

控制与决策

Control and Decision

考虑政府补贴的新产品与再制造产品定价模型

楼振凯, 楼旭明, 侯福均

引用本文:

楼振凯, 楼旭明, 侯福均. 考虑政府补贴的新产品与再制造产品定价模型[J]. *控制与决策*, 2022, 37(1): 196–204.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.1090>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同担保模式下考虑零售商公平关切的闭环供应链博弈模型

Game models of closed-loop supply chain under different warranty modes considering retailer's fairness concerns

控制与决策. 2021, 36(6): 1489–1498 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1328>

模糊环境下考虑零售商风险偏好的绿色供应链博弈模型

Modeling green supply chain games considering retailer's risk preference in fuzzy environment

控制与决策. 2021, 36(3): 711–723 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0646>

政府补贴和增值税退税政策的闭环供应链决策

Closed-loop supply chain decisions under government subsidies and VAT rebates

控制与决策. 2021, 36(11): 2771–2782 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0356>

风险规避制造商市场入侵策略

Market encroachment strategy of risk-averse manufacturer

控制与决策. 2021, 36(10): 2528–2536 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1819>

低碳环境下双渠道供应链线上线下广告策略的微分博弈分析

Differential game analysis of online and offline advertising strategies in a dual channel supply chain under low-carbon background

控制与决策. 2020, 35(11): 2707–2714 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1721>

考虑政府补贴的新产品与再制造产品定价模型

楼振凯¹, 楼旭明², 侯福均^{1†}

(1. 北京理工大学 管理与经济学院, 北京 100081; 2. 西安邮电大学 经济与管理学院, 西安 710121)

摘要: 在有限财政预算下, 政府对再制造产品进行补贴, 以促进再制造产品的生产和销售. 基于此, 首先建立政府对制造商进行生产补贴的三层决策模型, 该模型中制造商与新产品销售商和再制造产品销售商进行 Stackelberg 博弈, 同时两个销售商之间通过 Bertrand 博弈确定各自的销售价, 通过对解的分析, 揭示生产补贴对批发价、销售价以及销售量的影响, 并通过与无补贴销售量的比较, 进一步给出政府补贴提升再制造产品销量的根本原因; 然后给出对再制造产品销售商进行销售补贴下的三层模型, 证明销售补贴与生产补贴在影响销售价格、销售量方面的等价性; 接着讨论集中决策供应链中新产品与再制造产品销售的二层决策模型, 比较集中决策供应链与分散决策供应链再制造产品的销售量高低并分析其原因, 指出政府倾向于优先补贴的供应链类型; 最后给出一个算例, 分析不同类型供应链中再制造产品销售量对参数的敏感性.

关键词: 政府补贴; Stackelberg 博弈; Bertrand 博弈; 多层定价模型

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2020.1090

引用格式: 楼振凯, 楼旭明, 侯福均. 考虑政府补贴的新产品与再制造产品定价模型 [J]. 控制与决策, 2022, 37(1): 196-204.

Pricing models of new products and remanufactured products under government subsidies

LOU Zhen-kai¹, LOU Xu-ming², HOU Fu-jun^{1†}

(1. School of Management and Economics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. School of Economics and Management, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, China)

Abstract: Under a finite financial budget, the government offers subsidies for remanufactured products in order to encourage production and sales. Firstly, a three-layer decision model that the government provides production subsidies for the manufacturer is constructed, in which the manufacturer declares its wholesale prices by a Stackelberg game with the new-product retailer and the remanufactured-product retailer, and the two retailers determine their sales prices by a Bertrand game. The impacts of production subsidies on wholesale prices, sales prices and sales quantities are demonstrated. Further, the root cause of the increased sales quantity of the remanufactured products is shown. Secondly, the model in which the government offers sales subsidies for the remanufactured-product retailer is considered. It is shown that production subsidies and sales subsidies are equivalent for affecting sales prices and sales quantities. Thirdly, a centralized decision-making model is proposed. The sales quantities between the decentralized model and the centralized model are compared, and the reason of the difference is analyzed, which provides a basis for the priority of the subsidy. Finally, a numerical illustration is presented to make some supplements.

Keywords: government subsidy; Stackelberg game; Bertrand game; multiple-layer pricing model

0 引言

最优定价问题一直是供应链管理中的一个研究热点. 近年来, 随着顾客需求的多样化, 如何对差异产品进行定价成为销售商关心的重要问题^[1]. 在闭环供应链中, 新产品与再制造产品在功能上具有部分可替

代性^[2], 同时再制造产品对环境保护具有积极意义^[3]. 由于原材料、顾客接受程度等方面的差异, 需要进行差异定价, 以满足不同顾客的需求, 从而获得更高的销售量和收益^[4].

近些年, 许多学者对再制造产品的产销问题进

收稿日期: 2020-08-07; 录用日期: 2020-10-12.

基金项目: 国家自然科学基金项目(71571019).

责任编辑: 李登峰.

[†]通讯作者. E-mail: houfj@bit.edu.cn.

行了深入研究,其中定价策略是最重要的研究主题之一。Kumar等^[5]针对一垄断型闭环供应链,从回收、批发、销售等多环节研究其合作与竞争下的定价问题。刘文杰等^[6]分析了旧产品回收率和产品替代系数对再制造产品定价的影响,并对不同渠道权力结构下各决策者的定价策略进行了探讨。高举红等^[7]将消费者进行分类,考虑了不同类型消费者支付意愿的差异,构建了闭环供应链新产品和再制造产品定价决策模型。Saha等^[8]和罗利等^[9]分别从动态定价和双渠道的角度,探究了不同回收策略下再制造产品的生产和定价问题。Zheng等^[10]考虑了零售商的分配公平问题,并对5种非合作性和合作性的博弈模型进行盈利分析,讨论了如何在集中决策中分配最大利润。兰龙辉等^[11]和Zheng等^[12]建立了一个具有制造商、分销商和零售商的三层闭环供应链决策模型,并基于合作博弈的角度研究集中决策下各决策者的定价策略和利润分配方案。

由于再制造产品的生产和制造对环境保护以及循环经济有重要意义,政府常参与其中并提供政策支持 and 专项补贴。马方星等^[13]考虑回收补贴和再制造补贴两种方式,讨论了政府补贴力度和再制造产品认知度的变化对闭环供应链定价决策的影响。肖敏等^[14]分别考虑了无政府参与和政府制定奖惩与补贴两种情况下旧产品的回收与再制造产品的销售问题。李芳等^[15]给出了政府、制造商、零售商和消费者的三阶段博弈决策模型,分析在信息不对称下进行差异定价问题中各决策者的定价策略。Meng等^[16]将政府作为决策者之一,提供补贴以提高社会福利,基于此探讨了政府、新产品制造商与再制造产品制造商之间的博弈问题。刘名武等^[17]考虑了由一个制造商和一个零售商组成的同时生产、销售新产品和再制造产品的二级供应链,针对政府提供制造补贴和销售补贴两种方式,设计了制造商和零售商的收益共享契约。

本文研究与上述文献密切相关,即探索新产品与再制造产品定价对生产和销售的影响。虽然对新产品与再制造产品定价问题的研究十分丰富,然而政府作为决策者参与的文献并不多,尤其是从政府视角出发给出如何制定最优补贴政策的研究很少。事实上,当考虑政府补贴时,已有文献大多表明政府的补贴政策对制造商和零售商定价策略有重要影响。因此,政府如何在有限财政预算下制定补贴政策对再制造产品的生产和销售而言至关重要,对于这一主题的研

究有助于分析生产补贴、销售补贴与再制造产品销售量的关系,以及对不同类型供应链进行补贴所能取得的效果。

本文同时考虑了具有政府、制造商、新产品销售商和再制造产品销售商的定价决策问题,其中制造商同时生产新产品和再制造产品。从研究对象方面而言,本文研究可分为两部分。对于无法形成收益和成本合作契约的分散决策供应链,类似Lou等^[18]给出了3层决策模型,讨论了新产品销售和再制造产品销售的末端销售竞争问题,分析了生产补贴和销售补贴促进再制造产品销售量的根本原因,并证明在不考虑其他目标(如税收等)时,相同财政预算下两种补贴对再制造产品销量的促进是等价的。对于形成收益和成本合作契约或者制造商同时也是销售商的集中决策供应链,给出了二层决策模型,并与分散决策供应链的再制造产品销售量进行了比较。

现实中,比起再制造产品,顾客往往更倾向于购买新产品。政府对制造商的生产补贴将激励制造商增加再制造产品的产量并降低其批发价,对再制造产品销售商的销售补贴将激励其增加进货量并降低销售价格,两种方式对促进再制造产品的销售有异曲同工之处。本文创新之处在于,从政府的角度给出利用有限预算最大化再制造产品销售量的策略。具体而言,对管理实践的贡献总结如下:1)对于分散决策供应链,给出了政府补贴促进再制造产品生产量和销售量的计算式;2)对于分散式供应链和集成式供应链在政府补贴下的再制造产品产销量进行比较,给出了判断政府优先补贴哪种供应链的判别式。

综上,本文首先建立政府对制造商进行生产补贴的3层决策模型,该模型中制造商与新产品销售商和再制造产品销售商进行Stackelberg博弈,同时两个销售商之间通过Bertrand博弈确定各自的销售价,通过对解的分析,揭示生产补贴对批发价、销售价以及销售量的影响,并通过与无补贴销售量的比较,进一步给出政府补贴提升再制造产品销量的根本原因;然后给出对再制造产品销售商进行销售补贴下的3层模型,证明销售补贴与生产补贴在影响销售价格、销售量方面的等价性;接着讨论集中决策供应链中新产品与再制造产品销售的二层决策模型,比较集中决策供应链与分散决策供应链再制造产品的销售量高低并分析其原因,指出政府倾向于优先补贴的供应链类型;最后给出一个算例,分析不同类型供应链中再制造产品销售量对参数的敏感性。

1 符号描述与假设

本文讨论在政府对再制造产品的补贴下,一闭环供应链同时销售新产品与再制造产品时的定价问题.为了对所讨论的问题进行建模和分析,给出必要的符号定义如下表1所示.

表1 模型参数

参数	定义
a	销售期内市场对该类商品的潜在需求
w_n	制造商给出的新产品的批发价
w_r	制造商给出的再制造产品的批发价
p_n	新产品的销售价格
p_r	再制造产品的销售价格
c_n	新产品的生产成本
c_r	再制造产品的生产成本,包括原材料回收、加工等
λ	顾客购买新产品的偏好系数
$1-\lambda$	顾客购买再制造产品的偏好系数
δ	顾客需求对于商品价格的敏感系数
θ	两种产品之间价格的交叉影响因子
D_n	新产品销售期内的销售量, $D_n = \lambda a - \delta p_n + \theta p_r$
D_r	再制造产品销售期内销售量, $D_r = (1-\lambda)a - \delta p_r + \theta p_n$
k_m	制造商生产单位数量再制造产品的补贴
k_r	销售商销售单位数量再制造产品的补贴
k	产销一体的制造商生产销售单位数量再制造产品的补贴
G	政府扶持再制造产品的财政预算
M	制造商的利润函数
N	新产品零售商的利润函数
R	再制造产品零售商的利润函数

对上述参数做一些设定:

1) 沿用 Savaskan 等^[19] 的设定, 本文认为新产品与再制造产品外观和功能无差异. 许多顾客认为新产品在使用体验和使用寿命等方面有优势, 因此倾向于购买新产品, 而另外一些顾客具有绿色环保、循环经济等观念, 会选择购买再制造产品^[20].

2) 采用唐飞等^[21] 和 Lu 等^[22] 的处理, 认为两种产品的顾客需求对价格的敏感系数和价格交叉影响相同, 即 D_n 和 D_r 共用 δ 和 θ .

3) 本文考虑政府对制造商生产再制造产品进行补贴, 对销售商销售再制造产品进行补贴, 以及对产销一体的制造商进行补贴等不同情形下的问题, 即 k_m 、 k_r 和 k 是不同情形下的补贴参数, 不同时存在.

为了方便讨论, 对问题给出一些合理的前提假设:

1) 制造商用于生产新产品和再制造产品的原材料充足, 且其生产能力能够满足市场需求.

2) 本文所讨论的为确定性模型, 不考虑缺货或生产过剩的情况.

3) 不考虑库存成本, 或认为其是一常数, 不影响决策变量的确定.

4) 不考虑多条供应链之间的竞争, 所给出的潜在需求为市场对这一供应链生产和销售的产品需求.

另外, 考虑到生产成本通常远小于销售价, 本文认为 $\lambda a - \delta c_n > 0$ 和 $(1-\lambda)a - \delta c_r > 0$ 成立. 在此条件下, 决策模型所得到的解是合理的^[23].

2 生产补贴下的三层决策模型

本节讨论在分散决策的闭环供应链中, 政府在有限财政预算 G 下, 对制造商进行生产补贴鼓励再制造产品的生产的情形. 为了获得更多的生产补贴, 制造商将增加再制造产品的产量并降低其批发价, 从而对模型底层中两个末端销售商的博弈产生影响. 通过求解模型, 分析生产补贴对批发价、销售价的影响, 并对比无补贴下的结果, 给出补贴促进再制造产品产销量的计算式.

新产品与再制造产品分别由两个不同的销售商销售, 决策顺序为首先政府给出补贴, 然后制造商给出再制造产品和新产品的批发价, 最后由两个销售商给出其销售价. 显然, 这是一个具有4个决策者的3层决策模型. 底层, 两个销售商进行 Bertrand 博弈来确定各自的销售价格; 中间层, 制造商与两个销售商之间进行 Stackelberg 博弈; 最上层, 政府通过制造商给出的决策确定单位数量补贴.

在财政预算 G 下, 政府的决策模型为

$$\begin{aligned} & \max [(1-\lambda)a - \delta p_r + \theta p_n]; \\ & \text{s.t. } [(1-\lambda)a - \delta p_r + \theta p_n]k_m \leq G, \\ & k_m \geq 0. \end{aligned} \quad (1)$$

在考虑政府补贴情况下, 制造商的目标函数为

$$\begin{aligned} \max M = & (w_n - c_n)(\lambda a - \delta p_n + \theta p_r) + \\ & (w_r - c_r + k_m)[(1-\lambda)a - \delta p_r + \theta p_n]. \end{aligned} \quad (2)$$

新产品销售商的目标函数为

$$\max N = (p_n - w_n)(\lambda a - \delta p_n + \theta p_r). \quad (3)$$

再制造产品销售商的目标函数为

$$\max R = (p_r - w_r)[(1-\lambda)a - \delta p_r + \theta p_n]. \quad (4)$$

对上述3层模型采用逆序求解. 首先分析两个销售商进行的 Bertrand 博弈. 对式(3)中函数求导并令其为零, 得到

$$\frac{\partial N}{\partial p_n} = -2\delta p_n + \theta p_r + \lambda a + \delta w_n = 0. \quad (5)$$

由于 $\frac{\partial^2 N}{\partial p_n^2} = -2\delta < 0$, 式(5)的解是新产品销售商的最优解. 同样地, 对目标函数(4)求导并令其为零, 得

到

$$\frac{\partial R}{\partial p_r} = -2\delta p_r + \theta p_n + (1 - \lambda)a + \delta w_r = 0. \quad (6)$$

同样判断二阶导数可知,式(6)的解是再制造产品销售商的最优解.

综上,当且仅当式(5)和(6)同时有解时,Bertrand博弈存在均衡解.联立方程并求解,得到

$$\begin{cases} p_n = \frac{2\lambda\delta a + (1 - \lambda)\theta a + 2\delta^2 w_n + \delta\theta w_r}{4\delta^2 - \theta^2}, \\ p_r = \frac{2(1 - \lambda)\delta a + \lambda\theta a + \delta\theta w_n + 2\delta^2 w_r}{4\delta^2 - \theta^2}. \end{cases} \quad (7)$$

考虑制造商与两个销售商之间的Stackelberg博弈.将式(7)代入(2)得到

$$\begin{aligned} M = & -\frac{2\delta^3 - \delta\theta^2}{4\delta^2 - \theta^2} w_n^2 + \\ & \frac{2\lambda\delta^2 a + (1 - \lambda)\delta\theta a - \delta^2\theta(c_r - k_m) + (2\delta^3 - \delta\theta^2)c_n}{4\delta^2 - \theta^2} w_n - \\ & \frac{2\delta^3 - \delta\theta^2}{4\delta^2 - \theta^2} w_r^2 + \\ & \frac{2(1 - \lambda)\delta^2 a + \lambda\delta\theta a - \delta^2\theta c_n + (2\delta^3 - \delta\theta^2)(c_r - k_m)}{4\delta^2 - \theta^2} w_r + \\ & \frac{2\delta^2\theta}{4\delta^2 - \theta^2} w_n w_r - \frac{[2\lambda\delta^2 a + (1 - \lambda)\delta\theta a]c_n}{4\delta^2 - \theta^2} - \\ & \frac{[2(1 - \lambda)\delta^2 a + \lambda\delta\theta a](c_r - k_m)}{4\delta^2 - \theta^2}. \end{aligned}$$

令 M 关于 w_n 和 w_r 的偏导数为零,得到如下方程组:

$$\begin{cases} \frac{\partial M}{\partial w_n} = ((2\delta\theta^2 - 4\delta^3)w_n + 2\lambda\delta^2 a + (1 - \lambda)\delta\theta a - \delta^2\theta(c_r - k_m) + (2\delta^3 - \delta\theta^2)c_n + 2\delta^2\theta w_r)/(4\delta^2 - \theta^2) = 0, \\ \frac{\partial M}{\partial w_r} = ((2\delta\theta^2 - 4\delta^3)w_r + 2(1 - \lambda)\delta^2 a + \lambda\delta\theta a - \delta^2\theta c_n + (2\delta^3 - \delta\theta^2)(c_r - k_m) + 2\delta^2\theta w_n)/(4\delta^2 - \theta^2) = 0. \end{cases}$$

记方程组的解为 w_n^* 和 w_r^* ,得到

$$\begin{cases} w_n^* = \frac{2\lambda\delta^3 a(4\delta^2 - \theta^2) + 2(1 - \lambda)\delta^2\theta a(4\delta^2 - \theta^2)}{4[(2\delta^3 - \delta\theta^2)^2 - \delta^4\theta^2]} + \frac{c_n}{2}, \\ w_r^* = \frac{2(1 - \lambda)\delta^3 a(4\delta^2 - \theta^2) + 2\lambda\delta^2\theta a(4\delta^2 - \theta^2)}{4[(2\delta^3 - \delta\theta^2)^2 - \delta^4\theta^2]} + \frac{c_r - k_m}{2}. \end{cases}$$

由于

$$(2\delta^3 - \delta\theta^2)^2 - \delta^4\theta^2 = 4\delta^6 - 5\delta^4\theta^2 + \delta^2\theta^4 = \delta^2(4\delta^2 - \theta^2)(\delta^2 - \theta^2),$$

w_n 和 w_r 的解可化简为

$$\begin{cases} w_n^* = \frac{\lambda\delta a + (1 - \lambda)\theta a}{2\delta^2 - 2\theta^2} + \frac{c_n}{2}, \\ w_r^* = \frac{(1 - \lambda)\delta a + \lambda\theta a}{2\delta^2 - 2\theta^2} + \frac{c_r - k_m}{2}. \end{cases} \quad (8)$$

检查 M 的海塞矩阵

$$H = \begin{bmatrix} -\frac{4\delta^3 - 2\delta\theta^2}{4\delta^2 - \theta^2} & \frac{2\delta^2\theta}{4\delta^2 - \theta^2} \\ \frac{2\delta^2\theta}{4\delta^2 - \theta^2} & -\frac{4\delta^3 - 2\delta\theta^2}{4\delta^2 - \theta^2} \end{bmatrix},$$

由于 $\delta > \theta > 0$,有 $\frac{4\delta^3 - 2\delta\theta^2}{4\delta^2 - \theta^2} > \frac{2\delta^3}{4\delta^2 - \theta^2} > 0$.另外,由于 $(4\delta^3 - 2\delta\theta^2)^2 - 4\delta^4\theta^2 > 4\delta^6 - 4\delta^4\theta^2 > 0$, M 的海塞矩阵负定,即式(8)给出的解是 $\max M$ 的唯一最优解.

将式(8)代入(7),得到新产品和再制造产品的销售价格为

$$\begin{cases} p_n^* = \frac{6\lambda\delta^3 a + 5(1 - \lambda)\delta^2\theta a - 3\lambda\delta\theta^2 a - 2(1 - \lambda)\theta^3 a}{(4\delta^2 - \theta^2)(2\delta^2 - 2\theta^2)} + \frac{2\delta^2 c_n + \delta\theta(c_r - k_m)}{8\delta^2 - 2\theta^2}, \\ p_r^* = \frac{6(1 - \lambda)\delta^3 a + 5\lambda\delta^2\theta a - 3(1 - \lambda)\delta\theta^2 a - 2\lambda\theta^3 a}{(4\delta^2 - \theta^2)(2\delta^2 - 2\theta^2)} + \frac{2\delta^2(c_r - k_m) + \delta\theta c_n}{8\delta^2 - 2\theta^2}. \end{cases} \quad (9)$$

下面考虑模型(1).利用式(9)得到再制造产品的销售量为

$$\begin{aligned} (1 - \lambda)a - \delta p_r + \theta p_n = & \frac{2(1 - \lambda)\delta^2 a + \lambda\delta\theta a + \delta^2\theta c_n - (2\delta^3 - \delta\theta^2)(c_r - k_m)}{8\delta^2 - 2\theta^2}. \end{aligned} \quad (10)$$

由于 $\delta > \theta > 0$,有 $2\delta^3 - \delta\theta^2 > \delta^3 > 0$.考虑到除 k_m 外其余参数为已知,由式(10)给定的再制造产品销售量是 k_m 的斜率为正的一次函数.模型(1)等价于

$$\begin{aligned} & \max k_m; \\ & \text{s.t. } [(1 - \lambda)a - \delta p_r + \theta p_n]k_m \leq G, \\ & k_m \geq 0. \end{aligned}$$

将式(10)代入并整理,得到

$$\begin{aligned} & \max k_m; \\ & \text{s.t. } \left(\frac{2\delta^3 - \delta\theta^2}{8\delta^2 - 2\theta^2}\right)k_m^2 + \frac{2(1 - \lambda)\delta^2 a + \lambda\delta\theta a + \delta^2\theta c_n - (2\delta^3 - \delta\theta^2)c_r}{8\delta^2 - 2\theta^2} \times \\ & k_m - G \leq 0, \end{aligned}$$

$$k_m \geq 0. \quad (11)$$

分析模型(11)可知,只需求解其约束不等式得到 k_m 的取值区间,即可得到政府在预算下的最大单位补贴.将得到的 k_m 代入式(8)和(9),依次得到新产品和再制造产品的批发价和零售价.将所得到的 k_m 代入式(10),得到再制造产品的销售量.

可以发现,新产品的批发价与 k_m 值无关,而新产品的销售价、再制造产品的批发价和销售价等均与 k_m 值有关,且都为负线性相关.

下面分析政府补贴促进再制造产品销量的根本原因.记无补贴下新产品和再制造产品销售价分别为 p_n^0 和 p_r^0 ,考虑到补贴与不补贴的差别在于 k_m ,根据式(9),无补贴下的销售价格为

$$\begin{cases} p_n^0 = \frac{6\lambda\delta^3 a + 5(1-\lambda)\delta^2\theta a - 3\lambda\delta\theta^2 a - 2(1-\lambda)\theta^3 a}{(4\delta^2 - \theta^2)(2\delta^2 - 2\theta^2)} + \frac{2\delta^2 c_n + \delta\theta c_r}{8\delta^2 - 2\theta^2}, \\ p_r^0 = \frac{6(1-\lambda)\delta^3 a + 5\lambda\delta^2\theta a - 3(1-\lambda)\delta\theta^2 a - 2\lambda\theta^3 a}{(4\delta^2 - \theta^2)(2\delta^2 - 2\theta^2)} + \frac{2\delta^2 c_r + \delta\theta c_n}{8\delta^2 - 2\theta^2}. \end{cases}$$

无补贴下销售价格与补贴下销售价格的关系为

$$\begin{cases} p_n^* = p_n^0 - \frac{\delta\theta k_m}{8\delta^2 - 2\theta^2}, \\ p_r^* = p_r^0 - \frac{2\delta^2 k_m}{8\delta^2 - 2\theta^2}. \end{cases}$$

根据以上符号设定,无补贴下再制造产品的销售量为 $(1-\lambda)a - \delta p_r^0 + \theta p_n^0$.补贴下再制造产品销售量为

$$\begin{aligned} & (1-\lambda)a - \delta p_r^* + \theta p_n^* = \\ & (1-\lambda)a - \delta \left(p_r^0 - \frac{2\delta^2 k_m}{8\delta^2 - 2\theta^2} \right) + \theta \left(p_n^0 - \frac{\delta\theta k_m}{8\delta^2 - 2\theta^2} \right) = \\ & (1-\lambda)a - \delta p_r^0 + \theta p_n^0 + \frac{(2\delta^3 - \delta\theta^2)k_m}{8\delta^2 - 2\theta^2}. \end{aligned}$$

从而得到生产补贴促进再制造产品产销量的计算式为 $\frac{(2\delta^3 - \delta\theta^2)k_m}{8\delta^2 - 2\theta^2}$.可以发现,补贴对再制造产品的促进作用由 k_m 、 δ 和 θ 的关系式决定.

3 销售补贴下的3层决策模型

本节考虑在分散决策的闭环供应链中,政府对再制造产品的销售进行补贴,分析其对批发价格、销售价格的影响,并与上节生产补贴下的结果进行比较,分析哪种策略对再制造产品的产销更有益.参与决策的局中人与上一节相同,按决策顺序分别为政府、制造商、新产品销售商和再制造产品销售商,其中受

补贴对象为再制造产品销售商.在补贴下,再制造产品销售商为了获得更多的销量补贴将增加进货量,从而影响 Bertrand 博弈和 Stackelberg 博弈的均衡解.

对单位再制造产品销售进行补贴下,政府的决策模型为

$$\begin{aligned} & \max [(1-\lambda)a - \delta p_r + \theta p_n]; \\ & \text{s.t. } [(1-\lambda)a - \delta p_r + \theta p_n]k_r \leq G, \\ & k_r \geq 0. \end{aligned} \quad (12)$$

制造商的目标函数变为

$$\begin{aligned} \max M = & (w_n - c_n)(\lambda a - \delta p_n + \theta p_r) + \\ & (w_r - c_r)[(1-\lambda)a - \delta p_r + \theta p_n]. \end{aligned} \quad (13)$$

新产品销售商的目标函数仍然为式(3).再制造产品销售商的目标函数为

$$\max R = (p_r - w_r + k_r)[(1-\lambda)a - \delta p_r + \theta p_n]. \quad (14)$$

同样地,首先分析两个销售商之间的 Bertrand 博弈,考虑如下方程组:

$$\begin{cases} \frac{\partial N}{\partial p_n} = -2\delta p_n + \theta p_r + \lambda a + \delta w_n = 0, \\ \frac{\partial R}{\partial p_r} = -2\delta p_r + \theta p_n + (1-\lambda)a + \delta(w_r - k_r) = 0. \end{cases}$$

解得

$$\begin{cases} p_n = \frac{2\lambda\delta a + (1-\lambda)\theta a + 2\delta^2 w_n + \delta\theta(w_r - k_r)}{4\delta^2 - \theta^2}, \\ p_r = \frac{2(1-\lambda)\delta a + \lambda\theta a + \delta\theta w_n + 2\delta^2(w_r - k_r)}{4\delta^2 - \theta^2}. \end{cases} \quad (15)$$

N 和 R 的二阶导数与上节相同,因此式(15)给出的是 Bertrand 博弈的唯一均衡解.

下面考虑制造商和两个销售商的 Stackelberg 博弈.将式(15)代入(13),得到

$$\begin{aligned} M = & \frac{2\delta^3 - \delta\theta^2}{4\delta^2 - \theta^2} w_n^2 + \\ & \frac{2\lambda\delta^2 a + (1-\lambda)\delta\theta a - \delta^2\theta(c_r + k_r) + (2\delta^3 - \delta\theta^2)c_n}{4\delta^2 - \theta^2} w_n - \\ & \frac{2\delta^3 - \delta\theta^2}{4\delta^2 - \theta^2} w_r^2 + \\ & \frac{2(1-\lambda)\delta^2 a + \lambda\delta\theta a - \delta^2\theta c_n + (2\delta^3 - \delta\theta^2)(c_r + k_r)}{4\delta^2 - \theta^2} w_r + \\ & \frac{2\delta^2\theta}{4\delta^2 - \theta^2} w_n w_r - \frac{[2\lambda\delta^2 a + (1-\lambda)\delta\theta a - \delta^2\theta k_r]c_n}{4\delta^2 - \theta^2} - \\ & \frac{[2(1-\lambda)\delta^2 a + \lambda\delta\theta a + (2\delta^3 - \delta\theta^2)k_r]c_r}{4\delta^2 - \theta^2}. \end{aligned}$$

令 M 关于 w_n 和 w_r 的偏导数为零,得到如下方程组:

$$\begin{cases} \frac{\partial M}{\partial w_n} = ((2\delta\theta^2 - 4\delta^3)w_n + 2\lambda\delta^2a + (1 - \lambda)\delta\theta a - \delta^2\theta(c_r + k_m) + (2\delta^3 - \delta\theta^2)c_n + 2\delta^2\theta w_r)/(4\delta^2 - \theta^2) = 0, \\ \frac{\partial M}{\partial w_r} = ((2\delta\theta^2 - 4\delta^3)w_r + 2(1 - \lambda)\delta^2a + \lambda\delta\theta a - \delta^2\theta c_n + (2\delta^3 - \delta\theta^2)(c_r + k_m) + 2\delta^2\theta w_n)/(4\delta^2 - \theta^2) = 0. \end{cases}$$

从而解得

$$\begin{cases} w'_n = \frac{\lambda\delta a + (1 - \lambda)\theta a}{2\delta^2 - 2\theta^2} + \frac{c_n}{2}, \\ w'_r = \frac{(1 - \lambda)\delta a + \lambda\theta a}{2\delta^2 - 2\theta^2} + \frac{c_r + k_r}{2}. \end{cases} \quad (16)$$

比较式(8)与(16)可知,对再制造产品销售量进行补贴时,制造商再制造产品的批发价必然比其获得生产补贴时高.同时,新产品的批发价不变.

将式(16)代入(15),得到

$$\begin{cases} p'_n = \frac{6\lambda\delta^3a + 5(1 - \lambda)\delta^2\theta a - 3\lambda\delta\theta^2a - 2(1 - \lambda)\theta^3a}{(4\delta^2 - \theta^2)(2\delta^2 - 2\theta^2)} + \frac{2\delta^2c_n + \delta\theta(c_r - k_r)}{8\delta^2 - 2\theta^2}, \\ p'_r = \frac{6(1 - \lambda)\delta^3a + 5\lambda\delta^2\theta a - 3(1 - \lambda)\delta\theta^2a - 2\lambda\theta^3a}{(4\delta^2 - \theta^2)(2\delta^2 - 2\theta^2)} + \frac{2\delta^2(c_r - k_r) + \delta\theta c_n}{8\delta^2 - 2\theta^2}. \end{cases} \quad (17)$$

可以发现,两种产品的销售价格表达式与生产补贴下的销售价格表达式相同.考虑到需求函数由两种产品的价格共同决定,再制造产品的销售量表达式与上一节相同(除了 k_m 换成 k_r),即

$$(1 - \lambda)a - \delta p_r + \theta p_n = \frac{2(1 - \lambda)\delta^2a + \lambda\delta\theta a + \delta^2\theta c_n - (2\delta^3 - \delta\theta^2)(c_r - k_r)}{8\delta^2 - 2\theta^2}.$$

根据以上分析可知,再制造产品的单位销售补贴与单位生产补贴相等,即最终 $k_m = k_r$.换言之,政府对制造商进行补贴和对再制造产品销售商进行补贴,最终对再制造产品销量的促进作用是等价的.从而两种形式下新产品和再制造产品的销售价都相等.根据这一结果,给出如下结论.

命题1 在相同的财政预算下,政府对制造商进行生产补贴和对再制造产品销售商进行销售补贴,对于再制造产品的产销量的促进作用相等.

考虑到制造商和销售商的收益往往是不同的,具体对哪个进行补贴,政府可以结合税收等方面进行多

目标综合考虑得出结果.本文只从再制造产品的产量和销量的促进角度考虑,认为两种补贴是等价的.

4 集中决策下的二层模型

现实中,制造商和零售商在达成收益共享和成本分担契约的情况下会采取联合决策^[24],另外,还有许多大型制造商具有自营门店进行自产自销.对这两种情况,本文称之为集中决策下的产销问题,此时讨论批发价没有意义,而线性需求函数下集中决策供应链的总利润必然高于分散决策下的总利润,因此本节重点是政府补贴、销售价格以及销售量与分散决策下供应链的对应值之间的比较.

考虑集中决策下制造商生产、销售新产品和再制造产品,政府对再制造产品的销售进行补贴下,制造商的最优价格策略.将所得到的结果与分散决策供应链进行比较,分析其价格与销量的差异.参与决策者为政府和制造商.

在财政预算 G 下,政府的决策模型为

$$\begin{aligned} & \max[(1 - \lambda)a - \delta p_r + \theta p_n]; \\ & \text{s.t. } [(1 - \lambda)a - \delta p_r + \theta p_n]k \leq G, \\ & k \geq 0. \end{aligned} \quad (18)$$

制造商的目标函数为

$$\begin{aligned} \max M = & (p_n - c_n)(\lambda a - \delta p_n + \theta p_r) + \\ & (p_r - c_r + k)[(1 - \lambda)a - \delta p_r + \theta p_n] = \\ & -\delta p_n^2 - \delta p_r^2 + [\lambda a + \delta c_n - \theta(c_r - k)]p_n + \\ & [(1 - \lambda)a + \delta(c_r - k) - \theta c_n]p_r + \\ & 2\theta p_n p_r - \lambda a c_n - (1 - \lambda)a(c_r - k). \end{aligned} \quad (19)$$

将 M 对 p_n 和 p_r 求偏导并令其为零,得到如下方程组:

$$\begin{cases} \frac{\partial M}{\partial p_n} = -2\delta p_n + 2\theta p_r + \lambda a + \delta c_n - \theta(c_r - k) = 0, \\ \frac{\partial M}{\partial p_r} = -2\delta p_r + 2\theta p_n + (1 - \lambda)a + \delta(c_r - k) - \theta c_n = 0. \end{cases}$$

记方程组的解为 p_n^s 和 p_r^s ,得到

$$\begin{cases} p_n^s = \frac{\lambda\delta a + (1 - \lambda)\theta a + (\delta^2 - \theta^2)c_n}{2\delta^2 - 2\theta^2}, \\ p_r^s = \frac{(1 - \lambda)\delta a + \lambda\theta a + (\delta^2 - \theta^2)(c_r - k)}{2\delta^2 - 2\theta^2}. \end{cases} \quad (20)$$

检查 M 的海塞矩阵

$$H = \begin{bmatrix} -2\delta & 2\theta \\ 2\theta & -2\delta \end{bmatrix},$$

可知其为负定,因此式(20)给出的解是目标函数(19)

的唯一最优解.

根据式(20),得到再制造产品的销售量为

$$\frac{(1-\lambda)a - \delta p_r + \theta p_n}{2} = \frac{(1-\lambda)a + \theta c_n - \delta(c_r - k)}{2}. \quad (21)$$

为了与式(10)进行对比,式(21)转化为

$$\begin{aligned} (1-\lambda)a - \delta p_r + \theta p_n = \\ (4(1-\lambda)\delta^2 a(1-\lambda)\theta^2 a + (4\delta^2\theta - \theta^3)c_n - \\ (4\delta^3 - \delta\theta^2)(c_r - k))/(8\delta^2 - 2\theta^2). \end{aligned}$$

可以发现,虽然产销一体下制造商可以集成化决策,但在相同的政府补贴,即 $k = k_m$ (或 $k = k_r$) 下,集中决策供应链的再制造产品销售量未必比分散决策高. 比如,当 λ 很大而 δ/θ 的值较小时,产销一体下再制造产品销售量可能比前两种情形下的销售量少. 下一节的数值分析将对这种情况进行举例说明.

在一定的补贴力度下,对不同类型供应链再制造产品生产和销售的促进作用是政府部门制定补贴政策时所关心的问题.

最后考虑产销一体下政府最优补贴的确定. 根据销量函数和 k 的线性正相关性,模型(18)转化为

$$\begin{aligned} \max k; \\ \text{s.t. } \frac{\delta}{2}k^2 + \frac{(1-\lambda)a + \theta c_n - \delta c_r}{2}k - G \leq 0, \\ k \geq 0. \end{aligned} \quad (22)$$

同样地,模型(22)的目标函数可通过求解其约束中的不等式得到. 将所得到的 k 值代入式(21),得到再制造产品的销售量. 对比第3节的结果,得到如下结论.

命题2 如果由式(21)确定的再制造产品销售量比由式(10)确定再制造产品销售量高,则政府补贴集成决策供应链促进再制造产品产销的效果更明显;反之,则政府补贴分散决策供应链的促进效果更明显.

另外,对比无补贴下的结果,分析集中决策下政府补贴对再制造产品的促进作用. 类似第3节中的分析,可以得到决定促进作用的关系式为 $\delta k/2$.

5 算例分析

本节通过给出一个算例,分析不同类型供应链中再制造产品销售量对价格敏感系数和交叉影响因子的灵敏度. 根据消费者往往倾向于购买新产品的习惯,设置如下参数:一定时期内某类商品的潜在需求 $a = 1000$,新产品和再制造产品的生产成本分别为 $c_n = 20$ 和 $c_r = 10$,顾客购买新产品的偏好系数 $\lambda =$

0.8. 考虑顾客需求对于商品价格敏感系数 δ 的变动区间 $[4.6, 7]$,产品之间价格交叉影响因子 θ 的变动区间 $[2, 4.5]$. 另外,政府对此类再制造产品的补贴预算 $G = 10000$.

利用式(10),得到分散决策供应链中再制造产品销售量函数为

$$\frac{400\delta^2 + 800\delta\theta + 20\delta^2\theta - (2\delta^3 - \delta\theta^2)(10 - k_m)}{8\delta^2 - 2\theta^2},$$

其中 k_m 为下列方程的正根:

$$\begin{aligned} \left(\frac{2\delta^3 - \delta\theta^2}{8\delta^2 - 2\theta^2}\right)k_m^2 + \\ \frac{400\delta^2 + 800\delta\theta + 20\delta^2\theta - 20\delta^3 + 10\delta\theta^2}{8\delta^2 - 2\theta^2}k_m - \end{aligned}$$

$$10000 = 0.$$

利用式(21),得到集中决策供应链中再制造产品销售量函数为

$$100 + 10\theta - \frac{\delta(10 - k)}{2},$$

其中 k 为下列方程的正根:

$$\frac{\delta}{2}k^2 + \frac{200 + 20\theta - 10\delta}{2}k - 10000 = 0.$$

分析上述函数可知,分散决策供应链中的生产补贴 k_m 和集中决策供应链中的产销补贴 k 均由参数 δ 和 θ 确定,因此两种类型供应链中再制造产品的销售量为参数变量 δ 和 θ 的二元函数.

运用 Matlab,得到分散决策供应链和集成决策供应链中再制造产品销售量的变化情况如图1所示. 其中:曲面I为分散决策供应链的再制造产品销售量,曲面II为集成决策供应链的再制造产品销售量.

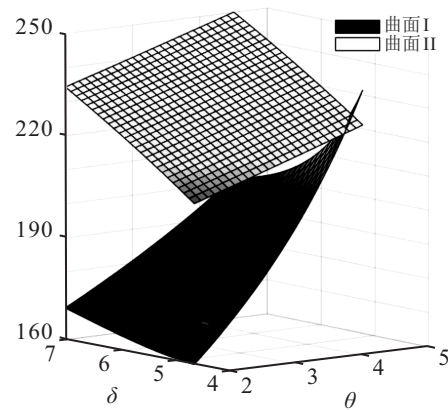


图1 两种供应链类型下再制造产品销售量变化曲面

根据上述仿真结果分析再制造产品销售量与参数的关系. 首先分析销售量变化率,曲面I大于曲面II,即曲面I对参数 δ 和 θ 的敏感性比曲面II强,从函数表达式上看,这是由于分散决策供应链比集中决策供应链再制造产品销售量函数复杂. 其次分析分散决策供应链和集成决策供应链再制造产品销售量与参

数 δ 、 θ 的关系,在大多数情况下,相等的政府财政预算下集成决策供应链再制造产品销售量比分散决策供应链高,只有当 δ 和 θ 的值十分接近时,后者才有可能高于前者.另外,对比式(10)和(21)可知, λ 值也是影响两种类型供应链中再制造产品销售量的重要因素,当 λ 的值越大时,曲面I对应的值高于曲面II对应的值的机会也越大.

根据上述分析结果可知,在多数情况下(即集成决策供应链比分散决策供应链再制造产品销售量高时),政府倾向于补贴集成决策供应链,此时制造商、销售商通过集中决策能获得更多利润^[25],且再制造产品的销售量也较高,达到了政府、制造商和销售商的多方共赢.

由于政府对制造商进行生产补贴和对再制造产品零售商进行销售补贴,对再制造产品产销量的促进作用等价,本算例只考虑前一种情况.

6 结论

本文研究了有限政府补贴下,同时销售新产品和再制造产品的供应链定价问题.分别对制造商进行生产补贴和对再制造产品销售商进行销售补贴的分散决策供应链情形进行讨论,建立了决策顺序从政府、制造商到销售商的三层决策模型.另外对集中决策下再制造产品的产销补贴问题建立了政府和制造商参与的二层决策模型,并与分散决策下得到的结果进行比较.

本文所做的贡献可总结如下:首先,分析了补贴对批发价、销售价以及再制造产品销售量的影响;其次,证明了对再制造产品销售商进行销售补贴与对制造商进行生产补贴在影响销售价格、销售量方面的等价性,政府需要结合税收等其他目标综合做出决策;最后,给出了集中决策供应链与分散决策供应链再制造产品销售量的比较,基于此,政府可选择补贴效果更好的供应链类型进行补贴.

本文的研究也存在一些不足之处.在现实中,需求往往具有随机性或不确定性,此时需要进行鲁棒性决策或者进行需求学习,这是接下来研究的内容之一.另外,随着可替代产品的增多,多条供应链之间的竞争对再制造产品生产与销售的影响也需要考虑.

参考文献(References)

- [1] 马鹏, 杜宛京, 王海燕. 顾客策略行为下差异产品两阶段定价模型研究[J]. 中国管理科学, 2020, 28(2): 136-144.
(Ma P, Du W J, Wang H Y. Two-stage pricing models with differentiated products under strategic customer behavior[J]. Chinese Journal of Management Science, 2020, 28(2): 136-144.)
- [2] Chen J M, Chang C A. Dynamic pricing for new and remanufactured products in a closed-loop supply chain[J]. International Journal of Production Economics, 2013, 146(1): 153-160.
- [3] Liu Z, Li K W, Li B Y, et al. Impact of product-design strategies on the operations of a closed-loop supply chain[J]. Transportation Research — Part E: Logistics and Transportation Review, 2019, 124: 75-91.
- [4] 孟丽君, 黄祖庆, 张宝友, 等. 基于回收风险的闭环供应链差异定价决策研究[J]. 运筹与管理, 2019, 28(10): 57-67.
(Meng L J, Huang Z Q, Zhang B Y, et al. Pricing decisions of closed-loop supply chain based on the risk of recycled product[J]. Operations Research and Management Science, 2019, 28(10): 57-67.)
- [5] Kumar Jena S, Sarmah S P. Price competition and co-operation in a duopoly closed-loop supply chain[J]. International Journal of Production Economics, 2014, 156: 346-360.
- [6] 刘文杰, 沈宁宁, 张璟, 等. 考虑渠道权力结构和产品双重差异的再制造闭环供应链最优定价决策[J]. 工业工程, 2018, 21(6): 54-63.
(Liu W J, Shen N N, Zhang J, et al. Optimal pricing for remanufacturing closed-loop supply chain under different channel power structures and product dual differentiation[J]. Industrial Engineering Journal, 2018, 21(6): 54-63.)
- [7] 高举红, 李梦梦, 霍顿. 市场细分下考虑消费者支付意愿差异的闭环供应链定价决策[J]. 系统工程理论与实践, 2018, 38(12): 3071-3084.
(Gao J H, Li M M, Huo Z. Pricing decision of closed-loop supply chain considering consumers' willingness to pay differentiation under market segmentation[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2018, 38(12): 3071-3084.)
- [8] Saha S, Sarmah S P, Moon I. Dual channel closed-loop supply chain coordination with a reward-driven remanufacturing policy[J]. International Journal of Production Research, 2016, 54(5): 1503-1517.
- [9] 罗利, 单仁邦, 贺佳思. 考虑动态回收率的两阶段闭环供应链定价策略分析[J]. 工业工程与管理, 2021, 26(2): 90-97.
(Luo L, Shan R B, He J S. Analysis of pricing strategy of two-stage closed-loop supply chain with considering dynamic recycling rate[J]. Industrial Engineering and Management, 2021, 26(2): 90-97.)
- [10] Zheng X X, Li D F, Liu Z, et al. Coordinating a closed-loop supply chain with fairness concerns through

- variable-weighted Shapley values[J]. *Transportation Research — Part E: Logistics and Transportation Review*, 2019, 126: 227-253.
- [11] 兰龙辉, 郑小雪, 李登峰. 考虑互惠偏好的闭环供应链合作博弈模型[J]. *计算机集成制造系统*, 2020, 26(12): 3458-3470.
(Lan L H, Zheng X X, Li D F. Cooperative game models in closed-loop supply chain considering reciprocity preference[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2020, 26(12): 3458-3470.)
- [12] Zheng X X, Liu Z, Li K W, et al. Cooperative game approaches to coordinating a three-echelon closed-loop supply chain with fairness concerns[J]. *International Journal of Production Economics*, 2019, 212: 92-110.
- [13] 马方星, 程发新, 邵汉青. 不同补贴方式下考虑回收质量不确定的闭环供应链差别定价模型[J]. *统计与决策*, 2018, 34(19): 58-61.
(Ma F X, Cheng F X, Shao H Q. Differentiated pricing model of a closed-loop supply chain under different subsidy manners by considering recycling quality uncertainty[J]. *Statistics & Decision*, 2018, 34(19): 58-61.)
- [14] 肖敏, 郑祯. 考虑消费者环境偏好的闭环供应链奖惩与补贴机制研究[J]. *工业工程与管理*, 2019, 24(3): 53-59.
(Xiao M, Zheng Z. A study of closed-loop supply chain with reward-penalty and subsidy mechanism considering consumers' environmental preferences[J]. *Industrial Engineering and Management*, 2019, 24(3): 53-59.)
- [15] 李芳, 马鑫, 洪佳, 等. 政府规制下非对称信息对闭环供应链差别定价的影响研究[J]. *中国管理科学*, 2019, 27(7): 116-126.
(Li F, Ma X, Hong J, et al. Pricing decision research of closed-loop supply chain under asymmetric information on government regulation[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2019, 27(7): 116-126.)
- [16] Meng L J, Qiang Q, Huang Z Q, et al. Optimal pricing strategy and government consumption subsidy policy in closed-loop supply chain with third-party remanufacturer[J]. *Sustainability*, 2020, 12(6): 2411.
- [17] 刘名武, 陈翔, 翟梦月. 考虑担保和补贴的再制造供应链定价及协调策略[J]. *数学的实践与认识*, 2020, 50(5): 15-22.
(Liu M W, Chen X, Zhai M Y. Pricing and coordination strategy of remanufacturing supply chain considering warranty and subsidy[J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 2020, 50(5): 15-22.)
- [18] Lou Z K, Lou X M, Dai X Z. Game-theoretic models of green products in a two-echelon dual-channel supply chain under government subsidies[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020, 2020: 1-11.
- [19] Savaskan R C, Bhattacharya S, van Wassenhove L N. Closed-loop supply chain models with product remanufacturing[J]. *Management Science*, 2004, 50(2): 239-252.
- [20] 曾蔚, 马北玲, 汪继, 等. 考虑消费者绿色偏好的闭环供应链决策研究[J]. *软科学*, 2018, 32(9): 108-113.
(Zeng W, Ma B L, Wang J, et al. Research on decision of the closed-loop supply chain based on consumer's green preferences[J]. *Soft Science*, 2018, 32(9): 108-113.)
- [21] 唐飞, 许茂增. 基于公平偏好的双渠道闭环供应链定价决策[J]. *系统工程*, 2017, 35(4): 110-115.
(Tang F, Xu M Z. Pricing decision in dual-channel closed-loop supply chain based on fairness preference[J]. *Systems Engineering*, 2017, 35(4): 110-115.)
- [22] Lu Q H, Liu N. Pricing games of mixed conventional and e-commerce distribution channels[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2013, 64(1): 122-132.
- [23] 楼振凯, 楼旭明. 需求依赖价格的两阶段最优定价问题[J]. *重庆师范大学学报: 自然科学版*, 2020, 37(1): 113-118.
(Lou Z K, Lou X M. Optimal two-period pricing under price-dependent demand[J]. *Journal of Chongqing Normal University: Natural Science*, 2020, 37(1): 113-118.)
- [24] Saha S, Majumder S, Nielsen I E. Is it a strategic move to subsidized consumers instead of the manufacturer?[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 169807-169824.
- [25] Lou Z K, Hou F J, Lou X M. Optimal ordering and pricing models of a two-echelon supply chain under multipletimes ordering[J]. *Journal of Industrial & Management Optimization*, 2021, 17(6): 3099.

作者简介

楼振凯(1989—), 男, 博士生, 从事供应链管理、博弈论的研究, E-mail: louzk@bit.edu.cn;

楼旭明(1971—), 男, 教授, 博士, 从事企业运营管理等研究, E-mail: louxuming@xupt.edu.cn;

侯福均(1967—), 男, 教授, 博士生导师, 从事群决策、供应链管理等研究, E-mail: houfj@bit.edu.cn.

(责任编辑: 郑晓蕾)