

碳限额政策下库存运输可持续水平集成优化

刘彩虹¹, 汤中明²

(1. 湖北广播电视大学 机电工程学院, 湖北 武汉 43022; 2. 湖北第二师范学院 管理学院, 湖北 武汉 430205)

摘要: 基于分散协调和集中控制供应商管理库存 (vendor-managed inventory, VMI) 供应链, 构建碳限额政策下库存运输可持续水平集成优化模型, 研究碳限额政策对可持续供应链性能的影响。运用Stackelberg方法构建供应链博弈模型, 并在Matlab中模拟实施碳限额政策前后可持续水平优化决策过程。为了调节供应商和零售商之间的溢出效应, 设计基于收益共享契约的供应链协调策略。研究表明, 碳限额政策能提高库存和运输可持续水平, 但对服务水平没有影响; 集中控制VMI供应链总利润随碳限额单调递增, 而分散协调VMI供应链总利润则随碳限额呈先升后降的变化趋势; 无论实施碳限额政策与否, 集中控制VMI供应链总利润和可持续水平均大于分散协调VMI供应链。

关键词: 碳限额政策; 可持续水平; 库存; 运输; 供应商管理库存

中图分类号: F274

文献标志码: A

文章编号: 1007-7375(2022)03-0066-10

Integrated Optimization of Sustainable Levels of Inventory and Transportation under Carbon Cap Policy

LIU Caihong¹, TANG Zhongming²

(1. School of Electromechanical Engineering, Hubei Radio and TV University, Wuhan 430223, China;

2. School of Management, Hubei University of Education, Wuhan 430205, China)

Abstract: Based on decentralized coordination and centralized control of the vendor-managed inventory (VMI) supply chain, an integrated optimization model for the sustainable level of inventory transportation under the carbon cap policy is constructed to study the impact of the carbon cap policy on the performance of the sustainable supply chain. The Stackelberg method is used to construct a supply chain game model, and the sustainable level optimization decision-making processes are simulated in Matlab before and after the implementation of the carbon allowance policy. In order to adjust the spillover effects between suppliers and retailers, a supply chain coordination strategy based on revenue sharing contracts is designed. The results show that the carbon cap policy improves the sustainable levels of inventory and transportation, but has no effect on the service level. The total profit of centralized VMI supply chain increases monotonically with the carbon cap, while the total profit of the decentralized and coordinated VMI supply chain first rises and then decreases with the carbon cap. Regardless of the implementation of carbon cap policy or not, the total profit and sustainable levels of centralized VMI supply chain are greater than that of decentralized coordinated VMI supply chain.

Key words: carbon cap policy; sustainable level; inventory; transportation; vendor-managed inventory

面对环境污染日益严重、全球气候日渐变暖、生态系统日趋退化和自然灾害频繁发生的严峻形势, 全球人类逐步意识到可持续性发展的重要性, 越来越多的国家开始采取措施控制温室气体的排放, 越来越多的组织和民众加入环境保护行动, 以减少大气中的碳排放。在供应链物流活动中, 运输

是最大碳排放源, 而库存则关系到库存水平、仓储活动以及运输频率等物流因素, 是供应链运作的主要决策因素。基于2500家大型企业供应链运作的调查结果显示, 仓储管理、库存控制、货物运输、物流配送环节的碳排放量超过供应链总碳排放量的20%^[1]。为了发展低碳供应链, 企业优化运输、库

收稿日期: 2020-11-04

基金项目: 教育部人文社会科学研究一般资助项目(17YJAZH074)

作者简介: 刘彩虹(1980—), 女, 湖北省人, 教授, 硕士, 主要研究方向为物流工程优化。

存、仓储、配送等决策, 加大清洁能源技术的碳减排投资, 以减少物流过程中的碳排放^[2]。例如, Marks & Spencer公司2007年的碳减排投资就达到了2亿英镑, 而Wal-Mart在要求其60 000个供应商削减5%的包装后, 碳排放量减少了667 000 m³[3]。从经济和环境角度而言, 库存和运输都是物流系统最重要的两大要素。研究库存和运输的可持续技术集成决策问题, 对推动物流可持续发展具有重要的现实意义。

现有许多文献研究了碳减排技术, 焦点之一是碳减排技术投资决策及其有效性。Drake等^[4]指出, 不应低估清洁技术在可持续性经济发展中的有效性。楼高翔等^[5]认为, 制造商减排水平与消费者低碳偏好呈正相关。政府可通过控制碳交易价格、技术补贴等手段来激励企业投资减排技术。赵丹等^[6]构建了基于公平关切行为的供应链减排博弈模型, 研究结论表明, 制造商公平关切对减排水平没有影响, 供应商公平关切能降低其减排水平。Shi等^[7]分析权力结构和可持续投资对经济和环境综合效应的影响, 并提出权力较小的供应链成员更有动力进行可持续投资, 以获得较高利润。蔡东等^[8]研究信息不对称情形下供应链上低碳技术创新的激励政策。张克勇等^[9]构建供应链碳减排资金的融资决策模型, 分析银行借贷、股权融资和组合融资等3种融资策略。Dong等^[10]研究碳限额与交易政策下的可持续投资问题。Cheng等^[3]在Dong的研究基础上, 将大数据背景引入到可持续投资决策模型。

VMI供应链优化亦是学者们研究的焦点问题之一。Cheung等^[11]指出, VMI带给供应链的两大好处是运输协同和库存再平衡。Cetinkaya等^[12]研究VMI背景下的运输计划问题, 建立库存和运输协同决策模型。汤中明等^[13]研究VMI模式下的补货策略。徐友良等^[14]构建合作博弈VMI供应链下库存与运输的集成优化系统。杨怀珍等^[15]构建集中控制型VMI&TPL模式下基于收益共享契约的利益分配机制。Zanoni等^[16]将碳交易机制引入VMI, 构建寄售库存契约下的经济批量模型。Jiang等^[17]的研究结果表明, 引入碳交易机制后, VMI模型会增加供应链总成本。

从现有研究来看, 虽有文献研究了供应链环节可持续技术决策问题, 但主要研究生产环节的可持续技术决策, 研究物流环节可持续技术决策的文献较少。Toptal等^[18]、李剑等^[19]分别研究库存环节和运输环节的可持续技术决策问题, 本文则同时考虑库

存和运输两个因素的可持续技术决策问题。而研究VMI供应链下库存运输集成问题的文献主要考虑库存运输成本因素, 考虑库存运输可持续发展问题的文献并不多见。鉴于此, 本文将分别探讨分散协调VMI (decentralized vendor-managed inventory, DVMI) 和集中控制VMI (centralized vendor-managed inventory, CVMI) 供应链模式下库存和运输环节的可持续技术优化问题。具体而言, 论文主要研究以下问题。1) 在DVMI和CVMI两类供应链下, 供应商如何进行运输、库存可持续性水平决策? 2) 碳限额政策下, 供应商如何进行可持续技术决策? 碳限额政策对供应商可持续技术决策有何影响? 3) 可持续技术决策对DVMI和CVMI供应链性能有何影响? 4) 在CVMI供应链下, 如何实现供应商和零售商利益的协调?

1 模型假设与符号说明

本文考虑VMI环境下“单供应商-单零售商”供应链。设产品的市场价格为 p ; 供应商批发价为 w ; 单位产品成本为 c (其中, c_m 表示生产成本; c_t 表示运输成本; c_i 表示库存成本)。产品如未能销售出去, 则会因为贬值只能得到部分回收价值 v 。供应商设定的服务水平和库存水平分别为 L 和 Q 。设零售商销售努力程度为 x ; 销售努力直接引起的市场需求量为 $f(x)$; 销售努力引起的成本为 $g(x)$ 。假设 $f'(x) > 0$, $f''(x) < 0$, $g'(x) > 0$, $g''(x) \geq 0$, 即市场需求量随着销售努力程度的增加而增加, 但需求增加的速度将越来越慢。零售商销售越努力, 销售成本则越高, 且成本增加的速度将越来越快。设可持续水平对需求的影响系数为 β ; 库存和运输可持续水平分别为 s_i 和 s_t ; 库存和运输可持续投资系数为 δ_i 和 δ_t 。当可持续水平为0时, 单位产品库存和运输的碳排放量分别为 a_i 和 a_t , 可持续水平对库存、运输碳排放影响系数分别为 b_i 和 b_t 。市场需求对产品的碳足迹敏感, 即可持续水平越高, 市场需求就越大, 但可持续投资成本亦会越高, 且成本增加速度越来越快。假设运输和库存可持续投资产生的需求分别为 βs_i 、 βs_t ; 可持续投资成本分别为 $\delta_i s_i^2/2$ 和 $\delta_t s_t^2/2$ ^[15-16]。假设市场需求 $D(x, s_i, s_t) = f(x) + \beta(s_i + s_t) + \xi$ (ξ 表示均值为 μ ; 概率密度函数和概率分布函数分别为 $\varphi(y)$ 、 $F(y)$ 的随机需求), 即市场需求受到零售商销售努力程度、可持续

水平和市场随机性需求因素的共同影响。利润函数用 Π 表示。在利润函数和决策变量中，R、V、T分别表示零售商、供应商和整个供应链；上标c表示碳限额政策；I和II分别表示DVMI供应链和CVMI供应链。

2 基本模型构建与分析

2.1 DVMI供应链可持续水平决策模型

在DVMI供应链下，零售商负责市场销售，供应商负责运输环节和库存环节。零售商决策销售努力程度，供应商决策运输环节可持续水平、库存环节可持续水平。零售商和供应商的期望利润函数分别为

$$\Pi_1^R = E [p \min(D, Q) - w \min(Q, D) - g(x)]; \quad (1)$$

$$\Pi_1^V = E [(w \min(D, Q) - (c_m + c_i + c_1)Q - \frac{\delta_1 s_1^2 + \delta_1 s_1^2}{2} + v(Q - D)^+)]. \quad (2)$$

式(1)中，第1项是零售商销售收入；第2项是产品批发成本；第3项是销售费用。式(2)中，第1项是供应商销售收入；第2项是产品成本，包括生产成本、运输成本和库存成本；第3项是可持续投资成本；第4项是超储产品的回收价值。分别求式(1)对 x 的一阶导数和二阶导数，结果为

$$\frac{d\Pi_1^R}{dx} = (p - w)f'(x) \int_0^{Q-f(x)-\beta(s_1+s_1)} \varphi(y)dy - g'(x); \quad (3)$$

$$\frac{d^2\Pi_1^R}{dx^2} = (p - w)f''(x) \int_0^{Q-f(x)-\beta(s_1+s_1)} \varphi(y)dy - (p - w)[f'(x)]^2 \times \varphi[Q - f(x) - \beta(s_1 + s_1)] - g''(x). \quad (4)$$

其中， $\varphi(\cdot)$ 为需求的概率分布函数。

因为 $f'(x) > 0$ ， $f''(x) < 0$ ，且 $g''(x) \geq 0$ ，所以可知 $\frac{d^2\Pi_1^R}{dx^2} < 0$ 。容易判断， Π_1^R 存在关于 x 的最大值。设零售商促销努力程度为 x_1^* 。若 x_1^* 满足式(5)，则 x_1^* 为分散决策VMI模式下零售商最优促销努力程度。

$$(p - w)f'(x_1^*) \int_0^{Q-f(x_1^*)-\beta(s_1+s_1)} \varphi(y)dy = g'(x_1^*). \quad (5)$$

同理，求式(2)对 s_1 的一阶导数和二阶导数，如式(6)、(7)所示。因为 $\frac{d^2\Pi_1^V}{ds_1^2} < 0$ ，故当 $s_1^* = \frac{(w - c_m - c_i - c_1)\beta}{\delta_1}$ 时， Π_1^V 有关于 s_1 的最大值。同理，当 $s_1^* = \frac{(w - c_m - c_i - c_1)\beta}{\delta_1}$ 时， Π_1^V 有最大值。

$$\frac{d\Pi_1^V}{ds_1} = (w - v)\beta \int_0^{Q-f(x)-\beta(s_1+s_1)} \varphi(y)dy - \delta_1 s_1; \quad (6)$$

$$\frac{d^2\Pi_1^V}{ds_1^2} = -(w - v)\beta \varphi[Q - f(x) - \beta(s_1 + s_1)] - \delta_1 < 0. \quad (7)$$

求式(2)对 Q 的一阶导数和二阶导数，可知 Π_1^V 有最大值。通过一阶导数条件得到服务水平如式(8)所示，并由此得到供应商最优库存量 Q_1^* 如式(9)所示。

$$L_1^* = \frac{w - c_m - c_i - c_1}{w - v}; \quad (8)$$

$$Q_1^* = f(x_1^*) + \beta(s_1^* + s_1^*) + F^{-1}\left(\frac{w - c_m - c_i - c_1}{w - v}\right). \quad (9)$$

将式(8)代入式(5)，得到零售商促销努力程度 x_1^* 满足式(10)。

$$(p - w)f'(x_1^*) = \frac{w - v}{w - c_m - c_i - c_1} g'(x_1^*). \quad (10)$$

2.2 CVMI供应链可持续水平决策模型

在CVMI模式下，供应商和零售商之间实现完全的信息共享，从博弈关系变成“完全合作”关系。双方形成一个决策主体，以供应链整体利益最优为目标，进行可持续水平决策和销售决策。供应链期望利润函数为

$$\Pi_{II}^T = E [p \min(D, Q) - (c_m + c_i + c_1)Q - g(x) - \frac{\delta_1 s_1^2 + \delta_1 s_1^2}{2} + v(Q - D)^+]. \quad (11)$$

式(11)中，第1项为销售收入；第2项为产品成本(包括生产成本和物流成本)；第3项为销售费用；第4项为可持续投资成本；第5项为回收产品的残余价值。

运用类似DVMI模式下决策模型的分析方法，得到主要决策结论如下。

1) 设集中控制VMI模式下零售商销售努力程度为 x_{II}^* 。若 x_{II}^* 满足式(12)，则 x_{II}^* 为零售商最优促销努力程度。

$$(p - c_m - c_i - c_1)f'(x_{II}^*) = \frac{p - v}{p - c_m - c_i - c_1} g'(x_{II}^*). \quad (12)$$

2) 供应商运输环节和库存环节最优可持续水平 s_1^{II*} 、 s_1^{II*} 分别为

$$s_1^{II*} = \frac{(p - c_m - c_i - c_1)\beta}{\delta_1}; \quad (13)$$

$$s_1^{II*} = \frac{(p - c_m - c_i - c_1)\beta}{\delta_1}. \quad (14)$$

3) 供应链期望收益最大时的库存量 Q_{II}^* 为

$$Q_{II}^* = f(x_{II}^*) + \beta(s_1^{II*} + s_1^{II*}) + F^{-1}\left(\frac{p - c_m - c_t - c_1}{p - v}\right). \quad (15)$$

其中, $\frac{p - c_m - c_t - c_1}{p - v}$ 为供应链设定的服务水平 L_{II}^* 。

式(12)~(15)所示的决策结果表明, 在CVMI模式下, 零售商在进行销售决策时, 会从供应链收益最大化角度来进行决策, 无需担心供应商是否有足够库存。因此, 零售商会将销售努力水平设置在供应链边际收益等于边际成本处。供应商在进行可持续水平和库存决策时, 其已完全了解零售商的销售努力水平, 并从供应链利益最大化为目标进行决策, 最大程度地提高可持续水平。

2.3 模型比较分析

从以上分析可知, 当市场价格 p 一定时, DVMI模式下的销售努力程度和可持续水平取决于批发价格 w , 而CVMI模式下的销售努力程度和可持续水平与批发价格 w 无关。对比DVMI和CVMI两种模式下 x 、 s_t 、 s_1 、 L 和 Q 的最优决策值, 基于产品销售价格、批发价格、成本和回收价值之间的关系, 可推导出以下定理。

定理1 CVMI供应链的可持续水平要高于DVMI供应链, 即 $s_t^* < s_t^{II*}$, $s_1^* < s_1^{II*}$ 。

证明 因为 $p > w$, 从而 $p - c_m - c_t - c_1 > w - c_m - c_t - c_1$ 。故有 $\frac{(p - c_m - c_t - c_1)\beta}{\delta_t} > \frac{(w - c_m - c_t - c_1)\beta}{\delta_t}$, 即 $s_t^* < s_t^{II*}$ 。同理, $s_1^* < s_1^{II*}$ 。

定理2 CVMI供应链零售商销售努力程度要高于DVMI供应链, 即 $x_1^* < x_{II}^*$ 。

证明 因为 $w > c_m + c_t + c_1$, 从而有 $p - w < p - c_m - c_t - c_1$, $\frac{w - c_m - c_t - c_1}{w - v} < \frac{p - c_m - c_t - c_1}{p - v}$ 。

因此, 依据 $f(x)$ 和 $g(x)$ 的特性 $f'(x) > 0$, $f''(x) < 0$, $g'(x) > 0$, $g''(x) \geq 0$, 故有 $x_1^* < x_{II}^*$ 。

定理3 CVMI供应链零售商的库存水平高于DVMI供应链, 即 $L_1^* < L_{II}^*$ 。

证明 因为 $w > c_m + c_t + c_1$, 从而有 $\frac{w - c_m - c_t - c_1}{p - v} < \frac{p - c_m - c_t - c_1}{p - v}$, 即 $L_1^* < L_{II}^*$ 。

定理4 CVMI供应链零售商的订货量高于DVMI供应链, 即 $Q_1^* < Q_{II}^*$ 。

证明 由定理1~3和 $f(x)$ 的特性可知,

$$f(x_1^*) < f(x_{II}^*), \quad \beta(s_1^* + s_1^*) < \beta(s_1^{II*} + s_1^{II*}),$$

$$F^{-1}\left(\frac{w - c_m - c_t - c_1}{p - v}\right) < F^{-1}\left(\frac{p - c_m - c_t - c_1}{p - v}\right)。$$

由式(9)和(15)可知, $Q_1^* < Q_{II}^*$ 。

以上定理表明, 从DVMI模式转向CVMI模式时, 供应商会提高库存和运输可持续水平, 零售商亦会提升销售努力程度。为了获得更多的利润, 供应商会增加库存量, 以提高服务水平。由于利润函数受到多个因素的影响, 本文将在第4节通过算例来分析利润的变化情况。

3 碳限额政策下决策模型分析

3.1 碳限额政策下DVMI供应链可持续水平决策

考虑碳限额政策后, 在决策库存、运输可持续水平时, 需要对库存、运输环节产生的碳排放量予以控制。设 K 为库存、运输环节碳排放量上限, 则需要原决策模型中加入碳排放限制的约束条件, 如式(16)所示。

$$(a_t - b_t s_t) + (a_1 - b_1 s_1) \leq K. \quad (16)$$

碳限额政策影响分散协调VMI模式下的可持续水平决策的过程。通过前文的分析可知, Π_1^V 是关于 s_t 和 s_1 的凸函数。因此, Π_1^V 在 $s_t \in [0, s_t^*]$ 时单调递增; 在 $s_t \in \left(s_t^*, \frac{a_t}{b_t}\right]$ 时单调递减。同理, Π_1^V 在 $s_1 \in (0, s_1^*]$ 时单调递增; 在 $s_1 \in \left(s_1^*, \frac{a_1}{b_1}\right]$ 时单调递减。基于此, 碳限额政策下决策模型可按以下方法得到最优解。

1) 如果 $(a_t - b_t s_t^*) + (a_1 - b_1 s_1^*) \leq K$, 即 s_t^* 和 s_1^* 满足约束条件(16), 此时碳限额条件没有实际约束作用, 则 s_t^* 和 s_1^* 即为碳限额政策下DVMI模型的最优解。

2) 如果 $(a_t - b_t s_t^*) + (a_1 - b_1 s_1^*) > K$, 此时, 为了满足碳限额条件, 供应商需要进一步提高可持续水平 s_t 和 s_1 , 直至满足 $(a_t - b_t s_t) + (a_1 - b_1 s_1) = K$ 为止。

由此, 得到可持续水平 s_t 和 s_1 的变化关系为

$$s_t = \frac{a_t + a_1 - K - b_1 s_1}{b_t}, \quad s_1 \in \left[s_1^*, \frac{a_1}{b_1}\right]. \quad (17)$$

将式(17)代入式(2), 求式(2)对 s_1 的一阶导数和二阶导数, 得式(18)、(19)。

$$\frac{d\Pi_1^V}{ds_1} = \frac{(w - c_s - c_m - c_1)\beta b_t(b_t + b_1) + \delta_t b_t(a_t + a_1 - K)}{b_t^2} - \frac{\delta_t b_1^2 + \delta_1 b_1^2}{b_t^2} s_1; \quad (18)$$

$$\frac{d^2\Pi_1^V}{ds_1^2} = -\frac{\delta_1 b_1^2 + \delta_1 b_1^2}{b_1^2}. \quad (19)$$

容易判断, $\frac{d^2\Pi_1^V}{ds_1^2} < 0$, Π_1^V 是关于 s_1 的凸函数。

根据一阶条件可知, 最优库存可持续水平 s_1^{cl*} 可由式(20)求得。

$$s_1^{cl*} = \frac{(w - c_m - c_i - c_1)\beta b_1(b_1 + b_i) + \delta_1 b_1(a_1 + a_i - K)}{\delta_1 b_1^2 + \delta_1 b_1^2}. \quad (20)$$

将 s_1^{cl*} 代入式(17)即可求得最优运输可持续水平 s_1^{cl*} , 如式(21)所示。

$$s_1^{cl*} = \frac{a_1 + a_i - K - b_1 s_1^{cl*}}{b_1}. \quad (21)$$

3.2 碳限额政策下CVMI供应链可持续水平决策

类似于DVMI模型的分析方法, CVMI模型的可持续水平决策可按以下方法得到最优解。

1) 如果 $(a_1 - b_1 s_1^{ll*}) + (a_1 - b_1 s_1^{ll*}) \leq K$, 即 s_1^{ll*} 和 s_1^{ll*} 满足约束条件(16), 此时碳限额条件没有实际约束作用, 则 s_1^{ll*} 和 s_1^{ll*} 为碳限额政策下CVMI模型的最优解。

2) 如果 $(a_1 - b_1 s_1^{ll*}) + (a_1 - b_1 s_1^{ll*}) > K$, 则CVMI模式下最优库存可持续水平 s_1^{cl*} 可由式(22)求得。将 s_1^{cl*} 代入式(23)即可求得最优运输可持续水平 s_1^{cl*} 。

$$s_1^{cl*} = \frac{(p - c_m - c_i - c_1)\beta b_1(b_1 + b_i) + \delta_1 b_1(a_1 + a_i - K)}{\delta_1 b_1^2 + \delta_1 b_1^2}; \quad (22)$$

$$s_1^{cl*} = \frac{a_1 + a_i - K - b_1 s_1^{cl*}}{b_1}. \quad (23)$$

3.3 碳限额政策对可持续水平的影响

基于3.1和3.2节的模型分析结果, 可得到以下定理。

定理5 当 $(a_1 - b_1 s_1^{ll*}) + (a_1 - b_1 s_1^{ll*}) > K$ 时, DVMI供应链库存和运输可持续水平随着碳限额的增加而降低。

证明 由式(20)求 s_1^{cl*} 关于 K 的导数, 即 $\frac{ds_1^{cl*}}{dK} = -\frac{\delta_1 b_1}{\delta_1 b_1^2 + \delta_1 b_1^2} < 0$ 。由一阶导数判定定理可知, s_1^{cl*} 随着 K 值单调递减。同理, s_1^{cl*} 随着 K 值单调递减。即DVMI供应链下, 可持续水平随着碳限额的增加而降低。

定理6 当 $(a_1 - b_1 s_1^{ll*}) + (a_1 - b_1 s_1^{ll*}) > K$ 时, CVMI供应链库存和运输可持续水平随着碳限额的增加而

降低。证明方法与定理5类似, 证明过程省略。

定理7 当 $(a_1 - b_1 s_1^{ll*}) + (a_1 - b_1 s_1^{ll*}) > K$ 时, CVMI供应链可持续水平要高于DVMI供应链, 即 $s_1^{cl*} > s_1^{cl*}$, $s_1^{cl*} > s_1^{cl*}$ 。

证明 当 $(a_1 - b_1 s_1^{ll*}) + (a_1 - b_1 s_1^{ll*}) > K$ 时, $s_1^{cl*} - s_1^{cl*} = \frac{(p - w)\beta b_1(b_1 + b_i)}{\delta_1 b_1^2 + \delta_1 b_1^2} > 0$, 故有 $s_1^{cl*} > s_1^{cl*}$ 。同理, $s_1^{cl*} > s_1^{cl*}$ 。

4 模拟分析

4.1 无碳政策下供应链决策模拟

为了验证DVMI和CVMI供应链模型的决策结论, 下面对两类供应链利润变化情况进行模拟分析。假设 $f(x) = 10\sqrt{x}$, $g(x) = x$, $p = 90$, $c_m = 25$, $c_1 = 2$, $c_i = 3$, $v = 5$, $a_1 = 5$, $b_1 = 0.5$, $a_i = 3$, $b_i = 0.3$, $\beta = 140$, $\delta_1 = 1500$, $\delta_i = 1200$ 。将批发价格 w 变化区间设为 $[35, 95]$ 。依据DVMI和CVMI供应链模型的决策方法, 在Matlab中编程模拟计算。设 $\xi \sim N(200, 20)$, 在Matlab中运用random函数随机产生100种需求, 计算出100种随机需求下的平均结果, 得到供应链决策与利润随批发价格变化情况, 如图1所示。

图1反映了零售商和供应商决策随批发价格 w 变化的情况。图1(a)、(b)和(c)表明, CVMI供应链的库存可持续水平、运输可持续水平和服务水平均要高于DVMI供应链。DVMI供应链的库存可持续水平、运输可持续水平和服务水平均随着批发价格 w 的增加而增加, 而CVMI供应链的库存可持续水平、运输可持续水平和服务水平都固定在某个较高水平。以上算例结果与理论分析结论是完全一致的。供应链利润主要有以下结论。

1) 零售商和供应商利润与批发价格 w 有关。

图1(d)表明, 在CVMI供应链下, 零售商利润随着批发价格 w 增加而减少。在DVMI供应链下, 零售商利润在批发价格 w 等于45时达到最大值。当批发价格 w 小于62.8时, CVMI供应链的零售商利润大于DVMI供应链的零售商利润。当批发价格 w 大于62.8时, CVMI供应链的零售商利润小于DVMI供应链的零售商利润。图1(e)表明, 在CVMI供应链下, 供应商利润随着批发价格 w 增加而增加。在DVMI供应链下, 供应商利润在批发价格 w 等于85时达到最大值。当批发价格 w 大于40时, CVMI供应链的供应商利润大于DVMI供应链的供应商利润。

2) CVMI供应链总利润大于DVMI供应链总利润。

图1(f)表明, CVMI供应链总利润稳定在较高水平, 且远远大于DVMI供应链总利润。在DVMI供应链下, 供应链总利润随着批发价格 w 呈现倒U型变化规律, 即在批发价格 w 较低时, 供应链总利润随

着批发价格 w 的增加而增加, 当批发价格 w 增加到一定值(65)时, 供应链总利润达到最大值。之后, 供应链总利润则随着批发价格 w 增加而减少。

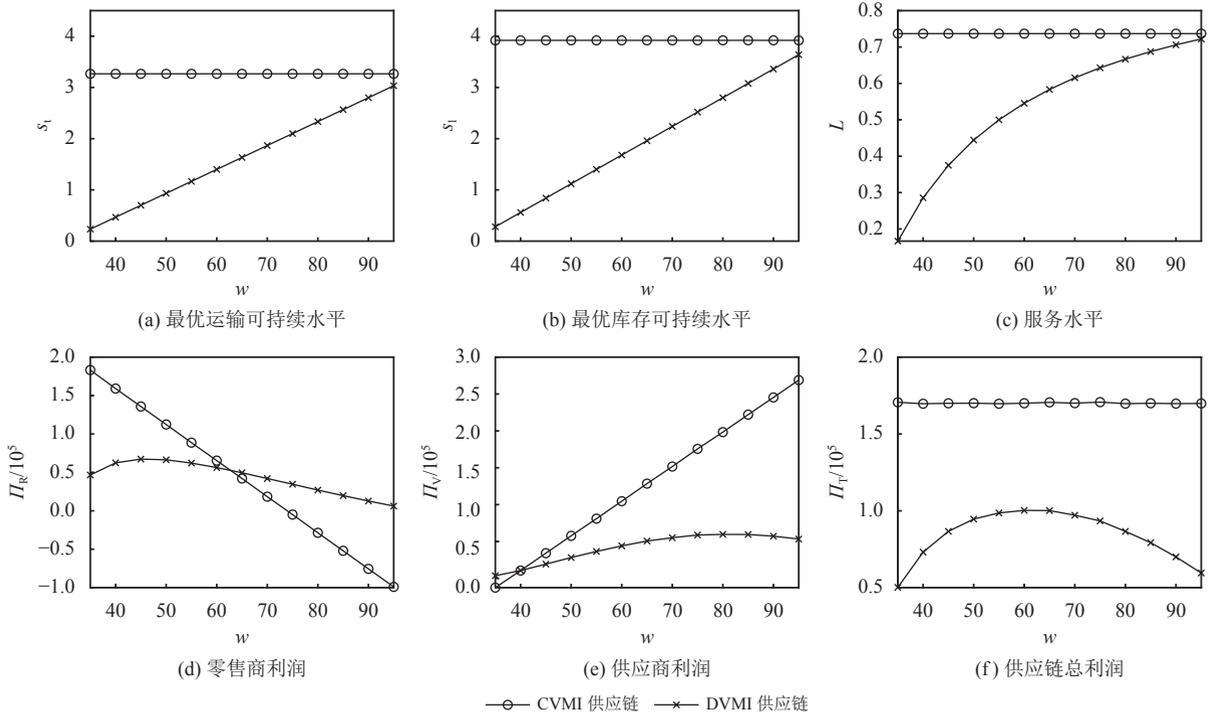


图1 DVMI和CVMI供应链优化结果

Figure 1 The optimal results in DVMI and CVMI supply chain

4.2 碳限额政策下供应链决策模拟

由4.1节的算例分析结论可知, 当批发价格 w 为65时, DVMI供应链总利润达到最大值。因此, 本节算例将批发价格 w 设为65, 其他参数值与4.1节相同。将碳限额参数 K 变化范围设为[2,8]。在Matlab中编程模拟100种随机需求情形, 得到的DVMI和CVMI供应链可持续水平和利润随碳限额参数 K 值变化情况分别如图2和3所示。通过对比分析发现, 碳限额政策的影响主要体现在以下方面。

1) 碳限额政策提高了库存和运输可持续水平。无论是DVMI供应链还是CVMI供应链, 当 $K < 7$ 时, 碳限额政策下的库存、运输可持续水平均高于无碳政策情形。库存、运输可持续水平随着 K 值单调递减(如图2(a)、(b)和图3(a)、(b)所示)。

2) 碳限额政策对服务水平没有影响, 如图2(c)、图3(c)所示。这是因为服务水平由销售价格、批发价格、生产成本、运输成本、库存成本和回收价值

等因素决定, 与可持续水平无关。

3) 碳限额政策增加了零售商利润, 降低了供应商利润。图2(d)、(e)和图3(d)、(e)表明, 当碳限额参数 K 小于一定阈值时, 零售商利润随着 K 值增加而减少, 而供应商利润随着 K 值增加而增加。这说明在一定的政策范围内, 碳限额政策越严厉(即 K 值越小), 零售商利润越高, 而供应商利润越低。这主要是因为供应商提高了库存、运输的可持续投资, 以满足碳限额政策要求。碳限额越严厉, 供应商可持续投资越高, 从而降低了其利润。而可持续投资的增加提高了市场需求, 零售商可从增加的市场需求中获益, 因而其利润会增加。当碳限额参数 K 大于一定阈值时, 零售商和供应商利润不再受碳限额参数 K 值的影响, 表明过于宽松的碳限额政策对供应商和零售商决策没有实际影响。

4) DVMI供应链总利润随 K 值呈倒U型变化关系, 如图2(f)所示。当 $K=5$ 时, DVMI供应链总利润

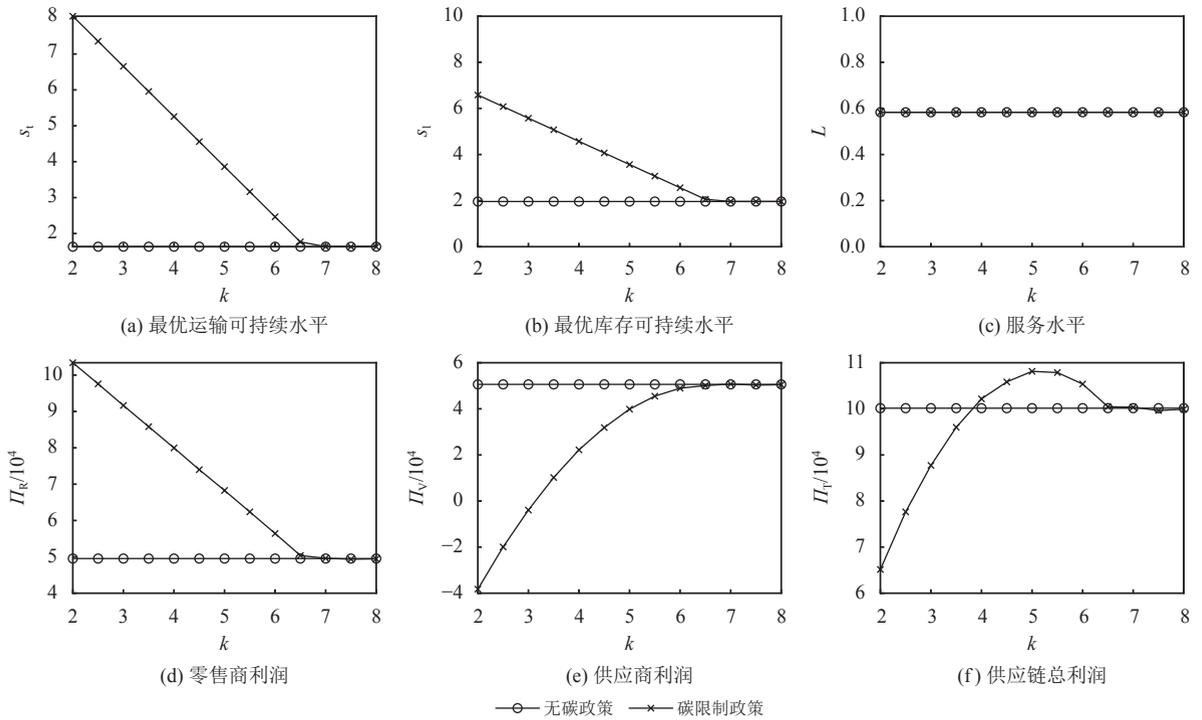


图 2 DVMI供应链最优可持续水平和利润

Figure 2 The optimal sustainable levels and profits in DVMI supply chain

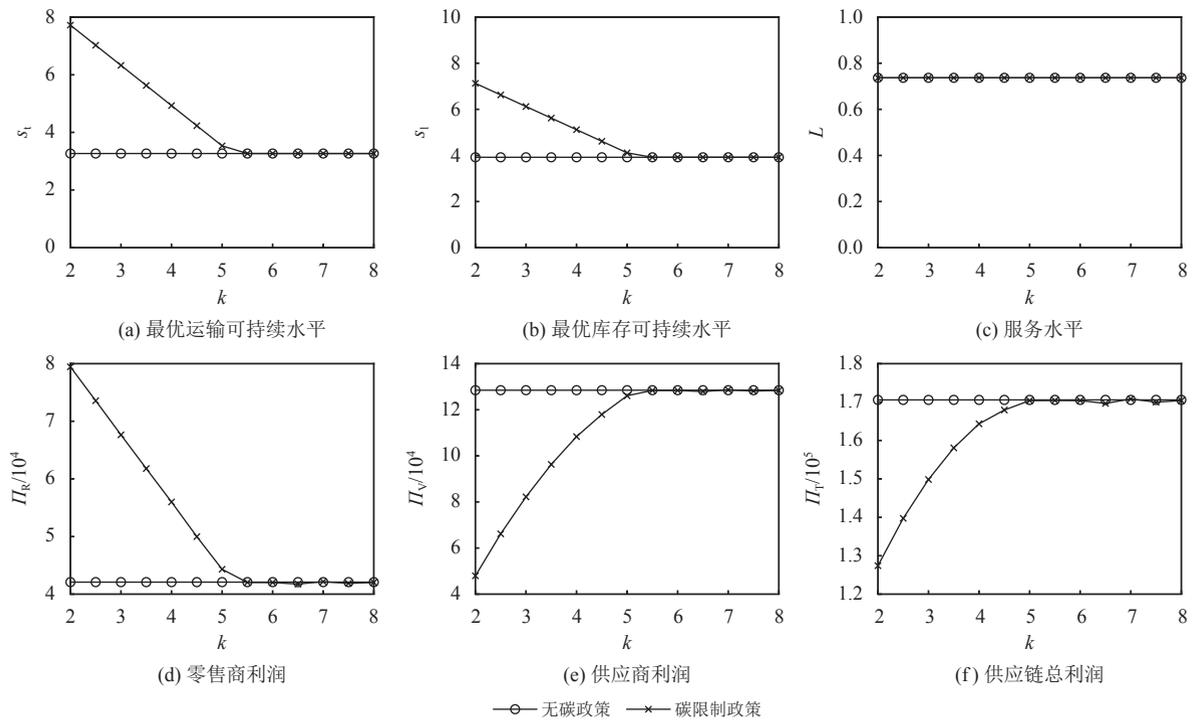


图 3 CVMI供应链最优可持续水平和利润

Figure 3 The optimal sustainable levels and profits in CVMI supply chain

最大化。在DVMI供应链下，供应商根据其边际利润决策可持续投资。当供应商边际收益等于边际成本时，供应链总边际收益仍然大于边际成本。因

此，当采取碳政策后，供应商会继续提高可持续水平以满足碳限额约束。当库存和运输可持续水平小于 s_t^{cl*} 、 s_i^{cl*} 时，虽然供应商利润会下降，但供应链总

利润仍然会提高, 反应供应链利润产生了溢出效应。当库存和运输可持续水平大于 s_1^{c1*} 、 s_1^{c1*} 时, 此时供应链总利润亦会下降。

5) 碳限额政策降低了 CVMI 供应链总利润。

图3(f)表明, 当碳限额参数 K 小于一定阈值时, CVMI 供应链总利润随着 K 值增加而增加, 说明碳限额政策越严厉(即 K 值越小), CVMI 供应链总利润越低。这是因为采取碳限额政策后, 可持续投资边际收益小于边际成本, 从而导致供应链总利润下降。

6) 采取碳政策后, CVMI 供应链总利润仍然大于 DVMI 供应链总利润。对比图2(f)和图3(f)可知, 无论碳限额政策严厉或宽松, CVMI 供应链总利润均远远大于 DVMI 供应链总利润。

5 CVMI 供应链协调策略

前文分析结果表明, 无论采取碳限额政策与否, CVMI 供应链绩效均优于 DVMI 供应链, 但对零售商和供应商而言, 利润的变化却是不确定的。在 CVMI 供应链下, 供应商会加大库存、运输可持续投资, 这会加大供应链上的溢出效应。因此, CVMI 供应链运行的前提条件是要实现供应链总利润在供应商和零售商之间的合理分配。收益分享契约是供应链协调的有效策略, 下面探讨如何设计有效的收益分享契约来实现 CVMI 供应链利益的协调。

设收益分享契约为 (w, ϕ) , 供应商以价格 w 将产品卖给零售商, 同时从零售商销售收入中获得一部分利润, 其中, ϕ 为供应商获得零售商收入的比例。由此得到零售商和供应商的期望收益分别为。

$$\Pi_{II}^R = E[(1-\phi)p\min(D, Q) - w\min(D, Q) - g(x)]; \quad (24)$$

$$\Pi_{II}^V = E[\phi p\min(D, Q) + w\min(D, Q) - (c_m + c_i + c_1)Q - \frac{\delta_1 s_1^2 + \delta_1 s_1^2}{2} + v(Q - D)^+]. \quad (25)$$

对式(25)推导可知, 要使供应商按供应链最优库存量 Q_{II}^* 储存货物, 则应满足式(26)所示条件。对式(24)推导可知, 要使零售商按供应链最优促销力度 x_{II}^* 进行促销, 则应满足式(27)所示条件。

$$w = (1-\phi)p; \quad (26)$$

$$[(1-\phi)p - w] \frac{c_m + c_i + c_1 - v}{p - v} = p - c_m - c_i - c_1. \quad (27)$$

通过对式(26)、(27)进一步分析可知, 要使等式

成立必须满足两个条件, 即 $\phi = 0$, $p = w = c_m + c_i + c_1$ 。对零售商而言, 要使自身利益最大化, 他希望供应商能以成本价销售产品, 同时不分配任何收入。在这种情形下, 零售商获得了供应链上的所有收入。式(26)可以很好地解释供应商应对零售商行为的策略。为了应对零售商的自利行为, 供应商将根据零售商分配给其收入比例 ϕ 来确定 w 价格。分配比例 ϕ 越小, 则定价 w 就越高。如果零售商不分配收入给供应商, 供应商则将按市场销售价格确定 w , 即 $w = p$ 。这是零售商和供应商都不愿意看到的“两败俱伤”局面。由此可见, 要实现供应链利益的最大化, 达到双赢局面, 供应商和零售商必须在利润分配原则方面达成共识, 共同设计收益分享契约参数值。

在 CVMI 供应链下, 零售商销售投资增加了 $g'(x_{II}^*) - g'(x_1^*)$ 。在其他条件不变情况下, 供应商利润增加了 $(w - c_m - c_i - c_1)[f(x_{II}^*) - f(x_1^*)]$ 。供应商库存和运输可持续投资分别增加了 $\frac{(p-w)(p-2c_m-2c_i-2c_1)\beta^2}{2\delta_1}$ 和 $\frac{(p-w)(p-2c_m-2c_i-2c_1)\beta^2}{2\delta_1}$, 零售商利润分别增加了 $\frac{(p-w)^2\beta^2}{\delta_1}$ 和 $\frac{(p-w)^2\beta^2}{\delta_1}$ 。由此可见, 零售商、供应商投资都会在供应链上下游企业之间形成溢出效应, 而这种溢出效应正是造成 CVMI 模式下零售商和供应商违背投入产出原则, 从而产生利益失衡现象的根本原因。

由此可见, 要实现 CVMI 供应链零售商和供应商利益的协调, 收益分享契约必须满足两个基本条件: 1) 零售商和供应商利润均不得低于 DVMI 供应链各自的利润, 否则供需双方均没有合作意愿; 2) 利润的分配应符合投入产出的基本原则。基于此, 收益分享契约下零售商利润应满足式(28), 由式(28)可推导出给定市场批发价格 w 时的收入分配比例 ϕ 值, 如式(29)所示。

$$\begin{aligned} & p\min(D, Q_{II}^*)(1-\phi) - g(x_{II}^*) - w\min(D, Q_{II}^*) = \Pi_{II}^R + \\ & (\Pi_{II}^R - \Pi_{II}^R - \Pi_{II}^V) \times \\ & \frac{2[g(x_{II}^*) - g(x_1^*)]}{2[g(x_{II}^*) - g(x_1^*)] + \delta_1(s_1^{c1*2} - s_1^{c1*2}) + \delta_1(s_1^{c1*2} - s_1^{c1*2})}; \quad (28) \\ & \phi = \frac{1}{p\min(D, Q_{II}^*)} \left\{ (p-w)\min(D, Q_{II}^*) - g(x_{II}^*) - \Pi_{II}^R - \right. \\ & \left. (\Pi_{II}^R - \Pi_{II}^R - \Pi_{II}^V) \frac{2[g(x_{II}^*) - g(x_1^*)]}{2[g(x_{II}^*) - g(x_1^*)] + \delta_1(s_1^{c1*2} - s_1^{c1*2}) + \delta_1(s_1^{c1*2} - s_1^{c1*2})} \right\}. \quad (29) \end{aligned}$$

6 研究结论与展望

本文以“单供应商-单零售商”供应链为研究对象,研究碳限额政策下VMI供应链库存运输可持续技术决策优化问题。产品需求受销售努力程度、可持续水平及随机需求等因素的共同影响。考虑DVMI和CVMI两种供应链,分别构建无碳政策和碳限额政策下库存运输可持续技术决策模型。在分析CVMI供应链协调运作基本条件的基础上,设计供应商和零售商之间的收益分享契约,确定了供应链收入分配的比例。研究的主要结论如下。

1) 无论采取碳限额政策与否, CVMI供应链的库存和运输可持续水平均要高于DVMI供应链。

2) 碳限额政策提高了库存和运输的可持续水平。在DVMI和CVMI供应链下,库存和运输可持续水平均随着碳限额政策的紧缩而提高。

3) DVMI供应链总利润随碳限额呈倒U型变化关系,即碳限额较高时,适当紧缩碳限额能提升DVMI供应链总利润。碳限额政策降低了CVMI供应链总利润。碳限额政策会降低供应商利润和提高零售商利润,从而在供应链上产生纵向溢出效应。

4) CVMI供应链服务水平要高于DVMI供应链,碳限额政策对服务水平没有影响。

碳限额政策降低了供应链上的碳排放量,能有效提升环境效用,但亦对供应链经济效用有一定的负面影响。因此,未来研究可以考虑经济和环境两方面因素,从社会福利最大化角度设计合适的碳限额政策。同时,其他碳减排政策,如碳限额交易、碳补偿、碳税等,对物流可持续技术的影响亦是值得深入研究的方向。另外,本文的研究在供应链网络结构方面还具有一定的局限性。在未来研究中,可以考虑诸如“一对多”、“多对一”或“多对多”等更复杂的供应链网络环境。复杂的供应链网络会使得供应链上可持续投资的溢出效应呈现网状结构,供应链上溢出效应的协调策略亦需要进一步深入研究。

参考文献:

- [1] KONUR D, SCHAEFER B. Integrated inventory control and transportation decisions under carbon emissions regulations: LTL vs. TL carriers[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2014, 68(8): 14-38.
- [2] BOURCHERY Y, GHAFARI A, JEMAI Z, et al. Including sustainability criteria into inventory models[J]. *European Journal of Operational Research*, 2012, 222(2): 229-240.
- [3] CHENG Y, KUANG Y, SHI X, et al. Sustainable investment in

a supply chain in the big data era: an information updating approach[J]. *Sustainability*, 2018, 403(10): 1-18.

- [4] DRAKE D, SPINLER S. Sustainable operations management: an enduring stream or a passing fancy?[J]. *Manufacturing & Service Operations Management*, 2013, 15(4): 689-700.
- [5] 楼高翔, 张洁琼, 范体军, 等. 非对称信息下供应链减排投资策略及激励机制[J]. *管理科学学报*, 2016, 19(2): 42-52.
LOU Gaoxiang, ZHANG Jieqiong, FAN Tijun, et al. Supply chain's investment strategy of emission reducing and incentive mechanism design under asymmetric information[J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2016, 19(2): 42-52.
- [6] 赵丹, 戢守峰. 公平关切和低碳偏好下供应链减排投资策略研究[J]. *工业技术经济*, 2020, 39(1): 94-104.
ZHAO Dan, JI Shoufeng. Research on emission-reduction investment strategy of supply chain with fairness concerns and low-carbon preference[J]. *Journal of Industrial Technological Economics*, 2020, 39(1): 94-104.
- [7] SHI X, QIAN Y, DONG C. Economic and environmental performance of fashion supply chain: the joint effect of power structure and sustainable investment[J]. *Sustainability*, 2017, 9(6): 961-983.
- [8] 蔡东, 胡七丹, 郭春香. 碳交易下供应链中的技术创新激励合约设计[J]. *工业工程*, 2019, 22(5): 133-140.
CAI Dong, HU Qidan, GUO Chunxiang. Design of incentive contracts for technological innovation in supply chain under carbon trading[J]. *Industrial Engineering Journal*, 2019, 22(5): 133-140.
- [9] 张克勇, 李春霞, 姚建明. 考虑碳限额与销售努力的低碳供应链融资决策[J]. *计算机工程与应用*, 2020, 56(11): 1-10.
ZHANG Keyong, LI Chunxia, YAO Jianming. Financing decision of low carbon supply chain considering carbon limit and sales effort[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2020, 56(11): 1-10.
- [10] DONG C, SHEN B, CHOW P S, et al. Sustainability investment under cap-and-trade regulation[J]. *Annals of Operations Research*, 2016, 240(2): 509-531.
- [11] CHEUNG K L, LEE H L. The inventory benefit of shipment coordination and stock rebalancing in a supply chain[J]. *Management Science*, 2002, 48(2): 300-306.
- [12] ÇETINKAYA S, LEE C Y. Stock replenishment and shipment scheduling for vendor-managed inventory systems[J]. *Management Science*, 2000, 46(2): 217-232.
- [13] 汤中明, 刘志学. 分散协调VMI&TPL模式下的补货决策[J]. *工业工程*, 2010, 13(6): 10-13.
TANG Zhongming, LIU Zhixue. Replenishment decision model in decentralized coordinating VMI & TPL supply chain[J]. *Industrial Engineering Journal*, 2010, 13(6): 10-13.
- [14] 徐友良, 周阳. VMI模式下库存与运输集成优化研究[J]. *铁道运输与经济*, 2017, 39(3): 26-31.
XU Youliang, ZHOU Yang. Study on integrated optimization of inventory and transportation under VMI mode[J]. *Railway Transport and Economy*, 2017, 39(3): 26-31.

- [15] 杨怀珍, 霍玉龙, 李雷. 基于ANP方法改进的集中控制型VMI&TPL模式的利益分配机制[J]. 运筹与管理, 2017, 26(10): 81-87.
YANG Huaizhen, HUO Yulong, LI Lei. Benefit distribution mechanism for centralized control VMI&TPL mode based on ANP method[J]. Operations Research and Management Science, 2017, 26(10): 81-87.
- [16] ZANONI S, MAZZOLDI L, JABER M Y. Vendor-managed inventory with consignment stock agreement for single vendor-single buyer under the emission-trading scheme[J]. International Journal of Production Research, 2013, 52(1): 20-31.
- [17] JIANG Y, LI B, QU X, et al. A green vendor-managed inventory analysis in supply chains under carbon emissions trading mechanism[J]. Clean Technologies and Environmental Policy, 2015, 18(5): 1369-1380.
- [18] TOPTAL A, OZLU H, KONUR D. Joint decisions on inventory replenishment and emission reduction investment under different emission regulations[J]. International Journal of Production Research, 2014, 52(1): 243-269.
- [19] 李剑, 苏秦. 考虑运输过程的供应链减排模型研究[J]. 中国管理科学, 2017, 25(2): 78-86.
LI Jian, SU Qin. The study of emission reduction model for supply chain considering transportation[J]. Chinese Journal of Management Science, 2017, 25(2): 78-86.
- (责任编辑: 刘敏仪)
-
- (上接第27页)
- [5] 马德青, 胡劲松. 展厅现象下考虑利他行为的O2O供应链动态运营策略[J]. 管理学报, 2020, 17(5): 734-745.
MA Deqing, HU Jinsong. Dynamic operational & marketing strategies of O2O supply chain considering altruistic behavior under the phenomenon of showrooming[J]. Chinese Journal of Management, 2020, 17(5): 734-745.
- [6] SHI X, DONG C, CHENG T C E. Does the buy-online-and-pick-up-in-store strategy with pre-orders benefit a retailer with the consideration of returns?[J]. International Journal of Production Economics, 2018, 206(9): 134-145.
- [7] RADHI M, ZHANG G. Optimal cross-channel return policy in dual-channel retailing systems[J]. International Journal of Production Economics, 2019, 210(1): 184-198.
- [8] GAO F, SU X M. Omnichannel service operations with online and offline self-order technologies[J]. Management Science, 2018, 64(8): 3595-3608.
- [9] PI Z, FANG W. Service and pricing strategies with competition and cooperation in a dual-channel supply chain with demand disruption[J]. Computers & Industrial Engineering, 2019, 138: 106-130.
- [10] 严建援, 李雅婷. 考虑个性化增值服务BOPS交叉渠道运营研究[J]. 工业工程与管理, 2019, 24(3): 130-138.
YAN Jianyuan, LI Yating. A study on BOPS cross channel operation considering personalized value-added service[J]. Industrial Engineering and Management, 2019, 24(3): 130-138.
- [11] 范丹丹, 徐琪, 王文杰. 考虑线上线下需求迁移下的供应链O2O最优服务决策研究[J]. 中国管理科学, 2017, 25(11): 22-32.
FAN Dandan, XU Qi, WANG Wenjie. Optimal service decisions consideration demand shift between online and offline in supply chain O2O system[J]. Chinese Journal of Management Science, 2017, 25(11): 22-32.
- [12] ZHANG J, CHEN H, WU X. Operation models in O2O supply chain when existing competitive service level[J]. Science and Technology, 2015, 8(9): 279-290.
- [13] 罗美玲, 李刚. 多渠道供应链中的跨渠道退货服务策略研究[J]. 运筹与管理, 2019, 28(2): 16-22.
LUO Meiling, LI Gang. Cross-channel consumers return in a multi-channel supply chain[J]. Operations Research and Management Science, 2019, 28(2): 16-22.
- [14] DAVIS S, HAGERTY M, GERSTNER E. Return policies and the optimal level of "hassle"[J]. Journal of Economics and Business, 1998, 50(5): 445-460.
- [15] 罗美玲, 李刚, 梁冬寒. 知名品牌制造商与零售商的联合消费者返利促销[J]. 系统管理学报, 2019, 28(1): 174-184.
LUO Meiling, LI Gang, LIANG Donghan. Joint national brand consumer rebates in the competition between a national brand and a private label retailer[J]. Journal of System & Management, 2019, 28(1): 174-184.
- [16] SHULMAN J D, COUGHLAN A T, SAVASKAN R C. Managing consumer returns in a competitive environment[J]. Management Science, 2011, 57(2): 347-362.
- [17] MCWILLIAMS B. Money-back Guarantees: helping the low-quality retailer[J]. Management Science, 2012, 58(8): 1521-1524.
- [18] XING W, JING C, BINTONG C. Exploring service positioning in platform-based markets [J]. International Journal of Production Economics, 2020, 220(7): 456-460.
- (责任编辑: 程静)