

# 级差碳税机制下二级易变质品供应链定价与库存研究

赵孙媛

长沙理工大学数学与统计学院, 湖南 长沙

收稿日期: 2024年4月29日; 录用日期: 2024年5月22日; 发布日期: 2024年5月31日

## 摘要

基于“碳达峰”目标测算碳排放强度, 动态设置碳限额并设计级差碳税机制, 针对由单个零售商和单个制造商组成的二级易变质品供应链, 考虑需求与货架库存量有关并允许缺货, 分别构建分散决策和集中决策下的定价与库存优化模型。运用Stackelberg博弈理论和逆向归纳法, 分析两种决策下制造商的最优批发价格和零售商的最优库存。数值实验表明, 变质率增加会导致分散决策和集中决策下的最优预期总利润下降, 而存货影响因子增加会提高两种决策的预期总利润。单位惩罚碳税对分散决策影响有限, 但会显著降低集中决策预期总利润。对比两种决策, 集中决策下预期总利润更大, 但碳减排效果不如分散决策, 可适当提高单位惩罚碳税以降低碳排放量。本文的研究为碳限额与级差碳税机制下的供应链定价与库存决策提供有益启示。

## 关键词

碳达峰, 碳限额, 级差碳税, 易变质品供应链

# Pricing and Inventory Optimization of Two-Echelon Supply Chain with Deteriorating Items under Differential Carbon Tax Mechanism

Sunyuan Zhao

School of Mathematics and Statistics, Changsha University of Science and Technology, Changsha Hunan

Received: Apr. 29<sup>th</sup>, 2024; accepted: May 22<sup>nd</sup>, 2024; published: May 31<sup>st</sup>, 2024

## Abstract

Based on the goal of “peak carbon dioxide emissions”, this study measures carbon emission intensity, dynamically sets a carbon allowance and differential carbon tax mechanism, designs pricing and inventory optimization models under decentralized and centralized decision making for a two-echelon deteriorating items supply chain consisting of a single retailer and a single manufacturer, considering that the demand is related to the amount of shelf inventory and allowing for stock-outs. In addition, this study uses Stackelberg game theory and backward induction, to analyse the optimal wholesale price of the manufacturer and the optimal inventory of the retailer under the two decisions. Numerical experiments show that an increase in the deterioration rate leads to a decrease in the optimal expected profit under both decentralised and centralised decisions, while an increase in the inventory impact factor increases the optimal profit for both decisions. A unit penalty carbon tax has a limited effect on the decentralised decision but significantly reduces the expected profit of the centralised decision. Comparing the two decisions, the optimal profit is larger under the centralised decision, but the carbon emission reduction effect is not as good as the decentralised decision, and the unit penalty carbon tax can be increased appropriately to reduce carbon emissions. The research in this study provides useful insights for supply chain pricing and inventory decisions under the carbon allowance and differential carbon tax mechanisms.

## Keywords

Carbon Peak, Carbon Quota, Differential Carbon Tax, Deterioration Supply Chain

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

二氧化碳的过度排放造成温室效应，严重损害了社会经济和生态环境，为保证人类社会的可持续发展，各个国家研究了许多低碳政策，其中，碳税政策在降低碳排放量方面产生了积极的效果[1]-[6]。中国也积极采取行动，在2020年提出“碳达峰、碳中和”目标，由此，如何在碳税政策下实现碳达峰、碳中和目标成为重要的研究问题。同时，供应链在运作过程中会产生大量碳排放，碳税政策的实施影响了供应链利润，如何在碳税政策下实现自身利润最大化成为了供应链决策的重要问题。

目前，许多学者在碳税政策下对供应链决策展开了系列研究。Halat K等[7]考虑了多级供应链下的分散、纵向向下合作、纵向向上合作和横向合作结构，对比碳税对每个结构的影响。Cheng P等[8]研究具有消费者低碳偏好和碳税的闭环供应链，得到各企业的非合作博弈模型均衡条件，发现约束碳排放量会刺激制造商提高绿色技术投资水平。对于制造商和零售商组成的双渠道闭环供应链，Zhang Y等[9]通过逆向归纳法求解其中的Stackelberg博弈模型，发现碳税过高会增加供应链系统的不稳定性。Golpîra H等[10]使用鲁棒混合整数线性规划来应对市场需求不确定性，研究碳限额、碳配额与交易和碳税政策下可持续闭环供应链的稳健性。根据政府对于企业超出碳限额的容忍程度，戢守峰等[11]设置级差碳税，基于Stackelberg博弈理论，研究了多级供应链中不同主体在碳限额与碳税机制下的生产-库存系统优化策略，证明征收碳税是未来建设低碳社会的可行选择。

上述文献所研究的对象都是非变质产品。事实上，很多产品在生产、运输和存储等过程中会发生变质，这类产品被称为易变质品[12]，如水果、蔬菜、肉制品以及牛乳制品等。在低收入和中等收入国家，大约 40% 的新鲜产品在到达消费者手中之前就被浪费[13]。在中国，果蔬产品从采摘到消费者手中的平均损耗率高达 25%~30%，每年损失近 890 亿美元[14]。对于易变质品的研究，一方面是采取有效的保鲜措施以减少易变质品的损耗，但这可能会消耗更多能源并导致大量碳排放[15]。Murmu V 等[15]研究依赖质量和销售价格的易变质品，发现工厂面临需求中断时，会加大对易变质品的保鲜力度，导致碳排放量激增。另一方面是进行易变质品的供应链管理，以提升易变质品供应链管理水平和有效降低碳排放量。Yadav S 等[16]讨论了碳税政策下易变质品库存模型，确定最佳销售周期和销售价格，证明碳税政策是减少碳排放量的有效工具。Zheng C [17]建立了在线渠道、零售渠道和双渠道库存模型，运用两阶段 Stackelberg 博弈理论，发现碳税有助于减少碳排放，但会导致农民利润受损。

综上所述，实施碳税有助于抑制企业碳排放，达到保护环境的目的。然而，上述文献大多是讨论单个企业在固定碳税政策下易变质品的运营问题，很少对级差碳税机制下易变质品供应链问题展开研究。相较于传统的固定碳税机制，级差碳税机制下企业支付碳税最低，可获得利润最高[18]，能够使企业更加精确地根据自身实际碳排放情况来支付碳税的数额，具有更大的灵活性，可以更加公平地分摊碳排放成本。

基于此，本文设计了碳限额与级差碳税机制，将其与允许缺货情形的二级易变质品供应链模型结合研究，假设需求与货架库存量有关，从利润最大化的角度构建供应链的分散决策与集中决策模型，并分析变质率、存货影响因子和单位惩罚碳税对最优解和利润的影响。本文的创新点在于：1) 通过将“碳达峰”目标与企业的实际产值相结合，动态设置碳限额和级差碳税机制，这一机制使得碳税的数值会随着企业的产值和碳排放强度的变化而调整，为不同企业提供更实用、更个性化的碳排放管理方案。2) 考虑缺货情形，将其与级差碳税机制结合，拓展了当前碳限额与级差碳税机制下的易变质品供应链模型。

## 2. 符号与说明基本假设

### 2.1. 符号说明

模型参数及含义见表 1。

Table 1. Model parameters and meanings

表 1. 模型参数及含义

参数符号	参数含义	参数符号	参数含义	参数符号	参数含义
$S_m$	一次制造易变质品的启动成本	$\xi$	易变质品的单位缺货成本	$G_i^t$	企业 <i>i</i> 第 <i>t</i> 年的生产总值
$c_m$	易变质品的单位生产成本	$K$	一次订货的固定成本	$E_i$	企业 <i>i</i> 实际碳排放量
$\omega$	易变质品的单位批发价格	$\tau$	缺货率, $0 < \tau < 1$	$c_{e1}$	单位基础碳税
$Q$	易变质品的生产数量(订购量)	$I(t)$	<i>t</i> 时刻产品的库存水平	$c_{e2}$	单位惩罚碳税
$P_m$	制造商预期利润	$T$	有限计划期	$C_r^{e1}$	基础碳税总成本
$\theta$	易变质品的变质率, $0 < \theta < 1$	$t_0$	库存为零时间点, $0 \leq t_0 \leq T$	$C_r^{e2}$	惩罚碳税总成本
$p$	易变质品的单位销售价格	$P_r$	零售商预期利润	$e_s$	一次订购产生的固定碳排放量

续表

$h_r$	易变质品的单位 库存成本	$E_r$	碳限额	$e_o$	订购时产生的 单位碳排放量
$c_\theta$	易变质品的单位 处理成本	$\chi_i$	第 $t$ 年碳排放强度限额	$e_h$	存贮时产生的 单位碳排放量

## 2.2. 基本假设

- 1) 市场需求与货架库存量有关，零售商的货架库存量会影响顾客在购买需求，假定市场需求率为  $D(t) = d_0 + \sigma I(t)$  [19] [20]，式中， $d_0$  为市场基本需求量， $\sigma$  为存货影响因子。
- 2) 制造商实行按需生产方式，不考虑制造商处的库存成本和产品变质。
- 3) 在零售商的有限计划期内，产品变质后会被立即处理，不占用库存且残值为零。
- 4) 零售商为碳排放主体，碳排放量主要来源于：一次订购产生的固定碳排放量，订购和存贮过程中产生的单位碳排放量。
- 5) 为促进减排力度，假设单位基础碳税小于单位惩罚碳税，即  $c_{e1} < c_{e2}$ 。
- 6) 基于本文允许缺货的情况，参考文献[20]中的假设，假定在分散决策下零售商的边际收益小于边际成本，同时假定在集中决策下供应链的边际收益小于边际成本。

## 3. 碳限额与极差碳税机制

### 3.1. 碳限额

为如期实现碳达峰目标，中国在气候雄心峰会上承诺：到 2030 年，中国单位国内生产总值二氧化碳排放将比 2005 年下降 65% 以上。从 2005 年到 2020 年底，中国单位生产总值二氧化碳排放已下降 48.4%。世界资源研究所(WRI)数据显示，2005 年，中国 GDP 总量 18.4 万亿元，二氧化碳排放总量 55.7 亿吨，碳排放强度为 3.02 吨/万元。由以上数据计算出 2020 年碳排放强度的预期数值约为 1.56 吨/万元，而 2030 年碳排放强度至多约为 1.06 吨/万元才能达到目标。

经测算，在 2021 年至 2030 年的十年之内，如果碳排放强度保持每年 4% 的下降幅度，则 2030 年的碳排放强度约为 0.93 吨/万元，比 1.06 吨/万元小，说明这种测算方式可以保证“碳达峰”目标的实现。基于此，在这十年间，根据测算的碳排放强度与企业的生产总值，动态设置碳限额公式为

$$E_r = \chi_i G_i^i \quad (1)$$

### 3.2. 级差碳税机制

在既定的承诺目标下，以每年碳排放强度下降 4% 的幅度来计算碳限额，进而设置级差碳税，由此判断企业除了缴纳基础碳税外，是否需要缴纳惩罚碳税。具体级差碳税公式如下：

$$\lambda_i = E_r - E_i = \chi_i G_i^i - E_i = \begin{cases} \geq 0 & \text{无惩罚碳税} \\ < 0 & \text{有惩罚碳税} \end{cases} \quad (2)$$

其中， $\lambda_i$  表示碳限额  $E_r$  与企业  $i$  实际碳排放量  $E_i$  的差值，当  $\lambda_i \geq 0$  时，表示企业  $i$  实际碳排放量未超出碳限额，只需要缴纳基础碳税；当  $\lambda_i < 0$  时，表示企业  $i$  实际碳排放量超出碳限额，需缴纳基础碳税和惩罚碳税。

## 4. 模型建立

本文中的二级供应链由单个零售商(企业 1)和单个制造商(企业 2)组成，零售商为碳排放主体[12]。零

售商的有限计划期  $T$  分为销售期  $[0, t_0]$  和缺货期  $[t_0, T]$ ，其库存系统如图 1 所示。

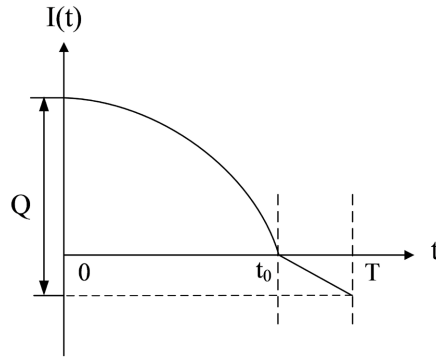


Figure 1. Schematic diagram of retailer inventory operation

图 1. 零售商库存运行示意图

在  $[0, T]$  内，零售商瞬时库存水平函数：

$$\frac{dI(t)}{dt} = \begin{cases} -d_0 - (\sigma + \theta)I(t) & 0 \leq t \leq t_0 \\ -\tau d_0 & t_0 \leq t \leq T \end{cases}$$

由边界条件  $I(t_0) = 0$ ，可得：

$$I(t) = \begin{cases} d_0 \int_t^{t_0} e^{(\sigma+\theta)(\mu-t)} d\mu = \frac{d_0}{\sigma+\theta} (e^{(\sigma+\theta)(t_0-t)} - 1) & 0 \leq t \leq t_0 \\ d_0 \int_t^{t_0} \tau d\mu = d_0 \tau (t_0 - t) & t_0 \leq t \leq T \end{cases}$$

由此可得零售商订购量：

$$Q = I(0) - I(T) = \frac{d_0}{\sigma + \theta} [e^{(\sigma+\theta)t_0} - 1] - d_0 \tau (t_0 - T)$$

在销售期  $[0, t_0]$  内的库存持有量：

$$CI = \int_0^{t_0} \left( \int_0^{t_0} d_0 e^{(\sigma+\theta)(\mu-t)} d\mu \right) dt = d_0 \left[ \frac{1}{(\sigma+\theta)^2} (e^{(\sigma+\theta)t_0} - 1) - \frac{t_0}{\sigma+\theta} \right]$$

在  $[t_0, T]$  上的缺货量：

$$N_1 = \int_{t_0}^T \left( \int_{t_0}^{t_0} -d_0 \tau d\mu \right) dt = d_0 \tau \left( \frac{1}{2} T^2 + \frac{1}{2} t_0^2 - t_0 T \right)$$

零售商在  $[0, T]$  内的相关函数分别如下所示：

1) 订购成本： $W_r = \omega Q + K = \omega \left[ \frac{d_0}{\sigma + \theta} (e^{(\sigma+\theta)t_0} - 1) - d_0 \tau (t_0 - T) \right] + K$

2) 缺货成本： $S_\xi = \xi N_1 = \xi d_0 \tau \left( \frac{1}{2} T^2 + \frac{1}{2} t_0^2 - t_0 T \right)$

3) 库存持有成本： $H_r = h_r CI = h_r d_0 \left[ \frac{1}{(\sigma + \theta)^2} (e^{(\sigma+\theta)t_0} - 1) - \frac{t_0}{\sigma + \theta} \right]$

4) 处理变质品成本:  $C_\theta = \theta c_\theta CI = \theta c_\theta d_0 \left[ \frac{1}{(\sigma + \theta)^2} (e^{(\sigma + \theta)t_0} - 1) - \frac{t_0}{\sigma + \theta} \right]$

5) 零售商销售收益:

$$\begin{aligned} G_r^1 &= p \left[ \int_0^{t_0} D dt + d_0 \tau (T - t_0) \right] \\ &= p d_0 \left[ t_0 - \frac{\sigma}{(\sigma + \theta)^2} - \frac{\sigma t_0}{\sigma + \theta} + \frac{\sigma}{(\sigma + \theta)^2} e^{t_0(\sigma + \theta)} + \tau (T - t_0) \right] \end{aligned}$$

6) 零售商在  $[0, T]$  内实际碳排放量:

$$\begin{aligned} E_1 = E_r^i &= e_s + e_h CI + e_\omega Q \\ &= e_s + e_h d_0 \left[ \frac{1}{(\sigma + \theta)^2} (e^{(\sigma + \theta)t_0} - 1) - \frac{t_0}{\sigma + \theta} \right] \\ &\quad + e_\omega \frac{d_0}{\sigma + \theta} [e^{(\sigma + \theta)t_0} - 1] + e_\omega d_0 \tau (T - t_0) \end{aligned}$$

7) 碳限额:

$$E_r = \chi_i G_r^1 = \chi_i p d_0 \left[ t_0 - \frac{\sigma}{(\sigma + \theta)^2} - \frac{\sigma t_0}{\sigma + \theta} + \frac{\sigma}{(\sigma + \theta)^2} e^{t_0(\sigma + \theta)} + \tau (T - t_0) \right]$$

8) 级差碳税:

$$C_r^e = C_r^{e1} + C_r^{e2} = \begin{cases} E_1 c_{e1} & E_1 \leq E_r \\ E_r c_{e1} + (E_1 - E_r) c_{e2} & E_1 > E_r \end{cases}$$

注: 当  $E_1 \leq E_r$  时, 企业实际碳排放量未超出碳限额,

$$C_r^{e2} = 0$$

$$\begin{aligned} C_r^e &= c_{e1} \left\{ e_s + e_h d_0 \left[ \frac{1}{(\sigma + \theta)^2} (e^{(\sigma + \theta)t_0} - 1) - \frac{t_0}{\sigma + \theta} \right] \right. \\ &\quad \left. + e_\omega \frac{d_0}{\sigma + \theta} [e^{(\sigma + \theta)t_0} - 1] + e_\omega d_0 \tau (T - t_0) \right\} \end{aligned}$$

当  $E_1 > E_r$  时, 企业实际碳排放量超出碳限额,

$$C_r^{e2} = (E_1 - E_r) c_{e2}$$

$$\begin{aligned} C_r^e &= c_{e1} \chi_i p d_0 \left[ t_0 - \frac{\sigma}{(\sigma + \theta)^2} - \frac{\sigma t_0}{\sigma + \theta} + \frac{\sigma}{(\sigma + \theta)^2} e^{t_0(\sigma + \theta)} + \tau (T - t_0) \right] \\ &\quad + c_{e2} \left\{ e_s + e_h d_0 \left[ \frac{1}{(\sigma + \theta)^2} (e^{(\sigma + \theta)t_0} - 1) - \frac{t_0}{\sigma + \theta} \right] + e_\omega \frac{d_0}{\sigma + \theta} [e^{(\sigma + \theta)t_0} - 1] \right. \\ &\quad \left. + e_\omega d_0 \tau (T - t_0) - \chi_i p d_0 \left[ t_0 - \frac{\sigma}{(\sigma + \theta)^2} - \frac{\sigma t_0}{\sigma + \theta} + \frac{\sigma}{(\sigma + \theta)^2} e^{t_0(\sigma + \theta)} + \tau (T - t_0) \right] \right\} \end{aligned}$$

9) 零售商在  $[0, T]$  内的总成本:

$$\begin{aligned}
S_c^r &= W_r + S_\xi + H_r + C_\theta + C_r^e \\
&= \omega \left[ \frac{d_0}{\sigma + \theta} \left( e^{(\sigma + \theta)t_0} - 1 \right) - d_0 \tau (t_0 - T) \right] + K - \xi d_0 \tau \left( t_0 T - \frac{1}{2} T^2 - \frac{1}{2} t_0^2 \right) \\
&\quad + d_0 (h_r + \theta c_\theta) \left[ \frac{1}{(\sigma + \theta)^2} \left( e^{(\sigma + \theta)t_0} - 1 \right) - \frac{t_0}{\sigma + \theta} \right] + C_r^e
\end{aligned}$$

10) 零售商在  $[0, T]$  内的预期利润:

$$\begin{aligned}
P_r &= G_t^1 - S_c^r \\
&= p d_0 \left[ t_0 - \frac{\sigma}{(\sigma + \theta)^2} - \frac{\sigma t_0}{\sigma + \theta} + \frac{\sigma}{(\sigma + \theta)^2} e^{t_0(\sigma + \theta)} + \tau (T - t_0) \right] \\
&\quad - \omega \left[ \frac{d_0}{\sigma + \theta} \left( e^{(\sigma + \theta)t_0} - 1 \right) - d_0 \tau (t_0 - T) \right] - K - \xi d_0 \tau \left( \frac{1}{2} T^2 + \frac{1}{2} t_0^2 - t_0 T \right) \\
&\quad - d_0 (h_r + \theta c_\theta) \left[ \frac{1}{(\sigma + \theta)^2} \left( e^{(\sigma + \theta)t_0} - 1 \right) - \frac{t_0}{\sigma + \theta} \right] - C_r^e
\end{aligned}$$

制造商在  $[0, T]$  内的相关函数分别如下所示:

- 1) 生产成本:  $C_m = c_m Q = c_m \left[ \frac{d_0}{\sigma + \theta} \left( e^{(\sigma + \theta)t_0} - 1 \right) - d_0 \tau (t_0 - T) \right]$ ;
- 2) 制造商的总成本:  $S_c^m = S_m + C_m = S_m + c_m \left[ \frac{d_0}{\sigma + \theta} \left( e^{(\sigma + \theta)t_0} - 1 \right) - d_0 \tau (t_0 - T) \right]$ ;
- 3) 制造商批发收益:  $G_t^2 = \omega Q = \omega \left[ \frac{d_0}{\sigma + \theta} \left( e^{(\sigma + \theta)t_0} - 1 \right) - d_0 \tau (t_0 - T) \right]$ ;
- 4) 制造商的预期利润:  $P_m = G_t^2 - S_c^m = (\omega - c_m) \left[ \frac{d_0}{\sigma + \theta} \left( e^{(\sigma + \theta)t_0} - 1 \right) - d_0 \tau (t_0 - T) \right] - S_m$ 。

为简化公式, 本文采用与文献[21]相同的处理方式, 将泰勒展开式  $e^{(\sigma + \theta)t_0} \approx 1 + (\sigma + \theta)t_0 + \frac{(\sigma + \theta)^2 t_0^2}{2}$  代入零售商和制造商的利润函数求解。

#### 4.1. 分散决策

在分散决策中, 运用 Stackelberg 博弈和逆向归纳法, 按照级差碳税机制, 考虑企业实际碳排放量是否超出碳限额的两种情况, 供应链成员以自身利润最大化为目标来决策。在博弈的第一阶段, 制造商为领导者, 决策批发价格  $\omega$ ; 在博弈的第二阶段, 零售商为跟随者, 决策库存为零时间点  $t_0$ 。

##### 4.1.1. 碳排放量未超出碳限额

在此情况下, 制造商预期利润函数为  $P_m = (\omega - c_m) \left[ \left( d_0 t_0 + d_0 \frac{(\sigma + \theta) t_0^2}{2} \right) - d_0 \tau (t_0 - T) \right] - S_m$ , 零售商预期利润函数为

$$\begin{aligned}
P_r &= p d_0 \left[ t_0 + \sigma \frac{t_0^2}{2} + \tau (T - t_0) \right] - d_0 (h_r + \theta c_\theta) \frac{t_0^2}{2} \\
&\quad - \omega \left[ \left( d_0 t_0 + d_0 \frac{(\sigma + \theta) t_0^2}{2} \right) - d_0 \tau (t_0 - T) \right] - K + \xi d_0 \tau \left( t_0 T - \frac{1}{2} T^2 - \frac{1}{2} t_0^2 \right) \\
&\quad - c_{e1} \left\{ e_s + e_h d_0 \frac{t_0^2}{2} + e_\omega d_0 \left[ t_0 + \frac{(\sigma + \theta) t_0^2}{2} \right] + e_\tau d_0 \tau (T - t_0) \right\}
\end{aligned}$$

**命题 1** 当批发价格满足条件(3)时, 分散决策下的最优批发价格存在, 且制造商预期利润函数有最大值; 同时, 存在最优库存为零时间点, 使得零售商预期利润函数有最大值,

$$\begin{aligned} E_1 - E_r &\leq 0 \\ 0 &\leq t_0 \leq T \\ \omega &\leq 3c_m + \frac{2A_1}{\sigma + \theta} \\ c_m &\leq \omega \leq p \end{aligned} \quad (3)$$

其中  $A_1 = \xi\tau + h_r + \theta c_\theta + c_{e1} [e_h + e_\omega (\sigma + \theta)] - p\sigma$ 。

**证明:**

对  $P_{1r}$  求  $t_0$  的二阶导数, 得  $\frac{\partial^2 P_{1r}}{\partial t_0^2} = p\sigma d_0 - \omega d_0 (\sigma + \theta) - \xi\tau d_0 - d_0 (h_r + \theta c_\theta) - d_0 c_{e1} e_h - d_0 c_{e1} e_\omega (\sigma + \theta)$ ,

根据假设(6), 得  $p\sigma < \omega(\sigma + \theta) + \xi\tau + h_r + \theta c_\theta + c_{e1} [e_h + e_\omega (\sigma + \theta)]$  成立, 则  $\frac{\partial^2 P_{1r}}{\partial t_0^2} \leq 0$  成立, 即  $P_{1r}$  是关于  $t_0$

的凹函数, 故存在最大值。对  $P_{1r}$  求  $t_0$  的一阶导数并令其等于零, 得  $\frac{\partial P_{1r}}{\partial t_0} = pd_0 (1 + \sigma t_0 - \tau) - \omega d_0 [1 + (\sigma + \theta)t_0 - \tau] + \xi d_0 \tau (T - t_0) - d_0 t_0 (h_r + \theta c_\theta) - c_{e1} d_0 \{e_h t_0 + e_\omega [1 + (\sigma + \theta)t_0 - \tau]\} = 0$ , 解得零售商的最优反应函数

$t_0^*(\omega) = \frac{(p - c_{e1} e_\omega - \omega)(1 - \tau) + \xi\tau T}{\omega(\sigma + \theta) + A_1}$ , 将  $t_0^*(\omega)$  代入  $P_m$ 、 $E_1$  和  $E_r$ , 对  $P_m$  求  $\omega$  的二阶导数, 得  $\frac{\partial^2 P_m}{\partial \omega^2} =$

$\frac{\{(\tau - 1)A_1 - (\sigma + \theta)[(p - c_{e1} e_\omega)(1 - \tau) + \xi\tau T]\}^2}{[\omega(\sigma + \theta) + A_1]^3} \left[ \frac{3d_0 C(\omega - c_m)}{\omega(\sigma + \theta) + A_1} - 2d_0 \right]$ 。当  $\omega \leq 3c_m + \frac{2A_1}{\sigma + \theta}$  时, 得  $\frac{\partial^2 P_m}{\partial \omega^2} \leq 0$  成

立, 即  $P_m$  是关于  $\omega$  的凹函数, 存在最大值。 $-P_m$  为凸函数, 可构造凸优化模型:

$$\begin{aligned} \min_{\omega} \quad & -P_m \\ \text{s.t.} \quad & E_1 - E_r \leq 0 \\ & 0 \leq t_0^*(\omega) \leq T \\ & \omega \leq 3c_m + \frac{2A_1}{\sigma + \theta} \\ & c_m \leq \omega \leq p \end{aligned}$$

易知, 满足上述约束条件的解区间为凸集或为有限个凸集的并集, 且为目标函数  $-P_m$  的子区间, 根据凸函数的性质, 则此凸优化模型存在最优解, 为最优批发价格, 制造商利润函数有最大值。

证毕。

#### 4.1.2. 碳排放量超出碳限额

在此情况下, 制造商预期利润函数为  $P_m$ , 零售商预期利润函数为

$$\begin{aligned} P_{2r} = & pd_0 \left[ t_0 + \sigma \frac{t_0^2}{2} + \tau(T - t_0) \right] - d_0 \frac{t_0^2}{2} (h_r + \theta c_\theta) \\ & - \omega d_0 \left[ \left( t_0 + \frac{(\sigma + \theta)t_0^2}{2} \right) - \tau(t_0 - T) \right] - K + \xi d_0 \tau \left( t_0 T - \frac{1}{2} T^2 - \frac{1}{2} t_0^2 \right) \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
& -c_{e1}\chi_i p d_0 \left[ t_0 + \sigma \frac{t_0^2}{2} + \tau(T-t_0) \right] - c_{e2} \left\{ e_s + e_h d_0 \left[ \left( \frac{1}{\sigma+\theta} t_0 + \frac{t_0^2}{2} \right) - \frac{t_0}{\sigma+\theta} \right] \right. \\
& \left. + e_\omega \left[ d_0 t_0 + d_0 \frac{(\sigma+\theta)t_0^2}{2} \right] + e_\omega d_0 \tau(T-t_0) - \chi_i p d_0 \left[ t_0 + \sigma \frac{t_0^2}{2} + \tau(T-t_0) \right] \right\}
\end{aligned}$$

**命题 2** 当批发价格满足条件(4)时, 分散决策下的最优批发价格存在, 且制造商预期利润函数有最大值; 同时, 存在最优库存为零时间点, 使得零售商预期利润函数有最大值,

$$\begin{aligned}
& E_r - E_1 \leq 0 \\
& 0 \leq t_0 \leq T \\
& \omega \leq 3c_m + \frac{2A_2}{\sigma+\theta} \\
& c_m \leq \omega \leq p
\end{aligned} \tag{4}$$

其中  $A_2 = \xi\tau + h_r + \theta c_\theta + c_{e1}\chi_i p\sigma + c_{e2} [e_h + e_\omega(\sigma+\theta) - \chi_i p\sigma] - p\sigma$ 。

**证明:**

对  $P_{2r}$  求  $t_0$  的二阶导数,  $\frac{\partial^2 P_{2r}}{\partial t_0^2} = d_0 \{ p\sigma(1-c_{e1}\chi_i) - \omega(\sigma+\theta) - \xi\tau - (h_r + \theta c_\theta) - c_{e2} [e_h + e_\omega(\sigma+\theta) - \chi_i p\sigma] \}$ ,

根据假设(6),  $p\sigma < \omega(\sigma+\theta) + \xi\tau + h_r + \theta c_\theta + c_{e1}\chi_i p\sigma + c_{e2} [e_h + e_\omega(\sigma+\theta) - \chi_i p\sigma]$  成立, 则  $\frac{\partial^2 P_{2r}}{\partial t_0^2} \leq 0$  成立,

即  $P_{2r}$  是关于  $t_0$  的凹函数, 故存在最大值。对  $P_{2r}$  求  $t_0$  的一阶导数并令其等于零, 得

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial P_{2r}}{\partial t_0} = p d_0 (1 + \sigma t_0 - \tau) - \omega d_0 [1 + (\sigma + \theta)t_0 - \tau] + \xi d_0 \tau (T - t_0) - d_0 (h_r + \theta c_\theta) t_0 \\
& - c_{e1}\chi_i p d_0 [1 + \sigma t_0 - \tau] - c_{e2} d_0 \{ e_h t_0 + e_\omega [1 + (\sigma + \theta)t_0 - \tau] - \chi_i p (1 + \sigma t_0 - \tau) \} = 0
\end{aligned}$$

解得零售商的最优反应函数  $t_0^{**}(\omega) = \frac{[p - \omega - c_{e1}\chi_i p - c_{e2}(e_\omega - \chi_i p)](1 - \tau) + \xi\tau T}{\omega(\sigma + \theta) + A_2}$ , 将  $t_0^{**}(\omega)$  代入  $P_m$ 、 $E_1$  和

$E_r$ , 对  $P_m$  求  $\omega$  的二阶导数, 得  $\frac{\partial^2 P_m}{\partial \omega^2} = \frac{\{(\tau-1)A_2 - (\sigma+\theta)[(p-c_{e1}e_\omega)(1-\tau) + \xi\tau T]\}^2}{[\omega(\sigma+\theta) + A_2]^3} \left\{ \frac{3d_0 C(\omega - c_m)}{\omega(\sigma+\theta) + A_2} - 2d_0 \right\}$ 。

当  $\omega \leq 3c_m + \frac{2A_2}{\sigma+\theta}$  时, 得  $\frac{\partial^2 P_m}{\partial \omega^2} \leq 0$  成立, 即  $P_m$  是关于  $\omega$  的凹函数, 存在最大值。 $-P_m$  为凸函数, 可构造凸优化模型:

$$\begin{aligned}
& \min_{\omega} && -P_m \\
& \text{s.t.} && E_r - E_1 \leq 0 \\
& && 0 \leq t_0^{**}(\omega) \leq T \\
& && \omega \leq 3c_m + \frac{2A_2}{\sigma+\theta} \\
& && c_m \leq \omega \leq p
\end{aligned}$$

易知, 满足上述约束条件的解区间为凸集或为有限个凸集的并集, 且为目标函数  $-P_m$  的子区间, 根据凸函数的性质, 则此凸优化模型存在最优解, 为最优批发价格, 制造商利润函数有最大值。

证毕。

## 4.2. 集中决策

在集中决策中, 考虑企业实际碳排放量是否超出碳限额的两种情况, 将制造商和零售商作为一个整

体，以整体供应链利润最大化为目标，决策最优库存为零时间点。

#### 4.2.1. 碳排放量未超出碳限额

在此情况下，供应链预期利润函数为  $P_{1r}$  与  $P_m$  之和

$$\begin{aligned} P_{1r+m} &= P_{1r} + P_m \\ &= pd_0 \left[ t_0 + \sigma \frac{t_0^2}{2} + \tau(T - t_0) \right] - d_0(h_r + \theta c_\theta) \left[ \left( \frac{1}{\sigma + \theta} t_0 + \frac{t_0^2}{2} \right) - \frac{t_0}{\sigma + \theta} \right] \\ &\quad - c_m \left[ \left( d_0 t_0 + d_0 \frac{(\sigma + \theta)t_0^2}{2} \right) - d_0 \tau(t_0 - T) \right] + \xi d_0 \tau \left( t_0 T - \frac{1}{2} T^2 - \frac{1}{2} t_0^2 \right) \\ &\quad - c_{e1} \left\{ e_s + e_h d_0 \left[ \frac{1}{\sigma + \theta} t_0 + \frac{t_0^2}{2} - \frac{t_0}{\sigma + \theta} \right] \right. \\ &\quad \left. + e_\omega d_0 \left[ t_0 + \frac{(\sigma + \theta)t_0^2}{2} \right] + e_\omega d_0 \tau(T - t_0) \right\} - S_m - K \end{aligned}$$

**命题 3** 当库存为零时间点满足条件(5)时，集中决策下的最优库存为零时间点存在，且供应链预期利润函数有最大值，

$$\begin{aligned} E_1 - E_r &\leq 0 \\ 0 &\leq t_0 \leq T \end{aligned} \quad (5)$$

**证明：**

对  $P_{1r+m}$  求  $t_0$  的二阶导数，得  $\frac{\partial^2 P_{1r+m}}{\partial t_0^2} = pd_0\sigma - c_m d_0(\sigma + \theta) - \xi d_0\tau - d_0(h_r + \theta c_\theta) - c_{e1} d_0[e_h - e_\omega(\sigma + \theta)]$ ，

根据假设(6)，得  $p\sigma < c_m(\sigma + \theta) + \xi\tau + h_r + \theta c_\theta + c_{e1}[e_h + e_\omega(\sigma + \theta)]$  成立，则  $\frac{\partial^2 P_{1r+m}}{\partial t_0^2} \leq 0$  成立，即  $P_{1r+m}$  是关于  $t_0$  的凹函数，故存在最大值。 $-P_{1r+m}$  为凸函数，可构造凸优化模型：

$$\begin{aligned} \min_{\omega} \quad & -P_{1r+m} \\ \text{s.t.} \quad & E_1 - E_r \leq 0 \\ & 0 \leq t_0 \leq T \end{aligned}$$

易知，满足上述约束条件的解区间为凸集或为有限个凸集的并集，且为目标函数  $-P_{1r+m}$  的子区间，根据凸函数的性质，则此凸优化模型存在最优解，为最优库存为零时间点，供应链预期利润函数有最大值。证毕。

#### 4.2.2. 碳排放量超出碳限额

在此情况下，供应链预期利润函数为  $P_{2r}$  与  $P_m$  之和

$$\begin{aligned} P_{2r+m} &= P_{2r} + P_m = pd_0 \left[ t_0 + \sigma \frac{t_0^2}{2} + \tau(T - t_0) \right] - c_m \left[ d_0 \left( t_0 + \frac{(\sigma + \theta)t_0^2}{2} \right) - d_0 \tau(t_0 - T) \right] \\ &\quad + \xi d_0 \tau \left( t_0 T - \frac{1}{2} T^2 - \frac{1}{2} t_0^2 \right) - d_0(h_r + \theta c_\theta) \frac{t_0^2}{2} - S_m - K \\ &\quad - c_{e1} \chi_t pd_0 \left[ t_0 + \sigma \frac{t_0^2}{2} + \tau(T - t_0) \right] - c_{e2} \left\{ e_s + e_h d_0 \frac{t_0^2}{2} + e_\omega d_0 \tau(T - t_0) \right. \\ &\quad \left. + e_\omega d_0 \left[ t_0 + \frac{(\sigma + \theta)t_0^2}{2} \right] - \chi_t pd_0 \left[ t_0 + \sigma \frac{t_0^2}{2} + \tau(T - t_0) \right] \right\} \end{aligned}$$

**命题 4** 当库存为零时间点满足条件(6)时, 集中决策下的最优库存为零时间点存在, 且供应链预期利润函数有最大值,

$$\begin{aligned} E_r - E_1 &\leq 0 \\ 0 \leq t_0 &\leq T \end{aligned} \tag{6}$$

**证明:**

对  $P_{2r+m}$  求二阶导数  $\frac{\partial^2 P_{2r+m}}{\partial t_0^2} = d_0 \{ p\sigma(1 - c_{e1}\chi_i) - c_m(\sigma + \theta) - \xi\tau - (h_r + \theta c_\theta) - c_{e2} [e_h + e_\omega(\sigma + \theta) - \chi_i p\sigma] \}$ ,

根据假设(6),  $p\sigma < c_m(\sigma + \theta) + \xi\tau + h_r + \theta c_\theta + c_{e1}\chi_i p\sigma + c_{e2} [e_h + e_\omega(\sigma + \theta) - \chi_i p\sigma]$  成立, 则  $\frac{\partial^2 P_{2r+m}}{\partial t_0^2} \leq 0$  成立, 即  $P_{2r+m}$  是关于  $t_0$  的凹函数, 故存在最大值。  $-P_{2r+m}$  为凸函数, 可构造凸优化模型:

$$\begin{aligned} \min_{\omega} \quad & -P_{2r+m} \\ \text{s.t.} \quad & E_r - E_1 \leq 0 \\ & 0 \leq t_0 \leq T \end{aligned}$$

易知, 满足上述约束条件的解区间为凸集或为有限个凸集的并集, 且为目标函数  $-P_{2r+m}$  的子区间, 根据凸函数的性质, 则此凸优化模型存在最优解, 为最优库存为零时间点, 供应链预期利润函数有最大值。证毕。

## 5. 数值实验与分析

### 5.1. 参数设置

为保证参数设定的客观性, 本文主要参考相关文献[21]的参数设定方式, 结合 2029 年测算得到的碳排放强度数值, 设定基本参数数值为:

$$\begin{aligned} p = 6, d_0 = 100, \sigma = 0.2, \tau = 0.1, T = 10, \theta = 0.1, K = 20, \xi = 0.5, h_r = 0.5, \\ c_\theta = 1, c_{e1} = 0.2, \chi_{2029} = 1, e_s = 200, e_h = 2, e_\omega = 1.5, c_{e2} = 0.5, c_m = 1, S_m = 50 \end{aligned}$$

在分散决策下, 情形 I 表示实际碳排放量未超出碳限额, 情形 II 表示实际碳排放量超出碳限额, 在集中决策下, 情形 III 表示实际碳排放量未超出碳限额, 情形 IV 表示实际碳排放量超出碳限额。使用 Matlab 软件, 按照相关决策公式, 求得各情形下的计算结果如表 2 所示,

**Table 2.** The optimal decision results in four scenarios

**表 2.** 四种情形下的最优决策结果

情形	最优决策结果							
	$\omega$	$t_0$	$Q$	$E_r$	$E_1$	$P_r$	$P_m$	$P_r + P_m$
I	2.01	7.05	1479.25	7385.52	7385.43	1406.19	1441.23	2847.42
II	1.53	7.05	1479.39	7386.17	7386.31	2107.09	740.44	2847.53
III	\	7.05	1479.28	7385.69	7385.65	\	\	2847.46
IV	\	9.67	2371.64	11426.55	13101.78	\	\	3058.42

其中, 在情形 I 和情形 III 下  $i=1$ , 在情形 II 和情形 IV 下  $i=2$ 。

根据计算结果, 分别比较四种情形: 1) 在分散决策下, 情形 I 和情形 II 的最优库存为零时间点相同, 但情形 I 的最优批发价格比情形 II 大, 制造商最优预期利润也较高, 而情形 II 的最优订购量、碳限额和

实际碳排放量比情形 I 高，零售商最优预期利润也更大。在博弈过程中，由于制造商为领导者，不会降低过多批发价格使自身利润降低，会优先保证自身利润最大化，因此选择情形 I 下的最优决策为最终决策。2) 在集中决策下，情形 IV 的最优库存为零时间点、订购量、碳限额和实际碳排放量都比情形 III 更大，此时碳税成本由整个供应链承担，供应链最优预期利润更高，因此选择情形 IV 下的最优决策为最终决策。3) 将分散决策下与集中决策下的最终决策结果进行对比，发现集中决策下供应链最优预期利润更大，但碳排放量更多。

### 5.2. 敏感性分析

对于分散决策和集中决策下四种情形，以预期利润最大化为目标，进一步分析变质率  $\theta$ 、单位惩罚碳税  $c_{e2}$  和存货影响因子  $\sigma$  的变化对分散决策和集中决策下最优库存为零时间点、订购量、碳限额、实际碳排放量和预期利润的影响。

**Table 3.** Sensitivity analysis of deterioration rate  $\theta$  under decentralized decision-making  
**表 3.** 分散决策下变质率  $\theta$  的敏感性分析

$\theta$	决策方式	最优决策结果							
		$\omega$	$t_0$	$Q$	$E_r$	$E_l$	$P_r$	$P_m$	$P_r + P_m$
0.10	分散	2.01	7.05	1479.25	7385.52	7385.43	1406.19	1441.23	2847.42
	集中	\	9.67	2371.64	11426.55	13101.78	\	\	3058.42
0.40	分散	3.03	1.36	277.11	1442.20	799.40	154.56	511.15	665.71
	集中	\	5.09	1333.76	4898.48	4787.38	\	\	1312.84
0.70	分散	3.44	0.66	179.57	984.87	513.41	0.01	388.27	388.28
	集中	\	2.92	746.42	2688.21	2172.15	\	\	800.52
1.00	分散	3.30	0.18	163.80	900.08	473.27	0.01	326.51	326.52
	集中	\	2.05	535.88	1957.34	1423.12	\	\	594.26

表 3 显示了变质率  $\theta$  在 [0.10, 1.00] 范围内，对分散决策和集中决策下最优决策结果的影响。在分散决策下，制造商提高最优批发价格来弥补因订购量下降而引起的利润损失，并控制实际碳排放量在碳限额以内。然而，这些策略未能弥补零售商和制造商的利润损失，两者的最优预期利润均因变质率的上升而下降。在集中决策下，为减小成本，供应链实际碳排放量从超出碳限额降至碳限额范围之内，但最优预期利润仍下降。对比两种决策下的最优决策结果发现，变质率增加时，分散决策下零售商的预期利润远低于制造商并逐渐趋于零，此时零售商选择集中决策更有利。同时，集中决策下最优预期利润总是大于分散决策，但实际碳排放量更多。

**Table 4.** Sensitivity analysis of unit penalty carbon tax  $c_{e2}$  under decentralized decision-making  
**表 4.** 单位惩罚碳税  $c_{e2}$  的敏感性分析

$c_{e2}$	决策方式	最优决策结果							
		$\omega$	$t_0$	$Q$	$E_r$	$E_l$	$P_r$	$P_m$	$P_r + P_m$
0.50	分散	2.01	7.05	1479.25	7385.52	7385.43	1406.19	1441.23	2847.42
	集中	\	9.67	2371.64	11426.55	13101.78	\	\	3058.42

续表

1.50	分散	2.01	7.05	1479.25	7385.52	7385.43	1406.19	1441.23	2847.42
	集中	\	7.05	1479.31	7385.82	7385.84	\	\	2847.47
2.50	分散	2.01	7.05	1479.25	7385.52	7385.43	1406.19	1441.23	2847.42
	集中	\	7.05	1479.31	7385.82	7385.84	\	\	2847.47
3.50	分散	2.01	7.05	1479.25	7385.52	7385.43	1406.19	1441.23	2847.42
	集中	\	7.05	1479.31	7385.82	7385.84	\	\	2847.47

表 4 显示了单位惩罚碳税  $c_{e2}$  在 [0.50, 3.50] 范围内, 对分散决策和集中决策下最优决策结果的影响。在分散决策下, 单位惩罚碳税仅作用于超额碳排放量部分, 它的增加并不影响分散决策下的最优决策结果。在集中决策下, 单位惩罚碳税的增加会提高碳税成本, 为降低订购和存贮过程中产生的实际碳排放量, 供应链会减少订购量, 导致最优库存为零时间点和预期利润下降直至趋于平缓, 实际碳排放量由超出碳限额变为未超出碳限额。对比两种决策下的最优决策结果发现, 单位惩罚碳税的增加不会影响分散决策的最优解, 但会有效降低集中决策下的碳排放量, 使其降至碳限额范围之内。同时, 集中决策下最优预期利润会下降至趋近于分散决策, 但仍略高于分散决策。

**Table 5.** Sensitivity analysis of inventory impact factor  $\sigma$  under decentralized decision-making

**表 5.** 存货影响因子  $\sigma$  的敏感性分析

$\sigma$	决策方式	最优决策结果							
		$\omega$	$t_0$	$Q$	$E_r$	$E_l$	$P_r$	$P_m$	$P_r + P_m$
0.10	分散	3.27	2.31	361.72	2009.75	1277.73	244.65	769.57	1014.22
	集中	\	5.32	861.41	4320.07	4320.12	\	\	1621.41
0.15	分散	2.58	3.79	621.39	3296.52	2571.54	628.47	934.22	1562.69
	集中	\	6.48	1207.98	5988.32	6210.49	\	\	2111.05
0.20	分散	2.01	7.05	1479.25	7385.52	7385.43	1406.19	1441.23	2847.42
	集中	\	9.67	2371.64	11426.55	13101.78	\	\	3058.42
0.25	分散	2.21	8.48	2120.56	10567.46	10567.18	1581.22	2520.54	4101.76
	集中	\	10	2750	13500	14325	\	\	4567.50

表 5 显示了存货影响因子  $\sigma$  在 [0.10, 0.25] 范围内, 对分散决策和集中决策下最优决策结果的影响。随着存货影响因子增加, 使得两种决策下的最优库存为零时间点、订购量和预期利润增加, 订购和存贮产生的碳排放量也增加, 但仍在碳限额之内。分散决策下, 随着存货影响因子增加, 制造商在初期会适当降低批发价格, 以促进更多订购。当存货影响因子过高时, 为确保供需平衡、控制成本并保护品牌价值, 制造商会提高批发价格, 自身预期利润也得到大幅提升。在集中决策下, 供应链整体承担碳税成本, 其预期利润在实际碳排放量超出碳限额的情形下实现最大化。对比两种决策下的最优决策结果发现, 随着存货影响因子增加, 集中决策下最优预期利润总是高于分散决策, 但碳排放量更多。

## 6. 结论

研究发现: 1) 从利润最大化的角度看, 变质率增加会降低分散决策和集中决策下的预期总利润。单

位惩罚碳税的增加加大了对超额排放的惩罚力度,降低了预期利润。存货影响因子的增加促进了分散决策和集中决策下预期总利润的提升。综合来看,相比分散决策,集中决策表现更为优越,总能获得更高的最优预期总利润。2)从碳排放的角度看,在分散决策和集中决策下,高变质率会导致订购和存贮产生的碳排放量增加。提高单位惩罚碳税对分散决策碳排放量没有影响,但对于集中决策是一种非常有效的碳减排措施。存货影响因子的增加带来更多的订购量,但会产生更多碳排放量。

总体而言,本文所构建的模型及其研究结果可为政府或者企业提供一定的理论参考。政府可以根据“碳达峰”目标测算得到碳排放强度,进而设置碳限额与级差碳税机制来约束企业的碳排放行为。企业可以根据不同参数变化,制定合理的库存和定价策略。

## 基金项目

湖南省教育厅重点项目(23A0254);湖南省水利厅科技项目(XSKJ2023059-39);长沙理工大学研究生科研创新项目(CXCLY2022134)。

## 参考文献

- [1] Bian, J. and Zhao, X. (2020) Tax or Subsidy? An Analysis of Environmental Policies in Supply Chains with Retail Competition. *European Journal of Operational Research*, **283**, 901-914. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.11.052>
- [2] Ghazouani, A., Jebli, M.B. and Shahzad, U. (2021) Impacts of Environmental Taxes and Technologies on Greenhouse Gas Emissions: Contextual Evidence from Leading Emitter European Countries. *Environmental Science and Pollution Research*, **28**, 22758-22767. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11911-9>
- [3] Lu, C.J., Gu, M., Lee, T.S., et al. (2022) Impact of Carbon Emission Policy Combinations on the Optimal Production-Inventory Decisions for Deteriorating Items. *Expert Systems with Applications*, **201**, Article ID: 117234. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.117234>
- [4] Metcalf, G.E. (2021) Carbon Taxes in Theory and Practice. *Annual Review of Resource Economics*, **13**, 245-265. <https://doi.org/10.1146/annurev-resource-102519-113630>
- [5] Lee, C.C. and Hussain, J. (2022) Optimal Behavior of Environmental Regulations to Reduce Carbon Emissions: A Simulation-Based Dual Green Gaming Model. *Environmental Science and Pollution Research*, **29**, 56037-56054. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19710-0>
- [6] Xu, J. and Wei, W. (2022) Would Carbon Tax Be an Effective Policy Tool to Reduce Carbon Emission in China? Policies Simulation Analysis Based on a CGE Model. *Applied Economics*, **54**, 115-134. <https://doi.org/10.1080/00036846.2021.1961119>
- [7] Halat, K., Hafezalkotob, A. and Sayadi, M.K. (2021) Cooperative Inventory Games in Multi-Echelon Supply Chains Under Carbon Tax Policy: Vertical or Horizontal? *Applied Mathematical Modelling*, **99**, 166-203. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2021.06.013>
- [8] Cheng, P., Ji, G., Zhang, G., et al. (2022) A Closed-Loop Supply Chain Network Considering Consumer's Low Carbon Preference and Carbon Tax under the Cap-And-Trade Regulation. *Sustainable Production and Consumption*, **29**, 614-635. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.11.006>
- [9] Zhang, Y. and Zhang, T. (2022) Dynamic Analysis of a Dual-Channel Closed-Loop Supply Chain with Fairness Concerns under Carbon Tax Regulation. *Environmental Science and Pollution Research*, **29**, 57543-57565. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19715-9>
- [10] Golpîra, H. and Javanmardan, A. (2022) Robust Optimization of Sustainable Closed-Loop Supply Chain Considering Carbon Emission Schemes. *Sustainable Production and Consumption*, **30**, 640-656. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.12.028>
- [11] 戢守峰, 蓝海燕, 孙琦. 考虑碳排放容忍度的多级供应链生产-库存系统碳税博弈策略[J]. 系统工程理论与实践, 2017, 37(8): 2071-2082.
- [12] 张云丰, 王勇, 龚本刚, 等. 需求依赖销售价格与变质时间的三级时滞易变质品供应链协调[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(5): 1272-1282.
- [13] Kayikci, Y., Demir, S., Mangla, S.K., et al. (2022) Data-Driven Optimal Dynamic Pricing Strategy for Reducing Perishable Food Waste at Retailers. *Journal of Cleaner Production*, **344**, Article ID: 131068. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131068>

- 
- [14] 吴庆, 但斌, 钱宇, 等. 努力水平影响损耗的低值易逝品 TPL 协调合同[J]. 管理科学学报, 2014, 17(12): 15-26.
- [15] Murmu, V., Kumar, D. and Jha, A.K. (2022) Quality and Selling Price Dependent Sustainable Perishable Inventory Policy: Lessons from Covid-19 Pandemic. *Operations Management Research*, **16**, 408-432. <https://doi.org/10.1007/s12063-022-00266-8>
- [16] Yadav, S. and Khanna, A. (2021) Sustainable Inventory Model for Perishable Products with Expiration Date and Price Reliant Demand under Carbon Tax Policy. *Process Integration and Optimization for Sustainability*, **5**, 475-486. <https://doi.org/10.1007/s41660-021-00157-8>
- [17] Zheng, C., Pang, Q., Li, T., *et al.* (2019) The Farmers' Channel Selection and Sustainable Analysis under Carbon Tax Policy. *Sustainability*, **11**, Article 2765. <https://doi.org/10.3390/su11102765>
- [18] 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.
- [19] Mandal, B.N.A. and Phaujdar, S. (1989) An Inventory Model for Deteriorating Items and Stock-Dependent Consumption Rate. *Journal of the Operational Research Society*, **40**, 483-488. <https://doi.org/10.1057/jors.1989.75>
- [20] 徐春明, 赵道致, 闵杰. 减排规制下基于存货影响销售模式的易变质产品库存优化模型[J]. 系统工程理论与实践, 2018, 38(6): 1512-1524.
- [21] Ghare, P.N. and Schrader, G.F. (1963) A Model for Exponentially Inventories. *Journal of Industrial Engineering*, **14**, 238-243.