Management Science and Engineering 管理科学与工程, 2026, 15(6), 1146-1162
Published Online November 2026 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/mse
https://doi.org/10.12677/mse.2026.156111

Hans汉斯

碳交易与碳税混合政策下供应链动态减排决策与工程管理研究

吴　丹，徐　琪

东华大学旭日经济与管理学院，上海

收稿日期：2026年10月3日；录用日期：2026年10月25日；发布日期：2026年11月5日

摘　要

文章聚焦于“双碳”目标下，探讨了碳交易、碳税及两种政策相结合的混合政策如何影响供应链的动态减排决策。研究构建了一个由单个供应商(跟随者)和单个制造商(领导者)组成的二级供应链Stackelberg微分博弈模型。文章分别在碳交易、碳税和混合政策三种情景下，求解了供应链成员的最优减排努力、最终产品的稳态减排水平以及各自的利润。通过对比分析和数值仿真，研究得出结论：混合碳政策对供应链成员的减排激励最强，其减排水平和产品碳减排水平均显著高于单一政策；政府采用“碳税 + 碳交易”的混合政策能够有效推动高排放行业的全链条低碳转型。研究为“双碳”目标下碳政策组合设计、低碳供应链工程管理与碳减排工程实施提供了理论依据。

关键词

碳交易，碳税，混合碳政策，供应链减排工程

Research on Dynamic Emission Reduction Decision-Making and Engineering Management of Supply Chain under the Mixed Policy of Carbon Trading and Carbon Tax

Dan Wu, Qi Xu

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

Received: October 3, 2026; accepted: October 25, 2026; published: November 5, 2026

文章引用: 吴丹, 徐琪. 碳交易与碳税混合政策下供应链动态减排决策与工程管理研究[J]. 管理科学与工程, 2026, 15(6): 1146-1162. DOI: 10.12677/mse.2026.156111

Abstract

This paper focuses on the "dual carbon" goals and examines how carbon trading, a carbon tax, and a hybrid policy combining the two influence dynamic emissions reduction decisions in supply chains. The study constructs a two-level Stackelberg differential game model consisting of a single supplier (follower) and a single manufacturer (leader). The paper solves for the optimal emission reduction efforts of supply chain participants, the steady-state emission reduction level of the final product, and their respective profits under three scenarios: carbon trading, a carbon tax, and a hybrid policy. Through comparative analysis and numerical simulations, the study concludes that hybrid carbon policies provide the strongest incentives for emissions reduction among supply chain participants, with both their emissions reduction levels and the carbon reduction levels of the final product being significantly higher than under either single policy; the government's adoption of a "carbon tax + carbon trading" hybrid policy can effectively drive the full-chain low-carbon transition in high-emission industries. This research provides a theoretical basis for the design of carbon policy portfolios, the engineering management of low-carbon supply chains, and the implementation of carbon reduction projects under the "Dual Carbon" goals.

Keywords

Carbon Trading, Carbon Tax, Hybrid Carbon Policy, Supply Chain Emissions Reduction Engineering

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

全球气候变化是当前人类社会面临的核心挑战，减少温室气体排放是实现可持续发展的关键。欧盟计划 2030 年前碳排放较 1990 年削减 55%；中国也早在 2009 年便承诺，到 2020 年单位 GDP 碳排放较 2005 年下降 40%~45% [1]，并进一步明确了 2030 年前碳达峰、2060 年前碳中和的目标，当前“十五五”是实现碳达峰的决胜期。作为全球最大碳市场，我国全国碳排放权交易市场已覆盖发电、钢铁、水泥、铝冶炼 4 个行业约 3500 家企业，纳入排放规模约 80 亿吨，占全国总量的 60%。其中，钢铁行业碳排放占我国总量 16%，是实现“双碳”目标的关键领域。碳交易作为市场型政策，通过配额市场化交易形成动态碳价，依托市场机制优化配置碳排放权，碳交易已被全球 38 个国家和地区采用；碳税作为价格型政策，由政府设定固定税率，通过明确成本信号引导减排。钢铁、水泥、铝冶炼等行业正推进氢冶金、CCUS、废钢电炉短流程、绿电替代、超低排放改造等低碳工程。以钢铁行业为例，宝钢、河钢、酒钢等企业已开展氢基竖炉、碳捕集、碳资产管理平台等工程实践。供应链上游原材料碳足迹直接影响最终产品碳排放，因此需要从全链条碳减排工程视角研究碳交易与碳税混合政策下的动态决策。

碳政策对供应链减排决策的影响主要围绕碳交易、碳税及混合政策三大类型展开。夏良杰等[2]在碳交易机制下构建过度自信制造商与减排服务商的决策模型，研究定制和订购两种减排外包模式；王文宾等[3]揭示了碳限额机制下不同决策模式的减排量与利润变化。部分研究纳入了外部变量，Cong 等[4]分析绿色金融补贴与低碳补贴对资金约束供应链的影响；丁志刚等[5]基于实物期权理论，考虑碳价波动与碳税变化的风险；Mahdi 等[6]提出三方补偿机制协调合同，提升供应链经济绩效与可持续表现；夏良杰等

[7]引入交叉持股战略研究碳交易价格对减排量的影响。碳税作为价格型政策，Xu 等[8]构建政企三方博弈模型，为决策提供双向指导。Dou 和 Cao [9]在闭环供应链与竞争环境中，对比三种回收渠道的环境与经济绩效；杨玉香等[10]分析两种碳税政策下闭环供应链网络均衡条件。缪朝炜等[11]证实碳税能降低行业总排放量；曹柬等[12]探讨 EPR 制度对碳税规制效能的提升；代业明和于双[13]考察零售商双重行为偏好的影响；矫梦迪等[14]揭示碳关税的减排效应；宋鹏等[15]发现差异化碳税与非化石能源补贴的协同控排作用。混合政策结合碳交易与碳税方面，刁心薇等[16]构建二级供应链模型，优化企业定价与减排决策。Sun [17]通过碳政策对比发现碳交易政策对消费者环境意识更敏感；杨玉香等[18]指出碳交易在控排效果与网络利润上更具优势；何莎等[19]通过 DSGE 模型分析，发现长期碳交易减排效果更优；朱晨等[20]构建微分博弈模型，探讨混合政策对供应链利润与碳排放的影响；江民星等[21]设计含价格约束的混合政策，提升效率并平抑碳价波动；陈庭强等[22]分析碳价与市场恐慌情绪对交易对手风险传染的影响。

供应链减排博弈机制研究涵盖静态与动态视角，聚焦不同主体互动关系与决策效率。静态博弈研究中，张玲红等[23]发现消费者环保意识、零售商公平关切与广告努力水平显著影响碳减排技术应用；李飚等[24]对比单独与共同减排投资模型的效率差异；邵舒羽等[25]构建政府与企业的演化博弈模型，探讨奖惩机制的影响。供应链企业的碳减排是一个长期动态过程，最终产品的碳排放水平也取决于供应链上各企业的集体决策[26]。动态博弈研究多采用微分博弈方法，Zhou 和 Ye [27]解析双渠道供应链集中与分散决策的最优均衡策略；Yang 和 Xu [28]发现增加技术投资与提升再制造能力能同步降碳增效；Jiang 等[29]建立跨区域边界污染减排微分博弈模型；武丹等[30]揭示消费者低碳偏好与碳交易价格的减排激励效应；王一雷等[31]考察碳交易政策对产品碳减排水平的提升作用；姜跃等[32]发现产品碳减排量随时间递增但增速放缓；张丹露等[33]探讨不同补贴模式下碳交易价格的影响。从工程管理视角来看，高排放行业的低碳转型本质上是全链条减排工程的协同管理问题。Shen 等[34]建立直接还原铁－电弧炉集成模型，比较碳排放与成本；绿电路线减排最优，焦炉煤气路线成本最低，推广可促钢铁脱碳。范学峰等[35]研究钢铁行业 CCUS 原理、碳排放特征及国内外应用，指出其仍处探索阶段并展望推广重点。

现有研究在碳政策与供应链减排互动方面已取得丰富成果，但多聚焦于碳交易或碳税的单一政策效应，且多采用静态博弈，难以刻画减排努力的累积效应、策略动态互动与碳减排状态演化。因此，本文构建三种政策情景下的 Stackelberg 微分博弈模型，比较均衡减排努力、稳态碳减排水平与利润，并给出政策组合与工程管理启示。

2. 模型描述及假设

2.1. 模型描述

本文考虑单一原材料供应商(S)和单一低碳制造商(M)组成的二级供应链，两者之间为 Stackelberg 博弈。制造商为 Stackelberg 博弈主导者，先决定减排努力；供应商为跟随者，观察到后决定减排努力；消费者具有低碳偏好，最终产品碳减排水平影响市场需求，最终产品减排水平由双方减排努力共同决定并随时间衰减。政府分别实施碳交易、碳税及混合政策，碳交易下制造商可出售盈余配额或购买超额配额，碳税下按实际排放缴税，混合政策下同时承担碳税与碳交易成本。制造商通过绿色采购合同将减排压力向上游传导，双方均以长期利润最大化为目标。供应商和制造商的决策过程见图 1。

2.2. 模型假设

为了更清楚地分析和描述该问题，提出以下假设：

假设 1：供应链由单一供应商和单一制造商组成的二级供应链，且双方均为理性经济人，追求自身利润最大化。

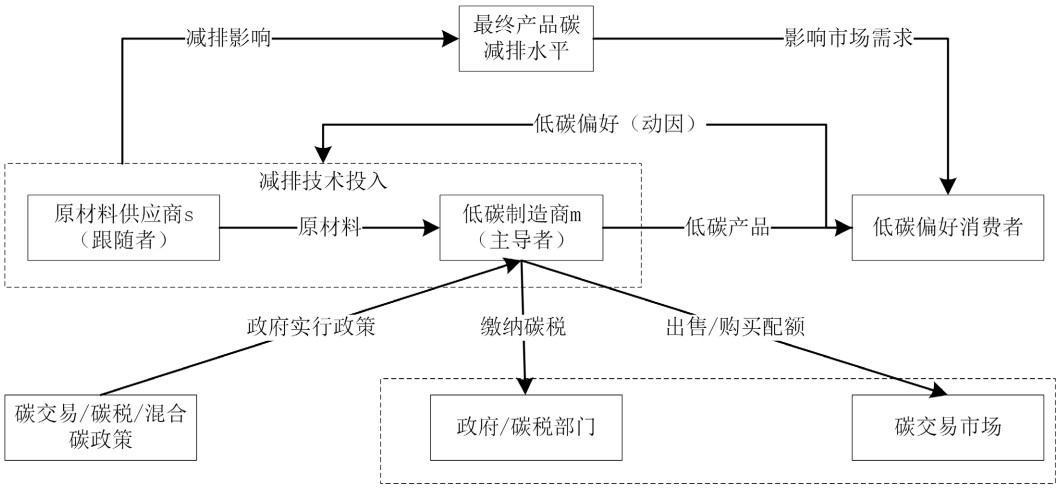


Figure 1. Schematic diagram of the decision-making process of the supplier and manufacturer
图 1. 供应商和制造商的决策过程示意图

假设 2：参考文献[36]，最终产品的碳减排水平是一个动态变量，由供应链各成员的减排努力共同决定，并随时间演变。最终产品碳减排水平 $G(t)$ 随时间衰减，遵循微分方程：$\dot{G}(t)=\alpha E_s(t)+\beta E_m(t)-\delta G(t)$，$G(0)=G_0>0$，其中，$\alpha,\beta$ 分别为供应商和制造商减排努力对碳减排水平的影响系数($\alpha,\beta>0$)，δ 为碳减排水平自然衰减率($\delta>0$)，G_0 为初始碳减排水平，$E_s(t)$ 和 $E_m(t)$ 分别表示供应商和制造商在 t 时刻的碳减排努力水平，$G(t)$ 为 t 时刻的碳减排水平。

假设 3：供应链成员碳减排行动的成本与其努力程度相关，减排成本为凸函数，满足边际成本递增特性，t 时刻供应商和制造商的碳减排努力成本分别为：$C_s(E_s(t))=\frac{\eta_s E_s(t)^2}{2}$，$C_m(E_m(t))=\frac{\eta_m E_m(t)^2}{2}$，其中 $C_s(E_s(t)),C_m(E_m(t))$ 分别表示供应商和制造商的减排成本，η_s,η_m 分别表示供应商和制造商的碳减排努力成本系数($\eta_s,\eta_m>0$)。

假设 4：产品的需求受产品减排量的影响，文中假设 t 时刻最终产品的需求与碳减排量呈线性关系，表示如下：$D(G(t))=a+\gamma G(t)$，a 为常数，表示产品的初始需求，γ 为减排量对产品需求的影响系数，反映消费者低碳偏好。

假设 5：为方便计算，本文参考了文献[37]中的假设，将最终产品的初始碳排放水平标准化为 1。政府分配给供应链总的初始碳配额 E_q，碳交易价格 $p_c>0$，超额排放需购买配额，盈余可出售。碳交易政策下的制造商成本项：$p_c\left[\left(1-\alpha E_s(t)-\beta E_m(t)\right)D-E_q\right]$，为实际净排放量支付市场成本或获得收益。

假设 6：单位碳排放税 t_c，碳税成本与产量挂钩，碳税政策下制造商的成本为：$t_c\left(1-\alpha E_s(t)-\beta E_m(t)\right)D$。

假设 7：在混合碳政策下，制造商的碳成本项为碳税成本与碳交易成本之和，即：$(t_c+p_c)\left[1-\alpha E_s(t)-\beta E_m(t)\right]D-p_c E_q$。该式清晰地反映了企业需同时为碳排放缴纳固定税费并在碳市场中交易配额的双重压力。

假设 8：供应链成员的决策目标为自身利润的最大化，并且供应商和制造商的共同贴现率为 $\rho>0$，用于计算长期利润现值。

假设 9：本文主要目的为分析碳交易、碳税及混合政策下供应链成员的碳减排决策，为了方便计算，在参考 Xia 等[38]的基础上，进一步假设供应商和制造商的边际利润分别为 u_s 和 u_m，且 $u_s>0$，$u_m>0$。

涉及模型参数说明见表 1。

Table 1. Model parameters and definitions
表 1. 模型参数及含义

符号	含义
α	供应商减排努力对碳减排水平的影响系数
β	制造商减排努力对碳减排水平的影响系数
δ	碳减排水平自然衰减率
$E_s(t)$	供应商在 t 时刻的碳减排努力水平
$E_m(t)$	制造商在 t 时刻的碳减排努力水平
$G(t)$	t 时刻的碳减排水平
$C_s(E_s(t))$	供应商的减排成本
$C_m(E_m(t))$	制造商的减排成本
η_s	供应商的碳减排努力成本系数
η_m	制造商的碳减排努力成本系数
a	产品的初始需求
γ	减排量对产品需求的影响系数
E_q	政府分配给供应链总的初始碳配额
p_c	单位碳交易价格
t_c	单位碳排放税
ρ	供应商和制造商的共同贴现率
u_s	供应商的边际利润
u_m	制造商的边际利润
上标 TD	碳交易政策下的决策模型
上标 BD	碳税政策下的决策模型
上标 HD	混合碳政策下的决策模型

3. 模型分析

3.1. 碳交易政策下供应链的动态减排决策(TD)

在碳交易政策的情景下，政府分配给供应链总的初始碳配额 E_q，超额排放需购买配额，盈余可出售。此情景下供应链企业的决策顺序为：制造商作为领导者率先决定自身的碳减排努力程度 $E_m(t)$ 并参与到碳交易市场；在观察到制造商的行动后，供应商决定其碳减排努力程度 $E_s(t)$，此时供应商及制造商的目标函数为：

$$J_S^{TD}=\int_0^{\infty}\mathrm{e}^{-\rho t}\left(u_sD-\frac{\eta_sE_s(t)^2}{2}\right)\mathrm{d}t \tag{1}$$

$$J_m^{TD}=\int_0^{\infty}\mathrm{e}^{-\rho t}\left(u_mD-\frac{\eta_mE_m(t)^2}{2}-p_c\left[\left(1-\alpha E_s(t)-\beta E_m(t)\right)D-E_q\right]\right)\mathrm{d}t \tag{2}$$

命题 1：在模型 TD 中，供应商和制造商的静态反馈均衡策略分别为：

$$E_s^{TD*}=\frac{2u_s\alpha\gamma\eta_m}{\eta_s\left(\eta_m\rho+\sqrt{\Delta^{TD}}\right)}$$

$$E_m^{TD*}=\frac{4\beta\eta_m\left(2p_cu_s\alpha^2\gamma^2\eta_m\left(2\delta+\rho\right)+u_m\gamma\delta\eta_s\left(\sqrt{\Delta^{TD}}+\eta_m\rho\right)+p_c\delta\eta_s\left(\sqrt{\Delta^{TD}}+\eta_m\rho\right)\left(-\gamma+a\left(\delta+\rho\right)\right)\right)}{\eta_s\left(\sqrt{\Delta^{TD}}-\eta_m\rho\right)\left(\sqrt{\Delta^{TD}}+\eta_m\rho\right)^2}。$$

其中 $\Delta^{TD}=\left(2\delta\eta_m+\rho\eta_m\right)^2-4\beta^2p_c\gamma\left(2\delta\eta_m+\rho\eta_m\right)$。

证明：参考文献[26]中最优控制问题的求解方法，根据式(1)和式(2)知 t 时刻后供应商和制造商的最优利润函数为：

$$J_s^{TD*}\left(G\right)=\mathrm{e}^{-\rho t}\max_{E_s\geq0}\int_t^{\infty}\mathrm{e}^{-\rho\left(\tau-t\right)}\left\{u_s\left(a+\gamma G\right)-\frac{\eta_sE_s^2}{2}\right\}\mathrm{d}\tau \tag{3}$$

$$J_m^{TD*}\left(G\right)=\mathrm{e}^{-\rho t}\max_{E_m\geq0}\int_t^{\infty}\mathrm{e}^{-\rho\left(\tau-t\right)}\left\{u_m\left(a+\gamma G\right)-\frac{\eta_mE_m^2}{2}-p_c\left[\left(1-\alpha E_s-\beta E_m\right)\left(a+\gamma G\right)-E_q\right]\right\}\mathrm{d}\tau \tag{4}$$

令

$$V_s^{TD}\left(G\right)=\max_{E_s\geq0}\int_t^{\infty}\mathrm{e}^{-\rho\left(\tau-t\right)}\left[u_s\left(a+\gamma G\right)-\frac{\eta_sE_s^2}{2}\right]\mathrm{d}\tau \tag{5}$$

$$V_m^{TD}\left(G\right)=\max_{E_m\geq0}\int_t^{\infty}\mathrm{e}^{-\rho\left(\tau-t\right)}\left[u_m\left(a+\gamma G\right)-\frac{\eta_mE_m^2}{2}-p_c\left(\left(1-\alpha E_s-\beta E_m\right)\left(a+\gamma G\right)-E_q\right)\right]\mathrm{d}\tau \tag{6}$$

t 时刻后上述最优利润值函数转化为 $J_s^{TD*}\left(G\right)=\mathrm{e}^{-\rho t}V_s^{TD}\left(G\right)$，$J_m^{TD*}\left(G\right)=\mathrm{e}^{-\rho t}V_m^{TD}\left(G\right)$，则上述两个博弈者的最优控制问题满足 HJB 方程：

$$\rho V_s^{TD}\left(G\right)=\max_{E_s\geq0}\left\{u_s\left(a+\gamma G\right)-\frac{\eta_sE_s^2}{2}+V_s^{TD'}\left(\alpha E_s+\beta E_m-\delta G\right)\right\} \tag{7}$$

$$\rho V_m^{TD}\left(G\right)=\max_{E_m\geq0}\left\{u_m\left(a+\gamma G\right)-\frac{\eta_mE_m^2}{2}+V_m^{TD'}\left(\alpha E_s+\beta E_m-\delta G\right)-p_c\left[\left(1-\alpha E_s-\beta E_m\right)\left(a+\gamma G\right)-E_q\right]\right\} \tag{8}$$

采用逆向归纳的方式求解，式(7)是关于 E_s 的二次函数并且二次项系数小于 0，则对(7)式求关于 E_s 的一阶导函数，并令其为 0 求解得到反应函数，再将其带入式(8)，式(8)是关于 E_m 的二次函数并且二次项系数小于 0，则对(8)式求关于 E_m 的一阶导函数，并令其为 0 求解得到反应函数：

$$E_s^{TD}=\frac{\alpha V_s^{TD'}}{\eta_s},\ E_m^{TD}=\frac{\beta\left[V_m^{TD'}+p_c\left(a+\gamma G\right)\right]}{\eta_m}=\frac{\beta\left[V_m^{TD'}+p_c\left(a+\gamma G\right)\right]}{\eta_m} \tag{9}$$

根据微分方程式(7)和式(8)的结构特点，HJB 方程的解是关于 G 的函数，令 $V_s^{TD}\left(G\right)=\kappa_1G+\kappa_2$，$V_m^{TD}\left(G\right)=v_1G^2+v_2G+v_3$，其中 k_1，k_2，v_1，v_2，v_3 均为常数，$V_s^{TD'}\left(G\right)=\kappa_1$，$V_m^{TD'}\left(G\right)=2v_1G+v_2$。将其分别带入式(7)和式(8)有：

$$\rho\left(\kappa_1G+\kappa_2\right)=\left[u_s\gamma+\frac{\beta^2\kappa_1\left(2v_1+p_c\gamma\right)}{\eta_m}-\delta\kappa_1\right]G+\left[u_sa+\frac{\alpha^2\kappa_1^2}{2\eta_s}+\frac{\beta^2\kappa_1\left(v_2+p_ca\right)}{\eta_m}\right] \tag{10}$$

$$\rho\left(v_1G^2+v_2G+v_3\right)=\left[\frac{\beta^2}{2\eta_m}\left(2v_1+p_c\gamma\right)^2-2\delta v_1\right]G^2+a\left(u_m-p_c\right)+p_cE_q+\frac{\beta^2}{2\eta_m}\left(v_2+p_ca\right)^2 +\frac{\alpha^2\kappa_1\left(v_2+p_ca\right)}{\eta_s}+\left[\left(u_m-p_c\right)\gamma+\frac{2\beta^2v_1p_ca}{\eta_m}-\delta v_2+\left(2v_1+p_c\gamma\right)\left(\frac{\beta^2v_2}{\eta_m}+\frac{\alpha^2\kappa_1}{\eta_s}\right)\right]G \tag{11}$$

制造商关于 G 平方项的系数分别相等为 $\frac{\beta^2}{2\eta_m}\left(2v_1+p_c\gamma\right)^2-2\delta v_1=v_1\rho$，其是关于 v_1 的一元二次方程，等式两边关于 G 的系数分别相等，式(11)求解类似式(10)的求解，求解到 $v_1=\frac{\eta_m\left(2\delta+\rho\right)-2\beta^2p_c\gamma\pm\sqrt{\Delta^{TD}}}{4\beta^2}$，其中 $\Delta^{TD}=\left(2\delta\eta_m+\rho\eta_m\right)^2-4\beta^2p_c\gamma\left(2\delta\eta_m+\rho\eta_m\right)>0$，为了符合现实中碳减排努力水平不能为负，取

$$v_1=\frac{\eta_m\left(2\delta+\rho\right)-2\beta^2p_c\gamma-\sqrt{\Delta^{TD}}}{4\beta^2} \tag{12}$$

$$\kappa_1=\frac{2\eta_m\gamma u_s}{\eta_m\rho+\sqrt{\Delta^{TD}}} \tag{13}$$

$$v_2=\frac{2\eta_m^2u_s\alpha^2\gamma\left(-\sqrt{\Delta^{TD}}+\eta_m\left(2\delta+\rho\right)\right)}{\beta^2\eta_s\left(\sqrt{\Delta^{TD}}+\eta_m\rho\right)^2}-\frac{2\eta_m\beta^2\eta_s\gamma\left(p_c-u_m\right)\left(\sqrt{\Delta^{TD}}+\eta_m\rho\right)}{\beta^2\eta_s\left(\sqrt{\Delta^{TD}}+\eta_m\rho\right)^2} +\frac{2\eta_map_c\beta^2\eta_s\left(\sqrt{\Delta^{TD}}\delta+\left(2p_c\beta^2\gamma-\delta\eta_m\right)\left(2\delta+\rho\right)\right)}{\beta^2\eta_s\left(\sqrt{\Delta^{TD}}+\eta_m\rho\right)^2} \tag{14}$$

其中 $\Delta^{TD}=\left(2\delta\eta_m+\rho\eta_m\right)^2-4\beta^2p_c\gamma\left(2\delta\eta_m+\rho\eta_m\right)$。

将求解结果代入微分方程 $\dot{G}\left(t\right)=\alpha E_s\left(t\right)+\beta E_m\left(t\right)-\delta G\left(t\right)$ 中，稳态时 $\dot{G}\left(t\right)=0$，即 $\alpha E_s^{TD*}+\beta E_m^{TD*}=\delta G$，代入 E_s^{TD*}，E_m^{TD*} 整理得最终产品碳减排水平的稳态值和最优轨迹为：

$$G^{TD}=\frac{8u_s\alpha^2\gamma\eta_m^3\left(\delta+\rho\right)+4\beta^2\eta_m\eta_s\left(\sqrt{\Delta^{TD}}+\eta_m\rho\right)\left(-p_c\gamma+u_m\gamma+ap_c\left(\delta+\rho\right)\right)}{\eta_s\left(\sqrt{\Delta^{TD}}-\eta_m\rho\right)\left(\sqrt{\Delta^{TD}}+\eta_m\rho\right)^2} \tag{15}$$

分子分母均为正(满足假设中 $\Delta>0$ 等条件)，故 $G^{TD}>0$。

$$G^{TD}\left(t\right)=G^{TD}+\left(G_0-G^{TD}\right)\mathrm{e}^{-\rho t} \tag{16}$$

其中，$G\left(0\right)=G_0$。

根据以上计算的结果，得到供应商和制造商利润值函数为：

$$J_s^{TD*}\left(G\right)=\mathrm{e}^{-\rho t}V_s^{TD}\left(G\right)=\mathrm{e}^{-\rho t}\left[\kappa_1G^{TD}+\frac{1}{\rho}\left(u_sa+\frac{\alpha^2\kappa_1^2}{2\eta_s}+\frac{\beta^2\kappa_1\left(v_2+p_ca\right)}{\eta_m}\right)\right] \tag{17}$$

$$J_m^{TD*}\left(G\right)=\mathrm{e}^{-\rho t}V_m^{TD}\left(G\right) =\mathrm{e}^{-\rho t}\left[v_1\left(G^{TD}\right)^2+v_2G^{TD*}+\frac{1}{\rho}\left(u_ma+p_cE_q-p_ca+\frac{\beta^2\left(v_2+p_ca\right)^2}{2\eta_m}+\frac{\alpha^2\kappa_1\left(v_2+p_ca\right)}{\eta_s}\right)\right] \tag{18}$$

命题 1 表明，碳交易政策通过市场机制首先作用于核心制造商，再通过商业关系与竞争压力驱动上

游企业减排。在碳排放权交易市场中，由于碳排放权能够流通，市场为其赋予了价值，碳减排既对制造商企业造成了成本负担，同时还为企业提供了创造利益的机会。例如，山钢集团为应对碳市场履约要求并挖掘碳资产价值，系统性地成立了专门的碳资产管理公司，并完成了其首笔国家核证自愿减排量(CCER)交易。而对于上游的供应商，碳价的影响则通过供应链的动态博弈间接传导，碳价升高促使制造商强化减排并提升对低碳原材料的要求，进而改变了供应商对未来市场需求和竞争格局的预期，使其预见到减排投资将有助于维持客户关系和获取订单溢价。如中国宝武钢铁公司，通过从原燃料端到生产制造端，再到使用端的深度协同来进一步降碳，加快提升低碳技术。

3.2. 碳税政策下供应链动态减排决策(BD)

碳税政策通常是政府向企业增收碳税。此情景下供应链企业的决策顺序为：制造商先确定其自身的碳减排努力程度 $E_m(t)$，且面临碳税的支出，供应商在观察到制造商的行动后，决定其碳减排努力程度 $E_s(t)$，此时供应商及制造商的目标函数为：

$$J_s^{BD}\left(G(t)\right)=\int_0^{\infty}\mathrm{e}^{-\rho t}\left\{u_sD-\frac{\eta_sE_s(t)^2}{2}\right\}\mathrm{d}t \tag{19}$$

$$J_m^{BD}\left(G(t)\right)=\int_0^{\infty}\mathrm{e}^{-\rho t}\left\{u_mD-\frac{\eta_mE_m(t)^2}{2}-t_c\left(1-\alpha E_s(t)-\beta E_m(t)\right)D\right\}\mathrm{d}t \tag{20}$$

命题 2：在碳税政策下的决策供应链中，供应链成员的最优静态反馈均衡策略如下：

$$E_s^{BD*}=\frac{2u_s\alpha\gamma\eta_m}{\eta_s\left(\eta_m\rho+\sqrt{\Delta^{BD}}\right)},$$

$$E_m^{BD*}=\frac{4\beta\eta_m\left(2t_cu_sa^2\gamma^2\eta_m(2\delta+\rho)+u_m\gamma\delta\eta_s\left(\sqrt{\Delta^{BD}}+\eta_m\rho\right)+t_c\delta\eta_s\left(\sqrt{\Delta^{BD}}+\eta_m\rho\right)\left(-\gamma+a(\delta+\rho)\right)\right)}{\eta_s\left(\sqrt{\Delta^{BD}}-\eta_m\rho\right)\left(\sqrt{\Delta^{BD}}+\eta_m\rho\right)^2}。$$

其中 $\Delta^{BD}=\left(2\delta\eta_m+\rho\eta_m\right)^2-4\beta^2t_c\gamma\left(2\delta\eta_m+\rho\eta_m\right)$。

证明：与上文中 3.1 的转换过程类似，t 时刻后供应链中制造商和供应商的最优利润函数为 $J_s^{BD*}(G)=\mathrm{e}^{-\rho t}V_s^{BD}(G)$，$J_m^{BD*}(G)=\mathrm{e}^{-\rho t}V_m^{BD}(G)$，其中

$$V_s^{BD}(G)=\max_{E_s\geq0}\int_t^{\infty}\mathrm{e}^{-\rho(\tau-t)}\left\{u_s(a+\gamma G)-\frac{\eta_sE_s^2}{2}\right\}\mathrm{d}\tau \tag{21}$$

$$V_m^{BD}(G)=\max_{E_m\geq0}\int_t^{\infty}\mathrm{e}^{-\rho(\tau-t)}\left\{u_m(a+\gamma G)-\frac{\eta_mE_m(t)^2}{2}-t_c\left(1-\alpha E_s(t)-\beta E_m(t)\right)(a+\gamma G)\right\}\mathrm{d}\tau \tag{22}$$

则上述两个博弈者的最优控制问题满足 HJB 方程：

$$\rho V_s^{BD}(G)=\max_{E_s\geq0}\left\{u_s(a+\gamma G)-\frac{\eta_sE_s^2}{2}+V_s^{BD'}\left(\alpha E_s+\beta E_m-\delta G\right)\right\} \tag{23}$$

$$\rho V_m^{BD}(G)=\max_{E_m\geq0}\left\{u_m(a+\gamma G)-\frac{\eta_mE_m^2}{2}-t_c\left(1-\alpha E_s-\beta E_m\right)(a+\gamma G)+V_m^{BD'}\left(\alpha E_s+\beta E_m-\delta G\right)\right\} \tag{24}$$

采用逆向归纳的方式求解，式(16)是关于 E_s 的二次函数并且二次项系数小于 0，则对(23)式求关于 E_s

的一阶导函数，并令其为 0 求解得到反应函数，再将其带入式(24)，式(24)是关于 $V_m^{BD}(G)=s_1G^2+s_2G+s_3$ E_m 的二次函数并且二次项系数小于 0，则对(24)式求关于 E_m 的一阶导函数，并令其为 0 求解得到反应函数：

$$E_s^{BD*}=\frac{\alpha V_s^{BD'}}{\eta_s},\ E_m^{BD*}=\frac{\beta\left[V_m^{BD'}+p_c(a+\gamma G)\right]}{\eta_m}=\frac{\beta\left[V_m^{BD'}+t_c(a+\gamma G)\right]}{\eta_m} \tag{25}$$

根据微分方程式(23)和式(24)的结构特点，HJB 方程的解是关于 G 的函数，令 $V_s^{BD}(G)=w_1G+w_2$，$V_m^{BD}(G)=s_1G^2+s_2G+s_3$，其中 w_1，w_2，s_1，s_2，s_3 均为常数，$V_s^{BD'}(G)=w_1$，$V_m^{BD'}(G)=2s_1G+s_2$。分别将其带入式(23)和式(24)有：

$$\rho(w_1G+w_2)=\left[u_s\gamma+\frac{\beta^2w_1(2s_1+t_c\gamma)}{\eta_m}-\delta w_1\right]G+\left[u_sa-\frac{\alpha^2w_1^2}{2\eta_s}+\frac{\beta^2w_1(s_2+t_ca)}{\eta_m}\right] \tag{26}$$

$$\begin{aligned}\rho\left(s_1G^2+s_2G+s_3\right)=&\left[\frac{\beta^2}{2\eta_m}(2s_1+t_c\gamma)^2-2\delta s_1\right]G^2+\left[(u_m-t_c)a+\frac{\beta^2}{2\eta_m}(s_2+t_ca)^2+\frac{\alpha^2w_1(s_2+t_ca)}{\eta_s}\right]\\&+\left[(u_m-t_c)\gamma+\frac{\beta^2(2s_1+t_c\gamma)(s_2+t_ca)}{\eta_m}+\frac{\alpha^2w_1(2s_1+t_c\gamma)}{\eta_s}-\delta s_2\right]G\end{aligned} \tag{27}$$

对应系数相等，为满足稳定性条件(值函数有界)，通常取较小的根，求解到系数值分别为：

$$s_1=\frac{(2\delta+\rho)\eta_m-2\beta^2t_c\gamma-\sqrt{\Delta^{BD}}}{4\beta^2} \tag{28}$$

$$w_1=\frac{2\eta_m\gamma u_s}{\eta_m\rho+\sqrt{\Delta^{BD}}} \tag{29}$$

$$\begin{aligned}s_2=&\frac{2\eta_m^2u_s\alpha^2\gamma\left(-\sqrt{\Delta^{BD}}+\eta_m(2\delta+\rho)\right)}{\beta^2\eta_s\left(\sqrt{\Delta^{BD}}+\eta_m\rho\right)^2}-\frac{2\eta_m\beta^2\eta_s\gamma(t_c-u_m)\left(\sqrt{\Delta^{BD}}+\eta_m\rho\right)}{\beta^2\eta_s\left(\sqrt{\Delta^{BD}}+\eta_m\rho\right)^2}\\&+\frac{2\eta_mat_c\beta^2\eta_s\left(\sqrt{\Delta^{BD}}\delta+\left(2t_c\beta^2\gamma-\delta\eta_m\right)(2\delta+\rho)\right)}{\beta^2\eta_s\left(\sqrt{\Delta^{BD}}+\eta_m\rho\right)^2}\end{aligned} \tag{30}$$

其中 $\Delta^{BD}=(2\delta\eta_m+\rho\eta_m)^2-4\beta^2t_c\gamma(2\delta\eta_m+\rho\eta_m)$。

将求解结果代入微分方程 $\dot{G}(t)=\alpha E_s(t)+\beta E_m(t)-\delta G(t)$ 中，稳态时 $\dot{G}(t)=0$，即 $\alpha E_s^{BD*}+\beta E_m^{BD*}=\delta G$，代入 E_s^{BD*}，E_m^{BD*}，整理得最终产品碳减排水平的稳态值和最优轨迹为：

$$G^{BD}=\frac{8u_sa^2\gamma\eta_m^3(\delta+\rho)+4\beta^2\eta_m\eta_s\left(\sqrt{\Delta^{BD}}+\eta_m\rho\right)\left(-t_c\gamma+u_m\gamma+at_c(\delta+\rho)\right)}{\eta_s\left(\sqrt{\Delta^{BD}}-\eta_m\rho\right)\left(\sqrt{\Delta^{BD}}+\eta_m\rho\right)^2} \tag{31}$$

分子分母均为正(满足假设中 $\Delta>0$ 等条件)，故 $G^{BD}>0$。

$$G^{BD}(t)=G^{BD}+\left(G_0-G^{BD}\right)e^{-\rho t} \tag{32}$$

其中 $G(0)=G_0$。

根据以上计算的结果，得到供应商和制造商利润值函数为：

$$J_s^{BD*}(G)=\mathrm{e}^{-\rho t}V_s^{BD}(G)=\mathrm{e}^{-\rho t}\left[w_1G^{BD}+\frac{1}{\rho}\left(u_sa+\frac{\alpha^2w_1^2}{2\eta_s}+\frac{\beta^2\kappa_1(s_2+p_ca)}{\eta_m}\right)\right] \tag{33}$$

$$J_m^{BD*}(G)=\mathrm{e}^{-\rho t}V_m^{BD}(G)=\mathrm{e}^{-\rho t}\left[s_1\left(G^{BD}\right)^2+s_2G^{BD*}+\frac{1}{\rho}\left(u_ma+\frac{\beta^2(s_2+p_ca)^2}{2\eta_m}+\frac{\alpha^2w_1(s_2+p_ca)}{\eta_s}-t_ca\right)\right] \tag{34}$$

命题 2 表明，碳税作为一种明确的“价格信号”，通过提高单位碳排放成本，直接激励制造商加大减排投入，而上游供应商的减排努力则不受碳税率的直接影响，而是通过制造商的决策和行为间接驱动。制造商为降低其发展目标的政策产品碳足迹和碳税负担，会对原材料提出更严格的低碳要求，从而促使供应商为了保持供应链竞争力和订单份额而主动进行减排优化。例如，甘肃酒钢集团在面临碳税(环保税)政策时，率先对碳钢薄板厂实施超低排放改造，并规划了涵盖焦化、烧结、炼铁、炼钢等全流程的减排项目。这种由核心制造商主导的大规模减排投资，不仅直接降低了其自身的碳税支出，也向铁矿石、焦炭等上游供应商传递了明确的绿色采购信号。相较于碳交易政策，碳税的影响路径更清晰、确定性更强，但减排效率高度依赖于下游制造商的传导意愿与供应链的协同程度。

3.3. 混合碳政策下供应链动态减排决策(HD)

在碳税与碳交易相结合的混合碳政策下，制造商的碳成本项为碳税成本与碳交易成本之和。此情景下供应链企业的决策顺序为：制造商先确定其自身的碳减排努力程度 $E_m(t)$，且制造商同时面临碳交易以及碳税政策的压力，供应商在观察到制造商的行动后，决定其碳减排努力程度 $E_s(t)$，此时供应商及制造商的目标函数为：

$$J_s^{HD}(G(t))=\int_0^{\infty}\mathrm{e}^{-\rho t}\left\{u_sD-\frac{\eta_sE_s(t)^2}{2}\right\}\mathrm{d}t \tag{35}$$

$$\begin{aligned}J_m^{HD}(G(t))=\int_0^{\infty}\mathrm{e}^{-\rho t}\Bigg\{&u_mD-\frac{\eta_mE_m(t)^2}{2}-t_c(1-\alpha E_s(t)-\beta E_m(t))D\\&-p_c\left[(1-\alpha E_s(t)-\beta E_m(t))D-E_q\right]\Bigg\}\mathrm{d}t\end{aligned} \tag{36}$$

命题 3：在混合政策下的决策供应链中，供应链成员的最优静态反馈均衡策略如下：

$$E_s^{HD*}=\frac{2u_s\alpha\gamma\eta_m}{\eta_s\left(\eta_m\rho+\sqrt{\Delta^{HD}}\right)},$$

$$E_m^{HD*}=\frac{4\beta\eta_m\left(2u_sa^2\gamma^2\eta_m(2\delta+\rho)(t_c+p_c)+u_m\gamma\delta\eta_s\left(\sqrt{\Delta^{HD}}+\eta_m\rho\right)+\delta\eta_s(t_c+p_c)\left(\sqrt{\Delta^{HD}}+\eta_m\rho\right)\left(-\gamma+a(\delta+\rho)\right)\right)}{\eta_s\left(\sqrt{\Delta^{HD}}-\eta_m\rho\right)\left(\sqrt{\Delta^{HD}}+\eta_m\rho\right)^2}。$$

其中 $\Delta^{HD}=\eta_m(2\delta+\rho)\left(-4\beta^2(t_c+p_c)\gamma+\eta_m(2\delta+\rho)\right)$。

证明：与上文中 3.1 的转换过程类似，t 时刻后供应链中制造商和供应商的最优利润函数为 $J_s^{HD*}(G)=\mathrm{e}^{-\rho t}V_s^{HD}(G)$，$J_m^{HD*}(G)=\mathrm{e}^{-\rho t}V_m^{HD}(G)$，其中

令

$$V_s^{HD}(G)=\max_{E_s\geq0}\int_t^{\infty}\mathrm{e}^{-\rho(\tau-t)}\left\{u_s(a+\gamma G)-\frac{\eta_sE_s^2}{2}\right\}\mathrm{d}\tau \tag{37}$$

$$V_m^{HD}(G)=\max_{E_m\geq 0}\int_t^{\infty}\mathrm{e}^{-\rho(\tau-t)}\left\{u_m(a+\gamma G)-\frac{\eta_m E_m^2}{2}-t_c(1-\alpha E_s-\beta E_m)(a+\gamma G)\right.$$
$$\left.-p_c\left[(1-\alpha E_s-\beta E_m)D-E_q\right]\right\}\mathrm{d}\tau \tag{38}$$

则上述两个博弈者的最优控制问题满足 HJB 方程：

$$\rho V_s^{HD}(G)=\max_{E_s\geq 0}\left\{u_s(a+\gamma G)-\frac{\eta_s E_s^2}{2}+V_s^{HD'}(\alpha E_s+\beta E_m-\delta G)\right\} \tag{39}$$

$$\rho V_m^{HD}(G)=\max_{E_m\geq 0}\left\{u_m(a+\gamma G)-\frac{\eta_m E_m^2}{2}-t_c(1-\alpha E_s-\beta E_m)(a+\gamma G)\right.$$
$$\left.+V_m^{HD'}(\alpha E_s+\beta E_m-\delta G)-p_c\left[(1-\alpha E_s-\beta E_m)D-E_q\right]\right\} \tag{40}$$

采用逆向归纳的方式求解，式(39)是关于 E_s 的二次函数并且二次项系数小于 0，则对(39)式求关于 E_s 的一阶导函数，并令其为 0 求解得到反应函数，再将其带入式(40)，式(40)是关于 E_m 的二次函数并且二次项系数小于 0，则对(40)式求关于 E_m 的一阶导函数，并令其为 0 求解得到反应函数：

$$E_s^{HD*}=\frac{\alpha V_s^{HD'}}{\eta_s},\ E_m^{HD*}=\frac{\beta\left[V_m^{HD'}+(t_c+p_c)(a+\gamma G)\right]}{\eta_m}=\frac{\beta\left[V_m^{HD'}+(t_c+p_c)(a+\gamma G)\right]}{\eta_m} \tag{41}$$

根据微分方程式(39)和式(40)的结构特点，HJB 方程的解是关于 G 的函数，令 $V_s^{HD}(G)=j_1G+j_2$，$V_m^{HD}(G)=c_1G^2+c_2G+c_3$，其中 j_1，j_2，c_1，c_2，c_3 均为常数，$V_s^{HD'}(G)=j_1$，$V_m^{HD'}(G)=2c_1G+c_2$。将其带入式(39)和式(40)有：

$$\rho(j_1G+j_2)=\left[u_s\gamma+\frac{\beta^2 j_1(2c_1+t_c\gamma+p_c\gamma)}{\eta_m}-\delta j_1\right]G+\left[u_s a+\frac{\alpha^2 j_1^2}{2\eta_s}+\frac{\beta^2 j_1(c_2+(t_c+p_c)a)}{\eta_m}\right] \tag{42}$$

$$\rho(c_1G^2+c_2G+c_3)=\left[\frac{\beta^2}{2\eta_m}(2c_1+p_c\gamma+t_c\gamma)^2-2\delta c_1\right]G^2$$
$$+\left[(u_m-t_c-p_c)\gamma+\frac{\beta^2(2c_1+t_c\gamma+p_c\gamma)(c_2+t_c a+p_c a)}{\eta_m}+\frac{\alpha^2 j_1(2c_1+t_c\gamma+p_c\gamma)}{\eta_s}-\delta c_2\right]G \tag{43}$$
$$+\left[(u_m-t_c)a+(E_q-a)p_c+\frac{\beta^2}{2\eta_m}(c_2+t_c a+p_c a)^2+\frac{\alpha^2 j_1(c_2+t_c a+p_c a)}{\eta_s}\right]$$

对应系数相等，为满足稳定性条件(值函数有界)，通常取较小的根，求解到系数值分别为：

$$c_1=\frac{(2\delta+\rho)\eta_m-2\beta^2(t_c+p_c)\gamma-\sqrt{\Delta^{HD}}}{4\beta^2} \tag{44}$$

$$w_1=\frac{2\eta_m\gamma u_s}{\eta_m\rho+\sqrt{\Delta^{HD}}} \tag{45}$$

$$c_2=\frac{2\eta_m^2u_s\alpha^2\gamma\left(\sqrt{\Delta^{HD}}-\eta_m(2\delta+\rho)\right)}{\beta^2\eta_s\left(\sqrt{\Delta^{HD}}+\eta_m\rho\right)^2}-\frac{2\eta_m\beta^2\eta_s\gamma(t_c+p_c-u_m)\left(\sqrt{\Delta^{HD}}+\eta_m\rho\right)}{\beta^2\eta_s\left(\sqrt{\Delta^{HD}}+\eta_m\rho\right)^2}$$
$$+\frac{2\eta_m a(t_c+p_c)\beta^2\eta_s\left(\sqrt{\Delta^{HD}}\delta+\left(2(t_c+p_c)\beta^2\gamma-\delta\eta_m\right)(2\delta+\rho)\right)}{\beta^2\eta_s\left(\sqrt{\Delta^{HD}}+\eta_m\rho\right)^2} \tag{46}$$

其中 $\Delta^{HD}=\eta_m\left(2\delta+\rho\right)\left(-4\beta^2\left(t_c+p_c\right)\gamma+\eta_m\left(2\delta+\rho\right)\right)$。

将求解结果代入微分方程 $\dot{G}(t)=\alpha E_s(t)+\beta E_m(t)-\delta G(t)$ 中，稳态时 $\dot{G}(t)=0$，即 $\alpha E_s^{HD*}+\beta E_m^{HD*}=\delta G$，代入 E_s^{HD*}，E_m^{HD*}，整理得最终产品碳减排水平的稳态值和最优轨迹为：

$$G^{HD}=\frac{8u_s\alpha^2\gamma\eta_m^3\left(\delta+\rho\right)+4\beta^2\eta_m\eta_s\left(\sqrt{\Delta^{HD}}+\eta_m\rho\right)\left(-p_c\gamma-t_c\gamma+u_m\gamma+a\left(p_c+t_c\right)\left(\delta+\rho\right)\right)}{\eta_s\left(\sqrt{\Delta^{HD}}-\eta_m\rho\right)\left(\sqrt{\Delta^{HD}}+\eta_m\rho\right)^2} \tag{47}$$

分子分母均为正(满足假设中 $\Delta>0$ 等条件)，故 $G^{HD}>0$。

$$G^{HD}(t)=G^{HD}+\left(G_0-G^{HD}\right)\mathrm{e}^{-\rho t} \tag{48}$$

其中 $G(0)=G_0$。

根据以上计算的结果，得到供应商和制造商利润值函数为：

$$J_s^{HD*}(G)=\mathrm{e}^{-\rho t}V_s^{HD}(G)=\mathrm{e}^{-\rho t}\left[j_1G^{HD}+\frac{1}{\rho}\left(u_sa+\frac{\alpha^2j_1^2}{2\eta_s}+\frac{\beta^2j_1\left(c_2+\left(t_c+p_c\right)a\right)}{\eta_m}\right)\right] \tag{49}$$

$$\begin{aligned}&J_m^{HD*}(G)=\mathrm{e}^{-\rho t}V_m^{HD}(G)\\&=\mathrm{e}^{-\rho t}\left[c_1\left(G^{HD}\right)^2+c_2G^{HD}+\frac{1}{\rho}\left(\left(u_m-t_c\right)a+\left(E_q-a\right)p_c+\frac{\beta^2\left(c_2+t_ca+p_ca\right)^2}{2\eta_m}+\frac{\alpha^2j_1\left(c_2+t_ca+p_ca\right)}{\eta_s}\right)\right]\end{aligned} \tag{50}$$

命题 3 表明，混合碳政策下，制造商受碳税率 t_c 与碳交易价 p_c 叠加形成的“复合碳成本”信号激励，显著提升减排投入，驱动自身技术革新(如山钢永锋工业互联网深度节能)。同时，这种压力通过供应链博弈向上游传导，迫使原材料环节响应绿色采购标准，从而形成链式协同。例如，重庆美的为应对欧盟 CBAM 打造零碳工厂，并带动上游减排。政策融合价格稳定性与市场灵活性，构建了覆盖全链条的强效激励体系，为高排放行业低碳转型提供了兼具韧性与效率的实施路径。

3.4. 对比分析

通过比较命题 1~3 中的均衡解，得到以下推论：

推论 1：对于供应商来说混合碳政策(HD)的减排努力水平优于单一碳交易(TD)和单一碳税(BD)政策，即 $E_s^{HD*}>E_s^{TD*}$，$E_s^{HD*}>E_s^{BD*}$。

证明：利用作差法，对于供应商

$$E_s^{HD*}-E_s^{TD*}=\frac{2u_s\alpha\gamma\eta_m}{\eta_s}\left(-\frac{1}{\eta_m\rho+\sqrt{\Delta^{TD}}}+\frac{1}{\eta_m\rho+\sqrt{\Delta^{HD}}}\right) \tag{51}$$

因为 $\Delta^{HD}=\eta_m\left(2\delta+\rho\right)\left(-4\beta^2\left(t_c+p_c\right)\gamma+\eta_m\left(2\delta+\rho\right)\right)$，$\Delta^{TD}=\left(2\delta\eta_m+\rho\eta_m\right)^2-4\beta^2p_c\gamma\left(2\delta\eta_m+\rho\eta_m\right)$，易得 $\Delta^{HD}<\Delta^{TD}$，$\frac{1}{\eta_m\rho+\sqrt{\Delta^{HD}}}>\frac{1}{\eta_m\rho+\sqrt{\Delta^{TD}}}$，证得 $E_s^{HD*}-E_s^{TD*}>0$。

$$E_s^{HD*}-E_s^{BD*}=\frac{2u_s\alpha\gamma\eta_m}{\eta_s}\left(-\frac{1}{\eta_m\rho+\sqrt{\Delta^{BD}}}+\frac{1}{\eta_m\rho+\sqrt{\Delta^{HD}}}\right) \tag{52}$$

因为 $\Delta^{BD}=\left(2\delta\eta_m+\rho\eta_m\right)^2-4\beta^2t_c\gamma\left(2\delta\eta_m+\rho\eta_m\right)$，易得 $\Delta^{HD}<\Delta^{BD}$，易证得 $E_s^{HD*}-E_s^{BD*}>0$。

推论 1 表明，制造商面临碳价波动与碳税固定的双重成本压力，促使其制定更严的绿色采购标准，

驱动上游供应商减排。例如，信发集团同时承受着配额清缴和市场碳价波动的压力，以及环境税带来的固定成本。因此，政府在设计碳减排政策时，可考虑采用“碳税 + 碳交易”的混合模式，以增强对全产业链的减排激励。

推论 2：供应商减排努力水平与反映消费者偏好的系数 γ 成正比，即 $\frac{\partial E_s^{TD*}}{\partial \gamma}>0$，$\frac{\partial E_s^{BD*}}{\partial \gamma}>0$，$\frac{\partial E_s^{HD*}}{\partial \gamma}>0$。

证明：根据命题 1 的结果，对 E_s^{TD*} 求关于消费者偏好的偏导数，

$$\frac{\partial E_s^{TD*}}{\partial \gamma}=\frac{4p_c u_s \alpha \beta^2 \gamma \eta_m^2(2\delta+\rho)}{\eta_s\sqrt{\Delta^{TD}}\left(\eta_m\rho+\sqrt{\Delta^{TD}}\right)^2}+\frac{2u_s\alpha\eta_m}{\eta_s\left(\eta_m\rho+\sqrt{\Delta^{TD}}\right)} \tag{53}$$

易得 $\frac{\partial E_s^{TD*}}{\partial \gamma}>0$。同理易证得其他表达式，$\frac{\partial E_s^{BD*}}{\partial \gamma}>0$，$\frac{\partial E_s^{HD*}}{\partial \gamma}>0$。

推论 2 表明，供应商减排努力与消费者低碳偏好呈正相关。说明消费者低碳偏好越强，混合政策通过需求端放大减排激励的效果越显著。基于此，政府应差异化设计政策，当 γ 较低时，市场需求对减排的放大作用有限，碳交易的减排收益不稳定，应侧重碳税，以稳定价格信号形成“底线型”约束；当 γ 较高时，低碳产品市场需求旺盛，应侧重碳交易，通过碳价发现和配额交易把市场需求转化为减排收益。例如，宝武钢铁面对碳交易市场价格上升或碳税税率提高时，会加大对氢冶金等低碳技术的投资，并通过对焦炭、铁矿石等原材料供应商设定更严格的碳减排标准，将政策压力传导至上游。因此，政府在设计碳政策时，应注重政策工具的组合运用，并积极培育绿色消费市场，以最大化减排激励的传导效果。

4. 数值分析

基于本文第 3 节构建的微分博弈模型，并结合前文的相关假设条件，供应商与制造商的最优碳减排决策方案的相关参数取值如下：$G_0=50$，$\rho=0.05$，$\alpha=0.3$，$\beta=0.4$，$\delta=0.1$，$\gamma=0.8$，$a=1000$，$u_s=10$，$u_m=15$，$\eta_s=100$，$\eta_m=120$，$E_q=500$，$p_c=25$，$t_c=10$，进一步将上述参数代入微分博弈模型的解析解表达式，借助 Mathematica 软件完成数值仿真与可视化图形的绘制工作。

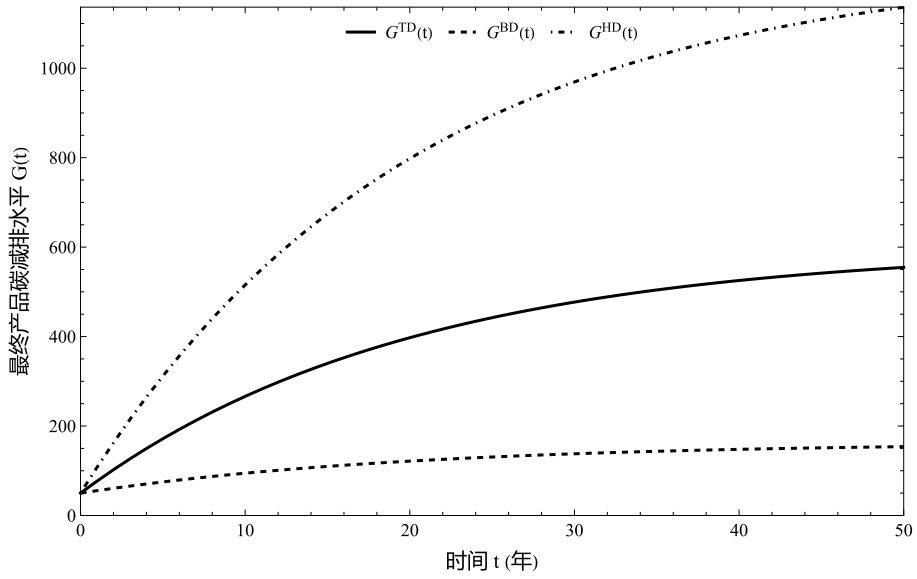


Figure 2. Final product carbon abatement dynamics
图 2. 最终产品碳减排水平动态变化

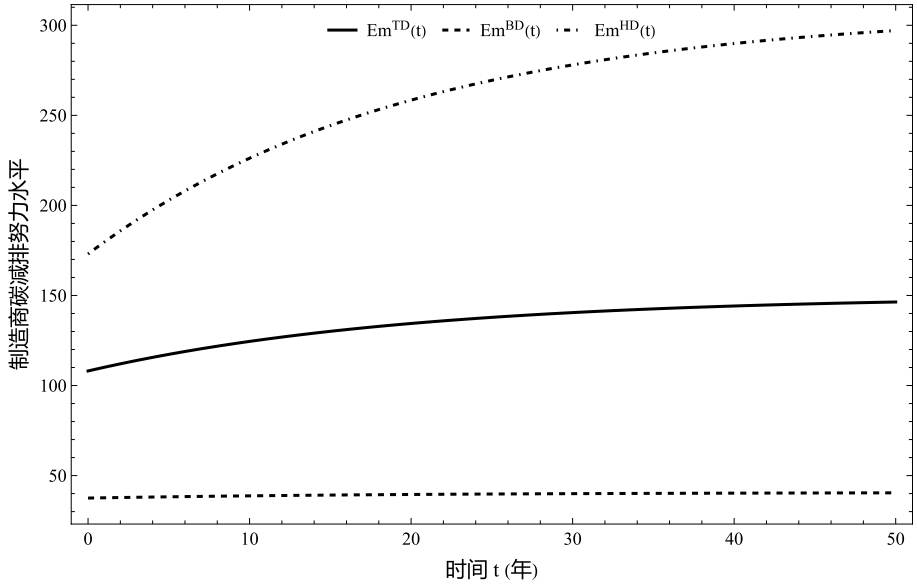


Figure 3. Manufacturer carbon abatement effort dynamics
图 3. 制造商碳减排努力水平动态变化

观察图 2 发现 $G^{HD} > G^{TD}$，$G^{HD} > G^{BD}$，混合碳政策(HD)的碳减排水平始终高于单一政策，且收敛速度最快，表明碳税与碳交易的协同作用能够加速供应链整体的减排进程。在初期($t=0$ 至 $t=1$ 年)，三种政策的减排水平差异较小，但随着时间推进，混合政策的优势逐渐显现，其减排水平在中期($t=3$ 年后)显著超越单一政策，并在稳态时达到最高值。观察图 3 发现制造商的减排努力 $E_m(t)$ 呈现类似趋势，混合政策下努力水平最高且调整最为积极。碳交易政策下努力水平随碳价波动敏感，而碳税政策下努力水平受固定税率影响，调整相对平缓但持续性强。例如，美的空调产品碳足迹逐年下降，沃尔沃单车全生命周期显著减碳；宝钢、攀钢持续投入节能降碳项目，减排努力随时间递增。

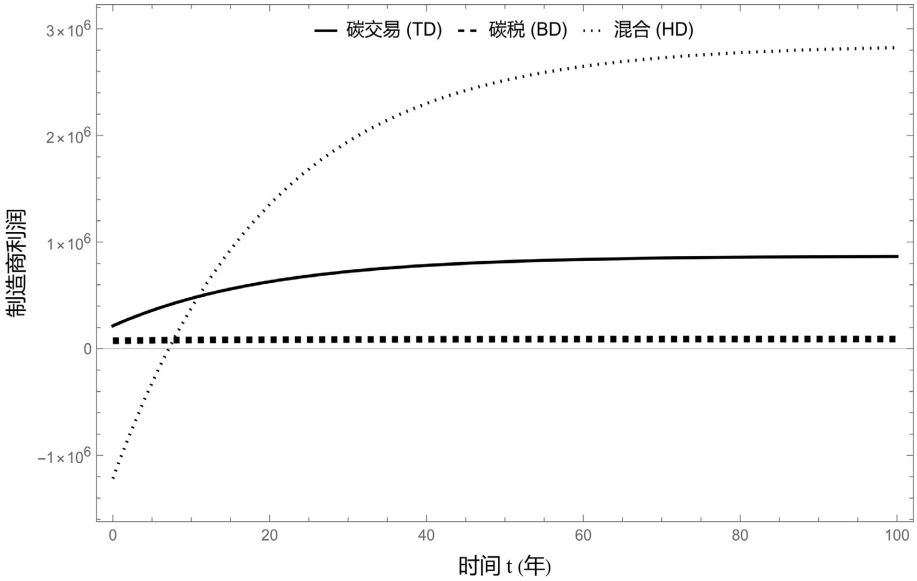


Figure 4. Manufacturer profit dynamics in three models
图 4. 三种模型中制造商利润动态变化

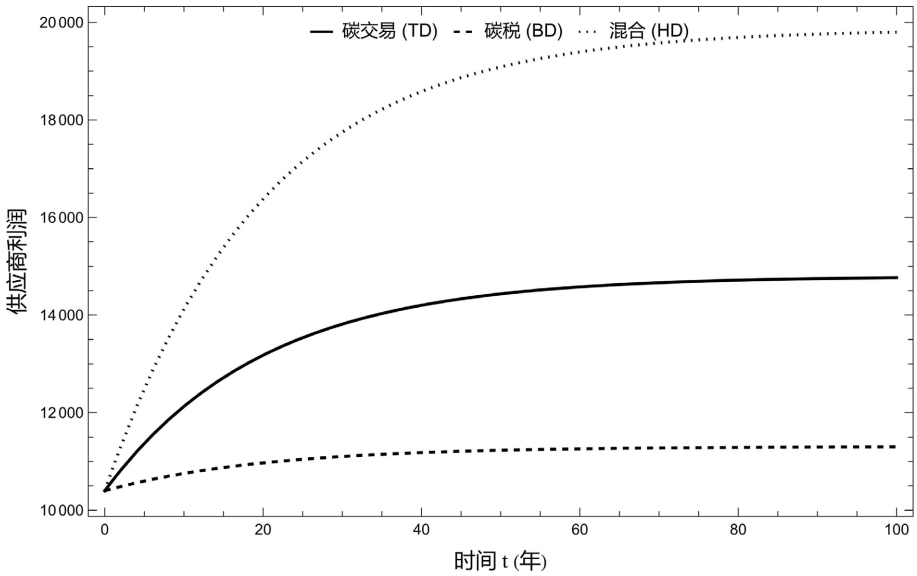


Figure 5. Supplier profit dynamics in three models
图 5. 三种模型中供应商利润动态变化

观察图 4 发现制造商利润在政策初期因减排投入与碳成本增加而暂时受挫，但随后凭借减排成效带来的成本节约、配额收益及产品绿色竞争力提升，利润逐步恢复并收敛于更高水平。例如，重庆璧山水泥厂初期因配额缺口需外购碳配额，碳成本侵蚀利润；后通过持续减排实现配额盈余，碳资产由负担转为收益来源。观察图 5 发现供应商利润始终保持稳步增长，虽不直接承担政策成本，却通过满足下游绿色采购要求、共享低碳产品市场份额提升而持续获益。例如，宝马以采购规模为杠杆，推动数百家一级供应商承诺使用绿电，供应商借此获得订单保障与绿色溢价，在碳足迹成为采购合同扣款条款前已锁定低碳成本优势。

5. 结论

本文构建了碳交易、碳税及混合政策下的二级供应链 Stackelberg 微分博弈模型，发现混合政策下供应商与制造商的减排努力、最终产品碳减排水平及双方利润均高于单一政策。但制造商利润在混合政策初期存在短期受挫、长期向好的特征，需通过碳金融、税收返还或免费配额等过渡机制缓解短期现金流压力。此外，政策工具应分行业、分阶段动态组合，而非固定比例。碳市场覆盖较全，应以碳交易为主、碳税作为碳价下限，防止碳价过低导致激励不足；尚未纳入碳市场的行业，应以碳税为主。消费者低碳偏好较低时，碳税提供稳定“底线型”约束；偏好较高时，碳交易更能将绿色需求转化为减排收益。同时应明确碳税与碳交易的覆盖边界，避免双重征收。对高排放行业核心企业而言，应主动承担供应链“链主”责任，将复合碳成本纳入工程投资决策，合理安排减排工程投资时序，避免一次性过度投资；同时通过设定供应商碳准入标准、绿色采购条款、低碳技术协同和碳数据披露要求，推动上游协同减排。对低碳原材料供应商而言，应主动响应下游绿色采购趋势，持续优化生产工艺与能源结构，推进清洁能源替代与能效提升，并开展产品碳足迹核算与认证。由此，供应链减排从单一环节治理转向全链条低碳工程协同管理。

本文模型简化了供应链结构，未考虑多层级网络、碳价波动、碳边境调节机制及国际贸易等因素。未来可进一步引入多层级供应链和碳市场不确定性等现实约束，使研究结论对高排放行业全链条低碳工程协同管理更具指导意义。

致　谢

衷心感谢导师在选题、模型构建与论文修改中的悉心指导，感谢同学在文献整理与数值仿真中的帮助，感谢审稿专家提出的宝贵修改意见。

参考文献

[1] 邹清明, 胡李庆, 邹霆钧. 碳限额与碳交易机制下考虑公平关切的供应链定价与协调研究[J]. 中国管理科学, 2022, 30(10): 142-154.

[2] 夏良杰, 曹云丽, 尹文昊, 等. 碳交易规制下过度自信制造商与减排服务商的减排博弈研究[J]. 中国管理科学, 2023, 31(10): 85-95.

[3] 王文宾, 管婕, 戚金钰, 等. 碳限额交易机制下大数据服务商参与的供应链决策模型[J]. 系统管理学报, 2025, 34(1): 68-80.

[4] Cong, J., Pang, T. and Peng, H. (2020) Optimal Strategies for Capital Constrained Low-Carbon Supply Chains under Yield Uncertainty. *Journal of Cleaner Production*, **256**, Article ID: 120339. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120339

[5] 丁志刚, 陈涵, 徐琪. 碳交易与碳税双重风险下供应链低碳技术采纳时机决策研究[J]. 软科学, 2020, 34(7): 101-107.

[6] Hosseini-Motlagh, S., Ebrahimi, S. and Jokar, A. (2019) Sustainable Supply Chain Coordination under Competition and Green Effort Scheme. *Journal of the Operational Research Society*, **72**, 304-319. https://doi.org/10.1080/01605682.2019.1671152

[7] 夏良杰, 孔清逸, 李友东, 等. 考虑交叉持股的低碳供应链减排与定价决策研究[J]. 中国管理科学, 2021, 29(4): 70-81.

[8] Xu, C., Wang, C. and Huang, R. (2020) Impacts of Horizontal Integration on Social Welfare under the Interaction of Carbon Tax and Green Subsidies. *International Journal of Production Economics*, **222**, Article ID: 107506. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.09.027

[9] Dou, G., Ma, L., Wei, K. and Zhang, Q. (2023) A Joint Analysis of the Environmental and Economic Performances of Closed-Loop Supply Chains under Carbon Tax Regulation. In: Dou, G., Ma, L., Wei, K. and Zhang, Q., Eds., *Operations Management for Environmental Sustainability*, Springer, 53-84. https://doi.org/10.1007/978-3-031-37600-9_4

[10] 杨玉香, 管倩, 张宝友, 等. 碳税政策下闭环供应链网络均衡分析[J]. 中国管理科学, 2022, 30(1): 185-195.

[11] 缪朝炜, 上官莉莉, 许舒婷, 等. 碳税政策下考虑双寡头竞争的再制造决策研究[J]. 管理工程学报, 2024, 38(6): 187-200.

[12] 曹柬, 卞兆龙, 陆佳雯, 等. 基于碳税的 EPR 规制设计——制造-再制造竞争视角[J]. 系统工程理论与实践, 2025, 45(6): 1960-1979.

[13] 代业明, 于双. 碳税政策下考虑零售商双重行为偏好的再制造闭环供应链决策[J]. 中国管理科学, 2025, 33(8): 308-320.

[14] 矫梦迪, 黄帅. 碳关税冲击下跨边境供应链减排策略和协调机制[J]. 青岛大学学报(自然科学版), 2026, 39(3): 52-58.

[15] 宋鹏, 黄婉婷, 毛显强, 等. 协同碳减排与非化石能源发展目标的政策效应: 征税与补贴[J]. 管理科学学报, 2025, 28(5): 174-190.

[16] 刁心薇, 曾珍香, 孙丞. 混合碳政策下两产品供应链的协同研究[J]. 中国管理科学, 2021, 29(2): 149-159.

[17] Sun, H. and Yang, J. (2021) Optimal Decisions for Competitive Manufacturers under Carbon Tax and Cap-and-Trade Policies. *Computers & Industrial Engineering*, **156**, Article ID: 107244. https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107244

[18] 杨玉香, 李剑锋, 金芳芳, 等. 供应链网络均衡下碳税与碳交易政策比较[J]. 系统工程学报, 2022, 37(2): 178-193.

[19] 何莎, 严星星, 宋李文, 等. 碳税与碳交易政策比较[J]. 青海金融, 2023(2): 4-14.

[20] 朱晨, 马静, 李翠. 混合碳政策下的供应链联合减排决策与优化[J]. 系统管理学报, 2024, 33(5): 1204-1217.

[21] 江民星, 贺一江, 朱帮助. 不确定信息下跨期动态的混合减排政策研究[J]. 系统工程理论与实践, 2024, 44(7): 2213-2226.

[22] 陈庭强, 侯月娟, 王磊, 等. 碳税碳交易协同下企业间碳交易对手风险传染[J]. 系统管理学报, 2025, 34(4): 1089-1111.

[23] 张玲红, 刘方媛, 朱立龙, 等. 考虑零售商公平关切与广告努力水平的碳减排策略研究[J]. 中国管理科学, 2021, 29(4): 138-148.

[24] 李飚, 夏西强, 李秋月. 碳配额下碳交易对碳减排效应的影响及协调机制研究[J]. 中国管理科学, 2024, 32(8): 250-261.

[25] 邵舒羽, 王晴, 刘艳. 政府动态奖惩机制下中小型制造企业绿色转型研究[J]. 中国管理科学, 2026, 34(8): 269-279.

[26] He, L., Yuan, B., Bian, J. and Lai, K.K. (2021) Differential Game Theoretic Analysis of the Dynamic Emission Abatement in Low-Carbon Supply Chains. *Annals of Operations Research*, **324**, 355-393. https://doi.org/10.1007/s10479-021-04134-9

[27] Zhou, Y. and Ye, X. (2018) Differential Game Model of Joint Emission Reduction Strategies and Contract Design in a Dual-Channel Supply Chain. *Journal of Cleaner Production*, **190**, 592-607. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.133

[28] Yang, Y. and Xu, X. (2019) A Differential Game Model for Closed-Loop Supply Chain Participants under Carbon Emission Permits. *Computers & Industrial Engineering*, **135**, 1077-1090. https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.03.049

[29] Jiang, K., You, D., Li, Z. and Shi, S. (2019) A Differential Game Approach to Dynamic Optimal Control Strategies for Watershed Pollution across Regional Boundaries under Eco-Compensation Criterion. *Ecological Indicators*, **105**, 229-241. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.05.065

[30] 武丹, 杨玉香. 考虑消费者低碳偏好的供应链减排微分博弈模型研究[J]. 中国管理科学, 2021, 29(4): 126-137.

[31] 王一雷, 夏西强, 张言. 碳交易政策下供应链碳减排与低碳宣传的微分对策研究[J]. 中国管理科学, 2022, 30(4): 155-166.

[32] 姜跃, 韩水华, 赵洋. 基于零售商公平偏好的联合碳减排与低碳宣传微分对策研究[J]. 中国管理科学, 2023, 31(7): 173-182.

[33] 张丹露, 李峰, 梁樑, 等. 碳交易背景下考虑消费者动态绿色感知的碳减排决策研究[J]. 中国管理科学, 2025, 33(10): 269-281.

[34] Shen, J., Zhang, Q., Tian, S., Li, X., Liu, J. and Tian, J. (2024) The Role of Hydrogen in Iron and Steel Production: Development Trends, Decarbonization Potentials, and Economic Impacts. *International Journal of Hydrogen Energy*, **92**, 1409-1422. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.10.368

[35] 范学峰, 何学坤, 赵运建, 等. 钢铁行业碳捕集、利用与封存技术应用研究进展[J]. 低碳化学与化工, 2025, 50(1): 132-142.

[36] 徐春秋, 赵道致, 原白云, 等. 上下游联合减排与低碳宣传的微分博弈模型[J]. 管理科学学报, 2016, 19(2): 53-65.

[37] Xia, L., Guo, T., Qin, J., Yue, X. and Zhu, N. (2017) Carbon Emission Reduction and Pricing Policies of a Supply Chain Considering Reciprocal Preferences in Cap-and-Trade System. *Annals of Operations Research*, **268**, 149-175. https://doi.org/10.1007/s10479-017-2657-2

[38] Xia, L., Bai, Y., Ghose, S. and Qin, J. (2020) Differential Game Analysis of Carbon Emissions Reduction and Promotion in a Sustainable Supply Chain Considering Social Preferences. *Annals of Operations Research*, **310**, 257-292. https://doi.org/10.1007/s10479-020-03838-8