

# 碳税下考虑利他偏好的双渠道绿色供应链碳减排与定价决策研究

赵苗苗, 倪 静

上海理工大学管理学院, 上海

收稿日期: 2024年10月26日; 录用日期: 2024年11月22日; 发布日期: 2024年11月29日

## 摘 要

建立由零售商和利他偏好制造商构成的两阶段双渠道绿色供应链, 基于非线性消费者需求函数, 构建政府有无碳税两种Stacklberg博弈模型, 探讨碳税、利他偏好和渠道竞争对双渠道绿色供应链碳减排与定价决策的影响。最后设计考虑利他偏好的成本分担契约以最大限度减少碳排放, 实现供应链成员双赢。研究表明, 无论是否有碳税政策, 制造商利他偏好有利于碳减排, 提高零售商、供应链利润以及制造商效用, 而渠道竞争的作用与利他偏好相反; 碳税对供应链碳减排有积极作用, 对渠道需求、供应链成员利润等有消极作用; 成本分担契约能有效协调供应链, 促进碳减排和提高供应链利润。

## 关键词

碳税, 利他偏好, 非线性消费者需求, 成本分担契约

# Research on Carbon Emission Reduction and Pricing Decision of Dual-Channel Green Supply Chain Considering Altruistic Preference under Carbon Tax

Miaomiao Zhao, Jing Ni

School of Management, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Oct. 26<sup>th</sup>, 2024; accepted: Nov. 22<sup>nd</sup>, 2024; published: Nov. 29<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

A two-stage dual-channel green supply chain consisting of retailer and altruistic preference

文章引用: 赵苗苗, 倪静. 碳税下考虑利他偏好的双渠道绿色供应链碳减排与定价决策研究[J]. 建模与仿真, 2024, 13(6): 6602-6617. DOI: 10.12677/mos.2024.136601

manufacturer was established. Based on nonlinear consumer demand function, two Stacklberg game models with or without government carbon tax are constructed to explore the effects of carbon tax, altruistic preference and channel competition on carbon emission reduction and pricing decisions of dual-channel green supply chain. Finally, a cost-sharing contract considering altruistic preference is designed to minimize carbon emissions and achieve a win-win situation for supply chain members. The results show that manufacturer's altruism preference is beneficial to carbon emission reduction and increase the profits of retailer and supply chain and manufacturer's utility, regardless of whether there is a carbon tax policy, while channel competition is opposite to altruism preference. Carbon tax has a positive effect on carbon emission reduction in supply chain, but has a negative effect on channel demand and supply chain members' profits. Cost-sharing contract can effectively coordinate supply chain, promote carbon emission reduction and increase supply chain profit.

## Keywords

Carbon Tax, Altruistic Preference, Nonlinear Consumer Demand, Cost-Sharing Contract

Copyright © 2024 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

近年来,经济的快速发展引发了一系列环境问题,保护环境、减少碳排放是各国实现绿色可持续发展的重要举措,许多国家已实施碳税政策,比如爱尔兰碳税是 10~15 欧元/吨,此举措将环境污染减少了 25% [1]。绿色理念深入人心,消费者愿意高价购买低碳产品[2],如何减少供应链碳排放成为研究热点。在碳税和消费者的驱动下,制造商投入低碳技术生产低碳产品,但高昂成本导致其利润减少,如何平衡碳减排和供应链利润是一个难题。网络的发展使消费者的购买渠道发生变化,在双渠道绿色供应链中供应链成员的利他偏好和渠道竞争也是影响碳减排等决策的重要因素。因此,研究在双渠道绿色供应链中制造商存在利他偏好下,碳税对碳减排和定价决策的影响具有重要现实意义。

已有国内外学者对双渠道绿色供应链的决策和协调问题进行研究。潘金涛等[3]构建由政府、制造商和公平关切零售商组成的博弈模型,研究不同补贴策略对双渠道绿色供应链定价决策的影响。Barman 等将不同渠道产品定价是否一致引入双渠道绿色供应链中,对比政府有无补贴的企业决策,发现适当的补贴能增加绿色产品需求[4]。林志炳等基于随机参照价格研究双渠道供应链的定价问题,并设计收益分享与成本共担组合契约协调供应链[5]。以上文献均未考虑碳税背景下双渠道绿色供应链的决策和协调问题。

关于碳税在绿色供应链决策方面的研究成果颇多。黄帝等发现不同权力结构下碳税能促进低排放制造商的碳减排[6]。缪朝炜等研究碳税下双寡头制造商的生产决策问题,发现碳税有利于降低碳排放量[7]。但是,以上文献均是对单渠道绿色供应链的研究,假设决策者是理性的,忽略了决策者的行为偏好。为实现供应链长期可持续发展,学者们开始研究利他偏好,利他偏好是一种内部协调机制[8],即供应链主导者根据对跟随者利益等的关系做出决策,比如苹果公司在中国和日本投资近 500 兆瓦的太阳能和风能电力以解决供应链上游的排放问题。石岩然等研究供应链成员利他偏好对定价及创新投入的影响,得到产品单位可变成本在一定范围时,供应商和零售商的利他偏好有利于其他成员及成员间的长期合作[9]。Shi 等在双渠道供应链定价决策中引入利他偏好,发现利他偏好制造商为主导者时对供应链的影响更大[10]。但是以上文献均未考虑碳税背景,而考虑利他偏好的双渠道供应链未考察其对产品碳减排量的影响。

综上所述，现有文献对双渠道绿色供应链、碳税和利他偏好等进行了深入研究，但是双渠道绿色供应链的决策问题较少考虑碳税背景，考虑碳税或利他偏好的文献多基于单渠道，且考虑利他偏好的双渠道供应链较少考虑产品的碳减排，而且多数文献的消费者需求函数是关于产品价格等的线性函数，实际的消费者需求函数受多种因素的影响。因此，本文基于非线性消费者需求函数，在利他偏好制造商主导的双渠道绿色供应链下，构建政府有无碳税两种 Stacklberg 博弈模型，研究碳税、利他偏好和渠道竞争对碳排放和定价的影响，并制定具有利他偏好的成本分担契约模型以减少碳排放，协调供应链。

2. 问题描述与基本假设

本文研究由单个制造商和单个零售商组成的双渠道绿色供应链，制造商和零售商之间是 Stacklberg 博弈，其中制造商是主导者，为满足消费者的绿色需求，制造商进行碳减排投资以生产低碳产品，制造商可通过直销渠道以价格  $p_2$  将产品销售给消费者，或以批发价  $w$  通过零售渠道销售产品，零售商是跟从者，将产品以价格  $p_1$  售卖给消费者。政府可能实施碳税政策，由于渠道竞争，为使供应链长期稳定运行，制造商具有利他偏好行为，且会根据碳税与消费者的需求决定产品碳减排量和定价，零售商随之决定售价。消费者选择渠道购买产品。为简化的描述问题，模型结构图和涉及到的参数含义分别如图 1 和表 1 所示，基本假设如下：

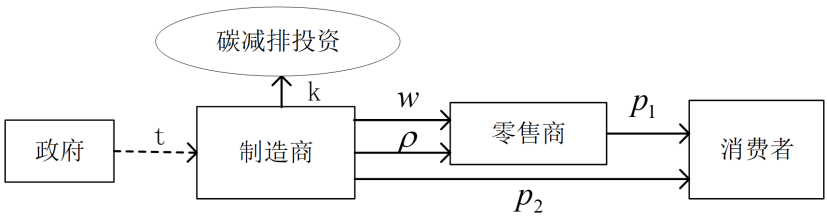


Figure 1. Model structure diagram  
图 1. 模型结构图

Table 1. Model parameter description  
表 1. 模型参数说明

| 参数       | 含义                       | 参数             | 含义                           |
|----------|--------------------------|----------------|------------------------------|
| $a$      | 产品基本市场需求                 | $p_2$          | 产品线上价格                       |
| $c$      | 单位产品生产成本                 | $q_1$          | 零售渠道的需求量                     |
| $e_0$    | 单位产品的初始碳排放量              | $q_2$          | 线上渠道的需求量                     |
| $e$      | 单位产品的碳减排量                | $\rho$         | 制造商利他偏好系数                    |
| $k$      | 制造商的碳减排成本系数              | $\theta$       | 成本分担系数                       |
| $t$      | 政府碳税率                    | $U_j$          | 效用函数， $j = n, m$ 分别表示消费者、制造商 |
| $\delta$ | 渠道竞争参数， $0 < \delta < 1$ | $\pi_{m,r,sc}$ | 制造商、零售商、供应链的利润函数             |
| $w$      | 产品批发价                    | $N, S$         | 分别为政府无碳税、征收碳税的情形             |
| $p_1$    | 产品零售价                    | *              | 表示最优情况                       |

**假设 1:** 碳排放仅产生于产品生产阶段，因此实施碳税政策时，制造商需根据碳排放量缴纳碳税，假设碳税与单位产品碳排放量是线性关系，则总碳税为  $t(e_0 - e)(q_1 + q_2)$ 。

**假设 2:** 风险中性的制造商和风险中性的零售商获得的市场信息对称。

**假设 3:** 参考文献[11]，制造商单位产品生产成本  $c$  为 0，其碳减排投资是一次性投资，碳减排成本

函数为  $ke^2/2$ ，投资成本是关于碳减排量的凸函数，其中  $0 < e < e_0$ ， $k > 0$ 。

**假设 4:** 制造商具有利他偏好时，以追求自身效用最大化为目标，参考文献[8]，制造商利他偏好时的效用函数为： $U_m = \pi_m + \rho\pi_r$ ，其中  $0 < \rho < 1$ 。

模型 N、S、TS 分别表示无碳税、有碳税、针对模型 S 的成本分担契约的情形。

### 3. 模型构建及求解

#### 3.1. 需求函数

随着环境污染加剧，越来越多的消费者倾向于购买低碳产品，多数文献的消费者需求是关于价格等的线性函数，在现实生活中消费者的需求受到多种因素的影响，比如消费者的低碳偏好、渠道竞争、产品价格。根据参考文献[3] [12]和[13]，消费者效用函数如下：

$$U_n = a(q_1 + q_2) - \frac{b \sum_{i=1,2} q_i^2}{2} - \delta q_1 q_2 - \sum_{i=1,2} p_i q_i + e(q_1 + q_2) \quad (1)$$

其中， $b \sum_{i=1,2} q_i^2 / 2$  表示产品购买数量及渠道不同导致消费者效用的递减项， $b$  为边际变化利率，设为 1， $\delta q_1 q_2$  表示渠道竞争导致消费者效用的递减项， $\sum_{i=1,2} p_i q_i$  表示价格不同导致消费者效用的递减项， $e(q_1 + q_2)$  表示碳减排对消费者效用的影响。

根据  $U_n$  表达式可得到其关于  $q_1$  和  $q_2$  的海塞矩阵  $\begin{pmatrix} -1 & -\delta \\ -\delta & -1 \end{pmatrix}$ ，由于  $0 < \delta < 1$ ，则据海塞矩阵可判定消费者效用函数有唯一最大值，令  $\partial U_n / \partial q_1 = 0$ ， $\partial U_n / \partial q_2 = 0$ ，可求得消费者线上和零售渠道的需求量分别为： $q_1 = \frac{p_2 \delta - p_1 + (a+e)(1-\delta)}{1-\delta^2}$ ， $q_2 = \frac{p_1 \delta - p_2 + (a+e)(1-\delta)}{1-\delta^2}$ 。

#### 3.2. 模型 N

政府不实施碳税的情形，制造商为缓解渠道竞争，维持供应链的稳定运行，关注零售商的利益，因而有利他偏好行为，利他偏好的制造商追求效用最大化，首先确定单位产品的碳减排量  $e$ 、批发价  $w$  和直销价  $p_2$ ，零售商作为跟随者追求利润最大化，随之决定产品零售价  $p_1$ 。制造商和零售商的利润函数、制造商的效用函数表示如下：

$$\pi_m^N = wq_1 + p_2 q_2 - \frac{1}{2} k e^2 \quad (2)$$

$$\pi_r^N = (p_1 - w) q_1 \quad (3)$$

$$U_m^N = \pi_m^N + \rho \pi_r^N \quad (4)$$

**命题 1:** 无碳税情形下，当  $(3-\rho) + \delta(1-\rho) - 2k(1+\delta)(2-\rho) < 0$  时，最优决策为：

$$p_1^{N*} = \frac{ak(1+\delta)[3-2\rho-\delta(1-\rho)]}{2k(1+\delta)(2-\rho)+(1+\delta)\rho-(3+\delta)}, \quad p_2^{N*} = \frac{ak(1+\delta)(2-\rho)}{2k(1+\delta)(2-\rho)+(1+\delta)\rho-(3+\delta)},$$

$$w^{N*} = \frac{ak(1+\delta)[2-\rho(2-\delta)]}{2k(1+\delta)(2-\rho)+(1+\delta)\rho-(3+\delta)}, \quad e^{N*} = \frac{a[3-\rho+\delta(1-\rho)]}{2k(1+\delta)(2-\rho)+(1+\delta)\rho-(3+\delta)}.$$

证明：运用逆向求解法，由于  $\partial^2 \pi_r^N / \partial p_1^2 = 2/(\delta^2 - 1) < 0$ ，所以零售商的利润函数  $\pi_r^N$  是关于  $p_1$  的凹函数，令  $\partial \pi_r^N / \partial p_1 = 0$ ，得  $p_1 = (a + e + w - (a + e - p_2))/2$ 。将  $p_1$  代入(4)式，通过求解得到  $U_m^N$  关于  $w$ ， $p_2$ ，

$$e \text{ 的 Hessian 矩阵为 } H_1 = \begin{pmatrix} -\frac{\rho-2}{2(\delta^2-1)} & \frac{\delta(\rho-2)}{2(\delta^2-1)} & \frac{1-\rho}{2+2\delta} \\ \frac{\rho-2}{2(\delta^2-1)} & \frac{4-\delta^2(\rho+2)}{2(\delta^2-1)} & \frac{2+\delta(\rho+1)}{2+2\delta} \\ \frac{1-\rho}{2+2\delta} & \frac{2+\delta(\rho+1)}{2+2\delta} & \frac{\rho(1-\delta)}{2+2\delta} - k \end{pmatrix}, \text{ 当 } (3-\rho)+\delta(1-\rho)-2k(1+\delta)(2-\rho)$$

$< 0$  时, Hessian 矩阵  $H_1$  负定, 制造商有最大效用,  $U_m^N$  是关于  $w, p_2, e$  的凹函数, 令  $\frac{\partial U_m^N}{\partial w} = 0, \frac{\partial U_m^N}{\partial p_2} = 0, \frac{\partial U_m^N}{\partial e} = 0$  联立求解得到  $w^{N*}, p_2^{N*}, e^{N*}$ , 将  $w^{N*}, p_2^{N*}, e^{N*}$  代入  $p_1$  的表达式得到  $p_1^{N*}$ , 从而命题 1 得证。

由命题 1 可得到零售和线上需求、制造商效用、零售商利润、制造商利润、供应链利润的最优值分别如下:

$$q_1^{N*} = \frac{ak}{2k(1+\delta)(2-\rho)+(1+\delta)\rho-(3+\delta)}, \quad q_2^{N*} = \frac{ak[2-\rho+\delta(1-\rho)]}{2k(1+\delta)(2-\rho)+(1+\delta)\rho-(3+\delta)},$$

$$U_m^{N*} = \frac{a^2k[3-\rho+\delta(1-\rho)]}{2[2k(1+\delta)(2-\rho)+(1+\delta)\rho-(3+\delta)]}, \quad \pi_r^{N*} = \frac{a^2k^2(1-\delta^2)}{[2k(1+\delta)(2-\rho)+(1+\delta)\rho-(3+\delta)]^2},$$

$$\pi_m^{N*} = \frac{a^2k\left(-(\rho-3+\delta(\rho-1))^2+2k(1+\delta)(6+(\rho-6)\rho+\delta(2+\rho(\rho-2)))\right)}{2(2k(1+\delta)(2-\rho)+(1+\delta)\rho-(3+\delta))^2},$$

$$\pi_{sc}^{N*} = \frac{a^2k\left(-(\rho-3+\delta(\rho-1))^2+2k(1+\delta)(7+(\rho-6)\rho+\delta(\rho-1)^2)\right)}{2(2k(1+\delta)(2-\rho)+(1+\delta)\rho-(3+\delta))^2}.$$

**推论 1:** 无碳税情形下, 有如下结论:

$$1) \frac{\partial p_2^{N*}}{\partial \rho} > 0, \frac{\partial e^{N*}}{\partial \rho} > 0, \frac{\partial U_n^{N*}}{\partial \rho} > 0, \frac{\partial U_m^{N*}}{\partial \rho} > 0; \frac{\partial p_1^{N*}}{\partial \delta} < 0, \frac{\partial p_2^{N*}}{\partial \delta} < 0, \frac{\partial e^{N*}}{\partial \delta} < 0, \frac{\partial q_2^{N*}}{\partial \delta} < 0, \frac{\partial U_m^{N*}}{\partial \delta} < 0.$$

$$2) \text{ 当 } k > \frac{4}{\rho} + \frac{\delta(6+\delta)-1-\rho-\delta\rho(2+\delta)}{(1+\delta)^2(4-2\rho)} \text{ 时, } \frac{\partial w^{N*}}{\partial \rho} < 0, \frac{\partial p_1^{N*}}{\partial \rho} < 0, \frac{\partial q_1^{N*}}{\partial \rho} > 0, \frac{\partial q_2^{N*}}{\partial \rho} < 0, \frac{\partial \pi_m^{N*}}{\partial \rho} < 0,$$

$$\frac{\partial \pi_r^{N*}}{\partial \rho} > 0, \frac{\partial \pi_{sc}^{N*}}{\partial \rho} > 0; \frac{\partial w^{N*}}{\partial \delta} > 0, \frac{\partial q_1^{N*}}{\partial \delta} < 0, \frac{\partial U_n^{N*}}{\partial \delta} < 0, \frac{\partial U_m^{N*}}{\partial \delta} < 0, \frac{\partial \pi_m^{N*}}{\partial \delta} < 0, \frac{\partial \pi_r^{N*}}{\partial \delta} < 0, \frac{\partial \pi_{sc}^{N*}}{\partial \delta} < 0.$$

推论 1 的证明见附录。

当  $k > \frac{4}{\rho} + \frac{\delta(6+\delta)-1-\rho-\delta\rho(2+\delta)}{(1+\delta)^2(4-2\rho)}$  时, 结合推论 1 中(1)和(2)得, 制造商利他偏好能提高产品碳减排量、其自身和消费者效用, 制造商通过降低产品批发价提高直销价, 使零售商获取更多的利益, 自身的直销量降低, 零售商随之降低零售价以提高零售量, 因此制造商利润降低, 零售商利润增加, 但是制造商效用、消费者效用和供应链利润总体是增加的。随着渠道竞争加剧, 制造商降低产品直销价提高批发价, 零售商降低零售价, 碳减排量降低, 所以产品需求减少, 制造商和零售商利润均降低, 使制造商

效用、消费者效用和供应链的利润也降低, 所以激烈的渠道竞争不利于供应链的绿色可持续发展。

### 3.3. 模型 S

政府实施碳税的情形, 制造商需根据生产产品过程中产出的碳排放量缴纳碳税, 利他偏好制造商依然追求效用最大化, 首先确定单位产品的碳减排量  $e$ 、批发价  $w$  和直销价  $p_2$ , 零售商作为跟随者追求利润最大化, 根据  $e$ ,  $w$ ,  $p_2$ , 决定产品零售价  $p_1$ 。制造商和零售商的利润函数、制造商的效用函数表示如下:

$$\pi_m^S = wq_1 + p_2q_2 - \frac{1}{2}ke^2 - t(e_0 - e)(q_1 + q_2) \quad (5)$$

$$\pi_r^S = (p_1 - w)q_1 \quad (6)$$

$$U_m^S = \pi_m^S + \rho\pi_r^S \quad (7)$$

**命题 2:** 有碳税情形下, 当  $2k(1+\delta)(2-\rho) - (1+t)^2(3-\rho+\delta(1-\rho)) > 0$  时, 最优决策如下:

$$p_1^{S*} = \frac{-e_0kt(1+\delta)(\delta(\rho-1)-1) + ak(1+\delta)(3-2\rho+\delta(\rho-1)) + (a+e_0)t(1+t)(\rho-3+\delta(\rho-1))}{2k(1+\delta)(2-\rho) - (1+t)^2(3-\rho+\delta(1-\rho))},$$

$$e^{S*} = \frac{(1+t)(a-e_0t)(\rho-3+\delta(\rho-1))}{2k(1+\delta)(\rho-2) - (1+t)^2(\rho-3+\delta(\rho-1))},$$

$$p_2^{S*} = \frac{(a+e_0t)k(1+\delta)(\rho-2) + (a+e_0)t(1+t)(3-\rho+\delta(1-\rho))}{2k(1+\delta)(\rho-2) - (1+t)^2(\rho-3+\delta(\rho-1))},$$

$$w^{S*} = \frac{-ak(1+\delta)(2-\rho(2-\delta)) + e_0kt(1+\delta)(\delta\rho-2) + (a+e_0)t(1+t)(3-\rho+\delta(1-\rho))}{2k(1+\delta)(\rho-2) - (1+t)^2(\rho-3+\delta(\rho-1))}.$$

证明: 运用逆向求解法, 由于  $\partial^2 \pi_r^S / \partial p_1^2 = 2/(\delta^2 - 1) < 0$ , 所以零售商的利润函数  $\pi_r^S$  是关于  $p_1$  的凹函数, 令  $\partial \pi_r^S / \partial p_1 = 0$ , 得  $p_1 = (a + e + w - (a + e - p_2))/2$ 。将  $p_1$  代入(7)式, 通过求解得到  $U_m^S$  关于  $w$ ,  $p_2$ ,

$$e \text{ 的 Hessian 矩阵为 } H_2 = \begin{pmatrix} -\frac{\rho-2}{2(\delta^2-1)} & \frac{\delta(\rho-2)}{2(\delta^2-1)} & \frac{1-t-\rho}{2+2\delta} \\ \frac{\rho-2}{2(\delta^2-1)} & \frac{4-\delta^2(\rho+2)}{2(\delta^2-1)} & \frac{2+\delta-t(2+\delta)+\delta\rho}{2+2\delta} \\ \frac{1-t-\rho}{2+2\delta} & \frac{2+\delta-t(2+\delta)+\delta\rho}{2+2\delta} & \frac{\rho(1-\delta)+2t(3+\delta)}{2+2\delta} - k \end{pmatrix}, \text{ 当 } 2k(1+\delta)(2-\rho)$$

$-(1+t)^2(3-\rho+\delta(1-\rho)) > 0$  时, Hessian 矩阵  $H_2$  负定, 制造商有最大效用,  $U_m^S$  是关于  $w$ ,  $p_2$ ,  $e$  的凹函数, 令  $\frac{\partial U_m^S}{\partial w} = 0$ ,  $\frac{\partial U_m^S}{\partial p_2} = 0$ ,  $\frac{\partial U_m^S}{\partial e} = 0$  联立求解得到  $w^{S*}$ ,  $p_2^{S*}$ ,  $e^{S*}$ , 将  $w^{S*}$ ,  $p_2^{S*}$ ,  $e^{S*}$  代入  $p_1$  的表达式得到  $p_1^{S*}$ , 命题 2 得证。

由命题 2 可得到零售和线上需求、制造商效用、零售商利润、制造商利润、供应链利润的最优值分别如下:

$$q_1^{S*} = \frac{k(e_0t - a)}{2k(1+\delta)(\rho-2) - (1+t)^2(\rho-3+\delta(\rho-1))}, \quad q_2^{S*} = \frac{k(a - e_0t)(\rho-2+\delta(\rho-1))}{2k(1+\delta)(\rho-2) - (1+t)^2(\rho-3+\delta(\rho-1))},$$

$$\begin{aligned}
U_m^{S*} &= \frac{k(a-e_0t)^2(\rho-3+\delta(\rho-1))}{2(2k(1+\delta)(\rho-2)-(1+t)^2(\rho-3+\delta(\rho-1)))}, \\
\pi_r^{S*} &= \frac{(a-e_0t)^2 k^2 (1-\delta^2)}{(2k(1+\delta)(2-\rho)+(1+t)^2(\rho-3+\delta(\rho-1)))^2}, \\
\pi_m^{S*} &= \frac{-(a-e_0t)^2 k((1+t)^2(\rho-3+\delta(\rho-1))^2 - 2k(1+\delta)(6+(\rho-6)\rho+\delta(2+\rho(\rho-2))))}{2(2k(1+\delta)(2-\rho)+(1+t)^2(\rho-3+\delta(\rho-1)))^2}, \\
\pi_{sc}^{S*} &= \frac{(a-e_0t)^2 k(-(1+t)^2(\rho-3+\delta(\rho-1))^2 + 2k(1+\delta)(7+(\rho-6)\rho+\delta(\rho-1)^2))}{2(2k(1+\delta)(2-\rho)+(1+t)^2(\rho-3+\delta(\rho-1)))^2}.
\end{aligned}$$

**推论 2:** 碳税情形下, 有如下结论:

$$\begin{aligned}
1) \quad & \frac{\partial p_2^{S*}}{\partial \rho} > 0, \frac{\partial e^{S*}}{\partial \rho} > 0, \frac{\partial U_n^{S*}}{\partial \rho} > 0, \frac{\partial U_m^{S*}}{\partial \rho} > 0; \frac{\partial p_1^{S*}}{\partial \delta} < 0, \frac{\partial p_2^{S*}}{\partial \delta} < 0, \frac{\partial e^{S*}}{\partial \delta} < 0, \frac{\partial U_n^{S*}}{\partial \delta} < 0, \frac{\partial q_2^{S*}}{\partial \delta} < 0, \\
& \frac{\partial U_m^{S*}}{\partial \delta} < 0. \\
2) \quad & \text{当 } k > \frac{(1+t)^2}{2\delta} \text{ 时, } \frac{\partial w^{S*}}{\partial \rho} < 0, \frac{\partial p_1^{S*}}{\partial \rho} < 0, \frac{\partial q_1^{S*}}{\partial \rho} > 0, \frac{\partial q_2^{S*}}{\partial \rho} < 0, \frac{\partial \pi_m^{S*}}{\partial \rho} < 0, \frac{\partial \pi_r^{S*}}{\partial \rho} > 0, \frac{\partial \pi_{sc}^{S*}}{\partial \rho} > 0; \\
& \frac{\partial w^{S*}}{\partial \delta} > 0, \frac{\partial q_1^{S*}}{\partial \delta} < 0, \frac{\partial \pi_m^{S*}}{\partial \delta} < 0, \frac{\partial \pi_r^{S*}}{\partial \delta} < 0, \frac{\partial \pi_{sc}^{S*}}{\partial \delta} < 0.
\end{aligned}$$

推论 2 的证明见附录。

同理, 推论 2 可得到与推论 1 类似的结论, 另外无论有无碳税政策, 制造商利他偏好能促进产品碳减排量、提高消费者和制造商效用, 而渠道竞争对产品碳减排量、提高消费者和制造商效用有抑制作用。由于最优值关于碳税的一阶偏导表达式过于复杂, 无法判断大小, 所以在数值分析中探讨碳税对供应链的影响。

### 3.4. 具有利他偏好的成本分担契约

为实现模型 S 分散决策下的帕累托改进, 本文设计具有利他偏好的成本分担契约, 即零售商分担  $\theta$  比例的碳减排成本, 以减轻制造商的碳减排成本, 回报制造商对其的利他偏好, 此契约的目的是尽可能提高产品的碳减排量, 同时使供应链成员都有利可图, 促进成员之间的合作, 使供应链长期可持续发展。

#### 3.4.1. 模型 C

模型 C 是模型 S 的集中决策情形, 决策目标是整体利润最大化。供应链利润函数如下:

$$\pi_{sc}^C = p_1 q_1 + p_2 q_2 - \frac{ke^2}{2} - t(e_0 - e)(q_1 + q_2) \quad (8)$$

**命题 3:** 当  $k > (1+t)^2/(1+\delta)$  时, 最优决策如下:

$$\begin{aligned}
p_1^{C*} &= \frac{(a+e_0t)k(1+\delta)-2t(1+t)(a+e_0)}{2k(1+\delta)-2(1+t)^2}, \quad p_2^{C*} = \frac{(a+e_0t)k(1+\delta)-2t(1+t)(a+e_0)}{2k(1+\delta)-2(1+t)^2}, \\
e^{C*} &= \frac{(1+t)(a-e_0t)}{k(1+\delta)-(1+t)^2}.
\end{aligned}$$

证明: 通过求解得到  $\pi_{sc}^C$  关于  $p_2, e, p_1$  的 Hessian 矩阵为  $H_3 = \begin{pmatrix} \frac{2}{\delta^2-1} & \frac{1-t}{1+\delta} & \frac{-2\delta}{\delta^2-1} \\ \frac{1-t}{1+\delta} & \frac{4t}{1+\delta} - k & \frac{1-t}{1+\delta} \\ \frac{-2\delta}{\delta^2-1} & \frac{1-t}{1+\delta} & \frac{2}{\delta^2-1} \end{pmatrix}$ , 根据 Hessian

矩阵负定的判定规则, 当  $k > (1+t)^2 / (1+\delta)$  时, Hessian 矩阵  $H_3$  负定,  $\pi_{sc}^C$  是关于  $p_2, e, p_1$  的凹函数, 供应链利润有最大值, 令  $\frac{\partial \pi_{sc}^C}{\partial p_2} = 0, \frac{\partial \pi_{sc}^C}{\partial e} = 0, \frac{\partial \pi_{sc}^C}{\partial p_1} = 0$  联立求解得到  $p_1^{C*}, p_2^{C*}, e^{C*}$ , 命题 3 得证。

由命题 3 可得零售和线上需求、供应链利润的最优值分别如下:

$$q_1^{C*} = \frac{k(a-e_0t)}{2k(1+\delta)-2(1+t)^2}, \quad q_2^{C*} = \frac{k(a-e_0t)}{2k(1+\delta)-2(1+t)^2}, \quad \pi_{sc}^{C*} = \frac{(a-e_0t)^2 k}{2k(1+\delta)-2(1+t)^2}。$$

### 3.4.2. 模型 TS: 成本分担契约

在成本分担契约下, 制造商和零售商利润函数、制造商效用函数分别如下:

$$\pi_m^{TS} = wq_1 + p_2q_2 - \frac{(1-\theta)ke^2}{2} - t(e_0 - e)(q_1 + q_2) \quad (9)$$

$$\pi_r^{TS} = (p_1 - w)q_1 - \frac{\theta ke^2}{2} \quad (10)$$

$$U_m^{TS} = \pi_m^{TS} + \rho\pi_r^{TS} \quad (11)$$

令  $\pi_r^{TS}$  关于  $p_1$  的一阶偏导为零得,  $p_1^{TS*} = ((a+e+w) - (a+e-p_2)\delta) / 2$ 。在契约状态下, 为使供应链的决策达到集中决策下的水平, 需使  $e^{TS*} = e^{C*}, p_1^{TS*} = p_1^{C*}$ , 此时求得  $w = 2p_1^{C*} + (a+e^{C*} - p_2)\delta - a - e^{C*}$ , 进而求得  $p_2^{TS*}, w^{TS*}$ 。

成本分担契约协调后, 需使制造商和零售商的利润不小于协调前各自的利润, 而且制造商的效用不小于协调前的效用, 即  $\pi_m^{TS*} \geq \pi_m^{S*}, \pi_r^{TS*} \geq \pi_r^{S*}, U_m^{TS*} \geq U_m^{S*}$ 。进一步可得成本分担参数的取值范围为:  $\max\{A_1, A_3\} \leq \theta \leq A_2$ , 其中  $A_1, A_2, A_3$  见附录。

## 4. 算例分析

为了考察利他偏好、渠道竞争和碳税对双渠道绿色供应链决策的影响, 验证所得结论, 参考文献[3]和[11]的参数赋值方法, 本文在满足计算条件和所有参数约束的前提下, 对参数赋值:  $a = 40, t = 0.4, \delta = 0.6, k = 12, e_0 = 20$ 。

### 4.1. 不同碳税情形下制造商利他偏好对供应链的影响

探究制造商利他偏好对供应链的影响, 利他偏好系数从 0.1 到 0.9, 步长 0.2, 所得结果如表 2 和表 3 所示。由表 2 得无碳税时, 随着利他偏好的增加, 批发价和零售价降低, 直销价虽升高但变化不大, 制造商利润略微下降, 但零售商利润大幅提高, 供应链总利润、消费者和制造商效用也在提高。利他偏好系数从 0.1 到 0.9 的变化, 使产品碳减排量增加了 9.1%, 零售量增加了 17.6%, 直销量降低了 7.9%。

由表 3 得有碳税时, 利他偏好对批发价、零售价、直销价、制造商利润、零售商利润、供应链总利润、消费者和制造商效用的影响与无碳税情形下一样。但是由于制造商增加了碳税成本, 通过调整定价

获利, 所以与无碳税情形相比, 批发价、零售价、直销价略高, 线上和零售的需求量略低, 制造商、零售商和供应链利润也略低。

**Table 2.** The influence of manufacturer's altruism preference on supply chain in model N  
**表 2.** 模型 N 中制造商利他偏好对供应链的影响

| $\rho$ | $w^{N*}$ | $p_1^{N*}$ | $p_2^{N*}$ | $e^{N*}$ | $q_1^{N*}$ | $q_2^{N*}$ | $\pi_m^{N*}$ | $\pi_r^{N*}$ | $\pi_{sc}^{N*}$ | $U_n^{N*}$ | $U_m^{N*}$ |
|--------|----------|------------|------------|----------|------------|------------|--------------|--------------|-----------------|------------|------------|
| 0.1    | 20.55    | 24.97      | 20.99      | 1.98     | 6.90       | 16.85      | 471.98       | 30.51        | 502.49          | 235.54     | 475.03     |
| 0.3    | 19.52    | 24.46      | 21.00      | 2.01     | 7.72       | 16.37      | 470.40       | 38.16        | 508.57          | 239.66     | 481.85     |
| 0.5    | 18.22    | 23.82      | 21.02      | 2.04     | 8.76       | 15.77      | 465.96       | 49.10        | 515.06          | 245.51     | 490.51     |
| 0.7    | 16.51    | 22.99      | 21.05      | 2.09     | 10.1       | 14.97      | 455.99       | 65.52        | 521.51          | 254.22     | 501.86     |
| 0.9    | 14.18    | 21.84      | 21.08      | 2.16     | 12.0       | 13.89      | 434.75       | 91.79        | 526.55          | 268.03     | 517.37     |

**Table 3.** The influence of manufacturer's altruism preference on supply chain in model S  
**表 3.** 模型 S 中制造商利他偏好对供应链的影响

| $\rho$ | $w^{S*}$ | $p_1^{S*}$ | $p_2^{S*}$ | $e^{S*}$ | $q_1^{S*}$ | $q_2^{S*}$ | $\pi_m^{S*}$ | $\pi_r^{S*}$ | $\pi_{sc}^{S*}$ | $U_n^{S*}$ | $U_m^{S*}$ |
|--------|----------|------------|------------|----------|------------|------------|--------------|--------------|-----------------|------------|------------|
| 0.1    | 24.33    | 28.04      | 24.70      | 2.33     | 5.80       | 14.15      | 317.03       | 21.52        | 338.55          | 166.16     | 319.18     |
| 0.3    | 23.46    | 27.62      | 24.71      | 2.36     | 6.49       | 13.76      | 315.91       | 26.96        | 342.87          | 169.31     | 324.00     |
| 0.5    | 22.36    | 27.08      | 24.72      | 2.41     | 7.37       | 13.26      | 312.74       | 34.75        | 347.50          | 173.76     | 330.12     |
| 0.7    | 20.92    | 26.38      | 24.74      | 2.47     | 8.52       | 12.61      | 305.62       | 46.48        | 352.10          | 180.35     | 338.16     |
| 0.9    | 18.94    | 25.41      | 24.76      | 2.55     | 10.1       | 11.72      | 290.38       | 65.33        | 355.71          | 190.77     | 349.18     |

对比表 2 和表 3, 利他偏好系数从 0.1 到 0.9 的变化, 模型 N 使产品碳减排量提高了 9.1%, 模型 S 使产品碳减排量提高了 9.4%, 所以无论是否实施碳税政策, 利他偏好对碳减排、零售商和供应链利润有积极的作用, 制造商牺牲少部分利润, 换来良好声誉, 即效用增加, 由此验证了推论 1。而且利他偏好和碳税的共同作用更利于供应链的碳减排。

#### 4.2. 不同碳税情形下渠道竞争参数对供应链的影响

探究渠道竞争对供应链的影响, 取利他偏好参数  $\rho = 0.3$ , 渠道竞争参数从 0.1 到 0.9, 步长 0.2, 所得结果如表 4 和表 5 所示。结果表明, 无论是否有碳税政策, 渠道竞争都会使制造商提高批发价、降低直销价, 零售商降低零售价, 渠道竞争的加剧使制造商和零售商两败俱伤, 产品的碳减排量减少, 各自的销量减少, 利润也随着下降, 消费者和制造商效用也在减少。对比表 4 和表 5, 渠道竞争系数从 0.1 到 0.9 的变化, 模型 N 使产品碳减排量降低了 31.6%, 模型 S 使产品碳减排量降低了 33.3%, 所以渠道竞争对碳减排、供应链成员利润有消极作用, 尤其在碳税情形下, 由此验证了推论 1 和推论 2。

#### 4.3. 碳税对供应链的影响

探究碳税对供应链的影响, 取  $\rho = 0.3$ ,  $\delta = 0.3$ , 碳税率从 0.1 到 0.9, 步长 0.2, 所得结果如表 6 所示。结果表明碳减排量随碳税的增加先增加后减少, 过高的碳税不利于产品的碳减排, 另外碳税提高了批发价、零售价和直销价, 但对渠道需求、供应链成员利润、消费者效用等有消极影响。原因在于, 碳税政策使制造商致力于碳减排, 但随着碳税加重及碳减排成本的增加, 制造商减少碳排放量的同时, 只能通过提高批发价和直销价, 使自身有利可图, 零售商也随着提高零售价, 虽低碳产品符合消费者的意愿, 但不断上调的价格令人望而生畏, 致使各渠道需求量减少, 从而供应链成员的利润减少。

**Table 4.** Influence of channel competition parameters on supply chain in model N  
**表 4.** 模型 N 中渠道竞争参数对供应链的影响

| $\delta$ | $w^{N*}$ | $p_1^{N*}$ | $p_2^{N*}$ | $e^{N*}$ | $q_1^{N*}$ | $q_2^{N*}$ | $\pi_m^{N*}$ | $\pi_r^{N*}$ | $\pi_{sc}^{N*}$ | $U_n^{N*}$ | $U_m^{N*}$ |
|----------|----------|------------|------------|----------|------------|------------|--------------|--------------|-----------------|------------|------------|
| 0.1      | 17.93    | 29.21      | 21.32      | 2.63     | 11.4       | 20.18      | 592.90       | 128.6        | 721.53          | 291.49     | 631.49     |
| 0.3      | 18.55    | 27.26      | 21.16      | 2.32     | 9.58       | 18.29      | 532.24       | 83.43        | 615.67          | 265.61     | 557.27     |
| 0.5      | 19.19    | 25.38      | 21.05      | 2.10     | 8.25       | 16.92      | 488.20       | 51.10        | 539.30          | 247.08     | 503.53     |
| 0.7      | 19.85    | 23.55      | 20.96      | 1.93     | 7.25       | 15.89      | 454.76       | 26.84        | 481.59          | 233.17     | 462.81     |
| 0.9      | 20.53    | 21.76      | 20.90      | 1.80     | 6.47       | 15.07      | 428.51       | 7.95         | 436.46          | 222.33     | 430.89     |

**Table 5.** Influence of channel competition parameters on supply chain in model S  
**表 5.** 模型 S 中渠道竞争参数对供应链的影响

| $\delta$ | $w^{S*}$ | $p_1^{S*}$ | $p_2^{S*}$ | $e^{S*}$ | $q_1^{S*}$ | $q_2^{S*}$ | $\pi_m^{S*}$ | $\pi_r^{S*}$ | $\pi_{sc}^{S*}$ | $U_n^{S*}$ | $U_m^{S*}$ |
|----------|----------|------------|------------|----------|------------|------------|--------------|--------------|-----------------|------------|------------|
| 0.1      | 22.05    | 31.69      | 24.94      | 3.15     | 9.73       | 17.23      | 403.26       | 93.80        | 497.05          | 212.55     | 431.40     |
| 0.3      | 22.61    | 29.99      | 24.83      | 2.75     | 8.11       | 15.49      | 359.74       | 59.88        | 419.62          | 190.65     | 377.70     |
| 0.5      | 23.18    | 28.39      | 24.74      | 2.47     | 6.95       | 14.26      | 328.46       | 36.27        | 364.73          | 175.35     | 339.34     |
| 0.7      | 23.75    | 26.85      | 24.68      | 2.26     | 6.08       | 13.33      | 304.91       | 18.88        | 323.79          | 164.06     | 310.57     |
| 0.9      | 24.32    | 25.35      | 24.63      | 2.10     | 5.41       | 12.60      | 286.52       | 5.56         | 292.08          | 155.40     | 288.19     |

**Table 6.** The influence of carbon tax parameters on supply chain in model S  
**表 6.** 模型 S 中碳税参数对供应链的影响

| $t$ | $w^{S*}$ | $p_1^{S*}$ | $p_2^{S*}$ | $e^{S*}$ | $q_1^{S*}$ | $q_2^{S*}$ | $\pi_m^{S*}$ | $\pi_r^{S*}$ | $\pi_{sc}^{S*}$ | $U_n^{S*}$ | $U_m^{S*}$ |
|-----|----------|------------|------------|----------|------------|------------|--------------|--------------|-----------------|------------|------------|
| 0.1 | 19.59    | 27.97      | 22.11      | 2.46     | 9.21       | 17.59      | 485.99       | 77.17        | 563.16          | 245.67     | 509.14     |
| 0.3 | 21.62    | 29.34      | 23.94      | 2.67     | 8.48       | 16.19      | 399.80       | 65.41        | 465.22          | 208.25     | 419.43     |
| 0.5 | 23.59    | 30.64      | 25.70      | 2.82     | 7.74       | 14.79      | 321.62       | 54.56        | 376.18          | 173.70     | 337.99     |
| 0.7 | 25.52    | 31.89      | 27.43      | 2.88     | 6.99       | 13.35      | 251.12       | 44.47        | 295.59          | 141.58     | 264.46     |
| 0.9 | 27.45    | 33.10      | 29.14      | 2.86     | 6.21       | 11.85      | 188.16       | 35.06        | 223.21          | 111.60     | 198.68     |

4.4. 成本分担参数对供应链的影响

探究成本分担参数对供应链的影响, 取  $\rho = 0.3$ ,  $\delta = 0.6$ , 根据各参数值得到满足协调条件的成本分担参数的取值范围, 即  $0.471 \leq \theta \leq 0.584$ , 以及成本分担契约模型下的值, 即  $w^{TS*} = 19.087$ ,  $p_1^{TS*} = 24.780$ ,  $p_2^{TS*} = 22.389$ ,  $e^{TS*} = 2.599$ ,  $q_1^{TS*} = 8.895$ ,  $q_2^{TS*} = 14.873$ , 对比表 7 得, 协调后的产品碳减排量更高, 制造商为回报零售商的成本分担, 选择降低批发价, 零售商也降低零售价, 以获取更多的零售量, 制造商为谋利同时稍微降低直销价, 两个购买渠道的需求增加, 结合表 8, 制造商利润和效用、零售商利润、供应链利润、消费者效用都高于协调前的结果, 所以成本分担契约有效。由表 8 得, 随着成本分担参数的增加, 制造商利润和效用在增加, 零售商利润在减少, 但制造商和零售商利润总是高于协调前两者的利润, 所以同样验证成本分担契约有效。

**Table 7.** The result of model S  
**表 7.** 模型 S 的结果

| 模型 | $w^{S*}$ | $p_1^{S*}$ | $p_2^{S*}$ | $e^{S*}$ | $q_1^{S*}$ | $q_2^{S*}$ | $\pi_m^{S*}$ | $\pi_r^{S*}$ | $\pi_{sc}^{S*}$ | $U_n^{S*}$ | $U_m^{S*}$ |
|----|----------|------------|------------|----------|------------|------------|--------------|--------------|-----------------|------------|------------|
| S  | 23.46    | 27.62      | 24.71      | 2.36     | 6.49       | 13.76      | 315.91       | 26.96        | 342.87          | 169.31     | 324.00     |

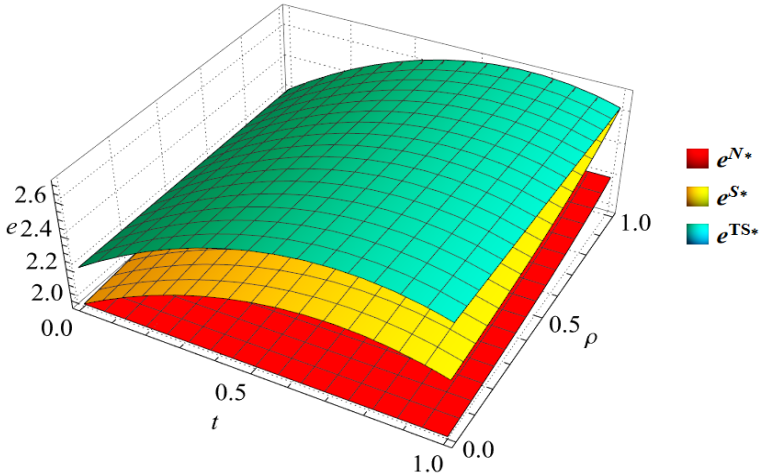
**Table 8.** The influence of cost sharing parameters on supply chain  
**表 8.** 成本分担参数对供应链的影响

| $\theta$ | $\pi_m^{TS*}$ | $\pi_r^{TS*}$ | $\pi_{sc}^{TS*}$ | $U_n^{TS*}$ | $U_m^{TS*}$ |
|----------|---------------|---------------|------------------|-------------|-------------|
| 0.478    | 316.174       | 31.274        | 347.448          | 229.544     | 325.556     |
| 0.499    | 317.033       | 30.415        | 347.448          | 229.544     | 326.157     |
| 0.520    | 317.892       | 29.556        | 347.448          | 229.544     | 326.758     |
| 0.542    | 318.751       | 28.697        | 347.448          | 229.544     | 327.360     |
| 0.563    | 319.610       | 27.838        | 347.448          | 229.544     | 327.961     |

#### 4.5. 利他偏好、碳税、渠道竞争对产品碳减排量的交叉影响

为进一步验证利他偏好、碳税、渠道竞争对产品碳减排量的交叉影响，取利他偏好  $\rho \in [0,1]$ ，碳税  $t \in [0,1]$ ，渠道竞争参数  $\delta \in [0,1]$ ，对比构建的三个模型对应的产品碳减排量。

利他偏好和碳税对产品碳减排量的交叉影响如图 2 所示，成本分担契约下产品碳减排量最高，未实施碳税的碳减排量最低，所以碳税政策能有效促进产品碳减排。三个模型中，产品碳减排量都随着利他偏好的增加而增加，所以制造商的利他偏好也有助于碳减排。从模型 S 与模型 TS 中可看出，两者的碳减排量随着碳税的增加先增加后减少，当碳减排量随碳税的增加而减少时，随着利他偏好的增加，碳减排量缓慢减少，接近最佳碳减排量，但碳减排量始终高于无碳税情形的模型 N，因此政府应合理的设置碳税率并鼓励制造商的利他偏好行为以促进碳减排，达到保护环境，实现绿色发展的目的。

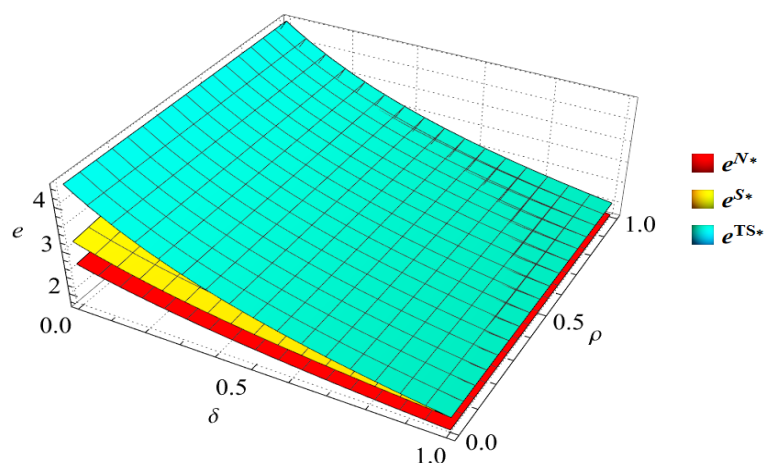


**Figure 2.** Cross-effects of altruism preference and carbon tax on product carbon reduction  
**图 2.** 利他偏好和碳税对产品碳减排量的交叉影响

利他偏好和渠道竞争对产品碳减排量的交叉影响如图 3 所示，三个模型的曲面趋势大致相同，模型 TS 的产品碳减排量最高，模型 S 次之，模型 N 最低，因此成本分担契约有效。利他偏好对产品碳减排的积极影响没有渠道竞争对产品碳减排的消极影响明显，产品碳减排量随渠道竞争的加剧而快速下降，所以供应链成员之间应少些竞争以促进供应链的绿色发展。

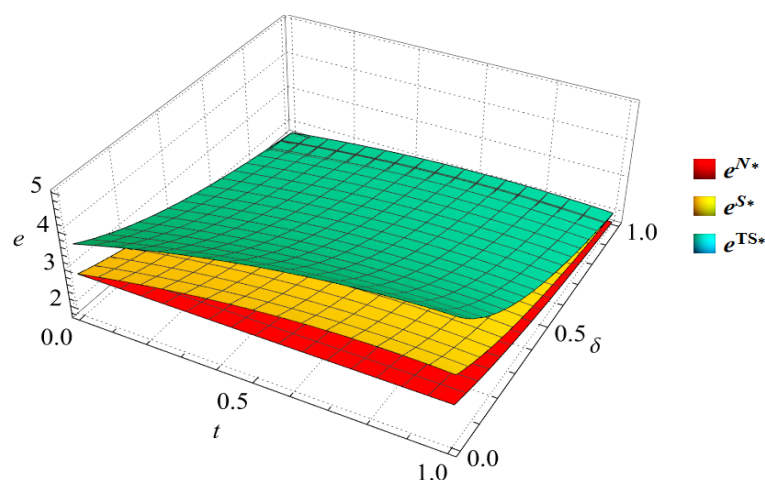
碳税和渠道竞争对产品碳减排量的交叉影响如图 4 所示，模型 TS 的产品碳减排量始终最高，模型 S 次之，模型 N 最低，同理可得出渠道竞争对产品碳减排的消极作用，碳税对产品碳减排的积极作用，另外，即使碳税率足够高也无法避免渠道竞争对碳减排的抑制，所以为了供应链的绿色可持续发展，应缓

解或避免渠道竞争带来的负面影响。



**Figure 3.** Cross-effects of altruistic preference and channel competition on product carbon reduction

**图 3.** 利他偏好和渠道竞争对产品碳减排量的交叉影响



**Figure 4.** Cross-effects of carbon tax and channel competition on product carbon reduction

**图 4.** 碳税和渠道竞争对产品碳减排量的交叉影响

## 5. 结论

本文基于考虑价格、单位产品碳减排量等因素的消费者效用函数求出非线性需求函数, 以单个利他偏好制造商和单个零售商组成的双渠道绿色供应链为研究背景, 构建有无碳税政策及具有利他偏好的成本分担契约三个模型, 探讨碳税、利他偏好、渠道竞争对碳减排和定价的影响, 设计契约以期提高产品碳减排量和供应链利润。结论如下:

1) 碳税情形下, 产品批发价、零售价、直销价略高, 线上和零售需求量略低, 制造商、零售商和供应链利润也略低, 但是产品碳减排量更高。所以碳税对碳减排有积极作用, 对渠道需求、供应链成员利润等有消极作用。

2) 制造商利他偏好通过减少批发价和零售价, 直销价几乎不变, 以增加零售量, 但直销量降低, 而制造商效用、零售商利润和供应链利润得到提高, 并能有效减少产品碳排放, 促进供应链的绿色可持续

发展。

3) 渠道竞争使制造商提高批发价、降低直销价, 零售商降低零售价, 对碳减排、供应链成员利润有极大的消极作用, 所以为了供应链的绿色可持续发展, 应缓解或避免渠道竞争带来的负面影响。

4) 成本分担契约能有效协调供应链, 促进碳减排和提高供应链利润。

5) 在碳税和利他偏好对产品碳减排交叉影响中, 发现适当的碳税和制造商利他偏好的综合作用能进一步促进产品碳减排, 更有利于供应链的绿色发展。

本文考虑的是完全信息下双渠道绿色供应链博弈模型, 下一步可考虑不完全信息下的博弈模型, 另外本文只考虑了制造商的利他偏好, 将来可考虑零售商等其他供应链成员的利他偏好或其他的行为偏好。

## 参考文献

- [1] Wissema, W. and Dellink, R. (2007) AGE Analysis of the Impact of a Carbon Energy Tax on the Irish Economy. *Ecological Economics*, **61**, 671-683. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2006.07.034>
- [2] Zhang, Z.Y., Fu, D.X. and Zhou, Q. (2020) Optimal Decisions of a Green Supply Chain under the Joint Action of Fairness Preference and Subsidy to the Manufacturer. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, **2020**, Article 9610503.
- [3] 潘金涛, 王道平, 田雨. 政府补贴下考虑公平关切的双渠道绿色供应链定价决策研究[J]. 系统科学与数学, 2023, 43(12): 3243-3262.
- [4] Barman, A., De, P.K., Chakraborty, A.K., Lim, C.P. and Das, R. (2023) Optimal Pricing Policy in a Three-Layer Dual-Channel Supply Chain under Government Subsidy in Green Manufacturing. *Mathematics and Computers in Simulation*, **204**, 401-429. <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2022.08.008>
- [5] 林志炳, 吴清. 基于随机参照价格的 BODS 全渠道绿色供应链定价和渠道策略研究[J]. 中国管理科学, 2024, 32(2): 65-74.
- [6] 黄帝, 张菊亮. 不同权力结构下碳税对供应链减排水平的影响[J]. 中国管理科学, 2021, 29(7): 57-70.
- [7] 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. <https://doi.org/10.13587/j.cnki.jieem.2024.06.014>
- [8] Wang, Y., Yu, Z., Jin, M. and Mao, J. (2021) Decisions and Coordination of Retailer-Led Low-Carbon Supply Chain under Altruistic Preference. *European Journal of Operational Research*, **293**, 910-925. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.12.060>
- [9] 石岩然, 蒋凤, 孙玉玲. 利他偏好对双渠道供应链成员企业的策略影响研究[J]. 运筹与管理, 2018, 27(9): 66-72.
- [10] Shi, K., Jiang, F. and Ouyang, Q. (2013) Altruism and Pricing Strategy in Dual-Channel Supply Chains. *American Journal of Operations Research*, **3**, 402-412. <https://doi.org/10.4236/ajor.2013.34038>
- [11] Sun, H. and Yang, J. (2021) Optimal Decisions for Competitive Manufacturers under Carbon Tax and Cap-and-Trade Policies. *Computers & Industrial Engineering*, **156**, Article 107244. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107244>
- [12] 王文宾, 蔺婉莹, 陈梦雪, 等. 消费者效用视角下双渠道供应链的产品质量研发模式选择研究[J]. 中国管理科学, 2021, 29(12): 135-144.
- [13] Chen, J., Liang, L., Yao, D. and Sun, S. (2017) Price and Quality Decisions in Dual-Channel Supply Chains. *European Journal of Operational Research*, **259**, 935-948. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.11.016>

## 附录

推论 1 证明:

$$\begin{aligned}
 1) \frac{\partial p_2^{N*}}{\partial \rho} &= \frac{ak(1-\delta^2)}{[3+\delta+2k(1+\delta)(\rho-2)-(1+\delta)\rho]^2} > 0, \\
 \frac{\partial e^{N*}}{\partial \rho} &= \frac{2ak(1-\delta^2)}{[3+\delta+2k(1+\delta)(\rho-2)-(1+\delta)\rho]^2} > 0, \quad \frac{\partial U_n^{N*}}{\partial \rho} = \frac{a^2k^3(\delta-1)(1+\delta)^2(1-\rho+2k)}{[3+\delta+2k(1+\delta)(\rho-2)-(1+\delta)\rho]^3} > 0, \\
 \frac{\partial U_m^{N*}}{\partial \rho} &= \frac{a^2k^2(1-\delta^2)}{[3+\delta+2k(1+\delta)(\rho-2)-(1+\delta)\rho]^2} > 0; \quad \frac{\partial p_2^{N*}}{\partial \delta} = \frac{2ak(\rho-2)}{[3+\delta+2k(1+\delta)(\rho-2)-(1+\delta)\rho]^2} < 0, \\
 \frac{\partial p_1^{N*}}{\partial \delta} &= \frac{ak[\delta(6+\delta)-3-2k(1+\delta)^2(\rho-2)(\rho-1)-2\delta\rho(4+\delta)+(1+\delta)^2\rho^2]}{[3+\delta+2k(1+\delta)(\rho-2)-(1+\delta)\rho]^2} < 0, \\
 \frac{\partial e^{N*}}{\partial \delta} &= \frac{4ak(\rho-2)}{[3+\delta+2k(1+\delta)(\rho-2)-(1+\delta)\rho]^2} < 0, \quad \frac{\partial q_2^{N*}}{\partial \delta} = \frac{ak[\rho-1+2k(\rho-2)]}{[3+\delta+2k(1+\delta)(\rho-2)-(1+\delta)\rho]^2} < 0, \\
 \frac{\partial U_m^{N*}}{\partial \delta} &= \frac{2a^2k^2(\rho-2)}{[3+\delta+2k(1+\delta)(\rho-2)-(1+\delta)\rho]^2} < 0. \\
 2) \text{ 当 } k > \frac{4}{\rho} + \frac{\delta(6+\delta)-1-\rho-\delta\rho(2+\delta)}{(1+\delta)^2(4-2\rho)} \text{ 时, } \frac{\partial w^{N*}}{\partial \rho} &= \frac{ak(\delta^2-1)[4k(1+\delta)-4-\delta]}{[3+\delta+2k(1+\delta)(\rho-2)-(1+\delta)\rho]^2} < 0, \\
 \frac{\partial p_1^{N*}}{\partial \rho} &= \frac{ak(\delta^2-1)[2k(1+\delta)-3]}{[3+\delta+2k(1+\delta)(\rho-2)-(1+\delta)\rho]^2} < 0, \quad \frac{\partial q_1^{N*}}{\partial \rho} = \frac{ak(2k-1)(1+\delta)}{[3+\delta+2k(1+\delta)(\rho-2)-(1+\delta)\rho]^2} > 0, \\
 \frac{\partial q_2^{N*}}{\partial \rho} &= \frac{ak(1-2k\delta)(1+\delta)}{[3+\delta+2k(1+\delta)(\rho-2)-(1+\delta)\rho]^2} < 0, \quad \frac{\partial \pi_m^{N*}}{\partial \rho} = \frac{2a^2k^2(1-\delta)(1+\delta)^2(2k-1)\rho}{[3+\delta+2k(1+\delta)(\rho-2)-(1+\delta)\rho]^3} < 0, \\
 \frac{\partial \pi_r^{N*}}{\partial \rho} &= \frac{2a^2k^2(\delta-1)(1+\delta)^2(2k-1)}{[3+\delta+2k(1+\delta)(\rho-2)-(1+\delta)\rho]^3} > 0, \quad \frac{\partial \pi_{sc}^{N*}}{\partial \rho} = \frac{2a^2k^2(1-\delta)(1+\delta)^2(2k-1)(\rho-1)}{[3+\delta+2k(1+\delta)(\rho-2)-(1+\delta)\rho]^3} > 0; \\
 \frac{\partial w^{N*}}{\partial \delta} &= \frac{ak(-4+\rho[1-\delta(6+\delta)-2k(1+\delta)^2(\rho-2)+\rho+\delta\rho(2+\delta)])}{[3+\delta+2k(1+\delta)(\rho-2)-(1+\delta)\rho]^2} > 0, \\
 \frac{\partial q_1^{N*}}{\partial \delta} &= \frac{ak[1-\rho+2k(\rho-2)]}{[3+\delta+2k(1+\delta)(\rho-2)-(1+\delta)\rho]^2} < 0, \\
 \frac{\partial U_n^{N*}}{\partial \delta} &= \frac{a^2k^2[7+5\delta-2k(1+\delta)(\rho-2)-7\rho(1+\delta)+2(1+\delta)\rho^2]}{[3+\delta+2k(1+\delta)(\rho-2)-(1+\delta)\rho]^3} < 0, \\
 \frac{\partial \pi_m^{N*}}{\partial \delta} &= \frac{4a^2k^2[-3-\delta+2k(1+\delta)(\rho-2)(\rho-1)+3\rho(1+\delta)-(1+\delta)\rho^2]}{[3+\delta+2k(1+\delta)(\rho-2)-(1+\delta)\rho]^3} < 0, \\
 \frac{\partial \pi_r^{N*}}{\partial \delta} &= \frac{2a^2k^2[\rho-1+\delta(\rho-3)-2k(1+\delta)(\rho-2)]}{[3+\delta+2k(1+\delta)(\rho-2)-(1+\delta)\rho]^3} < 0, \\
 \frac{\partial \pi_{sc}^{N*}}{\partial \delta} &= \frac{2a^2k^2[-7-5\delta+2k(1+\delta)(\rho-2)(2\rho-3)+7\rho(1+\delta)-2(1+\delta)\rho^2]}{[3+\delta+2k(1+\delta)(\rho-2)-(1+\delta)\rho]^3} < 0.
 \end{aligned}$$

推论 2 证明:

$$1) \frac{\partial p_2^{s*}}{\partial \rho} = \frac{k(a-te_0)(t^2-1)(\delta^2-1)}{\left(-2k(1+\delta)(\rho-2)+(1+t)^2[\rho-3+\delta(\rho-1)]\right)^2} > 0,$$

$$\frac{\partial e^{s*}}{\partial \rho} = \frac{2k(a-te_0)(1+t)(1-\delta^2)}{\left(-2k(1+\delta)(\rho-2)+(1+t)^2[\rho-3+\delta(\rho-1)]\right)^2} > 0,$$

$$\frac{\partial U_n^{s*}}{\partial \rho} = \frac{k^2(a-te_0)^2(\delta-1)(1+\delta)^2[2k+(1+t)^2(1-\rho)]}{\left(2k(1+\delta)(\rho-2)-(1+t)^2[\rho-3+\delta(\rho-1)]\right)^3} > 0,$$

$$\frac{\partial U_m^{s*}}{\partial \rho} = \frac{k^2(a-te_0)^2(1-\delta^2)}{\left(-2k(1+\delta)(\rho-2)+(1+t)^2[\rho-3+\delta(\rho-1)]\right)^2} > 0; \text{ 同理可得 } \frac{\partial p_1^{s*}}{\partial \delta} < 0,$$

$$\frac{\partial p_2^{s*}}{\partial \delta} = \frac{-2k(a-te_0)(t^2-1)(\rho-2)}{\left(-2k(1+\delta)(\rho-2)+(1+t)^2[\rho-3+\delta(\rho-1)]\right)^2} < 0,$$

$$\frac{\partial e^{s*}}{\partial \delta} = \frac{4k(a-te_0)(1+t)(\rho-2)}{\left(-2k(1+\delta)(\rho-2)+(1+t)^2[\rho-3+\delta(\rho-1)]\right)^2} < 0,$$

$$\frac{\partial U_n^{s*}}{\partial \delta} = \frac{k^2(a-te_0)^2[2k(1+\delta)(2-\rho)+(1+t)^2(7+5\delta-7\rho(1+\delta)+2(1+\delta)\rho^2)]}{\left(2k(1+\delta)(\rho-2)-(1+t)^2[\rho-3+\delta(\rho-1)]\right)^3} < 0,$$

$$\frac{\partial q_2^{s*}}{\partial \delta} = \frac{k(a-te_0)[(1+t)^2(\rho-1)+2k(\rho-2)]}{\left(-2k(1+\delta)(\rho-2)+(1+t)^2[\rho-3+\delta(\rho-1)]\right)^2} < 0,$$

$$\frac{\partial U_m^{s*}}{\partial \delta} = \frac{2k^2(a-te_0)^2(\rho-2)}{\left(-2k(1+\delta)(\rho-2)+(1+t)^2[\rho-3+\delta(\rho-1)]\right)^2} < 0.$$

$$2) \text{ 当 } k > \frac{(1+t)^2}{2\delta} \text{ 时, } \frac{\partial w^{s*}}{\partial \rho} = \frac{-k(a-te_0)(1+t)(1-\delta^2)[4k(1+\delta)-(1+t)(4+\delta+t(2+\delta))]}{\left(-2k(1+\delta)(\rho-2)+(1+t)^2[\rho-3+\delta(\rho-1)]\right)^2} < 0,$$

$$\frac{\partial p_1^{s*}}{\partial \rho} = \frac{k(a-te_0)(1+t)(1-\delta^2)[(1+t)(3+t)-2k(1+\delta)]}{\left(-2k(1+\delta)(\rho-2)+(1+t)^2[\rho-3+\delta(\rho-1)]\right)^2} < 0,$$

$$\frac{\partial q_1^{s*}}{\partial \rho} = \frac{k(a-te_0)(1+\delta)[2k-(1+t)^2]}{\left(-2k(1+\delta)(\rho-2)+(1+t)^2[\rho-3+\delta(\rho-1)]\right)^2} > 0,$$

$$\frac{\partial q_2^{s*}}{\partial \rho} = \frac{k(a-te_0)(1+\delta)[(1+t)^2-2k\delta]}{\left(-2k(1+\delta)(\rho-2)+(1+t)^2[\rho-3+\delta(\rho-1)]\right)^2} < 0,$$

$$\frac{\partial \pi_m^{s*}}{\partial \rho} = \frac{2k^2(a-te_0)^2[2k-(1+t)^2](1-\delta)(1+\delta)^2\rho}{\left(2k(1+\delta)(\rho-2)-(1+t)^2[\rho-3+\delta(\rho-1)]\right)^3} < 0,$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial \pi_r^{s*}}{\partial \rho} &= \frac{2k^2(a-te_0)^2[2k-(1+t)^2](\delta-1)(1+\delta)^2}{\left(2k(1+\delta)(\rho-2)-(1+t)^2[\rho-3+\delta(\rho-1)]\right)^3} > 0, \\ \frac{\partial \pi_{sc}^{s*}}{\partial \rho} &= \frac{-2k^2(a-te_0)^2[2k-(1+t)^2](\delta-1)(\rho-1)(1+\delta)^2}{\left(2k(1+\delta)(\rho-2)-(1+t)^2[\rho-3+\delta(\rho-1)]\right)^3} > 0; \\ \frac{\partial w^{s*}}{\partial \delta} &= \frac{k(te_0-a)\left\{4-4t^2+\left[-4k(1+\delta)^2+(1+t)(-1+\delta(6+\delta)+t(3+6\delta+\delta^2))\right]\rho-\left[(1+t)^2-2k\right]\delta^2(1+\delta)^2\right\}}{\left(-2k(1+\delta)(\rho-2)+(1+t)^2[\rho-3+\delta(\rho-1)]\right)^2}, \\ &> 0\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial q_1^{s*}}{\partial \delta} &= \frac{k(a-te_0)[2k(\rho-2)-(1+t)^2(\rho-1)]}{\left(-2k(1+\delta)(\rho-2)+(1+t)^2[\rho-3+\delta(\rho-1)]\right)^2} < 0, \\ \frac{\partial \pi_m^{s*}}{\partial \delta} &= \frac{4k^2(a-te_0)^2\left\{2k(1+\delta)(\rho-2)(\rho-1)-(1+t)^2[3+\delta+(1+\delta)(\rho-3)\rho]\right\}}{\left(2k(1+\delta)(\rho-2)-(1+t)^2[\rho-3+\delta(\rho-1)]\right)^3} < 0, \\ \frac{\partial \pi_r^{s*}}{\partial \delta} &= \frac{-2k^2(a-te_0)^2[2k(1+\delta)(\rho-2)-(1+t)^2(\rho-1+\delta(\rho-3))]}{\left(2k(1+\delta)(\rho-2)-(1+t)^2[\rho-3+\delta(\rho-1)]\right)^3} < 0, \\ \frac{\partial \pi_{sc}^{s*}}{\partial \delta} &= \frac{2k^2(a-te_0)^2\left\{2k(1+\delta)(\rho-2)(2\rho-3)-(1+t)^2[7+5\delta+\rho(1+\delta)(2\rho-7)]\right\}}{\left(2k(1+\delta)(\rho-2)-(1+t)^2[\rho-3+\delta(\rho-1)]\right)^3} < 0.\end{aligned}$$

成本分担契约中成本分担比例的取值范围是  $\max\{A_1, A_3\} \leq \theta \leq A_2$ , 其中,

$$\begin{aligned}A_1 &= 1 - \frac{k(1+\delta)((\rho-1)(1+\delta+\delta^2(-3-\rho+\delta(1+2\delta)(\rho-1))))}{2(1+t)^2(-1+\delta^2(\rho-1))^2} \\ &\quad - \frac{\left((1+t)^2-k(1+\delta)\right)^2\left((1+t)^2(\rho-3+\delta(\rho-1))^2-2k(1+\delta)(6+\rho(\rho-6)+\delta(2+\rho(\rho-2)))\right)}{(1+t)^2\left(-2k(1+\delta)(\rho-2)+(1+t)^2(\rho-3+\delta(\rho-1))\right)^2}, \\ A_2 &= \frac{k(1-\delta^2)}{2(1+t)^2(-1+\delta^2(\rho-1))^2} - \frac{2k(1-\delta^2)((1+t)^2-k(1+\delta))^2}{(1+t)^2\left(-2k(1+\delta)(\rho-2)+(1+t)^2(\rho-3+\delta(\rho-1))\right)^2}, \\ A_3 &= \frac{1}{1-\rho} + \frac{k(1+\rho+\delta(2-\delta(3+2\delta)(\rho-1)))}{2(1+t)^2(-1+\delta^2(\rho-1))(1-\rho)} \\ &\quad + \frac{2(\rho-3+\delta(\rho-1))((1+t)^2-k(1+\delta))^2}{(1-\rho)(1+t)^2\left(4k(1+\delta)(\rho-2)-2(1+t)^2(\rho-3+\delta(\rho-1))\right)^2}\end{aligned}$$