

“双碳”目标下多周期供应链碳减排协调决策研究

戴道明,王忆都

安徽财经大学 管理科学与工程学院,安徽 蚌埠 233000

摘 要:针对“双碳”目标下的供应链多周期碳减排问题,提出了单制造商、单零售商组成的多周期情形供应链模型,研究各周期碳减排水平和零售定价之间的协调优化问题。首先,建立单周期 Stackelberg 博弈模型并在此基础上构建了多周期供应链协调决策的动态规划模型,其次,利用 Stackelberg 博弈求解各周期产品零售价格与批发价格,之后运用动态规划求解出各周期最优碳减排水平并得出制造商与零售商的多周期最大利润;通过算例分析得出碳减排成本系数和低碳偏好程度等因素对碳减排、定价决策以及制造商、零售商利润的影响。研究发现,制造商各周期的碳减排量与周期剩余数以及低碳偏好程度呈正向关系,与减排成本系数呈负向关系;各周期批发价格、零售价格与消费者低碳偏好程度以及减排成本系数呈负向关系;各周期批发价格与零售价格随着周期推移逐渐增加。

关键词:供应链;碳减排;动态规划;多周期决策

中图分类号:F274 **文献标识码:**A **doi:**10. 16055/j. issn. 1672-058X. 2023. 0003. 001

Research on Coordinated Decision-making of Carbon Emission Reduction in Multi-cycle Supply Chain under Double Carbon Goals

DAI Daoming, WANG Yidu

School of Management Science and Engineering, Anhui University of Finance & Economics, Anhui Bengbu 233000, China

Abstract: To address the problem of multi-cycle carbon emission reduction in the supply chain under double carbon goals, a multi-cycle supply chain model consisting of a single manufacturer and a single retailer was proposed to study the coordination and optimization between the carbon emission reduction level and retail pricing in each cycle. Firstly, a single-cycle Stackelberg game model was established and a dynamic planning model was constructed based on the game model for coordinated decision-making in multi-cycle supply chains. Secondly, the Stackelberg game was used to solve the retail and wholesale prices of products in each cycle. After that, the optimal level of carbon emission reduction for each cycle was solved by dynamic programming and the maximum profit of manufacturers and retailers in multiple cycles was derived. The influence of factors such as carbon emission reduction cost coefficient and low carbon preference degree on carbon emission reduction, pricing decisions, and profit of manufacturers and retailers was obtained by example analysis. The results show that the carbon emission reduction of manufacturers in each cycle is positively correlated with the number of cycles remaining and the degree of low carbon preference, and is negatively correlated with the emission reduction cost coefficient; the wholesale price and retail price in each cycle have a negative relationship with the low carbon preference degree of consumers and the emission reduction cost coefficient; the wholesale and retail prices of each cycle gradually increase as the cycle goes on.

Keywords: supply chain; carbon emission reduction; dynamic programming; multi-cycle decision making

收稿日期:2022-03-05 **修回日期:**2022-05-18 **文章编号:**1672-058X(2023)03-0001-08

基金项目:安徽财经大学研究生科研创新基金项目(ACYC2021420)。

作者简介:戴道明(1972—),男,安徽六安人,教授,博士,从事物流与供应链管理研究。

通讯作者:王忆都(1998—),男,安徽蚌埠人,硕士研究生,从事物流与供应链管理研究。

引用格式:戴道明,王忆都.“双碳”目标下多周期供应链碳减排协调决策研究[J].重庆工商大学学报(自然科学版),2023,40(3): 1—8.

DAI Daoming, WANG Yidu. Research on coordinated decision-making of carbon emission reduction in multi-cycle supply chain under double carbon goals[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2023, 40(3): 1—8.

1 引言

我国作为能源生产大国的同时也是能源消耗大国,我国单位 GDP 能耗是世界平均水平的 1.4 倍,单位能源二氧化碳排放强度是世界平均水平的 1.3 倍。为了实现社会可持续发展,习近平总书记 2020 年 9 月 20 日在联合国大会上郑重宣布我国的“双碳”目标。为了贯彻落实国家“双碳”目标战略,需要科学合理地制定供应链在未来一段时间内的碳减排计划。因此,研究“双碳”目标下多周期供应链碳减排与定价的协调决策问题具有重要的实际应用价值,可以为供应链各成员在“双碳”目标背景下的合理决策提供重要的参考价值。

近年来,越来越多的学者致力于供应链碳减排方面的研究。Yao 等^[1]在考虑减排效果的基础上,应用微分博弈论研究成本分担机制下的低碳供应链协调问题,发现在分散决策时,制造商选择成本分担策略能够实现制造商与零售商利润的帕累托最优。Sun 等^[2]研究了政府碳减排政策以及市场环境对供应链碳排放转移以及碳减排的影响,结果表明减排滞后时间以及消费者低碳偏好对制造商碳排放转移产生正向影响。陈柳鑫等^[3]研究了碳交易市场环境下的制造商的碳减排决策,研究发现不同水平的单位产品碳排放量对供应链成员的利润所造成的影响有所不同。唐书传等^[4]建立了碳限额与碳交易背景下的二级供应链,分析了不同领导者情形对供应链碳减排以及定价决策的影响。

不少学者对低碳供应链定价决策问题具有浓厚的兴趣。Taleizadeh^[5]等分析了批发价格(WP)、成本分担(CS)以及回购(BB)三种契约下的供应链绩效情况,发现在 WP 契约下具有最大利润且能够实现供应链协调;Xu^[6]等研究了在制造商生产两种基于 MTO (Make-to-order) 产品情形下的供应链碳减排以及定价决策问题;夏良杰^[7]等在引入交叉持股战略的基础上考虑低碳供应链减排与定价问题,发现制造商与零售商交叉持股能提高单位产品碳减排量并增加市场需求;胡培^[8]等分析了在不同低碳产品策略以及政府补贴政策对消费者行为以及供应链成员决策的影响,结果表明低碳产品低价策略不能确保增加制造商利润但能提高制造商在市场中的竞争力。

此外,消费者的行为偏好如低碳偏好、渠道偏好等对供应链的减排决策以及利润也会产生较大影响。

Yu^[9]等构建了考虑消费者偏好的低碳供应链利润模型,讨论了集中式以及分散式情形下的供应链利润;Fan^[10]等研究消费者低碳偏好以及零售商利他行为对低碳供应链决策的影响,发现消费者低碳偏好过高时不利于供应链成员利润的提高;孙嘉楠^[11]等在分析了不同决策情形下消费者渠道偏好对低碳供应链碳减排决策的影响,研究表明:消费者的渠道偏好决定不同决策情形下的减排边界。温廷新^[12]等研究了消费者低碳偏好以及渠道偏好对供应链决策的影响,研究发现相较于单制造商减排策略,联合减排策略能够提高制造商与零售商的利润,两种减排策略的均衡解取决于消费者低碳偏好程度。

通过文献研究发现,国内外学者对于供应链碳减排问题的研究主要集中在碳交易、碳税以及碳补贴等政策对供应链碳减排决策影响方面;对于供应链定价问题的研究主要集中在供应链成员引入成本分担、交叉持股等协调机制基础上的定价决策方面。现有关于供应链碳减排决策的研究通常针对供应链的单周期决策,鲜有学者考虑多周期情形下的供应链碳减排问题,不能够有效地为当前“双碳”目标下供应链成员制定减排计划提供参考。因此,本文针对多周期情形,将 Stackelberg 博弈与动态规划模型相结合研究低碳供应链碳减排与定价协调决策问题,求解未来一段时间内(例如,至碳达峰期限 2030 年或碳中和期限 2060 年)各周期最优碳减排量与产品定价,分析了碳减排成本系数和低碳偏好程度等因素如何影响最优决策和利润。

2 问题描述与模型假设

2.1 模型描述

考虑由单制造商、单零售商组成的二级供应链结构,制造商是领导者,零售商是追随者。如图 1 所示,供应链各成员在多个周期内进行生产销售。以单个周期为例,首先,制造商决定当期单位产品碳减排量并根据当前周期单位产品碳减排量决定当期批发价格;然后,制造商将产品以批发价格出售给零售商;最后,零售商以零售价格出售给消费者。碳减排成本由当期碳减排量以及减排成本系数决定,各周期产品需求由当期产品零售价格、当期单位产品碳排放量共同决定。本文研究在多周期情形下,制造商如何决策每期的碳减排量以及批发价格,零售商如何决定零售价格,以实现各自利润最大化。

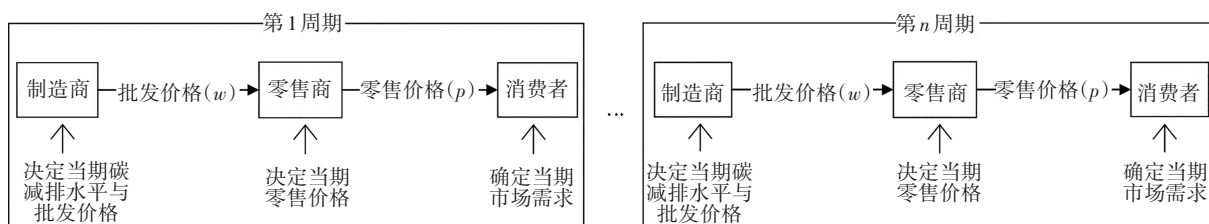


图1 决策顺序

Fig. 1 Order of decision

模型涉及的相关符号及其含义如表1所示。

表1 符号描述

Table 1 Descriptions of symbols

模型符号	含 义
w_k	第 k 周期产品批发价格
p_k	第 k 周期产品零售价格
a	产品潜在市场需求
θ	产品的价格弹性系数
β	消费者的低碳偏好程度
λ	减排成本系数
π_r, π_m	分别表示零售商、制造商总利润
π_r^k, π_m^k	分别表示零售商、制造商第 k 周期利润
s_k	第 k 周期开始时制造商单位产品碳排放量
x_k	第 k 周期制造商决定的单位产品碳减排量

2.2 模型基本假设

假设1:制造商和零售商关于市场信息完全对称,制造商生产低碳产品的产量与市场需求量相等,零售商的订货量等于制造商产量且产品能够全部卖出。

假设2:碳排放只产生于制造商产品生产环节,制造商通过碳减排技术投入实现碳减排,各周期碳减排成本由当期单位产品碳减排量以及减排成本系数决定,第 k 周期内制造商碳减排成本函数为 $C(x_k) = \lambda x_k^2$ [6]。

假设3:为简化模型,假设制造商生产成本为0,各周期产品潜在市场需求、价格弹性系数、减排成本系数以及消费者低碳偏好程度不变。

假设4:制造商与零售商在单周期内进行 Stackelberg 博弈,单周期内制造商首先决定当前周期单位产品碳减排水平,再根据减排水平决定当期批发价格,零售商在此基础上决定当期零售价格。

3 模型构建与求解分析

首先,在单周期 Stackelberg 博弈模型基础上,构建多周期供应链协调决策的动态规划模型;其次,利用 Stackelberg 博弈求解每周期零售定价与批发价格;然后,运用动态规划求解每周期最优碳减排水平;最后,分析碳减排成本系数和低碳偏好程度等因素对制造商

与零售商各期决策和利润的影响。

3.1 单周期 Stackelberg 模型

在制造商主导的分散决策情形下,制造商先决定当期的单位产品减排量并根据当期单位产品碳减排量决定当期批发价格,随后零售商根据制造商减排量决定当期产品零售价格,各周期市场需求 $D_k = a - \theta p_k - \beta s_k$, 制造商与零售商第 k 周期的利润函数如下:

$$\begin{cases} \pi_m^k = w_k(a - \theta p_k - \beta s_k) - \lambda x_k^2, k = 1, 2, \dots, n \\ \pi_r^k = (p_k - w_k)(a - \theta p_k - \beta s_k), k = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (1)$$

根据逆向归纳法,首先求解零售商的产品零售价格,并得到市场需求函数:

$$\begin{cases} p_k = \frac{a + \theta w_k - \beta s_k}{2\theta}, k = 1, 2, \dots, n \\ D_k = \frac{a - \theta w_k - \beta s_k}{2}, k = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (2)$$

将式(2)代入式(1)可得制造商第 k 周期的最优批发价格如下:

$$w_k^* = \frac{a - \beta s_k}{2\theta} \quad (3)$$

将式(2)、式(3)代入式(1)可得制造商与零售商第 k 周期的最大利润如下:

$$\begin{cases} \pi_m^{k*} = \frac{(a - \beta s_k)^2}{8\theta} - \lambda x_k^2, k = 1, 2, \dots, n \\ \pi_r^{k*} = \frac{(a - \beta s_k)^2}{16\theta}, k = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (4)$$

3.2 多周期动态规划模型

根据单周期 Stackelberg 模型可将多周期碳减排问题描述为

$$\begin{cases} \pi_m = \max \sum_{k=1}^n (w_k(a - \theta p_k - \beta s_k) - \lambda x_k^2) \\ w_k = \frac{a - \beta s_k}{2\theta} \\ p_k = \frac{a + \theta w_k - \beta s_k}{2\theta} \\ w_k, p_k \geq 0, k = 1, 2, 3, \dots, n \end{cases}$$

在此基础上建立动态规划模型,以周期为单位将决策过程划分为 k 个阶段, $k=1,2,3,\dots,n$; 设状态变量 s_k 为第 k 周期初时制造商单位产品碳排放量, 设决策变量 x_k 为第 k 周期制造商决定的单位产品碳减排量, 因此可以得到状态转移方程如下:

$$s_k + 1 = s_k - x_k, k=1,2,\dots,n$$

设当第 k 周期单位产品碳排放量为 s_k 时, 第 k 周期初至第 n 周期末的制造商最大利润为 $f_k(s_k)$ 。因此可以得到下面的逆序递推关系式(动态规划模型 DP)

$$\text{DP:} \begin{cases} f_k(s_k) = \max_{x_k \in [0, s_k]} [\pi_m^{k*} + f_{k+1}(s_k - x_k)] & k=1,2,\dots,n \\ f_{n+1}(s_{n+1}) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

定理1: 在制造商主导的分散决策情形下, 模型 DP 各周期最优单位产品碳减排量 x_k^* 满足:

$$x_k^* = \frac{L_{n-k}(\beta^2 s_k - a\beta)}{L_{n-k}\beta^2 - 8\theta\lambda}$$

$$\text{其中,} \begin{cases} L_k = \left(1 - \frac{L_{k-1}(8\theta\lambda)}{L_{k-1}\beta^2 - 8\theta\lambda}\right), L_k < \frac{8\theta\lambda}{\beta^2}, k=2,3,\dots,n \\ L_1 = 1 \end{cases}$$

证明: 使用逆推法对动态规划模型进行求解, 当 $k=n$ 时, 将式(4)代入式(5)中得:

$$f_n(s_n) = \max_{x_n \in [0, s_n]} \left[\frac{(a - \beta s_n)^2}{8\theta} - \lambda x_n^2 \right] \quad (6)$$

因此可根据一阶条件求解式(6)得到 x_n^* , 并将其代入式(6)中得到第 n 周期时制造商的最大利润:

$$\begin{cases} x_n^* = 0 \\ f_n(s_n) = \frac{(a - \beta s_n)^2}{8\theta} \end{cases} \quad (7)$$

当 $k=n-1$ 时, 将式(7)代入式(5)中, 得到第 $n-1$ 周期初至第 n 周期末时制造商的最大利润为

$$f_{n-1}(s_{n-1}) = \max_{x_{n-1} \in [0, s_{n-1}]} \left[\frac{(a - \beta s_{n-1})^2}{8\theta} - \lambda x_{n-1}^2 + f_n \left(\frac{(a - \beta(s_{n-1} - x_{n-1}))^2}{8\theta} \right) \right] \quad (8)$$

对式(8)求解可得 x_{n-1}^* 以及 $f_{n-1}(s_{n-1})$ 如式(9)所示:

$$\begin{cases} x_{n-1}^* = \frac{\beta^2 s_{n-1} - a\beta}{\beta^2 - 8\theta\lambda} \\ f_{n-1}(s_{n-1}) = \left(1 - \frac{8\theta\lambda}{\beta^2 - 8\theta\lambda}\right) \frac{(a - \beta s_{n-1})^2}{8\theta} \end{cases} \quad (9)$$

同理, 可以得到 $k=1$ 时的制造商最优碳减排量 x_1^* 以及最优利润 $f_1(s_1)$ 为

$$\begin{cases} x_1^* = \frac{L_{n-1}(\beta^2 s_1 - a\beta)}{L_{n-1}\beta^2 - 8\theta\lambda} \\ f_1(s_1) = L_n \frac{(a - \beta s_1)^2}{8\theta} \end{cases} \quad (10)$$

其中 L 满足:

$$\begin{cases} L_k = \left(1 - \frac{L_{k-1}(8\theta\lambda)}{L_{k-1}\beta^2 - 8\theta\lambda}\right), L_k < \frac{8\theta\lambda}{\beta^2}, k=2,3,\dots,n \\ L_1 = 1 \end{cases}$$

观察上述表达式可以得到最优单位产品碳减排量 x_k^* 满足:

$$x_k^* = \frac{L_{n-k}(\beta^2 s_k - a\beta)}{L_{n-k}\beta^2 - 8\theta\lambda} \quad (11)$$

定理1证毕。

根据式(10)可以得到 n 周期内制造商最大总利润 π_m^* , 将式(11)代入式(3)中可以得到 n 周期内零售商最大总利润 π_r^* 。 π_m^* 、 π_r^* 如下所示:

$$\begin{cases} \pi_m^* = L_n \frac{(a - \beta s_1)^2}{8\theta} \\ \pi_r^* = \sum_{k=1}^n \left(\frac{a}{4\sqrt{\theta}} - \frac{\beta}{4\sqrt{\theta}} \left(s_1 - \sum_{k=1}^n \frac{L_{n-k}(\beta^2 s_k - a\beta)}{L_{n-k}\beta^2 - 8\theta\lambda} \right) \right)^2 \end{cases}$$

定理2: 在制造商主导的分散决策情形下, 模型 DP 各周期最优批发价格 w_k^* 满足:

$$w_k^* = \frac{a}{2\theta} - \frac{\beta}{2\theta} \left(s_1 - \sum_{k=1}^n \frac{L_{n-k}(\beta^2 s_k - a\beta)}{L_{n-k}\beta^2 - 8\theta\lambda} \right)$$

其中 L 满足:

$$\begin{cases} L_k = \left(1 - \frac{L_{k-1}(8\theta\lambda)}{L_{k-1}\beta^2 - 8\theta\lambda}\right), L_k < \frac{8\theta\lambda}{\beta^2}, k=2,3,\dots,n \\ L_1 = 1 \end{cases}$$

证明: 根据状态变量的定义以及式(11)可以得到第 k 周期单位产品碳排放量 s_k 如下:

$$s_k = s_1 - \sum_{k=1}^n \frac{L_{n-k}(\beta^2 s_k - a\beta)}{L_{n-k}\beta^2 - 8\theta\lambda} \quad (12)$$

将式(12)代入式(3)可以得到第 k 周期最优批发价格 w_k^* 如下:

$$w_k^* = \frac{a}{2\theta} - \frac{\beta}{2\theta} \left(s_1 - \sum_{k=1}^n \frac{L_{n-k}(\beta^2 s_k - a\beta)}{L_{n-k}\beta^2 - 8\theta\lambda} \right)$$

定理2证毕。

定理3: 在制造商主导的分散决策情形下, 模型 DP 各周期最优零售价格 p_k^* 满足:

$$p_k^* = \frac{3a}{4\theta} - \frac{3\beta}{4\theta} \left(s_1 - \sum_{k=1}^n \frac{L_{n-k}(\beta^2 s_k - a\beta)}{L_{n-k}\beta^2 - 8\theta\lambda} \right)$$

其中 L 满足:

$$\begin{cases} L_k = \left(1 - \frac{L_{k-1}(8\theta\lambda)}{L_{k-1}\beta^2 - 8\theta\lambda} \right), L_k < \frac{8\theta\lambda}{\beta^2}, k=2,3,\dots,n \\ L_1 = 1 \end{cases}$$

证明:将式(3)、式(12)代入式(2)中可以得到第 k 周期最优零售价格 p_k^* 如下:

$$p_k^* = \frac{3a}{4\theta} - \frac{3\beta}{4\theta} \left(s_1 - \sum_{k=1}^n \frac{L_{n-k}(\beta^2 s_k - a\beta)}{L_{n-k}\beta^2 - 8\theta\lambda} \right)$$

定理3证毕。

推论1:在制造商主导的分散决策情形下,当 $\beta < \frac{a}{s_1}$

时,制造商各周期批发价格、零售商各周期零售价格随着周期推移递增。

证明:当 $L_k < \frac{8\theta\lambda}{\beta^2}$ 时,由归纳法易证 $L_k > 0$; 当 $\beta < \frac{a}{s_1}$

时, $x_1^* = \frac{L_{n-1}(\beta^2 s_1 - a\beta)}{L_{n-1}\beta^2 - 8\theta\lambda} > 0$, 因此 $s_2 = s_1 - x_1^* < s_1, \beta < \frac{a}{s_2}$,

$x_2^* = \frac{L_{n-2}(\beta^2 s_2 - a\beta)}{L_{n-2}\beta^2 - 8\theta\lambda} > 0$ 。同理可得 $x_k^* > 0$ 。

因此, $s_k < s_{k-1}, w_k^* = \frac{a}{2\theta} - \frac{\beta s_k}{2\theta} > w_{k-1}^* = \frac{a}{2\theta} - \frac{\beta s_{k-1}}{2\theta}$ 同理可证

$p_k^* > p_{k-1}^*$ 。

推论1表明:在计划初期制造商批发价格与零售商零售价格较低,随着周期推移,批发价格与零售价格均呈上升趋势。造成这种现象的原因是在计划初期由于产品碳排放量较高,此时受消费者低碳偏好影响,产品需求较低,此时供应链成员需要通过降低价格以增加产品需求。随着周期推移,产品碳排放量逐步降低,产品需求增加,此时供应链成员可以逐步提高价格以增加利润。

4 算例分析

令 $a=20, \theta=0.6, n=10, s_1=10$ 。运用 Matlab 软件对相关参数进行算例分析。

4.1 供应链利润分析

在上述参数设定下,分析制造商与零售商利润变化,以及消费者低碳偏好 β 、减排成本系数 λ 对它们的影响,如图2、图3所示。

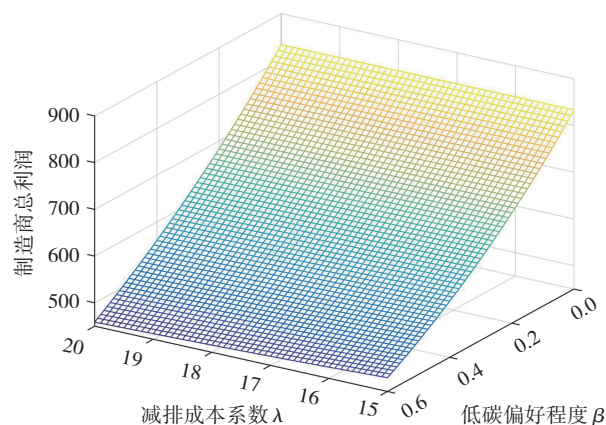


图2 消费者低碳偏好程度以及减排成本系数对制造商总利润影响

Fig. 2 The influence of consumers' low-carbon preference degree and emission reduction cost coefficient on manufacturers' total profit

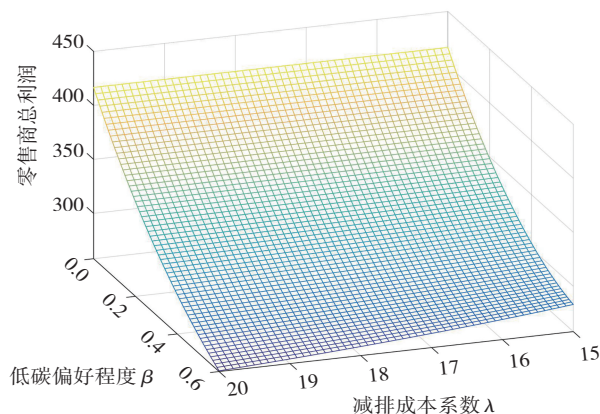


图3 消费者低碳偏好程度以及减排成本系数对零售商总利润影响

Fig. 3 The influence of consumers' low-carbon preference degree and emission reduction cost coefficient on retailers' total profit

由图2、图3可知,制造商与零售商的总利润与减排成本系数呈反比关系。对制造商而言,减排成本系数的增加一方面将直接影响其减排成本,导致其碳减排成本增加,另一方面由于减排成本增加,制造商各周期决定的单位产品碳减排量减少,产品碳排放量提高导致产品需求降低,从而使其总利润减少。对零售商而言,减排成本系数的增加不会对其产生直接影响,但随着减排成本系数的增加,会导致单位产品碳减排量下降,产品需求减少,因此也会间接导致零售商利润减少;另外可以发现当消费者关注产品碳排放量时,随着消费者低碳偏好的增加,制造商与零售商的总利润均呈现下降趋势。这是由于当消费者关注产品碳排放量时,单位产品碳排放量越高,产品需求越低。因此消费者低碳偏好越高产品需求越低,制造商与零售商的利润越低。

4.2 制造商碳减排量分析

在上述参数设定下,分析制造商各周期单位产品碳减排量变化,以及消费者低碳偏好 β 、减排成本系数 λ 对制造商总碳减排量的影响,如图4—图6所示。

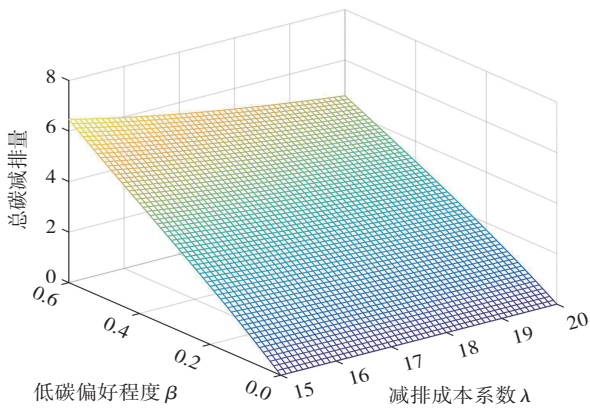


图 4 消费者低碳偏好程度以及减排成本系数对单位产品总碳减排量影响

Fig. 4 The influence of consumers' low-carbon preference degree and emission reduction cost coefficient on total carbon emission reduction per unit product

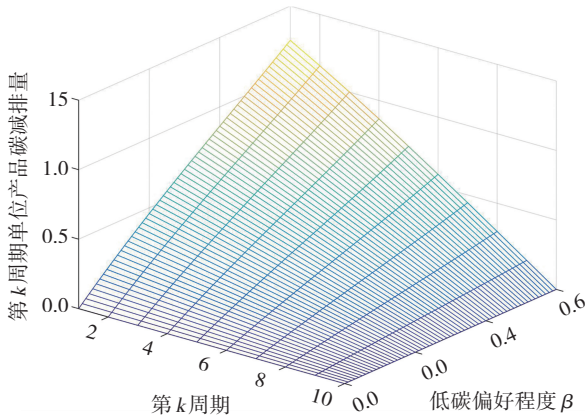


图 5 消费者低碳偏好程度对各周期单位产品碳减排量影响
Fig. 5 The influence of consumers' low carbon preference degree on carbon emission reduction per unit product in each cycle

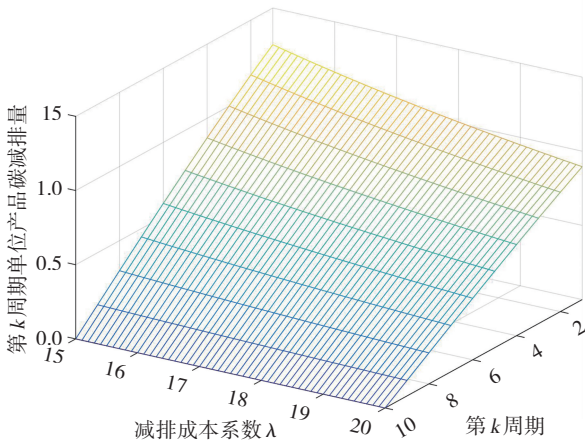


图 6 减排成本系数对各周期单位产品碳减排量影响
Fig. 6 The influence of emission reduction cost coefficient on carbon emission reduction per unit product in each cycle

由图 4 可见,制造商总碳减排量与消费者低碳偏好呈正比关系,与减排成本系数呈反比关系。当消费者低碳偏好为 0 时,产品碳排放量的降低不能增加需

求,制造商没有进行碳减排的动机,因此总碳减排为 0。当低碳偏好增加时,随着单位产品碳排放量的降低产品需求逐渐增加,低碳偏好越高,制造商进行碳减排能够带来的收益越大,碳减排的动机越大;而碳减排成本系数则相反,减排成本系数越大,制造商进行碳减排的成本越高,进行碳减排的动机越小。

由图 5、图 6 可知,各周期单位产品碳减排量受消费者低碳偏好以及减排成本系数的影响与单位产品总碳减排量类似,原因如上述分析。此外可以发现随着周期推移,各周期单位产品碳减排量呈下降趋势,这是由于产品需求受单位产品总碳排放量的影响,在当前周期进行碳减排后剩余各周期的单位产品总碳排放量都会降低,因此越早进行碳减排收益越高。

4.3 各周期产品价格分析

在上述参数设定下,分析零售商各周期产品零售价格变化,以及消费者低碳偏好 β 、减排成本系数 λ 对它的影响,如图 7、图 8 所示。

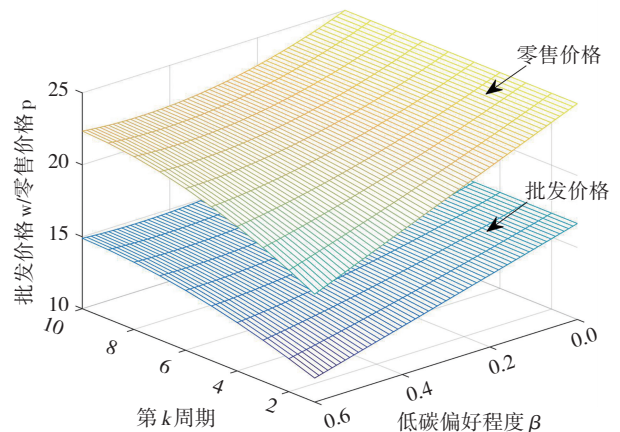


图 7 消费者低碳偏好对各周期批发价格、零售价格影响
Fig. 7 The influence of consumers' low-carbon preference on wholesale price and retail price in each cycle

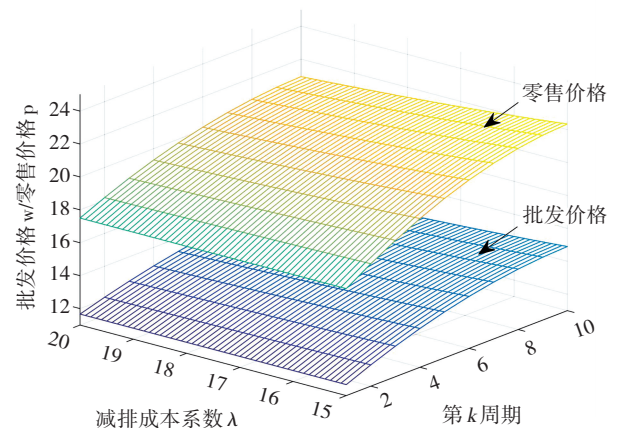


图 8 减排成本系数对各周期批发价格、零售价格影响
Fig. 8 The influence of emission reduction cost coefficient on wholesale price and retail price in each cycle

由图 7 可知,各周期批发价格与零售价格与消费

者低碳偏好呈反比。由于批发价格与零售价格受单位产品总碳排放量的影响,当消费者低碳偏好程度为0时,如上述分析此时制造商没有进行碳减排的动机,因此各周期批发价格与零售价格不变;随着消费者低碳偏好程度的增加,在相同的单位产品总碳排放量下,产品需求降低,此时制造商与零售商选择降价以提高产品需求。

由图8可知,各周期批发价格与零售价格与减排成本系数呈反比。造成这种现象的原因与上述类似,随着减排成本系数的增加,制造商进行总碳减排降低,因此在相同低碳偏好程度下,产品需求降低,制造商与零售商选择降价以提高产品需求;此外观察图7、8可以发现各周期批发价格与零售价格随着周期推移逐渐增加,原因如推论1分析:计划初期由于单位产品碳排放量较高,需通过降价以提高产品需求,随着单位产品碳排放量的降低,产品需求增加,此时供应链成员可以逐步提高价格以增加利润。

5 结论与启示

本文在“双碳”目标背景下以单制造商和单零售商构成的二级供应链为研究对象,求解出低碳供应链在多周期内最优减排量和定价策略,分析了消费者低碳偏好以及减排成本系数对供应链利润的影响。得出结论和相应的管理启示:

(1) 当消费者关注产品碳排放量时,供应链成员利润与减排成本系数以及消费者低碳偏好程度呈反比关系,因此供应链成员在面临消费者具有较强低碳意识的市场环境时,应从更新减排技术着手,一方面降低减排成本系数,另一方面提高单位产品碳减排量以增加需求。

(2) 当消费者关注产品碳排放量时,制造商各周期的单位产品碳减排量与周期剩余长度呈正比关系,即在计划初期时碳减排量较高,随着周期推进碳减排量逐步减少。因此制造商在实际生产过程中,应将减排任务的大部分工作量划分至任务初期并随着周期推进逐步减少,从而能够在完成减排任务的同时带来更高的利润。

(3) 当消费者关注产品碳排放量时,各周期批发价格、零售价格与当前周期数呈正向关系,即随着周期的推移产品价格逐步提高。因此供应链成员在定价决

策时,在初期应采取低价策略以提高产品需求,随后逐步提升价格以进一步增加利润。

未来进一步研究方向,一是考虑碳减排约束的多周期供应链决策,二是考虑考虑碳税、碳补贴等政策对供应链决策的影响。

参考文献(References):

- [1] YAO F, GAO H, JIANG H, et al. Study on low-carbon supply chain coordination considering reference emission reduction effect[J]. *Asia-Pacific Journal of Operational Research*, 2021, 38(5): 1—21.
- [2] SUN L, CAO X, ALHARTHI M, et al. Carbon emission transfer strategies in supply chain with lag time of emission reduction technologies and low-carbon preference of consumers[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 264(8): 1—16.
- [3] 陈柳鑫,徐聪,陈娴. 基于消费者低碳偏好的三级供应链制造商碳减排策略研究[J]. *中国矿业大学学报(社会科学版)*, 2021, 23(3): 53—65.
CHEN Liu-xin, XU Cong, CHEN Xian. Research on manufacturers' carbon reduction strategy of three echelon supply chain based on consumer preference for low carbon[J]. *Journal of China University of Mining and Technology (Social Science Edition)*, 2021, 23(3): 53—65.
- [4] 唐书传,刘云志,肖条军. 考虑社会责任的供应链定价与碳减排决策[J]. *中国管理科学*, 2020, 28(4): 99—108.
TANG Shu-zhuan, LIU Yun-zhi, XIAO Tiao-jun. Pricing and carbon emission reduction decisions in a socially responsible supply chain [J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2020, 28(4): 99—108.
- [5] TALEIZADEH A A, ALIZADEH B N, SARKER B R. Coordinated contracts in a two-level green supply chain considering pricing strategy[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2018, 124(10): 249—275.
- [6] CHEN X, YANG H, WANG X, et al. Optimal carbon tax design for achieving low carbon supply chains[J]. *Annals of Operations Research*, 2020, 31(4): 1—28.
- [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.
XIA Liang-jie, KONG Qing-yi, LI You-dong, et al. Emission reduction and pricing strategies of a low-carbon supply chain considering cross-shareholding[J]. *Chinese Journal of*

- Management Science, 2021, 29(4): 70—81.
- [8] 胡培, 代雨宏. 基于消费者行为的低碳供应链定价策略研究[J]. 软科学, 2018, 32(8): 73-77+90.
HU Pei, DAI Yu-hong. Research on pricing strategy of low-carbon supply chain based on consumer behaviour[J]. Soft Science, 2018, 32(8): 73-77, 90.
- [9] YU J, SHI W, FANG Y. Construction of low carbon supply chain profit model considering consumer preference [J]. Procedia CIRP, 2019, 83(5): 690—693.
- [10] FAN R, LIN J, ZHU K. Study of game models and the complex dynamics of a low-carbon supply chain with an altruistic retailer under consumers' low-carbon preference [J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2019, 528(8): 1—31.
- [11] 孙嘉楠, 肖忠东. 考虑消费者双重偏好的低碳供应链减排策略研究[J]. 中国管理科学, 2018, 26(4): 49—56.
SUN Jia-nan, XIAO Zhong-dong. Decision-making of dual-channel supply chain emission reduction based on consumer preference to low-carbon[J]. Chinese Journal of Management Science, 2018, 26(4): 49—56.
- [12] 温廷新, 闫冬. 消费者双重偏好对低碳供应链的影响研究[J]. 情报探索, 2020, 29(10): 16—22.
WEN Ting-xin, YAN Dong. Research on the impact of consumers' double preferences on low-carbon supply chain[J]. Information Research, 2020, 29(10): 16—22.
- [13] 张令荣, 彭博, 程春琪. 基于区块链技术的低碳供应链政府补贴策略研究[J]. 中国管理科学, 2021, 29(9): 1—13.
ZHANG Ling-rong, PENG Bo, CHENG Chun-qi. Research on government subsidy strategy of low-carbon supply chain based on block-chain technology[J]. Chinese Journal of Management Science, 2021, 29(9): 1—13.
- [14] 夏西强, 徐春秋. 政府碳税与补贴政策对低碳供应链影响的对比研究[J]. 运筹与管理, 2020, 29(11): 112—120.
XIA Xi-qiang, XU Chun-qiu. A comparative study of the impact of government carbon tax and subsidy policy on low-carbon supply chain[J]. Operations Research and Management Science, 2020, 29(11): 112—120.
- [15] DU S, HU L, WANG L. Low-carbon supply policies and supply chain performance with carbon concerned demand[J]. Annals of Operations Research, 2017, 255(1): 569—590.
- [16] 于晓辉, 李敏, 叶兆兴, 等. 基于公平关切的双渠道低碳供应链博弈分析[J]. 系统科学与数学, 2021, 41(1): 221—237.
YU Xiao-hui, LI Min, YE Zhao-xing, et al. Game analysis of two-channel low-carbon supply chain based on equity concerns [J]. Journal of Systems Science and Mathematical Sciences, 2021, 41(1): 221—237.
- [17] 范如国, 林金钗, 朱开伟. 基于批发价格契约的低碳供应链协调研究——考虑互惠和利他偏好的分析视角[J]. 商业研究, 2020, 62(6): 46—54.
FAN Ru-guo, LIN Jin-chai, ZHU Kai-wei. Research on coordination of low carbon supply chain based on wholesale price contract: an analysis perspective considering reciprocity and altruism preference [J]. Commercial Research, 2020, 62(6): 46—54.
- [18] YANG L, ZHENG C, XU M. Comparisons of low carbon policies in supply chain coordination[J]. Journal of Systems Science and Systems Engineering, 2014, 23(3): 342—361.
- [19] 王伟冬, 李小燕. 考虑竞争和信息不对称的低碳供应链协调策略研究[J]. 工业工程与管理, 2020, 25(3): 27—33.
WANG Wei-dong, LI Xiao-yan. Study on the coordination of low-carbon supply chain considering the competition and information asymmetry[J]. Industrial Engineering and Management, 2020, 25(3): 27—33.
- [20] 李友东, 赵道致. 考虑政府补贴的低碳供应链研发成本分摊比较研究[J]. 软科学, 2014, 28(2): 21-26+31.
LI You-dong, ZHAO Dao-zhi. Research on R&D cost allocation comparison for low-carbon supply chain based on government' subsidies[J]. Soft Sci, 2014, 28(2): 21-26+31.
- [21] 刘昊, 樊毓卿, 张诗青. 碳限额交易机制下低碳供应链协调策略[J]. 工业工程, 2021, 24(3): 60-67+82.
LIU Hao, FAN Yu-qing, ZHANG Shi-qing. A coordination strategy of low carbon supply chain under cap-and-trade mechanism[J]. Industrial Engineering Journal, 2021, 24(3): 60-67+82.
- [22] CHEN X, WANG X. Achieve a low carbon supply chain through product mix [J]. Industrial Management & Data Systems, 2017, 117(21): 1—27.