打破双产品减排过程中的信息壁垒，辅以供应链协同减排机制可显著提升整体的利润分配效率。夏良杰等[20]深入剖析了成员心理与行为偏差对契约有效性的冲击，提出必须设计特定的非线性减排与促销协调契约，才能有效纠正因过度自信和不对称所引发的效率损失问题。姜跃等[21]证实，在低碳技术共享的微分博弈中，引入差异化的成本分担契约并结合区块链智能合约，能够从根本上规避跨期合作中的短期投机行为，维持长效的动态协同稳态。郭金森等[22]则认为，当供应链叠加资金约束与制造商公平关切心理时，常规的单一交易模式极易破裂，必须引入包含利润转移与成本分担的联合减排协调契约，才能重新平衡各方的利益诉求，实现各方的帕累托均衡。

如表 1 所示，现有研究针对信息共享、融资安全、行为偏差及公平诉求等问题设计了多元化的协调契约，为供应链协同提供了扎实的理论基础。然而，在跨境电商面临碳关税壁垒这一特定场景时，现有

的单向激励或利润转移契约难以兼顾生产端减排与海外销售端合规的动态协同。因此，本文设计了“双向成本分担”复合契约，不仅可以在机制上消除双重边际效应，更通过对“绿色合规资产”这一核心动态变量的精准驱动，实现了跨境全链路在长期演化中的帕累托改进，填补了现有契约研究在应对外部绿色贸易壁垒方面的空白。

综上所述，现有文献已对碳关税宏观影响与供应链协调问题展开较多探讨，但多数研究未将绿色合规资产作为核心状态变量，缺少固定碳关税约束下基于减排投入与资产积累关系的系统性分析。鉴于此，本文将碳关税设定为线性外生约束，以绿色合规资产为状态变量构建微分博弈模型，重点分析主体减排投入对资产积累的作用机制，对比分散决策与集中决策的均衡结果，设计协同契约实现帕累托改进，为跨境电商供应链在碳关税背景下提升绿色合规能力与整体效益提供参考。

**Table 1.** Comparative analysis of collaborative contract mechanisms in low-carbon supply chains

**表 1.** 本文与相关低碳供应链协同契约的对比分析

文献来源	研究情境与核心约束	核心契约机制	决策维度与状态变量	较本文契约的差异与局限性
蔡建湖等 [17]	需求信息不对称、 风险规避行为	需求信息共享契约	订货量与减排水平	侧重于解决信息流传递问题， 未涉及投入成本的跨期分担与 动态资产积累。
张云丰等 [18]	产出不确定性、 资金约束	融资与减排协调契约 (风险/成本共担)	融资规模与产量决策	契约设计旨在对冲生产端风险， 缺乏对海外销售端绿色投入的同步激励。
张令荣等 [19]	碳交易、 区块链技术	区块链信任契约 + 协同减排机制	减排量决策	侧重于利用技术手段提升信任， 契约形式较为传统，未针对贸易壁垒进行 参数优化。
夏良杰等 [20]	过度自信心理、 信息不对称	非线性减排与 促销协调契约	减排与促销努力	针对心理偏差设计阶梯式激励， 属于行为博弈范畴， 难以应对碳关税的系统性冲击。
姜跃等 [21]	低碳技术共享、 长期合作	差异化成本分担契约 + 智能合约	技术共享水平	虽然采用了微分博弈，但分担模式 较为单一，未考虑批发价机制对双重 边际效应的消除。
郭金森等 [22]	资金约束、 制造商公平关切	包含利润转移的联合 减排协调契约	联合减排投入	契约重点在于通过利润调节平衡 “公平性”，而非通过双向分担提升 “合规性”。
本文研究	碳关税壁垒、 跨境清关约束	双向成本分担 复合契约	绿色合规资产	创新性地消除了双重边际效应， 实现了生产减排与末端营销的双向 精准激励，专门针对碳关税抵减效能 进行优化。

## 2. 模型描述

### 2.1. 问题描述

本研究考虑一条由国内制造商(M)和海外零售商(R)组成的跨境电商供应链(见图 1)。国内制造商主要负责生产环节的工艺优化、低碳技术研发等减排工作，海外零售商承担销售末端的低碳物流配送、绿色营销推广等绿色化任务。双方的减排投入共同作用于供应链绿色合规资产积累，绿色合规资产不仅体现产品低碳属性与碳合规水平，还直接影响跨境清关环节需缴纳的碳关税金额。各主体当期减排投入，可通过积累绿色合规资产，降低未来碳税支出，同时提升产品绿色溢价能力。

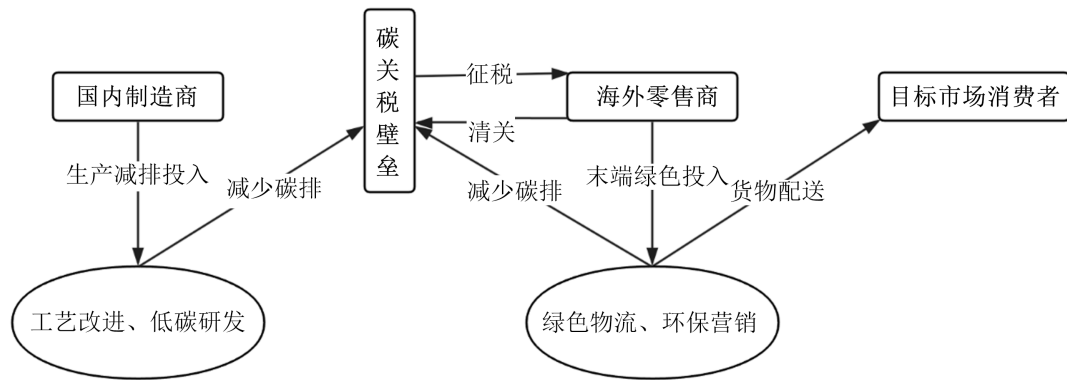


Figure 1. Cross-border e-commerce supply chain  
图 1. 跨境电商供应链

## 2.2. 模型假设

假设 1: 参考 Nerlove-Arrow [16] 动态方程, 将供应链的绿色合规资产  $L(t)$  设定为状态变量。它受制造商的生产减碳投入  $\tau(t)$  和零售商末端绿色投入  $k(t)$  的共同驱动。但在长期范围内, 因国际环保标准提升或技术更迭, 资产会存在贬值性, 因此存在一个自然贬值系数  $\theta$  ( $\theta > 0$ ), 则绿色合规资产变化微分方程可以表示为:

$$\dot{L}(t) = \alpha\tau(t) + \beta k(t) - \theta L(t)$$

其中,  $\alpha$  表示生产减碳投入对绿色合规资产的影响系数 ( $\alpha > 0$ ),  $\beta$  表示末端绿色投入对绿色合规资产的影响系数 ( $\beta > 0$ )。

假设 2: 参考目前主流的碳贸易政策, 假设碳关税是基于产品碳含量征收的成本, 而绿色合规资产可冲抵这一支出。单位产品的碳关税  $T(L)$  满足线性抵减关系:

$$T(L) = \sigma[E_0 - \mu L(t)]$$

其中,  $\sigma$  为目标市场的单位碳价, 即对每单位超额碳排放收取的计费标准;  $E_0$  为产品的初始碳排放量;  $\mu$  为资产对减排的转化系数, 即合规资产每增加一个单位, 实际上能帮企业冲抵掉多少碳排放量。

假设 3: 目标市场的消费者具有绿色偏好, 产品需求  $D(t)$  受零售价格  $p(t)$  和绿色合规资产水平  $L(t)$  的共同影响:

$$D(t) = D_0 - \delta p(t) + \gamma L(t)$$

其中,  $D_0$  为市场基础规模,  $\delta$  为价格敏感系数 ( $\delta > 0$ ),  $\gamma$  为绿色偏好系数 ( $\gamma > 0$ )。

假设 4: 双方的减排投入成本均呈现凸函数特征, 使用二次函数刻画:

$$C_M(\tau) = \frac{1}{2}\varepsilon_M\tau^2(t), C_R(k) = \frac{1}{2}\varepsilon_R k^2(t)$$

其中,  $\varepsilon_M$ 、 $\varepsilon_R$  分别为制造商和零售商的生产减碳投入成本系数和末端绿色投入成本系数 ( $\varepsilon_M, \varepsilon_R > 0$ )。

## 3. 模型建立与求解

### 3.1. 集中决策模型(C)

在集中决策(C)下, 制造商和零售商以供应链的整体利益为目标, 同时对制造商的生产减碳投入以及零售商的末端绿色投入进行决策。假设  $J_{SC}$  表示供应链整体在无限时间范围内的利润函数, 此时, 供应链

决策的目标函数为:

$$J_{SC}^C(L, t) = \max_{c_M, c_R} \int_0^{\infty} e^{-\rho t} \left\{ [p(t) - c_m - \sigma(E_0 - \mu L(t))] [D_0 - \delta p(t) + \gamma L(t)] - \frac{1}{2} \varepsilon_M \tau^2(t) - \frac{1}{2} \varepsilon_R k^2(t) \right\} dt \quad (1)$$

采用 HJB 方程进行求解, 省略时间  $t$ , 此时供应链整体的最优决策符合 HJB 方程如下:

$$\rho V_{SC}^C(L) = \max_{c_M, c_R} \left\{ [p - c_m - \sigma(E_0 - \mu L)] (D_0 - \delta p + \gamma L) - \frac{1}{2} \varepsilon_M \tau^2 - \frac{1}{2} \varepsilon_R k^2 + V'_{SC(L)} (\alpha \tau + \beta k - \theta L) \right\} \quad (2)$$

命题 1: 集中决策情形下,

$$\text{最优生产减排投入水平: } \tau^C = \frac{\alpha f_1}{\varepsilon_M}.$$

$$\text{最优末端绿色投入水平: } k^C = \frac{\beta f_1}{\varepsilon_R}.$$

$$\text{最优零售价格: } p^C = \frac{D_0 + \delta c_m + \delta \sigma E_0 + (\gamma + \delta \sigma \mu) L}{2\delta}.$$

$$\text{绿色合规资产稳态值: } L_{SS}^C = \frac{1}{\theta} \left[ \frac{\alpha^2 f_1}{\varepsilon_M} + \frac{\beta^2 f_1}{\varepsilon_R} \right].$$

$$\text{绿色合规资产最优轨迹: } L^C(t) = L_{SS}^C + (L_0 - L_{SS}^C) e^{-\theta t}, \quad L(0) = L_0.$$

$$\text{供应链系统的最优总利润为: } V_C(L) = f_1 L + g_1.$$

其中,

$$f_1 = \frac{(\gamma + \delta \sigma \mu)(D_0 - \delta c_m - \delta \sigma E_0)}{2\delta(\rho + \theta)}, \quad g_1 = \frac{1}{\rho} \left[ \frac{(D_0 - \delta c_m - \delta \sigma E_0)^2}{4\delta} + \frac{\alpha^2 f_1^2}{2\varepsilon_M} + \frac{\beta^2 f_1^2}{2\varepsilon_R} \right]$$

证明:

应用逆向求解法, 根据式(2)可知海瑟矩阵为负, 因此公式(2)存在最优解, 分别对  $p, \tau, k$  求偏导并令其为 0, 即  $\frac{\partial \rho V_{SC}^C(L)}{\partial p} = 0$ ,  $\frac{\partial \rho V_{SC}^C(L)}{\partial \tau} = 0$ ,  $\frac{\partial \rho V_{SC}^C(L)}{\partial k} = 0$ 。可得:

$$p^C = \frac{D_0 + \delta c_m + \delta \sigma E_0 + (\gamma + \delta \sigma \mu) L}{2\delta}, \quad \tau^C = \frac{\alpha V'_C(L)}{\varepsilon_M}, \quad k^C = \frac{\beta V'_C(L)}{\varepsilon_R} \quad (3)$$

鉴于式(2)的结构特点, 可以推测供应链的值函数关于  $G$  具有线性解析形式为:  $V_C(L) = f_1 L + g_1$ 。将式(3)和  $V_C(L) = f_1 L + g_1$  代入到(2)式中:

$$\rho(f_1 L + g_1) = [p - c_m - \sigma(E_0 - \mu L)] (D_0 - \delta p + \gamma L) - \frac{\alpha^2 f_1^2}{2\varepsilon_M} - \frac{\beta^2 f_1^2}{2\varepsilon_R} + f_1 \left( \frac{\alpha^2 f_1}{\varepsilon_M} + \frac{\beta^2 f_1}{\varepsilon_R} - \theta L \right) \quad (4)$$

运用待定系数法, 可求得:

$$f_1 = \frac{(\gamma + \delta \sigma \mu)(D_0 - \delta c_m - \delta \sigma E_0)}{2\delta(\rho + \theta)}, \quad g_1 = \frac{1}{\rho} \left[ \frac{(D_0 - \delta c_m - \delta \sigma E_0)^2}{4\delta} + \frac{\alpha^2 f_1^2}{2\varepsilon_M} + \frac{\beta^2 f_1^2}{2\varepsilon_R} \right] \quad (5)$$

将式(5)代入式(3)和绿色合规资产变化微分方程  $\dot{L}(t) = \alpha \tau(t) + \beta k(t) - \theta L(t)$  中, 可求得制造商的生产减排投入、零售商的末端绿色投入和绿色合规资产的稳态值、最优轨迹。

### 3.2. 分散决策模型(N)

在分散决策模型(N)下, 供应链成员以自身利润最大化为决策目标, 遵循 Stackelberg 博弈结构。在该

博弈中，制造商作为领导者，先决策生产减排投入和批发价格；零售商作为跟随者，在观察到制造商决策后，决定其末端绿色投入和零售价格。

此时制造商和零售商的目标函数分别为：

$$J_M^N(L, t) = \max_{C_M} \int_0^\infty e^{-\rho t} \left\{ [w(t) - c_m] [D_0 - \delta p(t) + \gamma L(t)] - \frac{1}{2} \varepsilon_M \tau^2(t) \right\} dt \quad (6)$$

$$J_R^N(L, t) = \max_{C_R} \int_0^\infty e^{-\rho t} \left\{ [p(t) - w(t) - \sigma(E_0 - \mu L(t))] [D_0 - \delta p(t) + \gamma L(t)] - \frac{1}{2} \varepsilon_R k^2(t) \right\} dt \quad (7)$$

采用 HJB 方程进行求解，省略时间  $t$ ，此时制造商和零售商的最优决策符合 HJB 方程如下：

$$\rho V_M^N(L) = \max_{C_M} \left\{ (w - c_m)(D_0 - \delta p + \gamma L) - \frac{1}{2} \varepsilon_M \tau^2 + V'_{M(L)}(\alpha \tau + \beta k - \theta L) \right\} \quad (8)$$

$$\rho V_R^N(L) = \max_{C_R} \left\{ [p - w - \sigma(E_0 - \mu L)](D_0 - \delta p + \gamma L) - \frac{1}{2} \varepsilon_R k^2 + V'_{R(L)}(\alpha \tau + \beta k - \theta L) \right\} \quad (9)$$

命题 2：分散决策情形下，

$$\text{最优生产减排投入水平： } \tau^N = \frac{\alpha f_2}{\varepsilon_M}。$$

$$\text{最优末端绿色投入水平： } k^N = \frac{\beta f_3}{\varepsilon_R}。$$

$$\text{最优零售价格： } p^N = \frac{3D_0 + \delta c_m + \delta \sigma E_0 + (3\gamma - \delta \sigma \mu)L}{4\delta}。$$

$$\text{最优批发价格： } w^N = \frac{D_0 + \delta c_m - \delta \sigma E_0 + (\gamma + \delta \sigma \mu)L}{2\delta}。$$

$$\text{绿色合规资产稳态值： } L_{SS}^N = \frac{1}{\theta} \left[ \frac{\alpha^2 f_2}{\varepsilon_M} + \frac{\beta^2 f_3}{\varepsilon_R} \right]。$$

$$\text{绿色合规资产最优轨迹： } L^N(t) = L_{SS}^N + (L_0 - L_{SS}^N) e^{-\theta t}, \quad L(0) = L_0。$$

$$\text{制造商和零售商的最大利润分别为： } V_M^N(L) = f_2 L + g_2, \quad V_R^N(L) = f_3 L + g_3。$$

其中，

$$f_2 = \frac{(\gamma + \delta \sigma \mu)(D_0 - \delta c_m - \delta \sigma E_0)}{4\delta(\rho + \theta)}, \quad g_2 = \frac{1}{\rho} \left[ \frac{(D_0 - \delta c_m - \delta \sigma E_0)^2}{8\delta} + \frac{\alpha^2 f_2^2}{2\varepsilon_M} + \frac{\beta^2 f_2 f_3}{\varepsilon_R} \right]$$

$$f_3 = \frac{(\gamma + \delta \sigma \mu)(D_0 - \delta c_m - \delta \sigma E_0)}{8\delta(\rho + \theta)}, \quad g_3 = \frac{1}{\rho} \left[ \frac{(D_0 - \delta c_m - \delta \sigma E_0)^2}{16\delta} + \frac{\beta^2 f_3^2}{2\varepsilon_R} + \frac{\alpha^2 f_2 f_3}{\varepsilon_M} \right]$$

证明：

采用逆向归纳法，求解零售商的最优策略，零售商决策  $p$  和  $k$ ，分别对  $p$  和  $k$  求一阶偏导并令其为 0，可求得：

$$p^N = \frac{D_0 + \delta w + \delta \sigma E_0 + (\gamma + \delta \sigma \mu)L}{2\delta}, \quad k^N = \frac{\beta V'_R(L)}{\varepsilon_R} \quad (10)$$

之后，零售商决策  $w$  和  $\tau$ ，对  $w$  和  $\tau$  求一阶偏导并令其为 0：

$$w^N = \frac{D_0 + \delta c_m - \delta \sigma E_0 + (\gamma + \delta \sigma \mu)L}{2\delta}, \quad \tau^N = \frac{\alpha V'_M(L)}{\varepsilon_M} \quad (11)$$

将最优批发价  $w^N$  代入式(10)，可求得最优零售价格为：

$$p^N = \frac{3D_0 + \delta c_m + \delta \sigma E_0 + (3\gamma - \delta \sigma \mu)L}{4\delta} \quad (12)$$

采用待定系数法求解值函数, 设  $V_M(L) = f_2 L + g_2$ ,  $V_R(L) = f_3 L + g_3$ , 将其代入 HJB 方程可得:

$$\begin{cases} f_2 = \frac{(\gamma + \delta \sigma \mu)(D_0 - \delta c_m - \delta \sigma E_0)}{4\delta(\rho + \theta)}, g_2 = \frac{1}{\rho} \left[ \frac{(D_0 - \delta c_m - \delta \sigma E_0)^2}{8\delta} + \frac{\alpha^2 f_2^2}{2\varepsilon_M} + \frac{\beta^2 f_2 f_3}{\varepsilon_R} \right] \\ f_3 = \frac{(\gamma + \delta \sigma \mu)(D_0 - \delta c_m - \delta \sigma E_0)}{8\delta(\rho + \theta)}, g_3 = \frac{1}{\rho} \left[ \frac{(D_0 - \delta c_m - \delta \sigma E_0)^2}{16\delta} + \frac{\beta^2 f_3^2}{2\varepsilon_R} + \frac{\alpha^2 f_2 f_3}{\varepsilon_M} \right] \end{cases} \quad (13)$$

将式(12)代入式(10)、式(11)和绿色合规资产变化微分方程  $\dot{L}(t) = \alpha\tau(t) + \beta k(t) - \theta L(t)$  中, 可求得制造商的生产减排投入、零售商的末端绿色投入和绿色合规资产的稳态值、最优轨迹。

### 3.3. “双向成本分担” 契约决策模型(S)

为了扭转分散决策下各主体减排投入不足的局面, 本研究引入“双向成本分担”协同契约。双方达成如下双向协作协议:

(一) **批发价格让利**: 制造商以边际生产成本  $c_m$  将产品批发给零售商(即  $w = c_m$ ), 以消除价格加价导致的“双重边际效应”。

(二) **固定费用补偿**: 零售商支付给制造商一笔固定费用  $F$ , 保证制造商利润。

(三) **双向成本分担**: 制造商分担零售商末端绿色投入的  $\lambda$  比例成本; 零售商则分担制造商生产减排投入的  $\varphi$  比例成本。

此时制造商和零售商的目标函数分别为:

$$J_M^S(L, t) = \max_{c_M} \int_0^\infty e^{-\rho t} \left\{ F - \frac{1-\varphi}{2} \varepsilon_M \tau^2(t) - \frac{\lambda}{2} \varepsilon_R k^2(t) \right\} dt \quad (14)$$

$$\begin{aligned} J_R^S(L, t) = \max_{c_R} \int_0^\infty e^{-\rho t} \left\{ [p(t) - c_m - \sigma(E_0 - \mu L(t))] [D_0 - \delta p(t) + \gamma L(t)] \right. \\ \left. - F - \frac{\varphi}{2} \varepsilon_M \tau^2(t) - \frac{1-\lambda}{2} \varepsilon_R k^2(t) \right\} dt \end{aligned} \quad (15)$$

采用 HJB 方程进行求解, 制造商和零售商的最优决策符合 HJB 方程如下:

$$\rho V_M^S(L) = \max_{c_M} \left\{ F - \frac{1-\varphi}{2} \varepsilon_M \tau^2 - \frac{\lambda}{2} \varepsilon_R k^2 + V_{M(L)}'(\alpha\tau + \beta k - \theta L) \right\} \quad (16)$$

$$\rho V_R^S(L) = \max_{c_R} \left\{ [p - c_m - \sigma(E_0 - \mu L)](D_0 - \delta p + \gamma L) - F - \frac{\varphi}{2} \varepsilon_M \tau^2 - \frac{1-\lambda}{2} \varepsilon_R k^2 + V_{R(L)}'(\alpha\tau + \beta k - \theta L) \right\} \quad (17)$$

命题 3: 契约决策情形下,

$$\text{最优生产减排投入水平: } \tau^S = \frac{\alpha f_4}{(1-\varphi)\varepsilon_M}。$$

$$\text{最优末端绿色投入水平: } k^S = \frac{\beta f_5}{(1-\lambda)\varepsilon_R}。$$

$$\text{最优零售价格: } p^S = \frac{D_0 + \delta c_m + \delta \sigma E_0 + (\gamma + \delta \sigma \mu)L}{2\delta}。$$

$$\text{绿色合规资产稳态值: } L_{SS}^S = \frac{1}{\theta} \left[ \frac{\alpha^2 f_4}{(1-\varphi)\varepsilon_M} + \frac{\beta^2 f_5}{(1-\lambda)\varepsilon_R} \right]。$$

绿色合规资产最优轨迹:  $L^S(t) = L_{SS}^S + (L_0 - L_{SS}^S)e^{-\theta t}$ ,  $L(0) = L_0$ 。

制造商和零售商的最大利润分别为:  $V_M^S(L) = f_4L + g_4$ ,  $V_R^S(L) = f_5L + g_5$ 。

其中,

$$f_4 = \frac{\lambda(\gamma + \delta\sigma\mu)(D_0 - \delta c_m - \delta\sigma E_0)}{2\delta(\rho + \theta)}, g_4 = \frac{1}{\rho} \left[ F + \frac{\alpha^2 f_4^2}{2(1-\varphi)\varepsilon_M} + \frac{\beta^2 f_4 f_5}{(1-\lambda)\varepsilon_R} - \frac{\lambda\beta^2 f_5^2}{2(1-\lambda)^2 \varepsilon_R} \right]$$

$$f_5 = \frac{\varphi(\gamma + \delta\sigma\mu)(D_0 - \delta c_m - \delta\sigma E_0)}{2\delta(\rho + \theta)},$$

$$g_5 = \frac{1}{\rho} \left[ \frac{(D_0 - \delta c_m - \delta\sigma E_0)^2}{4\delta} - F + \frac{\beta^2 f_5^2}{2(1-\lambda)\varepsilon_R} + \frac{\alpha^2 f_4 f_5}{(1-\varphi)\varepsilon_M} - \frac{\psi\alpha^2 f_4^2}{2(1-\psi)^2 \varepsilon_M} \right]$$

证明: 采用逆向求解法, 证明过程与分散决策情形求解类似, 此处不再赘述。

#### 4. 均衡分析

命题 4: 在“双向成本分担”协同契约下, 若要使国内制造商的生产减排强度  $\tau$  和海外零售商的末端绿色投入  $k$  同时达到集中决策的最优水平, 即满足  $\tau^S = \tau^C$  且  $k^S = k^C$ , 则契约中的成本分担比例  $\varphi$  与  $\lambda$  必须满足:

$$\varphi + \lambda = 1$$

证明:

$$\text{由命题 1、3 可知, } \begin{cases} \tau^C = \frac{\alpha f_1}{\varepsilon_M}, k^C = \frac{\beta f_1}{\varepsilon_R} \\ \tau^S = \frac{\alpha f_4}{(1-\varphi)\varepsilon_M}, k^S = \frac{\beta f_5}{(1-\lambda)\varepsilon_R} \end{cases}, \text{ 要使 } \tau^S = \tau^C \text{ 且 } k^S = k^C, \text{ 则要求 } f_1 = \frac{f_4}{1-\varphi} \text{ 且}$$

$$f_1 = \frac{f_5}{1-\lambda}。$$

根据微分博弈的值函数叠加性, 系统总资产边际价值  $f_1$  始终满足  $f_1 = V_M^S(L) + V_R^S(L) = f_4 + f_5$ , 由此得到  $f_1 = (1-\varphi)f_1 + (1-\lambda)f_1$ , 最终解得  $\varphi + \lambda = 1$ 。

命题 5 表明“双向成本分担”协同契约通过  $\varphi + \lambda = 1$  实现了激励的“完全匹配”。虽然  $f_5$  小于  $f_1$ , 但因为成本分母  $1-\lambda$  同步缩小, 两者的比值恰好能回到全系统的最优投入点。零售商可以根据自身的议价能力, 在满足参与约束的前提下, 通过协商确定具体的  $\lambda$  值, 再利用  $F$  调节最终获利。

命题 5: 当契约满足特定协调条件时, 最优减排投入、绿色投入及资产稳态值满足:  $\tau^C = \tau^S > \tau^N$ ,  $k^C = k^S > k^N$ ,  $L_{SS}^C = L_{SS}^S > L_{SS}^N$ 。

证明:

由命题 4 可知, 当契约满足特定协调条件时,  $\tau^S = \tau^C$ ,  $k^S = k^C$ ,  $L_{SS}^C = L_{SS}^S$ , 又由命题 1~3 可知,

$$\begin{cases} \tau^C = \frac{\alpha f_1}{\varepsilon_M}, \tau^N = \frac{\alpha f_2}{\varepsilon_M}, \tau^S = \frac{\alpha f_4}{(1-\varphi)\varepsilon_M} \\ k^C = \frac{\beta f_1}{\varepsilon_R}, k^N = \frac{\beta f_3}{\varepsilon_R}, k^S = \frac{\beta f_5}{(1-\lambda)\varepsilon_R} \end{cases}, \text{ 只需比较 } f_1, f_2, f_3 \text{ 大小。}$$

$$L_{SS}^C = \frac{1}{\theta} \left[ \frac{\alpha^2 f_1}{\varepsilon_M} + \frac{\beta^2 f_1}{\varepsilon_R} \right], L_{SS}^N = \frac{1}{\theta} \left[ \frac{\alpha^2 f_2}{\varepsilon_M} + \frac{\beta^2 f_3}{\varepsilon_R} \right], L_{SS}^S = \frac{1}{\theta} \left[ \frac{\alpha^2 f_4}{(1-\varphi)\varepsilon_M} + \frac{\beta^2 f_5}{(1-\lambda)\varepsilon_R} \right]$$

因为  $f_1 > (f_2 + f_3)$ , 所以  $\tau^C > \tau^N$ ,  $k^C > k^N$ ,  $L_{SS}^C > L_{SS}^N$ 。

综上可得  $\tau^C = \tau^S > \tau^N$ ,  $k^C = k^S > k^N$ ,  $L_{SS}^C = L_{SS}^S > L_{SS}^N$ 。

由命题 4 可知, 分散决策下存在“减排投入不足”现象。即使存在碳关税壁垒压力, 也会由于成员间存在“搭便车”心理而减少投入, 从而导致绿色合规资产的边际收益远低于系统最优水平。而“双向成本分担”协同契约的引入, 使得供应链成功实现了帕累托改进, 达到帕累托最优情形。

命题 6:  $f_1$  是关于单位碳价  $\sigma$  的二次凹函数。

证明:

对  $f_1 = \frac{(\gamma + \delta\sigma\mu)(D_0 - \delta c_m - \delta\sigma E_0)}{2\delta(\rho + \theta)}$  关于  $\sigma$  求一阶偏导:

$$\frac{\partial f_1}{\partial \sigma} = \frac{\delta\mu(D_0 - \delta c_m - \delta\sigma E_0) - \delta E_0(\gamma + \delta\sigma\mu)}{2\delta(\rho + \theta)}$$

其二阶导数为  $\frac{-2\delta^2\mu E_0}{2\delta(\rho + \theta)} < 0$ , 因此  $f_1$  是关于单位碳价  $\sigma$  的二次凹函数。

根据命题 6,  $f_1$  是关于单位碳价  $\sigma$  的二次凹函数, 因此存在单位碳价的临界值  $\sigma^*$ 。当  $\sigma < \sigma^*$  时, 各主体投入随  $\sigma$  增加而提升; 反之则下降。该现象说明适度的关税强度能形成倒逼效应, 但当  $\sigma$  超过企业承受极限时, 高昂的清关成本将大幅萎缩市场基础规模  $D_0$ , 导致减排投资的回报率降低, 企业可能放弃绿色投入甚至退出目标市场。

命题 7: 在跨境电商供应链系统中, 绿色合规资产的稳态水平始终是消费者绿色偏好系数和资产减排转化率的增函数, 即  $\frac{\partial L_{SS}}{\partial \gamma} > 0$  且  $\frac{\partial L_{SS}}{\partial \mu} > 0$ 。

证明:

根据绿色合规资产的变化微分方程  $\dot{L}(t) = \alpha\tau(t) + \beta k(t) - \theta L(t)$ , 在系统达到稳态时 ( $\dot{L} = 0$ ), 绿色合规资产稳态值为:

$$L_{SS} = \frac{\alpha\tau^* + \beta k^*}{\theta}$$

代入最优投入水平  $\tau^* = \frac{\alpha f_1}{\varepsilon_M}$  和  $k^* = \frac{\beta f_1}{\varepsilon_R}$ , 可得  $L_{SS}$  关于边际评价系数  $f_1$  的表达式:

$L_{SS}(f_1) = \left( \frac{\alpha^2}{\theta\varepsilon_M} + \frac{\beta^2}{\theta\varepsilon_R} \right) f_1$ 。因此, 证明  $\gamma$  和  $\mu$  驱动  $L_{SS}$  增长等价于证明  $\frac{\partial f_1}{\partial \gamma} > 0, \frac{\partial f_1}{\partial \mu} > 0$ 。

又因为  $f_1 = \frac{(\gamma + \delta\sigma\mu)(D_0 - \delta c_m - \delta\sigma E_0)}{2\delta(\rho + \theta)}$ , 对  $f_1$  关于  $\gamma$  求一阶偏导:  $\frac{\partial f_1}{\partial \gamma} = \frac{D_0 - \delta c_m - \delta\sigma E_0}{2\delta(\rho + \theta)}$ 。根据市场

存续假设, 跨境产品的市场基础规模需能支撑其生产及碳成本, 即满足  $D_0 - \delta c_m - \delta\sigma E_0 > 0 \Rightarrow \frac{\partial f_1}{\partial \gamma} > 0$ 。

对  $f_1$  关于  $\mu$  求一阶偏导:  $\frac{\partial f_1}{\partial \mu} = \frac{\delta\sigma(D_0 - \delta c_m - \delta\sigma E_0)}{2\delta(\rho + \theta)} = \frac{\sigma(D_0 - \delta c_m - \delta\sigma E_0)}{2(\rho + \theta)}$ 。由于单位碳价  $\sigma > 0$  且需

求项为正, 因此  $\frac{\partial f_1}{\partial \mu} > 0$ 。

命题 7 表明随着目标市场消费者环保意识的增强 ( $\gamma$  增大), 单位合规资产所能转化的市场需求增量显著提升。这提高了资产的边际盈利能力  $f_1$ , 进而激励供应链成员加大投入。在长期演化中, 这种强化的投入动力克服了资产的自然贬值, 使得系统在更高水位的  $L_{SS}$  处达到均衡。当转化效率提升时 ( $\mu$  增大),

每一单位合规资产带来的避税收益增加，降低了碳关税壁垒对利润的侵蚀，最终体现为合规资产稳态值  $L_{SS}$  的显著增长。

## 5. 算例仿真

参考相关低碳供应链[23]研究，结合跨境电商与碳关税的现实背景，设定基础参数如下：市场基础规模  $D_0=100$ ，价格敏感系数  $\delta=1$ ，绿色偏好系数  $\gamma=2$ ；制造商生产成本  $c_m=10$ ，初始碳排放  $E_0=5$ ；单位碳价  $\sigma=2$ ，资产减排转化率  $\mu=0.8$ ；投入成本系数  $\varepsilon_M=5$ ， $\varepsilon_R=5$ ；资产效能系数  $\alpha=1.5$ ， $\beta=1.2$ ；自然贬值率  $\theta=0.5$ ，贴现因子  $\rho=0.1$ 。初始绿色合规资产  $L_0=0$ 。

从图 2 可以看到，协同契约模式下的制造商和零售商投入、合规资产稳态值显著高于分散决策，这证明了“双向成本分担”协同契约的引入实现了帕累托改进，印证了命题 5。

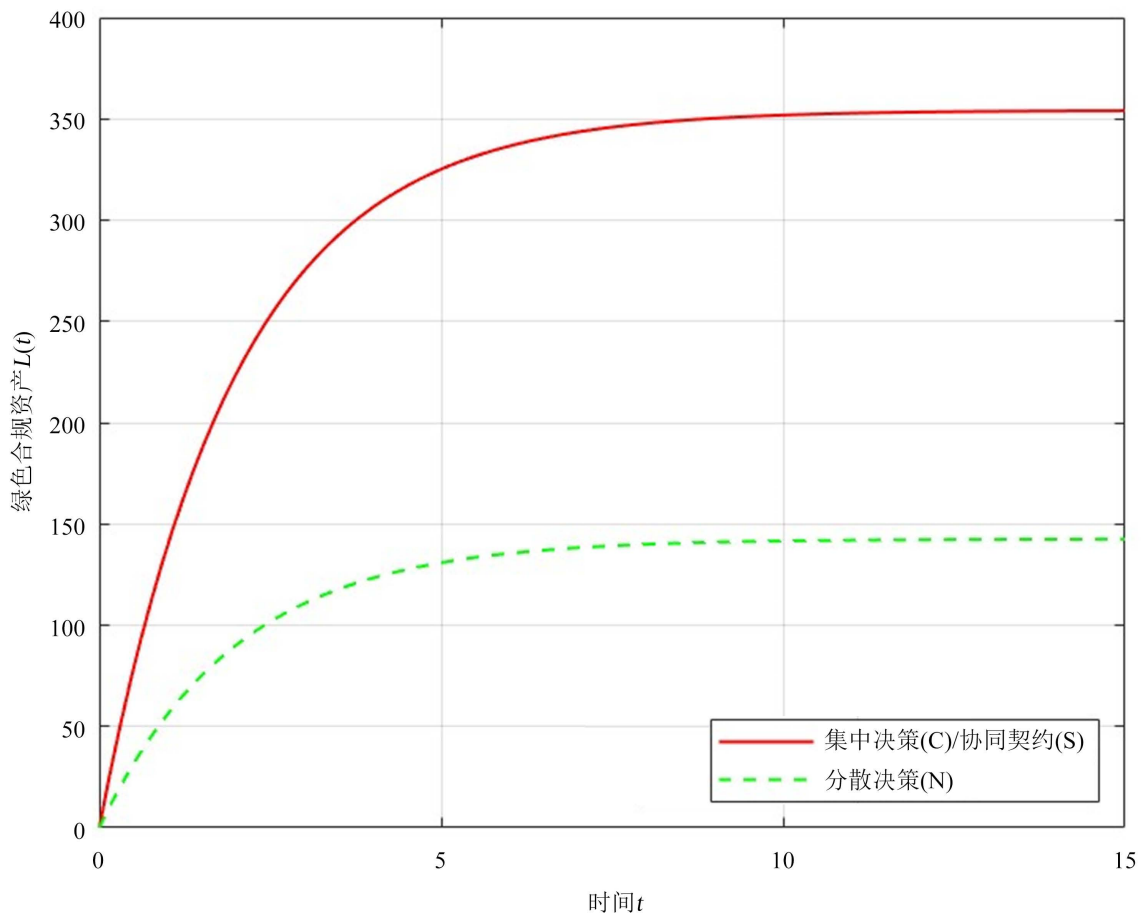
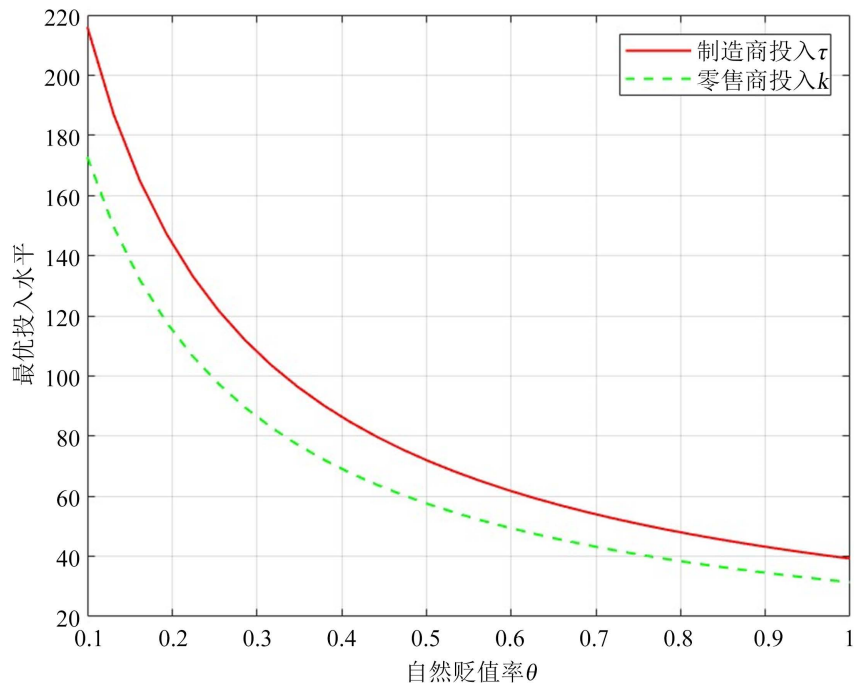


Figure 2. Comparison of dynamic evolution trajectories of green compliance assets

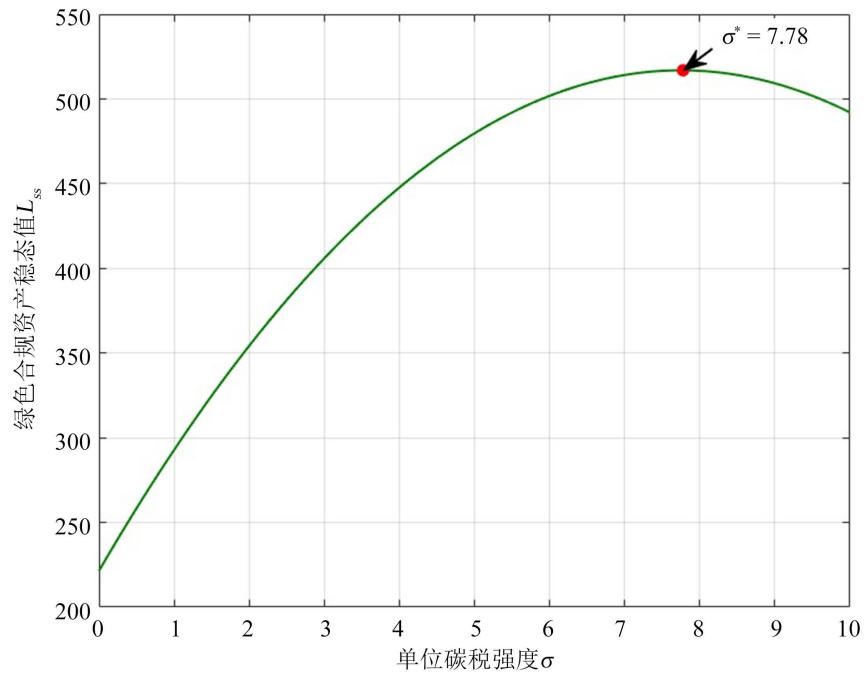
图 2. 绿色合规资产动态演化轨迹对比

图 3 分析了技术更迭或标准提升速度对成员投入积极性的打击。随着  $\theta$  增加，代表制造商投入的实线( $\tau$ )和代表零售商投入的虚线( $k$ )均呈现下降趋势。 $\theta$  越大，意味着绿色资产失效越快。如果投入转化资产的速度跟不上资产“贬值”的速度，企业会倾向于缩减长期研发，转而支付短期碳税。

图 4 呈现显著的倒“U”型特征。在碳税较低时( $\sigma < \sigma^*$ )，随着  $\sigma$  增加，曲线向上攀升。当碳税超过临界点  $\sigma^*$  (图中斜向箭头指示处)后，曲线开始下滑。这与命题 6 结论保持一致。

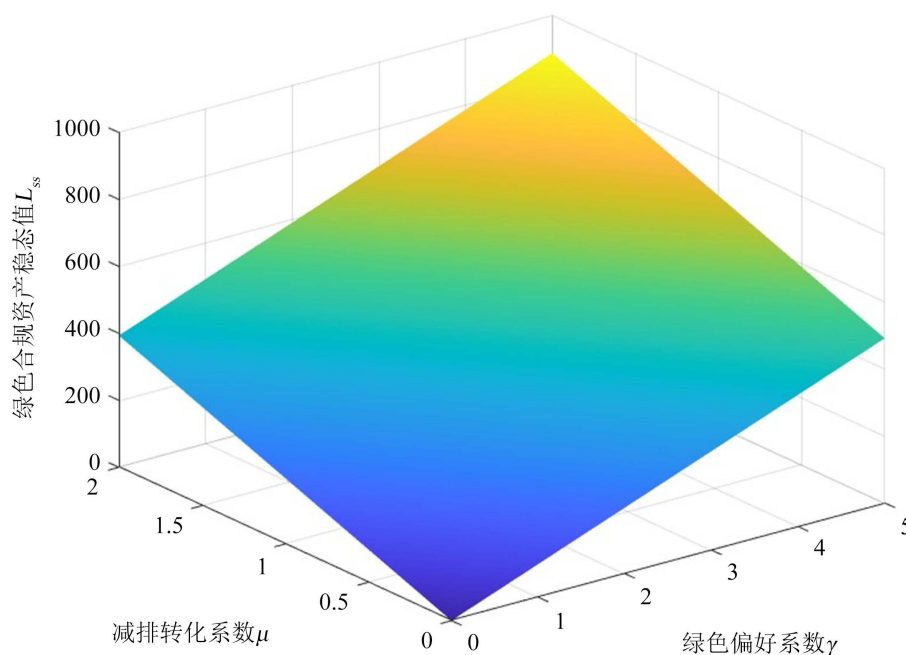


**Figure 3.** Impact of the natural depreciation rate on the efforts of each member  
**图 3.** 自然贬值率对各主体投入的影响



**Figure 4.** Impact of carbon tariff barrier intensity on the steady-state value of green compliance assets  
**图 4.** 碳关税壁垒强度对绿色合规资产稳态值的影响

从图 5 曲面走势看，绿色合规资产稳态值  $L_{ss}$  随消费者绿色偏好系数和减排转化系数的增加而单调上升。这表明在碳关税背景下，企业积累合规资产的动力具有双重来源：一侧是来自海外市场消费者的绿色需求溢价，另一侧是来自技术进步带来的碳税支出缩减。



**Figure 5.** Impact of consumer green preference and emission reduction conversion coefficient on steady-state values  
**图 5.** 消费者绿色偏好与减排转化系数对稳态值的影响

## 6. 总结

本文在碳关税壁垒持续收紧、跨境电商亟需绿色转型的背景下，基于管理工程的系统思维，研究了碳关税约束下跨境电商供应链协同减排的最优决策与动态协调问题。与现有研究相比，本文在理论模型、契约设计上的主要贡献与结论如下：1) “双向成本分担”协同契约可有效弥补分散决策的效率损失；2) 适度碳关税壁垒可倒逼减排投入，过高则产生反噬效应；3) 消费者绿色偏好与减排转化系数提升可显著激励减排投入，而资产自然贬值率上升则会降低企业绿色投入意愿。

基于以上研究结果，本文提出以下关于政府、跨境电商供应链企业的管理建议：1) 从管理工程全局优化的角度，政府应完善跨境电商碳核算体系并出台精准激励政策，防范高碳税带来的市场退出风险；2) 从跨境电商供应链长期发展来看，制造商与海外零售商应摒弃利己思维，主动开展双向成本分担、绿色投入协同，通过契约机制实现风险共担、利益共享，提升全链路绿色合规能力与国际竞争力；3) 面对海外消费者绿色偏好提升，零售商应积极推动低碳配送与绿色营销落地，制造商应加大低碳技术与工艺升级，共同打造产品绿色溢价，提升供应链抗碳关税风险能力。

本文仅考虑了单制造商与单零售商组成的二级跨境电商供应链，且将碳关税设定为线性外生约束，未涉及碳交易市场、碳关税壁垒变化性、平台参与等复杂现实场景。因此，未来可进一步拓展：引入跨境电商平台、第三方物流等多主体构建多级供应链；考虑碳关税动态调整、碳关税与碳交易联动等政策情景，提升模型的现实适用性。

## 参考文献

- [1] 余壮雄, 薛钊杰, 胡毅. 欧美碳关税对中国产业发展的影响与福利分析[J]. 管理科学学报, 2025, 28(6): 17-32.
- [2] Corvino, F. (2025) The Compound Injustice of the EU Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM). *Ethics, Policy & Environment*, 28, 26-45. <https://doi.org/10.1080/21550085.2023.2272237>
- [3] 董玮, 石晶晶. 欧盟碳关税对中国的经贸冲击及应对策略[J]. 生态经济, 2025, 41(1): 89-98.

- [4] 陀才进, 孙慧, 张若威. 碳关税对中国全球价值链分工的影响研究[J]. 中南财经政法大学学报, 2026(1): 133-147.
- [5] 孟猛, 郑昭阳. 自主减排、碳关税对中国贸易和福利的影响研究[J]. 西安交通大学学报(社会科学版), 2024, 44(6): 62-77.
- [6] 张令荣, 彭博, 程春琪. 基于区块链技术的低碳供应链政府补贴策略研究[J]. 中国管理科学, 2023, 31(10): 49-60.
- [7] 孙嘉轶, 路阳阳, 滕春贤. 区块链技术对低碳供应链合作策略的影响研究[J]. 中国管理科学, 2025, 33(10): 293-303.
- [8] 倪晓然, 蔡树勋, 李润, 等. 低碳供应链视角下的留抵退税政策效应研究[J]. 财政研究, 2026, 47(3): 559-588.
- [9] 黄晨星, 朱小武, 熊波, 等. 零售商主导的低碳供应链竞争结构与决策分析[J]. 工业技术经济, 2025, 44(7): 36-45.
- [10] 王道平, 董汉玺, 张可. 区块链技术驱动下考虑减排积极性的动态低碳供应链微分博弈[J]. 系统科学与数学, 2024, 44(5): 1412-1431.
- [11] 卓四清, 韩雪. 碳补贴和时滞效应下低碳供应链微分博弈研究[J]. 运筹与管理, 2022, 31(8): 7-14.
- [12] 张永明, 楼高翔. 竞争型低碳供应链下考虑参考效应的微分博弈[J]. 系统工程, 2018, 36(6): 101-108.
- [13] Zhang, Z. and Yu, L. (2022) Altruistic Mode Selection and Coordination in a Low-Carbon Closed-Loop Supply Chain under the Government's Compound Subsidy: A Differential Game Analysis. *Journal of Cleaner Production*, **366**, Article ID: 132863. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132863>
- [14] Yang, X., Jiang, H., Sun, J., Tang, Y., Su, P. and Hong, S. (2026) Joint Dynamic Coordination Strategies for Low-Carbon Technologies in Coal Supply Chains Considering Time-Delay Effects: A Two-Stage Differential Game Approach. *Expert Systems with Applications*, **320**, Article ID: 132131. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2026.132131>
- [15] Kang, Y., Dong, P., Ju, Y. and Zhang, T. (2024) Differential Game Theoretic Analysis of the Blockchain Technology Investment and Carbon Reduction Strategy in Digital Supply Chain with Government Intervention. *Computers & Industrial Engineering*, **189**, Article ID: 109953. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.109953>
- [16] Nerlove, M. and Arrow, K.J. (1962) Optimal Advertising Policy under Dynamic Conditions. *Economica*, **29**, 129-142. <https://doi.org/10.2307/2551549>
- [17] 蔡建湖, 谭辉龙, 朱克毓, 等. 考虑风险规避的低碳供应链需求信息共享模型[J/OL]. 系统工程理论与实践: 1-20. <https://link.cnki.net/urlid/11.2267.N.20251118.1323.002>, 2026-04-25.
- [18] 张云丰, 孙利君, 刘伟华, 等. 低碳补贴下产出不确定性制造商的融资与减排决策及协调研究[J]. 系统工程理论与实践, 2025, 45(9): 3010-3024.
- [19] 张令荣, 王锋, 刘笑言. 碳交易与区块链技术下双产品低碳供应链减排决策研究[J]. 管理工程学报, 2025, 39(4): 239-250.
- [20] 夏良杰, 冯锦茹, 杨新文, 等. 考虑过度自信和不对称的低碳供应链减排与促销博弈[J]. 运筹与管理, 2025, 34(9): 169-176.
- [21] 姜跃, 陈锦聪. 不同契约下嵌入区块链的低碳技术共享微分博弈策略[J/OL]. 山东大学学报(理学版): 1-17. <https://link.cnki.net/urlid/37.1389.N.20260429.0932.002>, 2026-04-25.
- [22] 郭金森, 于春艳, 周永务. 资金约束下考虑制造商公平关切的低碳供应链联合减排决策[J/OL]. 昆明理工大学学报(自然科学版): 1-15. <https://doi.org/10.16112/j.cnki.53-1223/n.202501030004>, 2026-04-25.
- [23] 李小燕, 杨丽芳, 陈双双. 考虑政府双重补贴和企业互惠偏好行为的双渠道供应链减排策略研究[J]. 数学的实践与认识, 2025, 55(7): 11-31.