

控制与决策

Control and Decision

模糊环境下考虑零售商风险偏好的绿色供应链博弈模型

王淑纳, 胡志华

引用本文:

王淑纳, 胡志华. 模糊环境下考虑零售商风险偏好的绿色供应链博弈模型[J]. *控制与决策*, 2021, 36(3): 711–723.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0646>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

联合定价下果农对零售商的选择与优化

Fruit-producer's strategy of selecting and optimizing retailers under joint-pricing

控制与决策. 2021, 36(3): 747–753 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0564>

制造商竞争下创新投资对零售商信息分享策略的影响

Optimal information sharing strategy for retailer under competitive manufacturers' innovation investment

控制与决策. 2020, 35(12): 3006–3016 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0377>

损失厌恶下考虑参照利润效应的供应链决策模型

Decision model of supply chain considering reference profit under loss aversion

控制与决策. 2020, 35(11): 2810–2816 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0094>

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>

库存水平影响需求下变质品订购、定价和保鲜技术投资的联合决策

Ordering, pricing and preservation technology investment decision for perishable items with inventory-level-dependent demand

控制与决策. 2020, 35(11): 2578–2588 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0195>

模糊环境下考虑零售商风险偏好的绿色供应链博弈模型

王淑纳^{1,2†}, 胡志华²

(1. 菏泽学院 商学院, 山东 菏泽 274015; 2. 上海海事大学 物流研究中心, 上海 201306)

摘要: 在模糊需求环境下绿色供应链运作系统中, 研究由单一制造商和单一零售商组成的两级绿色供应链. 首先, 引入创新成本, 分别建立风险中性制造商为主导者, 具有中性、悲观和乐观等风险偏好的零售商为跟随者的两级绿色供应链 Stackelberg 博弈模型; 然后, 推导出最优决策的期望值和机会约束规划模型, 并进行算例分析, 比较产品绿色度、批发价格及零售价格与不同置信水平之间的相互影响, 探讨具有不同风险偏好的零售商对模糊绿色供应链中制造商、零售商及供应链整体运作绩效的影响. 研究结果表明: 悲观决策模型中, 伴随置信水平的增加, 产品的绿色度水平、批发价格及创新成本逐步下降, 零售价格、制造商、零售商及绿色供应链整体利润逐步上升; 在乐观决策模型中, 结论相反.

关键词: 绿色供应链; 零售商风险偏好; 模糊环境; 创新成本; 绿色度; Stackelberg 博弈

中图分类号: F270.5

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2019.0646

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



引用格式: 王淑纳, 胡志华. 模糊环境下考虑零售商风险偏好的绿色供应链博弈模型 [J]. 控制与决策, 2021, 36(3): 711-723.

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

WANG Shu-na^{1,2†}, HU Zhi-hua²

(1. School of Business, Heze University, Heze 274015, China; 2. Logistics Research Center, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract: A two-echelon green supply chain model composed of a risk-neutral manufacturer acting as the leader and a retailer with different risk reference acting as followers is studied under a fuzzy decision environment. Considering the innovation cost, the parameters of demand function and manufacturing cost are all characterized as fuzzy variables. Then the optimum policy of the expected value and chance-constrained programming models are derived considering the different risk reference of the retailer. Finally, numerical examples are presented to illustrate the theoretical underpinning of proposed models, to compare the interaction among product greenness, wholesale price and retail price and different confidence levels, and to explore the influence of retailer's risk preference on the profit of manufacturers, retailers and green supply chains in the fuzzy green supply chain. Study results show that the confidence level of the profits for supply chain members affects the final optimal solutions. In the pessimistic decision-making model, with the increase of the confidence level, the level of product green degree, wholesale price and innovation cost gradually decline, but retail price and the overall profit of manufacturers, retailers and green supply chain gradually increase. The results is opposite in the optimistic decision model.

Keywords: green supply chain; retailer's risk preference; fuzzy environment; innovation cost; green degree; Stackelberg game

0 引言

随着全球气候变暖、环境污染、资源枯竭等问题的凸显, 绿色可持续发展逐渐成为新的发展共识. 党

的十九大报告明确要求深化绿色发展的制度创新, 并全面阐述了推进绿色发展的战略部署. 这就要求企业在生产中尽量消减对环境的不利影响, 越来越多的

收稿日期: 2019-05-10; 修回日期: 2019-08-11.

基金项目: 国家自然科学基金项目(71871136); 教育部人文社会科学研究青年基金项目(17YJC630116); 上海市科学技术委员会基金项目(16040501800); 山东省自然科学基金菏泽学院培育项目(XY18PY07); 山东省社会科学规划研究项目(19CDNJ02); 山东省高校人文社会科学研究计划项目(J18RA050).

责任编辑: 李登峰.

†通讯作者. E-mail: shuna_wang@163.com.

企业践行绿色供应链管理. 早在2015年沃尔玛就要求其所有包装材料必须再循环使用或者符合环保标准. 截止到2018年, 沃尔玛已连续五年荣登世界500强排行榜榜首. 华为、海尔、北京汽车、上海振华、九阳、天能电池等大批企业纷纷践行绿色供应链管理理念. 由此可见政府、制造商、零售商和消费者之间通过实施绿色供应链管理共同获益是个不可逆转的发展趋势. 实施绿色供应链管理不仅能改善环境, 还能使企业领先于竞争对手. 但绿色产品多为创新产品, 新产品更新换代时间短、需求波动大, 由于缺乏可参考的历史数据, 决策者对此类新兴产品的市场环境认识较为模糊, 且传统分销模式下零售商承担着极高的市场需求不足风险, 导致绿色供应链管理中的各种不确定性更加突出. 如何向消费者提供高性价比的绿色产品是企业亟待解决的问题. 模糊理论为解决管理决策及博弈问题中模糊现象的一种重要工具, 在解决此类不确定性问题上起着重要作用. 例如文献[1]研究了模糊多目标多人决策和模糊多目标多人对策等内容. 文献[2]研究了直觉模糊集在管理决策和博弈理论中的应用, 建立了决策和博弈研究的新方法. 文献[3]研究了经济管理中区间接合作博弈的模型与方法. 因此, 利用模糊需求理论和行为博弈理论研究绿色供应链运行效率具有重要实践意义.

目前, 绿色供应链管理已引起了全社会的广泛关注, 吸引了国内外众多专家对其进行研究. 与本文相关的研究主要集中在如下两方面:

1) 绿色供应链优化. 文献[4]将市场需求视为线性函数, 对两级绿色供应链下的分散决策和集中决策进行了比较分析, 并通过二部定价契约来协调该供应链系统. 文献[5]考虑到供应链成员的不同渠道权力结构, 分别研究了两级绿色供应链的Stackelberg和Nash均衡. 随后, 文献[6]进一步通过设计成本分担契约来协调绿色供应链系统. 文献[7]在双渠道环境下分析了绿色供应链的产品定价问题. 文献[8]研究了两级供应链在生产销售绿色产品和非绿色产品混合生产模式下的价格和协调机制策略问题. 国内学者对绿色供应链最优决策的研究同样取得了一些有价值的成果. 文献[9]在三级绿色供应链博弈中研究了产品绿色度和政府补贴的影响. 文献[10]研究了考虑产品绿色度的分散和集中决策模型. 文献[11]基于Stackelberg模型研究了两阶段绿色供应链在双重竞争的情境下供应链成员间的减排博弈问题. 另外, 文献[12-13]分别基于政府补贴视角研究了考虑消费者绿色偏好及单一与协调补贴策略对绿色供应链决

策的影响.

2) 供应链行为因素. 近10年来, 行为供应链的研究也成为供应链管理中一个新的研究热点. 文献[14]研究了成员具有不同风险态度下双渠道供应链定价及利润机制. 文献[15]研究了制造商具有公平关切行为下, 绿色供应链的分散和集中决策. 文献[16]考虑了决策者损失规避并运用变权分析法求解了异质多属性决策问题, 为解决复杂决策问题提供了支持. 在此基础上, 文献[17]进一步研究了具有偏好偏差情况下的异质群体复杂决策情景. 文献[18]研究了不同产品设计策略对闭环供应链运作效果的影响. 文献[19]分析了信息不对称条件下公平偏好对绿色供应链中最优解的影响. 文献[20]在三级闭环供应链中创新性地研究了考虑零售商公平偏好的合作博弈模型. 此后, 文献[21]进一步研究了运用可变权重shapley法协调考虑零售商公平偏好的闭环供应链.

综上所述, 虽然众多专家研究了绿色供应链, 但现阶段鲜有考虑对绿色供应链上风险偏好不同的零售商对其决策的影响. 文献[4-10]大都是在确定需求和随机需求环境下进行的, 且都将决策者假定为完全理性的, 没有考虑实际情况下模糊的市场需求环境. 文献[11-21]虽是研究行为偏好因素, 但文献[11-13]主要研究的是政府的行为因素, 文献[14-21]主要研究具有相同的偏好属性的制造商与零售商对绿色供应链最优决策的影响. 因此, 本文用模糊变量刻画绿色供应链上制造商与零售商分销过程中的不确定性, 考虑决策者应对绿色供应链系统中风险的不同态度, 研究由风险中性的制造商和具有不同风险偏好的零售商组成的两级绿色供应链系统, 将绿色创新系数、需求函数中参数及制造成本视为模糊变量, 建立绿色供应链上风险中性制造商为主导者、不同风险偏好零售商为跟随者的Stackelberg博弈模型, 创新性地探讨模糊环境下具有不同风险偏好行为的零售商对绿色供应链绩效的影响, 以期所得结论能为绿色供应链节点企业的科学决策提供理论支持和借鉴^[22].

1 理论基础

令 ξ 是可能性空间中的一个模糊变量(可能性空间的概念参见Nahmias^[23]), Θ 是非空集合, $P(\Theta)$ 是 Θ 的幂集, 且Pos表示 $P(\Theta)$ 发生的可能性.

定义1^[24] 假设模糊变量 ξ 为非负变量, 即 $\text{Pos}\{\xi < 0\} = 0$.

定义2^[24] 假设 ξ 为模糊变量且 $\alpha \in (0, 1)$, 有

$\xi_\alpha^L = \inf\{r | \text{Pos}\{\xi \leq r\} \geq \alpha\}$ 和 $\xi_\alpha^R = \sup\{r | \text{Pos}\{\xi \geq r\} \geq \alpha\}$, 分别称为模糊变量 ξ 的 α 悲观值和 α 乐观值. 此时, α 为预先给定的置信水平, 有时决策者希望约束条件能以一定的置信水平成立为前提, 以此来提高决策的准确性. 则 ξ 的 α 悲观值和 α 乐观值分别表示决策者厌恶风险和喜好风险时模糊变量的取值.

定义3^[24] 三元数组 $\tilde{A} = (a_1, a_2, a_3)$, 这里 $a_1 < a_2 < a_3$ 称为三角模糊数, 当且仅当其隶属度函数

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} L(x) = \frac{x - a_1}{a_2 - a_1}, & x \in [a_1, a_2]; \\ R(x) = \frac{a_3 - x}{a_3 - a_2}, & x \in (a_2, a_3]; \\ 0, & x \notin (a_1, a_3). \end{cases}$$

其中: a_2 为三角模糊数 \tilde{A} 的中心点, a_1 和 a_3 分别为 \tilde{A} 的下确界和上确界. 如果 $a_1 > 0$, 则称 \tilde{A} 为正三角模糊数.

例1 假设 $\xi = (a, b, c)$ 为模糊三角函数, 模糊变量 ξ 的 α 悲观值和 α 乐观值分别表示为

$$\xi_\alpha^L = b\alpha + a(1 - \alpha), \quad \xi_\alpha^U = b\alpha + c(1 - \alpha).$$

性质1^[25] 假设 ξ 和 η 为相互独立的模糊变量, 则对任意 $\alpha \in (0, 1]$, 有:

- 1) $(\xi + \eta)_\alpha^L = \xi_\alpha^L + \eta_\alpha^L, (\xi + \eta)_\alpha^U = \xi_\alpha^U + \eta_\alpha^U;$
- 2) if $\lambda > 0$, then $(\lambda\xi)_\alpha^L = \lambda\xi_\alpha^L, (\lambda\xi)_\alpha^U = \lambda\xi_\alpha^U;$
- 3) $(\xi\eta)_\alpha^L = \xi_\alpha^L\eta_\alpha^L, (\xi\eta)_\alpha^U = \xi_\alpha^U\eta_\alpha^U;$
- 4) $(\xi - \eta)_\alpha^L = \xi_\alpha^L - \eta_\alpha^U, (\xi - \eta)_\alpha^U = \xi_\alpha^U - \eta_\alpha^L.$

性质2^[25] 若 ξ 为一模糊数, 其有限期望值可表示为

$$E[\xi] = \frac{1}{2} \int_0^1 (\xi_\alpha^L + \xi_\alpha^U) d\alpha.$$

性质3^[25] 假设 ξ 和 η 为相互独立的模糊变量, 对于任意实数 a 和 b , 有

$$E[a\xi + b\eta] = aE[\xi] + bE[\eta].$$

例2 假设 $\xi = (a, b, c)$ 为模糊三角函数, 其期望值为

$$E[\xi] = \frac{1}{2} \int_0^1 (b\alpha + a(1 - \alpha) + b\alpha + c(1 - \alpha)) d\alpha = \frac{a + 2b + c}{4}.$$

例3 假设 $\xi = (a, b, c)$ 和 $\eta = (l, m, n)$ 均为模糊三角函数, 期望值

$$\begin{aligned} E[\eta\xi] &= \\ & \frac{1}{2} \int_0^1 ((\xi\eta)_\alpha^L + (\xi\eta)_\alpha^U) d\alpha = \\ & \frac{1}{2} \int_0^1 (\xi_\alpha^L\eta_\alpha^L + \xi_\alpha^U\eta_\alpha^U) d\alpha = \\ & \frac{2al + am + 3bl + 3bn + cm + 2cn}{12}. \end{aligned}$$

定义4 假设 ξ 和 η 为相互独立的模糊变量, 若 $\xi > \eta$, 当且仅当 $\xi > \eta$ 时, 对任意 $\alpha \in (0, 1]$ 有 $\xi_\alpha^L > \eta_\alpha^L$ 和 $\xi_\alpha^U > \eta_\alpha^U$.

2 问题描述与假设

由于全球市场竞争加剧, 绿色产品从生产到流通各环节都存在众多的不确定性, 尤其销售过程中, 现有研究大多将需求、制造成本及变化率等参数依据历史数据, 利用既定参数的概率分布来反映绿色供应链中的不确定性. 但是, 由于科学技术的迅猛发展, 技术和产品更新换代速度越来越快, 产品生命周期越来越短, 且顾客对交货期要求和产品的期望越来越高, 产品需求波动也越来越大. 绿色供应链内外部环境发生剧烈变化, 管理中的不确定性加大, 如果再利用随机变量描述未知参数, 则造成的偏差较大, 由此想要准确估计随机变量的分布变得更加困难. 急需参考行业专家经验预测需求函数中的相应参数, 如市场规模、市场需求对价格和绿色度的变化系数等, 其具有模糊不确定性; 绿色产品的制造成本和创新成本与国内的利率及国际汇率密切相关, 专家会结合当今大数据技术进行较为精准的供需预测和更有效的成本估计, 其也具有模糊不确定性. 模糊理论为解决管理决策及博弈问题中模糊现象的一种重要工具, 在解决此类模糊不确定性问题上起着重要的作用.

实践中专家常常使用“成本较低”“市场容量很大”和“需求变化率较敏感”等类似语言进行经验估计, 模糊理论可以确定专家的模糊语言和三角模糊数的关系. 以单一制造商和单一零售商组成的两阶段绿色供应链为研究背景, 引入制造商的创新成本(模糊变量), 研究绿色偏好行为中性制造商为主导的绿色供应链下, 分别应对风险偏好行为中性的、乐观的和悲观的零售商3种情况下的 Stackelberg 博弈. 其中, 制造商负责以批发价格向零售商供应绿色商品, 零售商负责将绿色商品以零售价格销售给顾客. 具体过程为: 制造商根据生产成本 c_m (模糊变量) 先确定绿色产品的批发价格 w (模糊变量) 和绿色度 θ (模糊变量), 零售商得知批发价格 w 后, 再选择自认为最佳的零售价格 p (模糊变量), 其中批发价格 w 、零售价格 p 和产品的绿色度 θ 为模糊决策变量. 在博弈过程中制造商和零售商都以最大化各自的利润为主要决策目标.

本文中用到的基本参数符号如表1所示. 为简化研究环境, 本文作如下假设.

假设1 市场上只有一种产品, 价格为 p , 即只售卖绿色产品. θ 代表所售产品的绿色度, θ 越高, 产品

表1 基本参数符号

符号	具体涵义
p	单位绿色产品的零售价格
p^*	单位绿色产品的最优零售价格
w	单位绿色产品的批发价格
w^*	单位绿色产品的最优批发价格
α	置信水平
θ	绿色度水平
c_m	全部由制造商承担的创新成本
\tilde{c}	单位绿色产品的制造成本
\tilde{Q}	市场的需求量
$\tilde{\xi}$	单位产品的绿色创新系数
\tilde{B}	市场规模
$\tilde{\beta}$	市场需求对价格的变化率
$\tilde{\gamma}$	市场需求对绿色度水平 μ 的变化率
$\tilde{\pi}_M$	制造商的利润
$\tilde{\pi}_R$	零售商的利润

越环保, $\theta > 0$.

假设2 市场模糊需求函数 $\tilde{Q} = \tilde{B} - \tilde{\beta}P + \tilde{\gamma}\theta$, 且 \tilde{B} 、 $\tilde{\beta}$ 、 $\tilde{\gamma}$ 是相互独立的非负模糊变量, 且有 $\tilde{B} > 0$, $\tilde{\beta} > 0$, $\tilde{\gamma} > 0$.

假设3 为满足客户的绿色需求, 需要创新技术而提高产品绿色度, 由此产生的成本全部由制造商承担. 研发绿色产品的成本为 $c_m = \tilde{\xi}\theta^2/2$, $\tilde{\xi}$ 为绿色创新系数, $\tilde{\xi} > 0$, θ 代表所售产品的绿色度.

假设4 该模型中不考虑制造商和零售商的库存、运输成本等相关物流成本, 也不考虑产品的缺货成本, 是一种相对简化的商业状态.

假设5 假设供应链上下游企业间的成本构成和市场需求等信息是透明状态, 即信息在绿色供应链成员间是对称的.

假设6 假设制造商给出批发价后, 当零售商确定零售价格时, 风险偏好不同的零售商应对绿色供应链系统的风险时选择不同的处理态度, 可以分为中性、悲观和乐观等3种风险偏好行为. 中性的零售商是理性人, 作出的决策比较理性, 此时所得收益即零售商利润的期望值; 悲观的零售商一般谨慎对待风险, 不会贸然采取行动, 采取较保守的对策应对风险, 所得收益即零售商利润的 α 悲观值; 乐观的零售商一般奉行高风险高收益的理念, 偏好采取风险较高的决策应对风险, 以期未来能博取较高收益, 所得收益即零售商利润的 α 乐观值.

由以上假设, 建模如下:

制造商的利润函数为

$$\tilde{\pi}_M = (w - \tilde{c})(\tilde{B} - \tilde{\beta}p + \tilde{\gamma}\theta) - \frac{1}{2}\tilde{\xi}\theta^2;$$

零售商的利润函数为

$$\tilde{\pi}_R = (p - w)(\tilde{B} - \tilde{\beta}p + \tilde{\gamma}\theta);$$

供应链整体利润为

$$\tilde{\pi}_{SC} = (p - \tilde{c})(\tilde{B} - \tilde{\beta}p + \tilde{\gamma}\theta) - \frac{1}{2}\tilde{\xi}\theta^2.$$

3 模型优化与求解

本文在模糊环境下研究制造商是绿色供应链上主导企业的 Stackelberg 博弈情形. 具体博弈过程为: 制造商根据生产成本先确定绿色产品的批发价格, 零售商得知批发价格后, 再选择自认为最佳的零售价格, 其中批发价格 w 、零售价格 p 和产品的绿色度 θ 为决策变量. 根据零售商的风险偏好行为不同, 借鉴文献 [25-26] 提出的模糊期望值模型和模糊机会规划模型, 分别建立以风险偏好行为中性的制造商为主导, 风险偏好行为中性的零售商、厌恶风险行为的悲观零售商和偏好风险行为的乐观零售商等为跟随者的3种绿色供应链博弈模型. 可分别简称为期望值决策模型、悲观决策模型及乐观决策模型.

3.1 期望值决策模型

该模型研究中性制造商与中性零售商之间的博弈, 利用模糊期望值模型刻画绿色供应链中各中性行为参与者的价格、数量及利润. 该决策过程遵从 Stackelberg 博弈, 风险偏好中性制造商占主导地位, 由其先决定批发价格 w 和绿色度 θ , 作为跟随者的风险偏好中性零售商再决定绿色产品的零售价格 p , 决策模型如下:

$$\left\{ \begin{array}{l} \max E[\tilde{\pi}_M(w, \theta)] = \\ E[(w - \tilde{c})(\tilde{B} - \tilde{\beta}p + \tilde{\gamma}\theta) - \frac{1}{2}\tilde{\xi}\theta^2]; \\ \text{s.t. Pos}\{w - \tilde{c} \leq 0\} = 0. \\ p^* \text{ 是如下问题的解} \\ \left\{ \begin{array}{l} \max E[\tilde{\pi}_R(p)] = E[(p - w)(\tilde{B} - \tilde{\beta}p + \tilde{\gamma}\theta)]; \\ \text{s.t. Pos}\{\tilde{B} - \tilde{\beta}p + \tilde{\gamma}\theta \leq 0\} = 0, \\ p \geq w. \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (1)$$

其中: 用利润的期望值 $E[\tilde{\pi}_M]$ 表示风险偏好中性的制造商利润, 用 $E[\tilde{\pi}_R]$ 表示风险偏好中性的零售商利润. 绿色供应链上的制造商和零售商分别通过抉择 w 、 θ 和 p 来最大化各自的所得利润.

模糊环境下风险偏好中性制造商为主导, 风险偏好中性的零售商为跟随者的绿色供应链博弈可以得出如下结论.

定理1 令 $E[\tilde{\pi}_R(p)]$ 为风险偏好中性零售商的期望利润, 给定绿色产品的批发价格 w , 若 $\text{Pos}\{\tilde{B} - \tilde{\beta}p^* + \tilde{\gamma}\theta^* \leq 0\} = 0$, 则零售价格 p 的最优反应函数为

$$P^*(w, \theta) = \frac{1}{2}w + \frac{E[\tilde{B}] + \theta E[\tilde{\gamma}]}{2E[\tilde{\beta}]}.$$

证明 风险偏好中性零售商的期望利润表达式为

$$E[\tilde{\pi}_R(p)] = E[(p - w)(\tilde{B} - \tilde{\beta}p + \tilde{\gamma}\theta)], \quad (2)$$

整理得

$$E[\tilde{\pi}_R(p)] = -E[\tilde{\beta}]p^2 + (E[\tilde{B}] + w\theta E[\tilde{\gamma}] + E[\tilde{\beta}])p - E[\tilde{B}]w - w\theta E[\tilde{\gamma}]. \quad (3)$$

由式(3)可得 $E[\tilde{\pi}_R(p, \theta)]$ 的一阶和二阶导数,即

$$\frac{dE[\tilde{\pi}_R(p)]}{dp} = -2E[\tilde{\beta}]p + E[\tilde{B}] + w\theta E[\tilde{\gamma}] + E[\tilde{\beta}], \quad (4)$$

$$\frac{d^2E[\tilde{\pi}_R(p)]}{dp^2} = -2E[\tilde{\beta}]. \quad (5)$$

由于 $d^2E[\tilde{\pi}_R(p)]/dp^2 < 0$,得 $E[\tilde{\pi}_R(p)]$ 是关于 p 的凹函数,绿色供应链上的零售商的最优价格可通过令 $E[\tilde{\pi}_R(p)]$ 的一阶导数等于零获得,即

$$\frac{dE[\tilde{\pi}_R(p)]}{dp} = -2E[\tilde{\beta}]p + E[\tilde{B}] + w\theta E[\tilde{\gamma}] + E[\tilde{\beta}] = 0. \quad (6)$$

由式(6)得绿色产品的零售价格 p 对批发价格 w 和绿色度 θ 的最优反应函数

$$P^*(w, \theta) = \frac{1}{2}w + \frac{E[\tilde{B}] + \theta E[\tilde{\gamma}]}{2E[\tilde{\beta}]}. \quad (7)$$

定理1得证. □

定理2 $E[\tilde{\pi}_M(w, \theta)]$ 为风险偏好中性制造商的期望利润,若 $\text{Pos}\{w^* \leq \tilde{c}\} = 0, \text{Pos}\{\tilde{B} - \tilde{\beta}p^* + \tilde{\gamma}\theta^* \leq 0\} = 0$,且有 $4E[\tilde{\beta}]E[\tilde{\xi}] > (E[\tilde{\gamma}])^2$,则存在唯一策略 $\theta^* =$

$$\frac{3E[\tilde{\gamma}]E[\tilde{c}\tilde{\beta}] + E[\tilde{B}]E[\tilde{\gamma}] - 2E[\tilde{\beta}] \int_0^1 (\tilde{c}_\alpha^U \tilde{\gamma}_\alpha^L + \tilde{c}_\alpha^L \tilde{\gamma}_\alpha^U) d\alpha}{4E[\tilde{\xi}]E[\tilde{\beta}] - (E[\tilde{\gamma}])^2},$$

$w^* =$

$$\frac{2E[\tilde{\beta}]E[\tilde{B}]E[\tilde{\xi}] + 2E[\tilde{\beta}]E[\tilde{c}\tilde{\beta}]E[\tilde{\xi}] + (E[\tilde{\gamma}])^2E[\tilde{c}\tilde{\beta}] - E[\tilde{\gamma}]E[\tilde{\beta}] \int_0^1 (\tilde{c}_\alpha^U \tilde{\gamma}_\alpha^L + \tilde{c}_\alpha^L \tilde{\gamma}_\alpha^U) d\alpha}{(E[\tilde{\beta}](4E[\tilde{\xi}]E[\tilde{\beta}] - (E[\tilde{\gamma}])^2))},$$

$p^* =$

$$\frac{(3E[\tilde{B}]E[\tilde{\beta}]E[\tilde{\xi}] + 2E[\tilde{c}\tilde{\beta}](E[\tilde{\gamma}])^2 + E[\tilde{\beta}]E[\tilde{\xi}]E[\tilde{c}\tilde{\beta}] - \frac{3}{2}E[\tilde{\gamma}]E[\tilde{\beta}] \int_0^1 (\tilde{c}_\alpha^U \tilde{\gamma}_\alpha^L + \tilde{c}_\alpha^L \tilde{\gamma}_\alpha^U) d\alpha)}{(E[\tilde{\beta}](4E[\tilde{\xi}]E[\tilde{\beta}] - (E[\tilde{\gamma}])^2))},$$

是模型的Stackelberg-Nash均衡解.

证明 将性质1~性质3整理得,风险偏好中性制造商的期望利润表达式为

$$E[\tilde{\pi}_M(w, \theta)] = E\left[(w - \tilde{c})(\tilde{B} - \tilde{\beta}p + \tilde{\gamma}\theta) - \frac{1}{2}\tilde{\xi}\theta^2\right] = \frac{1}{2} \int_0^1 \left[(w - \tilde{c})(\tilde{B} - \tilde{\beta}p^*(w) + \tilde{\gamma}\theta) - \frac{1}{2}\tilde{\xi}\theta^2\right]^L d\alpha +$$

$$\frac{1}{2} \int_0^1 \left[(w - \tilde{c})(\tilde{B} - \tilde{\beta}p^*(w) + \tilde{\gamma}\theta) - \frac{1}{2}\tilde{\xi}\theta^2\right]^R d\alpha = wE[\tilde{B}] + w\theta E[\tilde{\gamma}] - wE[\tilde{\beta}]p^*(w) + E[\tilde{c}\tilde{\beta}]p^*(w) - \frac{1}{2}E[\tilde{\xi}]\theta^2 - \frac{1}{2} \int_0^1 (\tilde{B}_\alpha^L \tilde{c}_\alpha^U + \tilde{B}_\alpha^U \tilde{c}_\alpha^L) d\alpha - \frac{1}{2} \int_0^1 ((\tilde{c}_\alpha^U \tilde{\gamma}_\alpha^L + \tilde{c}_\alpha^L \tilde{\gamma}_\alpha^U)\theta) d\alpha. \quad (8)$$

将式(7)代入(8)得

$$E[\tilde{\pi}_M(w, \theta)] = -\frac{1}{2}E[\tilde{B}]w^2 + \frac{1}{2}wE[\tilde{B}] + \frac{1}{2}\theta wE[\tilde{\gamma}] + \frac{1}{2}E[\tilde{c}\tilde{\beta}]w - \frac{1}{2}E[\tilde{\xi}]\theta^2 + \frac{E[\tilde{\gamma}]E[\tilde{c}\tilde{\beta}]\theta}{2E[\tilde{\beta}]} + \frac{E[\tilde{\beta}]E[\tilde{c}\tilde{\beta}]}{2E[\tilde{\beta}]} - \frac{1}{2} \int_0^1 ((\tilde{c}_\alpha^U \tilde{\gamma}_\alpha^L + \tilde{c}_\alpha^L \tilde{\gamma}_\alpha^U)\theta) d\alpha - \frac{1}{2} \int_0^1 (\tilde{B}_\alpha^L \tilde{c}_\alpha^U + \tilde{B}_\alpha^U \tilde{c}_\alpha^L) d\alpha. \quad (9)$$

由式(9)可得 $E[\tilde{\pi}_M(w, \theta)]$ 关于 (w, θ) 的一阶导数,所以其Hesse矩阵为

$$H = \begin{bmatrix} -E[\tilde{\beta}] & \frac{1}{2}E[\tilde{\gamma}] \\ \frac{1}{2}E[\tilde{\gamma}] & -E[\tilde{\xi}] \end{bmatrix},$$

当 $4E[\tilde{\beta}]E[\tilde{\xi}] > (E[\tilde{\gamma}])^2$ 时,即

$$H = \begin{bmatrix} -E[\tilde{\beta}] & \frac{1}{2}E[\tilde{\gamma}] \\ \frac{1}{2}E[\tilde{\gamma}] & -E[\tilde{\xi}] \end{bmatrix} > 0.$$

Hesse矩阵是负定矩阵,函数存在唯一均衡解.

令 $E[\tilde{\pi}_M(w, \theta)]$ 关于 (w, θ) 的一阶导数等于零,分别有

$$\frac{dE[\tilde{\pi}_M(w, \theta)]}{dw} = -E[\tilde{\beta}]w + \frac{1}{2}(E[\tilde{B}] + \theta E[\tilde{\gamma}] + E[\tilde{c}\tilde{\beta}]) = 0, \quad (10)$$

$$\frac{dE[\tilde{\pi}_M(w, \theta)]}{d\theta} = -E[\tilde{\xi}]\theta + \frac{1}{2}wE[\tilde{\gamma}] + \frac{E[\tilde{\gamma}]E[\tilde{c}\tilde{\beta}]}{2E[\tilde{\beta}]} - \frac{1}{2} \int_0^1 (\tilde{c}_\alpha^U \tilde{\gamma}_\alpha^L + \tilde{c}_\alpha^L \tilde{\gamma}_\alpha^U) d\alpha = 0. \quad (11)$$

联立式(10)和(11)得

$$\theta^* = \frac{3E[\tilde{\gamma}]E[\tilde{c}\tilde{\beta}] + E[\tilde{B}]E[\tilde{\gamma}] - 2E[\tilde{\beta}] \int_0^1 (\tilde{c}_\alpha^U \tilde{\gamma}_\alpha^L + \tilde{c}_\alpha^L \tilde{\gamma}_\alpha^U) d\alpha}{4E[\tilde{\xi}]E[\tilde{\beta}] - (E[\tilde{\gamma}])^2}, \quad (12)$$

$w^* =$

$$\left(2E[\tilde{\beta}]E[\tilde{B}]E[\tilde{\xi}] + 2E[\tilde{\beta}]E[\tilde{c}\tilde{\beta}]E[\tilde{\xi}] + (E[\tilde{\gamma}])^2E[\tilde{c}\tilde{\beta}] - 2E[\tilde{\gamma}]E[\tilde{\beta}] \int_0^1 (\tilde{c}_\alpha^U \tilde{\gamma}_\alpha^L + \tilde{c}_\alpha^L \tilde{\gamma}_\alpha^U) d\alpha\right) /$$

$$E(\tilde{\beta})(4E[\tilde{\xi}]E[\tilde{\beta}] - (E[\tilde{\gamma}])^2). \tag{13}$$

将式(12)和(13)代入(7)得

$$p^* = \left(3E[\tilde{B}]E[\tilde{\beta}]E[\tilde{\xi}] + 2E[\tilde{c}\tilde{\beta}](E[\tilde{\gamma}])^2 + E[\tilde{\beta}]E[\tilde{\xi}]E[\tilde{c}\tilde{\beta}] - 2E[\tilde{\gamma}]E[\tilde{\beta}] \int_0^1 (\tilde{c}_\alpha^U \tilde{\gamma}_\alpha^L + \tilde{c}_\alpha^L \tilde{\gamma}_\alpha^U) d\alpha \right) / E(\tilde{\beta})(4E[\tilde{\xi}]E[\tilde{\beta}] - (E[\tilde{\gamma}])^2). \tag{14}$$

即模型(1)的Stackelberg-Nash均衡解为 (p^*, w^*, θ^*) . 此时制造商和零售商均可取得最优利润.

将式(12)~(14)代入(3), 可得绿色供应链中零售商的最大期望利润

$$E[\tilde{\pi}_R(p^*, \theta^*, w^*)] = E[(p^* - w^*)(\tilde{B} - \tilde{\beta}p^* + \tilde{\gamma}\theta^*)]. \tag{15}$$

将式(12)~(14)代入(9), 可得绿色供应链中制造商的最大期望利润

$$E[\tilde{\pi}_M(w^*, p^*, \theta^*)] = E\left[(w^* - \tilde{c})(\tilde{B} - \tilde{\beta}p^* + \tilde{\gamma}\theta^*) - \frac{1}{2}\tilde{\xi}\theta^{*2}\right]. \tag{16}$$

定理得证. □

3.2 悲观决策模型

该模型研究中性制造商与悲观零售商之间的博弈, 模型亦遵从Stackelberg 博弈, 风险偏好中性制造商占主导地位, 由其先决定批发价格 w 和绿色度 θ , 对绿色供应链上风险采取厌恶态度的悲观零售商作为跟随者决定绿色产品的零售价格 p . 利用模糊机会约束规划思想, 建立风险偏好中性的制造商与悲观零售商的 α 悲观值决策模型如下:

$$\begin{cases} \max_w E[\tilde{\pi}_M]; \\ \text{s.t. Pos}\{(w - \tilde{c})(\tilde{B} - \tilde{\beta}p^*(w) + \tilde{\gamma}\theta)\} \geq \tilde{\pi}_M, \\ \text{Pos}\{w - \tilde{c} \leq 0\} = 0. \\ p^* \text{是如下问题的解:} \\ \begin{cases} \max_p \min_{\tilde{\pi}_R} \tilde{\pi}_R. \\ \text{s.t. Pos}\{(p - w)(\tilde{B} - \tilde{\beta}p + \tilde{\gamma}\theta) \leq \tilde{\pi}_R\} \geq \alpha, \\ \text{Pos}\{\tilde{B} - \tilde{\beta}p + \tilde{\gamma}\theta \leq 0\}, \\ p \geq w. \end{cases} \end{cases} \tag{17}$$

此处模糊机会规划模型能解决参与者期望在约束条件以一定的置信水平成立的前提下极大化目标函数的悲观收益, 其中 α 为预先给定的置信水平. $\min \tilde{\pi}_R$ 代表零售商利润 α 的悲观值, 用利润的期望值 $E[\tilde{\pi}_M]$ 来表示风险偏好中性的制造商的利润. 绿色供应链上的制造商和零售商分别通过抉择 w 、 θ 和

p 来最大化各自的所得利润. 上面的minmax 机会约束规划模型等价于如下模型:

$$\begin{cases} \max E[\tilde{\pi}_M(w, \theta)] = \\ E\left[(w - \tilde{c})(\tilde{B} - \tilde{\beta}p + \tilde{\gamma}\theta) - \frac{1}{2}\tilde{\xi}\theta^2\right]; \\ \text{s.t. Pos}\{w - \tilde{c} \leq 0\} = 0. \\ p^* \text{是如下问题的解:} \\ \begin{cases} \max [\tilde{\pi}_R(p)]_\alpha^L = [(p - w)(\tilde{B} - \tilde{\beta}p + \tilde{\gamma}\theta)]_\alpha^L; \\ \text{s.t. Pos}\{\tilde{B} - \tilde{\beta}p + \tilde{\gamma}\theta \leq 0\} = 0, \\ p \geq w. \end{cases} \end{cases} \tag{18}$$

在模糊环境下, 以风险偏好中性制造商为主导, 厌恶风险的悲观零售商为跟随者的绿色供应链可以得出如下结论.

定理3 令 $[\tilde{\pi}_R(p)]_\alpha^L$ 为厌恶风险的悲观零售商的利润, 给定绿色产品的批发价格 w , 若 $\text{Pos}\{\tilde{B} - \tilde{\beta}p^* + \tilde{\gamma}\theta^* \leq 0\} = 0$, 则零售价格 p 的最优反应函数为 $P^*(w, \theta) = \frac{1}{2}w + \frac{\tilde{B}_\alpha^L + \tilde{\gamma}_\alpha^L\theta}{2\tilde{\beta}_\alpha^U}$.

证明 厌恶风险的悲观零售商的利润表达式为

$$[\tilde{\pi}_R(p)]_\alpha^L = [(p - w)(\tilde{B} - \tilde{\beta}p + \tilde{\gamma}\theta)]_\alpha^L, \tag{19}$$

整理得

$$[\tilde{\pi}_R(p)]_\alpha^L = -\tilde{\beta}_\alpha^U p^2 + (\tilde{B}_\alpha^L + \tilde{\gamma}_\alpha^L\theta + w\tilde{\beta}_\alpha^U)p - w\tilde{\gamma}_\alpha^L\theta - w\tilde{B}_\alpha^L. \tag{20}$$

由式(20)可得 $[\tilde{\pi}_R(p)]_\alpha^L$ 的一阶和二阶导数, 即

$$\frac{d[\tilde{\pi}_R(p)]_\alpha^L}{dp} = -2\tilde{\beta}_\alpha^U p + (\tilde{B}_\alpha^L + \tilde{\gamma}_\alpha^L\theta + w\tilde{\beta}_\alpha^U), \tag{21}$$

$$\frac{d^2[\tilde{\pi}_R(p)]_\alpha^L}{dp^2} = -2\tilde{\beta}_\alpha^U. \tag{22}$$

由于 $d^2[\tilde{\pi}_R(p)]_\alpha^L/dp^2 = -2\tilde{\beta}_\alpha^U < 0$, 得 $[\tilde{\pi}_R(p)]_\alpha^L$ 是关于 p 的凹函数, 绿色供应链上的悲观零售商的最优价格可以通过令 $[\tilde{\pi}_R(p)]_\alpha^L$ 的一阶导数等于零获得, 即

$$\frac{d[\tilde{\pi}_R(p)]_\alpha^L}{dp} = -2\tilde{\beta}_\alpha^U p + (\tilde{B}_\alpha^L + \tilde{\gamma}_\alpha^L\theta + w\tilde{\beta}_\alpha^U) = 0. \tag{23}$$

由式(23)得绿色产品的零售价格 p 对批发价格 w 和绿色度 θ 的最优反应函数

$$P^*(w, \theta) = \frac{1}{2}w + \frac{\tilde{B}_\alpha^L + \tilde{\gamma}_\alpha^L\theta}{2\tilde{\beta}_\alpha^U}. \tag{24}$$

定理3得证. □

定理4 $E[\tilde{\pi}_M(w, \theta)]$ 为风险偏好中性制造商的期望利润, 若 $\text{Pos}\{w^* \leq \tilde{c}\} = 0$ 及 $\text{Pos}\{\tilde{B} - \tilde{\beta}p^* + \tilde{\gamma}\theta^* \leq 0\} = 0$, 且 $4E[\tilde{\beta}]E[\tilde{\xi}] > (E[\tilde{\gamma}] - E[\tilde{\beta}]\tilde{\gamma}_\alpha^L/2\tilde{\beta}_\alpha^U)^2$, 则存在

唯一策略

$$\begin{aligned} \theta^* &= \left(4E[\tilde{B}]E[\tilde{\gamma}](\tilde{\beta}_\alpha^U)^2 + 2E[\tilde{\gamma}]E[\tilde{c}\tilde{\beta}](\tilde{\beta}_\alpha^U)^2 - \right. \\ &\quad 2E[\tilde{\gamma}]E[\tilde{\beta}]B_\alpha^L\tilde{\beta}_\alpha^U + E[\tilde{\beta}]E[\tilde{c}\tilde{\beta}]\tilde{\gamma}_\alpha^L\tilde{\beta}_\alpha^U - \\ &\quad 2E[\tilde{B}]E[\tilde{\beta}]\tilde{\gamma}_\alpha^L\tilde{\beta}_\alpha^U + (E[\tilde{\beta}])^2\tilde{B}_\alpha^L\tilde{\gamma}_\alpha^L - \\ &\quad \left. 2E[\tilde{\beta}](\tilde{\beta}_\alpha^U)^2 \int_0^1 (\tilde{c}_\alpha^U\tilde{\gamma}_\alpha^L + \tilde{c}_\alpha^L\tilde{\gamma}_\alpha^U)d\alpha \right) / \\ &\quad (4E[\tilde{\xi}]E[\tilde{\beta}](\tilde{\beta}_\alpha^U)^2 - 4(E[\tilde{\gamma}])^2(\tilde{\beta}_\alpha^U)^2 + \\ &\quad 4E[\tilde{\beta}]E[\tilde{\gamma}]\tilde{\gamma}_\alpha^L\tilde{\beta}_\alpha^U - (E[\tilde{\beta}]\tilde{\gamma}_\alpha^L)^2), \\ w^* &= \left(4E[\tilde{B}]E[\tilde{\xi}](\tilde{\beta}_\alpha^U)^2 + 2E[\tilde{\xi}]E[\tilde{c}\tilde{\beta}](\tilde{\beta}_\alpha^U)^2 + \right. \\ &\quad 2E[\tilde{\gamma}]E[\tilde{c}\tilde{\beta}]\tilde{\gamma}_\alpha^L\tilde{\beta}_\alpha^U - 2E[\tilde{\beta}]E[\tilde{\xi}]\tilde{B}_\alpha^L\tilde{\beta}_\alpha^U - \\ &\quad E[\tilde{\beta}]E[\tilde{c}\tilde{\beta}](\tilde{\gamma}_\alpha^L)^2 + [E[\tilde{\beta}]\tilde{\gamma}_\alpha^L\tilde{\beta}_\alpha^U - \\ &\quad \left. 2E[\tilde{\gamma}](\tilde{\beta}_\alpha^U)^2 \int_0^1 (\tilde{c}_\alpha^U\tilde{\gamma}_\alpha^L + \tilde{c}_\alpha^L\tilde{\gamma}_\alpha^U)d\alpha \right) / \\ &\quad (4E[\tilde{\xi}]E[\tilde{\beta}](\tilde{\beta}_\alpha^U)^2 - 4(E[\tilde{\gamma}])^2(\tilde{\beta}_\alpha^U)^2 + \\ &\quad 4E[\tilde{\beta}]E[\tilde{\gamma}]\tilde{\gamma}_\alpha^L\tilde{\beta}_\alpha^U - (E[\tilde{\beta}]\tilde{\gamma}_\alpha^L)^2), \\ p^* &= \left(4E[\tilde{B}]E[\tilde{\gamma}]\tilde{\gamma}_\alpha^U\tilde{\beta}_\alpha^U + 4E[\tilde{\gamma}]E[\tilde{c}\tilde{\beta}]\tilde{\gamma}_\alpha^L\tilde{\beta}_\alpha^U - \right. \\ &\quad 2E[\tilde{B}]E[\tilde{\beta}](\tilde{\gamma}_\alpha^L)^2 + 2E[\tilde{\xi}]E[\tilde{\beta}]\tilde{B}_\alpha^L\tilde{\beta}_\alpha^U - \\ &\quad 4(E[\tilde{\gamma}])^2\tilde{B}_\alpha^L\tilde{\beta}_\alpha^U + 2E[\tilde{\gamma}]E[\tilde{\beta}]\tilde{B}_\alpha^L\tilde{\gamma}_\alpha^L + \\ &\quad 4E[\tilde{B}]E[\tilde{\xi}](\tilde{\beta}_\alpha^U)^2 + 2E[\tilde{\xi}]E[\tilde{c}\tilde{\beta}](\tilde{\beta}_\alpha^U)^2 - \\ &\quad \left. [E[\tilde{\beta}]\tilde{\gamma}_\alpha^L\tilde{\beta}_\alpha^U + 2E[\tilde{\gamma}](\tilde{\beta}_\alpha^U)^2 \int_0^1 (\tilde{c}_\alpha^U\tilde{\gamma}_\alpha^L + \tilde{c}_\alpha^L\tilde{\gamma}_\alpha^U)d\alpha \right) / \\ &\quad (2[4E[\tilde{\xi}]E[\tilde{\beta}](\tilde{\beta}_\alpha^U)^2 - 4(E[\tilde{\gamma}])^2(\tilde{\beta}_\alpha^U)^2 + \\ &\quad 4E[\tilde{\beta}]E[\tilde{\gamma}]\tilde{\gamma}_\alpha^L\tilde{\beta}_\alpha^U - (E[\tilde{\beta}]\tilde{\gamma}_\alpha^L)^2]), \end{aligned}$$

是模型(18)的Stackelberg-Nash均衡解。

证明 由式(8)可得风险偏好中性制造商的利润表达式,将式(24)代入(8)得

$$\begin{aligned} E[\tilde{\pi}_M(w, \theta)] &= \\ & - \frac{1}{2}E(\tilde{\beta})w^2 + E[\tilde{B}]w + \theta wE(\tilde{\gamma}) + \frac{1}{2}E(\tilde{c}\tilde{\beta})w - \\ & \frac{(\tilde{B}_\alpha^L + \tilde{\gamma}_\alpha^L\theta)E(\tilde{\beta})w}{2\tilde{\beta}_\alpha^U} + \frac{\tilde{\gamma}_\alpha^LE(\tilde{c}\tilde{\beta})\theta}{2\tilde{\beta}_\alpha^U} - \frac{1}{2}E[\tilde{\xi}](\theta)^2 + \\ & \frac{\tilde{B}_\alpha^LE(\tilde{c}\tilde{\beta})}{2\tilde{\beta}_\alpha^U} - \frac{1}{2} \int_0^1 (\tilde{c}_\alpha^U\tilde{\gamma}_\alpha^L + \tilde{c}_\alpha^L\tilde{\gamma}_\alpha^U)\theta d\alpha - \\ & \frac{1}{2} \int_0^1 (\tilde{B}_\alpha^L\tilde{c}_\alpha^U + \tilde{B}_\alpha^U\tilde{c}_\alpha^L)d\alpha. \end{aligned} \tag{25}$$

由式(25)可得 $E[\tilde{\pi}_M(w, \theta)]$ 关于 (w, θ) 的一阶导数,所以其Hesse矩阵为

$$H = \begin{bmatrix} -E[\tilde{\beta}] & E[\tilde{\gamma}] - \frac{E[\tilde{\beta}]\tilde{\gamma}_\alpha^L}{2\tilde{\beta}_\alpha^U} \\ E[\tilde{\gamma}] - \frac{E[\tilde{\beta}]\tilde{\gamma}_\alpha^L}{2\tilde{\beta}_\alpha^U} & -E[\tilde{\xi}] \end{bmatrix},$$

当 $4E[\tilde{\beta}]E[\tilde{\xi}] > (E[\tilde{\gamma}] - E[\tilde{\beta}]\tilde{\gamma}_\alpha^L/2\tilde{\beta}_\alpha^U)^2$ 时,即

$$H = \begin{bmatrix} -E[\tilde{\beta}] & \left(E[\tilde{\gamma}] - \frac{E[\tilde{\beta}]\tilde{\gamma}_\alpha^L}{2\tilde{\beta}_\alpha^U} \right) \\ \left(E[\tilde{\gamma}] - \frac{E[\tilde{\beta}]\tilde{\gamma}_\alpha^L}{2\tilde{\beta}_\alpha^U} \right) & -E[\tilde{\xi}] \end{bmatrix} > 0,$$

Hesse矩阵是负定矩阵,函数存在唯一均衡解。

令 $E[\tilde{\pi}_M(w, \theta)]$ 关于 (w^*, θ^*) 的一阶导数等于零,分别有

$$\begin{aligned} \frac{dE[\tilde{\pi}_M(w, \theta)]}{dw} &= \\ & - E[\tilde{\beta}]w + E[\tilde{B}] + \theta E(\tilde{\gamma}) + \frac{1}{2}E(\tilde{c}\tilde{\beta}) - \\ & \frac{(\tilde{B}_\alpha^L + \tilde{\gamma}_\alpha^L\theta)E(\tilde{\beta})}{2\tilde{\beta}_\alpha^U} = 0, \end{aligned} \tag{26}$$

$$\begin{aligned} \frac{dE[\tilde{\pi}_M(w, p^*(w))]}{d\theta} &= \\ & - E[\tilde{\xi}]\theta + wE[\tilde{\gamma}] - \frac{wE(\tilde{\beta})\tilde{\gamma}_\alpha^L}{2\tilde{\beta}_\alpha^U} + \frac{\tilde{\gamma}_\alpha^LE(\tilde{c}\tilde{\beta})}{2\tilde{\beta}_\alpha^U} - \\ & \frac{1}{2} \int_0^1 (\tilde{c}_\alpha^U\tilde{\gamma}_\alpha^L + \tilde{c}_\alpha^L\tilde{\gamma}_\alpha^U)d\alpha = 0. \end{aligned} \tag{27}$$

联立式(26)和(27)可得最优批发价格和最优绿色度

$$\begin{aligned} \theta^* &= \left(4E[\tilde{B}]E[\tilde{\gamma}](\tilde{\beta}_\alpha^U)^2 + 2E[\tilde{\gamma}]E[\tilde{c}\tilde{\beta}](\tilde{\beta}_\alpha^U)^2 - \right. \\ &\quad 2E[\tilde{\gamma}]E[\tilde{\beta}]B_\alpha^L\tilde{\beta}_\alpha^U + E[\tilde{\beta}]E[\tilde{c}\tilde{\beta}]\tilde{\gamma}_\alpha^L\tilde{\beta}_\alpha^U - \\ &\quad 2E[\tilde{B}]E[\tilde{\beta}]\tilde{\gamma}_\alpha^L\tilde{\beta}_\alpha^U + (E[\tilde{\beta}])^2\tilde{B}_\alpha^L\tilde{\gamma}_\alpha^L - \\ &\quad \left. 2E[\tilde{\beta}](\tilde{\beta}_\alpha^U)^2 \int_0^1 (\tilde{c}_\alpha^U\tilde{\gamma}_\alpha^L + \tilde{c}_\alpha^L\tilde{\gamma}_\alpha^U)d\alpha \right) / \\ &\quad (4E[\tilde{\xi}]E[\tilde{\beta}](\tilde{\beta}_\alpha^U)^2 - 4(E[\tilde{\gamma}])^2(\tilde{\beta}_\alpha^U)^2 + \\ &\quad 4E[\tilde{\beta}]E[\tilde{\gamma}]\tilde{\gamma}_\alpha^L\tilde{\beta}_\alpha^U - (E[\tilde{\beta}]\tilde{\gamma}_\alpha^L)^2), \end{aligned} \tag{28}$$

$$\begin{aligned} w^* &= \left(4E[\tilde{B}]E[\tilde{\xi}](\tilde{\beta}_\alpha^U)^2 + 2E[\tilde{\xi}]E[\tilde{c}\tilde{\beta}](\tilde{\beta}_\alpha^U)^2 + \right. \\ &\quad 2E[\tilde{\gamma}]E[\tilde{c}\tilde{\beta}]\tilde{\gamma}_\alpha^L\tilde{\beta}_\alpha^U - 2E[\tilde{\beta}]E[\tilde{\xi}]\tilde{B}_\alpha^L\tilde{\beta}_\alpha^U - \\ &\quad E[\tilde{\beta}]E[\tilde{c}\tilde{\beta}](\tilde{\gamma}_\alpha^L)^2 + [E[\tilde{\beta}]\tilde{\gamma}_\alpha^L\tilde{\beta}_\alpha^U - \\ &\quad \left. 2E[\tilde{\gamma}](\tilde{\beta}_\alpha^U)^2 \int_0^1 (\tilde{c}_\alpha^U\tilde{\gamma}_\alpha^L + \tilde{c}_\alpha^L\tilde{\gamma}_\alpha^U)d\alpha \right) / \\ &\quad (4E[\tilde{\xi}]E[\tilde{\beta}](\tilde{\beta}_\alpha^U)^2 - 4(E[\tilde{\gamma}])^2(\tilde{\beta}_\alpha^U)^2 + \\ &\quad 4E[\tilde{\beta}]E[\tilde{\gamma}]\tilde{\gamma}_\alpha^L\tilde{\beta}_\alpha^U - (E[\tilde{\beta}]\tilde{\gamma}_\alpha^L)^2). \end{aligned} \tag{29}$$

将式(28)、(29)代入(24)可得最优零售价格

$$\begin{aligned} p^* &= \\ & \left(4E[\tilde{B}]E[\tilde{\gamma}]\tilde{\gamma}_\alpha^L\tilde{\beta}_\alpha^U + 4E[\tilde{\gamma}]E[\tilde{c}\tilde{\beta}]\tilde{\gamma}_\alpha^L\tilde{\beta}_\alpha^U - \right. \\ &\quad 2E[\tilde{B}]E[\tilde{\beta}](\tilde{\gamma}_\alpha^L)^2 + 2E[\tilde{\xi}]E[\tilde{\beta}]\tilde{B}_\alpha^L\tilde{\beta}_\alpha^U - \\ &\quad - 4(E[\tilde{\gamma}])^2\tilde{B}_\alpha^L\tilde{\beta}_\alpha^U + 2E[\tilde{\gamma}]E[\tilde{\beta}]\tilde{B}_\alpha^L\tilde{\gamma}_\alpha^L + \\ &\quad 4E[\tilde{B}]E[\tilde{\xi}](\tilde{\beta}_\alpha^U)^2 + 2E[\tilde{\xi}]E[\tilde{c}\tilde{\beta}](\tilde{\beta}_\alpha^U)^2 - [E[\tilde{\beta}]\tilde{\gamma}_\alpha^L\tilde{\beta}_\alpha^U + \\ &\quad \left. 2E[\tilde{\gamma}](\tilde{\beta}_\alpha^U)^2 \int_0^1 (\tilde{c}_\alpha^U\tilde{\gamma}_\alpha^L + \tilde{c}_\alpha^L\tilde{\gamma}_\alpha^U)d\alpha \right) / \\ &\quad (2[4E[\tilde{\xi}]E[\tilde{\beta}](\tilde{\beta}_\alpha^U)^2 - 4(E[\tilde{\gamma}])^2(\tilde{\beta}_\alpha^U)^2 + \\ &\quad 4E[\tilde{\beta}]E[\tilde{\gamma}]\tilde{\gamma}_\alpha^L\tilde{\beta}_\alpha^U - (E[\tilde{\beta}]\tilde{\gamma}_\alpha^L)^2]). \end{aligned} \tag{30}$$

此时制造商和零售商的最大利润分别为

$$E[\tilde{\pi}_M(w^*, p^*, \theta^*)] = E\left[(w^* - \tilde{c})(\tilde{B} - \tilde{\beta}p^* + \tilde{\gamma}\theta^*) - \frac{1}{2}\tilde{\xi}\theta^{*2}\right], \quad (31)$$

$$\begin{aligned} & [\tilde{\pi}_R(p, w, \theta)]_\alpha^L = \\ & \tilde{\pi}_R(p^*, \theta^*, w^*) = (p^* - w^*)(\tilde{B} - \tilde{\beta}p^* + \tilde{\gamma}\theta^*). \end{aligned} \quad (32)$$

定理4得证. □

3.3 乐观决策模型

该部分研究中性制造商与乐观零售商博弈,依然用期望值表示中性制造商的数据,模型亦遵从Stackelberg博弈,占主导地位的是风险偏好行为中性制造商,由其先决定批发价格 w 和绿色度 θ ,行为喜好风险的乐观零售商作为跟随者决定绿色产品的零售价格 p ,利用模糊机会约束规划思想,建立如下风险偏好中性的制造商与乐观零售商 α 的乐观值决策模型:

$$\left\{ \begin{aligned} & \max_w \tilde{\pi}_M; \\ & \text{s.t. Pos}\{(w - \tilde{c})(\tilde{B} - \tilde{\beta}p^*(w) + \tilde{\gamma}\theta)\} \geq \tilde{\pi}_M, \\ & \quad \text{Pos}\{w - \tilde{c} \leq 0\} = 0. \\ & p^* \text{是如下问题的解:} \\ & \left\{ \begin{aligned} & \max_p \tilde{\pi}_R; \\ & \text{s.t. Pos}\{(p - w)(\tilde{B} - \tilde{\beta}p + \tilde{\gamma}\theta) \geq \tilde{\pi}_R\} \geq \alpha, \\ & \quad \text{Pos}\{\tilde{B} - \tilde{\beta}p + \tilde{\gamma}\theta \leq 0\}, \\ & \quad p \geq w. \end{aligned} \right. \end{aligned} \right. \quad (33)$$

同样,此处模糊机会规划模型能解决参与者期望在约束条件以一定的置信水平成立的前提下,极大化目标函数的乐观收益,其中 α 为制造商和零售商预先确定的置信水平.对于任何给定的可行性策略, $\max \tilde{\pi}_R$ 代表零售商利润的 α 乐观值,用利润的期望值 $E[\tilde{\pi}_M]$ 来表示风险偏好中性的制造商的利润.绿色供应链上的制造商和零售商分别通过抉择 w 、 θ 和 p 来最大化各自的所得利润.

上面的机会规划模型等价于如下模型:

$$\left\{ \begin{aligned} & \max E[\tilde{\pi}_M(w, \theta)] = \\ & E\left[(w - \tilde{c})(\tilde{B} - \tilde{\beta}p^*(w) + \tilde{\gamma}\theta) - \frac{1}{2}\tilde{\xi}\theta^2\right]; \\ & \text{s.t. Pos}\{w - \tilde{c} \leq 0\} = 0. \\ & p^* \text{是如下问题的解:} \\ & \left\{ \begin{aligned} & \max[\tilde{\pi}_R(p)]_\alpha^U = [(p - w)(\tilde{B} - \tilde{\beta}p + \tilde{\gamma}\theta)]_\alpha^U; \\ & \text{s.t. Pos}\{\tilde{B} - \tilde{\beta}p + \tilde{\gamma}\theta \leq 0\} = 0, \\ & \quad p \geq w. \end{aligned} \right. \end{aligned} \right. \quad (34)$$

在模糊环境下,以风险偏好中性制造商为主导,偏好风险的乐观零售商为跟随者的绿色供应链可以得出如下结论.

定理5 令 $[\tilde{\pi}_R(p)]_\alpha^U$ 为偏好风险的乐观零售商的利润,给定绿色产品的批发价格 w 和绿色度 θ ,若 $\text{Pos}\{\tilde{B} - \tilde{\beta}p^* + \tilde{\gamma}\theta^* \leq 0\} = 0$,则零售价格 p 的最优反应函数为 $P^*(w, \theta) = \frac{1}{2}w + \frac{\tilde{B}_\alpha^U + \tilde{\gamma}_\alpha^U\theta}{2\tilde{\beta}_\alpha^L}$.

证明 偏好风险的乐观零售商的利润表达式为

$$[\tilde{\pi}_R(p)]_\alpha^U = [(p - w)(\tilde{B} - \tilde{\beta}p + \tilde{\gamma}\theta)]_\alpha^U. \quad (35)$$

同定理3的证明,得此模型中绿色产品的零售价格 p 的最优反应函数

$$P^*(w, \theta) = \frac{1}{2}w + \frac{\tilde{B}_\alpha^U + \tilde{\gamma}_\alpha^U\theta}{2\tilde{\beta}_\alpha^L}. \quad (36)$$

定理5得证. □

定理6 $E[\tilde{\pi}_M(w, \theta)]$ 为风险偏好中性制造商的期望利润,若 $\text{Pos}\{w^* \leq \tilde{c}\} = 0$ 及 $\text{Pos}\{\tilde{B} - \tilde{\beta}p + \tilde{\gamma}\theta \leq 0\} = 0$,且 $4E[\tilde{\beta}]E[\tilde{\xi}] > (E[\tilde{\gamma}] - \frac{E[\tilde{\beta}]\tilde{\gamma}_\alpha^U}{2\tilde{\beta}_\alpha^L})^2$,则存在唯一策略

$$\begin{aligned} \theta^* = & \left(4E[\tilde{\beta}]E[\tilde{\gamma}](\tilde{\beta}_\alpha^L)^2 + 2E[\tilde{\gamma}]E[\tilde{c}\tilde{\beta}](\tilde{\beta}_\alpha^L)^2 - \right. \\ & 2E[\tilde{\gamma}]E[\tilde{\beta}]\tilde{B}_\alpha^U\tilde{\beta}_\alpha^L + E[\tilde{\beta}]E[\tilde{c}\tilde{\beta}]\tilde{\gamma}_\alpha^U\tilde{\beta}_\alpha^L - \\ & 2E[\tilde{B}]E[\tilde{\beta}]\tilde{\gamma}_\alpha^U\tilde{\beta}_\alpha^L + (E[\tilde{\beta}])^2\tilde{B}_\alpha^U\tilde{\gamma}_\alpha^U - \\ & \left. 2E[\tilde{\beta}](\tilde{\beta}_\alpha^L)^2 \int_0^1 (\tilde{c}_\alpha^U\tilde{\gamma}_\alpha^L + \tilde{c}_\alpha^L\tilde{\gamma}_\alpha^U) d\alpha \right) / \\ & (4E[\tilde{\xi}]E[\tilde{\beta}](\tilde{\beta}_\alpha^L)^2 - 4(E[\tilde{\gamma}])^2(\tilde{\beta}_\alpha^L)^2 + \\ & 4E[\tilde{\beta}]E[\tilde{\gamma}]\tilde{\gamma}_\alpha^U\tilde{\beta}_\alpha^L - (E[\tilde{\beta}]\tilde{\gamma}_\alpha^U)^2), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} w^* = & \left(4E[\tilde{B}]E[\tilde{\xi}](\tilde{\beta}_\alpha^L)^2 + 2E[\tilde{\xi}]E[\tilde{c}\tilde{\beta}](\tilde{\beta}_\alpha^L)^2 + \right. \\ & 2E[\tilde{\gamma}]E[\tilde{c}\tilde{\beta}]\tilde{\gamma}_\alpha^U\tilde{\beta}_\alpha^L - 2E[\tilde{\beta}]E[\tilde{\xi}]\tilde{B}_\alpha^U\tilde{\beta}_\alpha^L - \\ & E[\tilde{\beta}]E[\tilde{c}\tilde{\beta}](\tilde{\gamma}_\alpha^U)^2 + [E[\tilde{\beta}]\tilde{\gamma}_\alpha^U\tilde{\beta}_\alpha^L - \\ & \left. 2E[\tilde{\gamma}](\tilde{\beta}_\alpha^L)^2] \int_0^1 (\tilde{c}_\alpha^U\tilde{\gamma}_\alpha^L + \tilde{c}_\alpha^L\tilde{\gamma}_\alpha^U) d\alpha \right) / \\ & (4E[\tilde{\xi}]E[\tilde{\beta}](\tilde{\beta}_\alpha^L)^2 - 4(E[\tilde{\gamma}])^2(\tilde{\beta}_\alpha^L)^2 + \\ & 4E[\tilde{\beta}]E[\tilde{\gamma}]\tilde{\gamma}_\alpha^U\tilde{\beta}_\alpha^L - (E[\tilde{\beta}]\tilde{\gamma}_\alpha^U)^2), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} p^* = & \left(4E[\tilde{B}]E[\tilde{\gamma}]\tilde{\gamma}_\alpha^U\tilde{\beta}_\alpha^L + 4E[\tilde{\gamma}]E[\tilde{c}\tilde{\beta}]\tilde{\gamma}_\alpha^U\tilde{\beta}_\alpha^L - \right. \\ & 2E[\tilde{B}]E[\tilde{\beta}](\tilde{\gamma}_\alpha^U)^2 + 2E[\tilde{\xi}]E[\tilde{\beta}]\tilde{B}_\alpha^U\tilde{\beta}_\alpha^L - \\ & 4(E[\tilde{\gamma}])^2\tilde{B}_\alpha^U\tilde{\beta}_\alpha^L + 2E[\tilde{\gamma}]E[\tilde{\beta}]\tilde{B}_\alpha^U\tilde{\gamma}_\alpha^U + \\ & 4E[\tilde{B}]E[\tilde{\xi}](\tilde{\beta}_\alpha^L)^2 + 2E[\tilde{\xi}]E[\tilde{c}\tilde{\beta}](\tilde{\beta}_\alpha^L)^2 - \\ & \left. [E[\tilde{\beta}]\tilde{\gamma}_\alpha^U\tilde{\beta}_\alpha^L + 2E[\tilde{\gamma}](\tilde{\beta}_\alpha^L)^2] \int_0^1 (\tilde{c}_\alpha^U\tilde{\gamma}_\alpha^L + \tilde{c}_\alpha^L\tilde{\gamma}_\alpha^U) d\alpha \right) / \\ & (2[4E[\tilde{\xi}]E[\tilde{\beta}](\tilde{\beta}_\alpha^L)^2 - 4(E[\tilde{\gamma}])^2(\tilde{\beta}_\alpha^L)^2 + \\ & 4E[\tilde{\beta}]E[\tilde{\gamma}]\tilde{\gamma}_\alpha^U\tilde{\beta}_\alpha^L - (E[\tilde{\beta}]\tilde{\gamma}_\alpha^U)^2]), \end{aligned}$$

是模型(34)的Stackelberg-Nash均衡解.

证明 由式(8)可得风险偏好中性制造商的利润表达式,将式(36)代入(8)得

$$\begin{aligned}
 E[\tilde{\pi}_M(w, \theta)] = & -\frac{1}{2}E(\tilde{\beta})w^2 + \left[E[\tilde{B}] + \theta E(\tilde{\gamma}) + \frac{1}{2}E(\tilde{c}\tilde{\beta}) - \right. \\
 & \left. \frac{(\tilde{B}_\alpha^U + \tilde{\gamma}_\alpha^U \theta)E(\tilde{\beta})}{2\tilde{\beta}_\alpha^L} \right] w + \frac{\tilde{\gamma}_\alpha^U E(\tilde{c}\tilde{\beta})\theta}{2\tilde{\beta}_\alpha^L} - \frac{1}{2}E[\tilde{\xi}](\theta)^2 + \\
 & \frac{\tilde{B}_\alpha^U E(\tilde{c}\tilde{\beta})}{2\tilde{\beta}_\alpha^L} - \frac{1}{2} \int_0^1 (\tilde{c}_\alpha^U \tilde{\gamma}_\alpha^L + \tilde{c}_\alpha^L \tilde{\gamma}_\alpha^U) \theta d\alpha - \\
 & \frac{1}{2} \int_0^1 (\tilde{B}_\alpha^L \tilde{c}_\alpha^U + \tilde{B}_\alpha^U \tilde{c}_\alpha^L) d\alpha. \quad (37)
 \end{aligned}$$

同定理4的证明,可得绿色供应链乐观决策模型下 $E[\tilde{\pi}_M(w, \theta)]$ 关于 (w, θ) 的一阶导数,令其等于零,分别有

$$\begin{aligned}
 \frac{dE[\tilde{\pi}_M(w, \theta)]}{dw} = & -2wE[\tilde{\beta}]\tilde{\beta}_\alpha^L + [2E[\tilde{B}] + 2\theta E(\tilde{\gamma}) + \\
 & E(\tilde{c}\tilde{\beta})\tilde{\beta}_\alpha^L - (\tilde{B}_\alpha^U + \tilde{\gamma}_\alpha^U \theta)E(\tilde{\beta})] = 0, \quad (38)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{dE[\tilde{\pi}_M(w, \theta)]}{d\theta} = & -2\theta E[\tilde{\xi}]\tilde{\beta}_\alpha^L + w\tilde{\beta}_\alpha^L E[\tilde{\gamma}] + \tilde{\gamma}_\alpha^U E[\tilde{c}\tilde{\beta}] - \\
 & wE[\tilde{\beta}]\tilde{\gamma}_\alpha^U - 2\tilde{\beta}_\alpha^L \int_0^1 (\tilde{c}_\alpha^U \tilde{\gamma}_\alpha^L + \tilde{c}_\alpha^L \tilde{\gamma}_\alpha^U) d\alpha = 0. \quad (39)
 \end{aligned}$$

联立式(38)和(39)得

$$\begin{aligned}
 \theta^* = & \left(4E[\tilde{B}]E[\tilde{\gamma}](\tilde{\beta}_\alpha^L)^2 + 2E[\tilde{\gamma}]E[\tilde{c}\tilde{\beta}](\tilde{\beta}_\alpha^L)^2 - \right. \\
 & 2E[\tilde{\gamma}]E[\tilde{\beta}]\tilde{B}_\alpha^U \tilde{\beta}_\alpha^L + E[\tilde{\beta}]E[\tilde{c}\tilde{\beta}]\tilde{\gamma}_\alpha^U \tilde{\beta}_\alpha^L - \\
 & 2E[\tilde{B}]E[\tilde{\beta}]\tilde{\gamma}_\alpha^U \tilde{\beta}_\alpha^L + (E[\tilde{\beta}])^2 \tilde{B}_\alpha^U \tilde{\gamma}_\alpha^U - \\
 & 2E[\tilde{\beta}](\tilde{\beta}_\alpha^L)^2 \int_0^1 (\tilde{c}_\alpha^U \tilde{\gamma}_\alpha^L + \tilde{c}_\alpha^L \tilde{\gamma}_\alpha^U) d\alpha \Big) / \\
 & (4E[\tilde{\xi}]E[\tilde{\beta}](\tilde{\beta}_\alpha^L)^2 - 4(E[\tilde{\gamma}])^2(\tilde{\beta}_\alpha^L)^2 + \\
 & 4E[\tilde{\beta}]E[\tilde{\gamma}]\tilde{\gamma}_\alpha^U \tilde{\beta}_\alpha^L - (E[\tilde{\beta}]\tilde{\gamma}_\alpha^U)^2), \quad (40)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 w^* = & \left(4E[\tilde{\beta}]E[\tilde{\xi}](\tilde{\beta}_\alpha^L)^2 + 2E[\tilde{\xi}]E[\tilde{c}\tilde{\beta}](\tilde{\beta}_\alpha^L)^2 + \right. \\
 & 2E[\tilde{\gamma}]E[\tilde{c}\tilde{\beta}]\tilde{\gamma}_\alpha^U \tilde{\beta}_\alpha^L - 2E[\tilde{\beta}]E[\tilde{\xi}]\tilde{B}_\alpha^U \tilde{\beta}_\alpha^L - \\
 & E[\tilde{\beta}]E[\tilde{c}\tilde{\beta}](\tilde{\gamma}_\alpha^U)^2 + [E[\tilde{\beta}]\tilde{\gamma}_\alpha^U \tilde{\beta}_\alpha^L - \\
 & 2E[\tilde{\gamma}](\tilde{\beta}_\alpha^L)^2] \int_0^1 (\tilde{c}_\alpha^U \tilde{\gamma}_\alpha^L + \tilde{c}_\alpha^L \tilde{\gamma}_\alpha^U) d\alpha \Big) / \\
 & (4E[\tilde{\xi}]E[\tilde{\beta}](\tilde{\beta}_\alpha^L)^2 - 4(E[\tilde{\gamma}])^2(\tilde{\beta}_\alpha^L)^2 + \\
 & 4E[\tilde{\beta}]E[\tilde{\gamma}]\tilde{\gamma}_\alpha^U \tilde{\beta}_\alpha^L - (E[\tilde{\beta}]\tilde{\gamma}_\alpha^U)^2). \quad (41)
 \end{aligned}$$

将式(40)、(41)代入(36),可得最优零售价格

$$\begin{aligned}
 p^* = & \left(4E[\tilde{B}]E[\tilde{\gamma}]\tilde{\gamma}_\alpha^U \tilde{\beta}_\alpha^L + 4E[\tilde{\gamma}]E[\tilde{c}\tilde{\beta}]\tilde{\gamma}_\alpha^U \tilde{\beta}_\alpha^L - \right. \\
 & 2E[\tilde{B}]E[\tilde{\beta}](\tilde{\gamma}_\alpha^U)^2 + 2E[\tilde{\xi}]E[\tilde{\beta}]\tilde{B}_\alpha^U \tilde{\beta}_\alpha^L - \\
 & 4(E[\tilde{\gamma}])^2 \tilde{B}_\alpha^U \tilde{\beta}_\alpha^L + 2E[\tilde{\gamma}]E[\tilde{\beta}]\tilde{B}_\alpha^U \tilde{\gamma}_\alpha^U +
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & 4E[\tilde{B}]E[\tilde{\xi}](\tilde{\beta}_\alpha^L)^2 + 2E[\tilde{\xi}]E[\tilde{c}\tilde{\beta}](\tilde{\beta}_\alpha^L)^2 - \\
 & [E[\tilde{\beta}]\tilde{\gamma}_\alpha^U \tilde{\beta}_\alpha^L + 2E[\tilde{\gamma}](\tilde{\beta}_\alpha^L)^2] \int_0^1 (\tilde{c}_\alpha^U \tilde{\gamma}_\alpha^L + \\
 & \tilde{c}_\alpha^L \tilde{\gamma}_\alpha^U) d\alpha \Big) / (2[4E[\tilde{\xi}]E[\tilde{\beta}](\tilde{\beta}_\alpha^L)^2 - \\
 & 4(E[\tilde{\gamma}])^2(\tilde{\beta}_\alpha^L)^2 + 4E[\tilde{\beta}]E[\tilde{\gamma}]\tilde{\gamma}_\alpha^U \tilde{\beta}_\alpha^L - (E[\tilde{\beta}]\tilde{\gamma}_\alpha^U)^2]). \quad (42)
 \end{aligned}$$

定理6得证. □

注1 当模型中的模糊变量退化为清晰数时,模型(1)、(18)、(34)退化为如下精确环境的双层供应链模型:

$$\begin{cases} \max_{(w, \theta)} (w - c)(B - \beta p^*(w) + \gamma \theta) - \frac{1}{2} \xi \theta^2; \\ \text{s.t. } w > c. \\ p^* \text{ 是如下问题的解:} \\ \begin{cases} \max_p (p - w)(B - \beta p + \gamma \theta); \\ \text{s.t. } B - \beta p + \gamma \theta > 0, \\ p \geq w. \end{cases} \end{cases} \quad (43)$$

注2 当模型中的模糊变量 B (最大市场容量)、 β (市场需求对价格的变化率)、 ξ (绿色创新系数)、 c (制造成本)及 γ (市场需求对绿色度水平 θ 的变化率)退化为清晰数时,定理2、定理4和定理6的结论退化为:当 $B > c\beta$ 时,有

$$\begin{aligned}
 \theta^* = & \frac{B\gamma - c\beta\gamma}{4\xi\beta - \gamma^2}, \quad w^* = \frac{2B\xi + 2c\beta\xi - c\gamma^2}{4\xi\beta - \gamma^2}, \\
 p^* = & \frac{3B\xi + c\beta\xi - c\gamma^2}{4\xi\beta - \gamma^2},
 \end{aligned}$$

是模型的Stackelberg-Nash均衡解. 这是精确环境下模型(43)的一般结论. 因此本文的结论也是精确环境下的推广.

4 数值分析

本节以绿色供应链管理实践企业为研究对象,验证模型的有效性. 但是,由于实践中模糊变量较多,建立的模糊决策模型具有复杂性,得出的解析解也比较复杂,导致所得公式性质不太明显,不容易得到更精确的解释. 所以,以如下案例为背景进行数值算例仿真,进一步分析在不确定市场需求环境下,绿色供应链中零售商的不同风险偏好行为对供应链绩效及相关决策的影响,在置信水平 α 赋值方面,从 $\alpha = 0.55$ 开始,步长为0.05,其赋值范围尽量较广以此保证仿真结果的精准性.

近年来,国际上众多知名制造企业通过开展绿色供应链管理工作,获得了良好的经济和社会效益. 我国绿色供应链管理典型示范企业之一的北京汽车股份有限公司(简称“北汽股份”)已将绿色供应链管理理念纳入公司《中长期发展规划》等规划文件,制定

或完善了《北汽股份绿色供应链管控办法》等系列配套管理制度.北汽股份通过推行绿色供应链管理,实现公司整车产品在设计开发、生产制造、使用维护及回收利用等环节,均满足相关环保法规和标准;同时,实现了培育优质供应商资源、缩短产品开发周期、提升产品质量水平、降低产品成本、减少产品对环境的影响等目标.以北汽股份的行业实践为例,模糊变量 B (最大市场容量)、 β (表示市场需求对价格的变化率)、 ξ (绿色创新系数)、 c (制造成本)及 γ (市场需求对绿色度水平 θ 的变化率)常常由管理决策者和专家估计得出.在北汽股份绿色供应链中,专家估计产品的市场容量较大(大约为600),市场需求对价格的变化很敏感(大约为20),市场需求对绿色度水平 θ 的变化率较小(大约为5)、绿色创新系数较大(大约为10)以及制造商的制造成本基本适中(10左右).利用模糊理论确定专家的模糊语言和三角模糊数的关系.

根据问题描述得到如下各模糊变量具体假设:

$$\tilde{B} \text{ 约为 } 600, \tilde{B} = (580, 600, 620);$$

$$\tilde{\beta} \text{ 约为 } 20, \tilde{\beta} = (19, 20, 21);$$

$$\tilde{\gamma} \text{ 约为 } 5, \tilde{\gamma} = (4, 5, 6);$$

$$\tilde{c} \text{ 约为 } 10, \tilde{c} = (9, 10, 11);$$

$$\tilde{\xi} \text{ 约为 } 10, \tilde{\xi} = (8, 10, 12).$$

且 \tilde{B} 、 $\tilde{\beta}$ 、 $\tilde{\gamma}$ 、 $\tilde{\xi}$ 和 \tilde{c} 的 α 乐观值和 α 悲观值如下:

$$\tilde{B}_\alpha^L = 580 + 20\alpha, \tilde{B}_\alpha^U = 620 - 20\alpha;$$

$$\tilde{\beta}_\alpha^L = 19 + \alpha, \tilde{\beta}_\alpha^U = 21 - \alpha;$$

$$\tilde{\gamma}_\alpha^L = 4 + \alpha, \tilde{\gamma}_\alpha^U = 6 - \alpha;$$

$$\tilde{c}_\alpha^L = 9 + \alpha, \tilde{c}_\alpha^U = 11 - \alpha;$$

$$\tilde{\xi}_\alpha^L = 8 + 2\alpha, \tilde{\xi}_\alpha^U = 12 - 2\alpha.$$

各参数的期望值为

$$E[\tilde{B}] = \frac{580 + 2 \times 600 + 620}{4} = 600,$$

$$E[\tilde{\beta}] = \frac{19 + 2 \times 20 + 21}{4} = 20,$$

$$E[\tilde{\gamma}] = \frac{4 + 2 \times 5 + 6}{4} = 5,$$

$$E[\tilde{c}] = \frac{9 + 2 \times 10 + 11}{4} = 10.$$

可计算出

$$E[\tilde{c}\tilde{\beta}] = \frac{1}{2} \int_0^1 (\tilde{c}_\alpha^L \tilde{\beta}_\alpha^L + \tilde{c}_\alpha^U \tilde{\beta}_\alpha^U) d\alpha = \frac{601}{3},$$

$$\int_0^1 (\tilde{c}_\alpha^L \tilde{\gamma}_\alpha^U + \tilde{c}_\alpha^U \tilde{\gamma}_\alpha^L) d\alpha = \frac{298}{3},$$

$$\int_0^1 (\tilde{c}_\alpha^L \tilde{B}_\alpha^U + \tilde{c}_\alpha^U \tilde{B}_\alpha^L) d\alpha = \frac{35960}{3}.$$

基于以上分析,模糊绿色供应链模型的最优期望值、 α 悲观值和 α 乐观值及绿色供应链系统利润率见表2.基于表2所示的结果,不同置信水平下具有风险偏好的零售商对最优策略的影响如图1~图4所示,分析结果可得如下结论.

1) 表2中的第3行和第13行显示:当 $\alpha = 1$ 时,模型中零售价格、批发价格和绿色度的 α 悲观值和 α 乐观值最优解相同,并等同于精确需求情形下绿色供应链模型的解.验证了注2的结论,说明模糊需求环境下的结论是精确环境下的推广.图1~4中所示直线的交点也验证了注2中的均衡解.

表2 模糊绿色供应链中不同 α 下各参数的最优值

	α	θ^*	w^*	p^*	Q^*	创新成本	$E[\pi_M]^*$	π_R^*	π_{SC}^*
期望值	—	2.62	20.34	25.50	103.19	34.36	1032.2	532.46	1564.70
	1.00	2.58	20.32	25.48	103.23	33.30	1032.26	532.78	1565.04
	0.95	2.63	20.40	25.46	101.55	34.63	1021.02	514.32	1535.34
	0.90	2.68	20.47	25.44	99.87	36.00	1009.44	496.19	1505.63
	0.85	2.74	20.54	25.41	98.18	37.43	997.53	478.38	1475.91
	0.80	2.79	20.61	25.39	96.49	38.91	985.27	460.89	1446.16
悲观值	0.75	2.84	20.69	25.37	94.79	40.44	972.66	443.73	1416.39
	0.70	2.90	20.76	25.35	93.09	42.02	959.71	426.88	1386.59
	0.65	2.96	20.83	25.32	91.38	43.66	946.39	410.36	1356.75
	0.60	3.01	20.91	25.30	89.67	45.36	932.72	394.15	1326.88
	0.55	3.07	20.98	25.28	87.95	47.12	918.69	378.26	1296.96
	1.00	2.58	20.32	25.48	103.23	33.30	1032.26	532.78	1565.04
	0.95	2.53	20.25	25.51	104.90	32.02	1043.16	551.56	1594.73
	0.90	2.48	20.18	25.53	106.57	30.79	1053.74	570.67	1624.41
	0.85	2.43	20.10	25.56	108.23	29.60	1063.99	590.12	1654.10
	0.80	2.39	20.03	25.58	109.89	28.46	1073.92	609.89	1683.80
乐观值	0.75	2.34	19.96	25.61	111.55	27.36	1083.52	629.99	1713.51
	0.70	2.29	19.89	25.63	113.20	26.30	1092.81	650.43	1743.24
	0.65	2.25	19.81	25.66	114.84	25.29	1101.78	671.21	1772.99
	0.60	2.21	19.74	25.68	116.49	24.31	1110.44	692.33	1802.77
	0.55	2.16	19.67	25.71	118.13	23.37	1118.79	713.79	1832.58

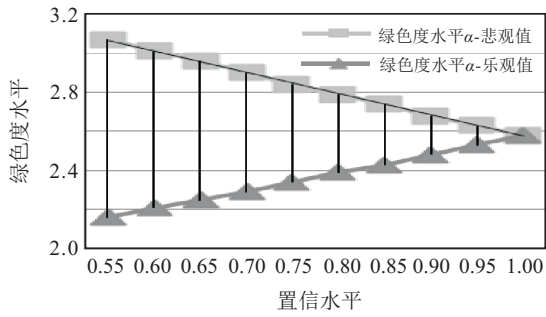


图1 不同置信水平下绿色度水平的变化

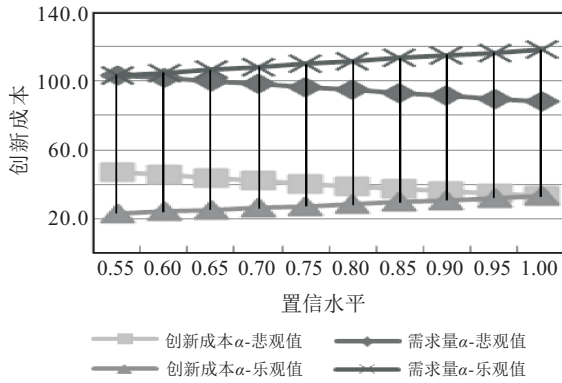


图2 不同置信水平下需求量与创新成本的变化

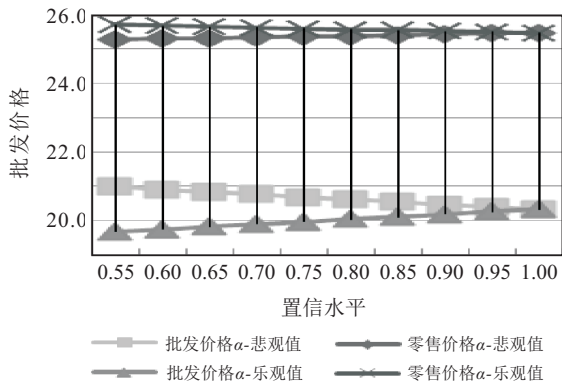


图3 不同置信水平下批发价格、零售价格的变化

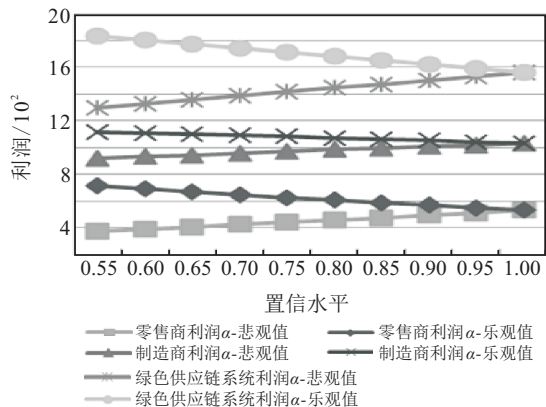


图4 不同置信水平下制造商、零售商及系统利润的变化对比

2) 由图1和图2可知:在悲观决策模型中,随着置信水平的增加,产品的绿色度水平逐步下降,而需求量逐步上升;相反地,在乐观决策模型中,产品的绿色度水平逐步增加,需求量则随着置信水平的增加而下

降;在同等置信水平下,悲观决策模型的绿色度水平高于乐观决策模型,乐观决策模型的需求量高于悲观决策模型,说明零售商不同的风险偏好,对绿色供应链上产品的绿色度和需求量都会产生影响.当零售商厌恶风险时,伴随决策者信心的增加,绿色供应链管理中不再盲目通过提高产品的绿色度规避自己的经营风险,而是使产品绿色度逐渐降低直至趋于合理水平,此时绿色产品需求量由于创新成本降低,批发价格下降等主要因素的影响,即使零售商采取保守的市场策略,绿色供应链需求量依然呈现逐步上升的趋势;当零售商偏好风险时,伴随决策者信心的不断增加,绿色供应链上制造商对创新投入不断加大,产品环保水平逐步提高,社会认可度不断增强,所以绿色度水平不断提高.但由于制造成本的增加,最终导致绿色供应链需求量逐步下降.总之,伴随着决策者信心的增强,无论零售商厌恶风险还是偏好风险,绿色供应链的需求量与批发价格成反比,与零售价格成正比.说明在绿色供应链中,占据主导地位的制造商更能影响市场需求,作为跟随者的零售商影响市场需求的能力有限.由于零售商的个人偏好的影响,其往往做出不符合市场调节机制的一些决策.

3) 由图2和图3可知:制造商最优批发价策略的 α 乐观值与零售商最优定价的 α 悲观值都随着置信水平 α 的增加而增加;相反地,随着置信水平 α 的增加,制造商最优定价策略的 α 悲观值和零售商最优定价的 α 乐观值都下降.说明零售商不同的风险偏好,同时影响绿色供应链上产品的批发价格和零售价格.当零售商厌恶风险时,伴随决策者信心的增加,制造商通过减少绿色创新研发投入,降低产品绿色度,进而降低绿色产品批发价格,让利于合作伙伴,以此来增强悲观零售商信心,增加绿色供应链需求量.但零售商通过提高零售价格规避自身经营风险,虽然零售商提高价格,最终消费者间接受益于批发商降价,所以消费者依然能够接受价格水平,使得绿色供应链购买量增加.正如图2所示:伴随决策者信心的增加,需求量的 α 悲观值不断上升;当零售商偏好风险时,伴随决策者信心的不断增加,作为绿色供应链的领导者,制造商为规避由激进的零售商可能导致的绿色供应链风险,对创新投入不断加大,使产品绿色环保水平逐步提高.由于生产成本增加,制造商通过提高批发价格获得更多收益.在成本上升的压力下,喜好风险的零售商希望通过薄利多销的形式刺激消费者购买,因此零售商不断降低零售价格,但由于绿色产品制造成本上升,即使零售商有一定幅度的降价,

但是零售价格依然较高,消费者接受能力有限,使得绿色供应链需求量的 α 乐观值逐渐下降.正如图2所示,伴随决策者信心的增加,需求量的 α 乐观值不断下降.

4) 由图3和图4分析可得:制造商、零售商及绿色供应链整体最优利润的 α 乐观值都伴随置信水平的提高而下降;相反地,随着置信水平 α 的增加,制造商、零售商及绿色供应链整体最优利润的 α 悲观值都增加.说明零售商不同的风险偏好,对绿色供应链上制造商、零售商及供应链整体的利润都会产生影响.当零售商厌恶风险时,伴随决策者信心的增加,制造商通过减少创新投入,以此降低批发价格,让利于悲观零售商,使消费者也最终受益,绿色供应链需求量有大幅度增加,制造商利润呈上升趋势;规避风险的零售商不断提高零售价格,需求量也有所增加,所以零售商利润也呈上升趋势.对绿色供应链系统利润而言,零售商保守的经营态度使其有所增加.当零售商偏好风险时,伴随决策者信心的增加,制造商通过增加创新投入,并提高批发价格,受生产成本上升的影响,绿色供应链需求量有大幅度减少,由于投入的增加和需求量的减少,制造商利润不断下降;偏好风险的零售商虽为刺激消费者增加需求,降低零售价格,但由于价格和需求量的同时下降,零售商利润也不断下降;对绿色供应链系统的利润而言,零售商激进的经营态度使其有所损失.

5) 就图4整体而言,由于制造商的主导性,其 α 悲观值和 α 乐观值都远大于零售商的利润.这表明,作为模糊绿色供应链中的领导者在获得更高的利润方面具有优势;另外,零售商偏好风险时,无论制造商利润、零售商利润还是绿色供应链整体利润都高于同等情况下的厌恶风险的零售商决策模型,符合业界高风险获得高利润的规律.所以在实践中,对于绿色供应链上的企业给以启示:在绿色供应链中具有主导地位的企业获益更多,并且企业承担适当的风险可以获得较多收益.

5 结论

本文提出模糊需求环境下两级绿色供应链管理的模型,在考虑市场需求中参数、绿色创新系数和制造商成本为模糊变量的条件下,给出了中性制造商和具有风险偏好的零售商在期望值和机会约束规划模型下的最优定价方案.通过分析可得出如下结论.

1) 当 $\alpha = 1$ 时,模糊模型的各最优解等于精确需求情形下绿色供应链模型的解.说明模糊需求环境下绿色供应链最优结论是精确环境下的推广.

2) 零售商不同的风险偏好,影响绿色供应链的绿色度水平和需求量.在悲观决策模型中,随着置信水平的提高,产品的绿色度水平逐步下降,而需求量逐步上升;在乐观决策模型中,产品的绿色度水平逐步增加,需求量则随着置信水平的提高而下降.

3) 零售商不同的风险偏好,影响绿色供应链上产品的批发价格和零售价格.制造商最优批发价策略的 α 乐观值与零售商最优定价的 α 悲观值都随着置信水平 α 的增加而增加;相反地,随着置信水平 α 的增加,制造商最优定价策略的 α 悲观值和零售商最优定价的 α 乐观值都下降.

4) 零售商不同的风险偏好,对绿色供应链上制造商、零售商及供应链整体的利润都会产生影响.制造商、零售商及绿色供应链整体最优利润的 α 乐观值都伴随置信水平的提高而下降;相反地,随着置信水平 α 的增加,制造商、零售商及绿色供应链整体最优利润的 α 悲观值都增加.

5) 由于制造商的主导性,其 α 悲观值和 α 乐观值都远大于零售商的利润.这表明,作为模糊绿色供应链中的领导者在获得更高的利润方面具有优势;另外,零售商偏好风险时,无论制造商利润、零售商利润还是绿色供应链整体利润都高于同等情况下的厌恶风险的零售商决策模型.

本文研究主要集中在一个制造商和一个零售商构成的绿色供应链,模糊需求函数是线性的.因此,其他形式的模糊需求函数和多个具有竞争性的零售商或制造商是未来研究的重要方向.

参考文献(References)

- [1] 李登峰. 模糊多目标多人决策与对策[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003: 15-98.
(Li D F. Fuzzy multiobjective many-person decision making and games[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2003: 15-98.)
- [2] Li D F. Decision and game theory in management with intuitionistic fuzzy sets[M]. Berlin: Springer, 2014: 26-45.
- [3] Li D F. Models and methods of interval-valued cooperative games in economic management[M]. Cham: Springer, 2016: 5-29.
- [4] Swami S, Shah J. Channel coordination in green supply chain management[J]. Journal of the Operational Research Society, 2013, 64(3): 336-351.
- [5] Ghosh D, Shah J. A comparative analysis of greening policies across supply chain structures[J]. International Journal of Production Economics, 2011, 135(2): 568-583.
- [6] Ghosh D, Shah J. Supply chain analysis under green sensitive consumer demand and cost sharing contract[J].

- International Journal of Production Economics, 2015, 164(164): 319-329.
- [7] Li B, Zhu M, Jiang Y, et al. Pricing policies of a competitive dual-channel green supplychain[J]. International Journal Cleaner Production, 2016, 112(20): 2029-2042.
- [8] Zhang C T, Wang H X, Ren M L. Research on pricing and coordination strategy of green supply chain under hybrid production mode[J]. Computers & Industrial Engineering, 2013, 72(11): 24-31.
- [9] 朱庆华, 窦一杰. 基于政府补贴分析的绿色供应链管理博弈模型[J]. 管理科学学报, 2011, 14(6): 86-95. (Zhu Q H, Dou Y J. A game model for green supply chain management based on government subsidies[J]. Journal of Management Sciences in China, 2011, 14(6): 86-95.)
- [10] 江世英, 李随成. 考虑产品绿色度的绿色供应链博弈模型及收益共享契约[J]. 中国管理科学, 2015, 23(6): 169-176. (Jiang S Y, Li S C. Green supply chain game models and revenue sharing contract with product green degree[J]. Chinese Journal of Management Science, 2015, 23(6): 169-176.)
- [11] 梁玲, 孙威风, 杨光, 等. 基于低碳偏好的多对一型供应链减排博弈[J]. 统计与决策, 2019, 35(3): 54-58. (Liang L, Sun W F, Yang G, et al. A game for supply chain emission reduction with many to one based on low carbon preference[J]. Statistics & Decision, 2019, 35(3): 54-58.)
- [12] 温兴琦, 程海芳, 蔡建湖, 等. 绿色供应链中政府补贴策略及效果分析[J]. 管理学报, 2018, 15(4): 625-632. (Wen X Q, Cheng H F, Cai J H, et al. Government subsidy policies and effect analysis in green supply chain[J]. Chinese Journal of Management, 2018, 15(4): 625-632.)
- [13] 曹裕, 李青松, 胡韩莉. 不同政府补贴策略对供应链绿色决策的影响研究[J]. 管理学报, 2019, 16(2): 297-305. (Cao Y, Li Q S, Hu H L. Research on the influence of different government subsidy strategies on the green decision-making of supply chain[J]. Chinese Journal of Management, 2019, 16(2): 297-305.)
- [14] Liu M, Cao E, Salifou C K. Pricing strategies of a dual-channel supply chain with risk aversion[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2016, 90: 108-120.
- [15] 石平, 颜波, 石松. 考虑公平的绿色供应链定价与产品绿色度决策[J]. 系统工程理论与实践, 2016, 36(8): 1937-1950. (Shi P, Yan B, Shi S. Pricing and product green degree decision in green supply chain with fairness concerns[J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2016, 36(8): 1937-1950.)
- [16] 余高锋, 李登峰, 吴坚, 等. 考虑决策者损失规避的异质信息多属性变权决策方法[J]. 中国管理科学, 2018, 26(9): 141-147. (Yu G F, Li D F, Wu J, et al. Heterogeneous multi-attribute variable weight decision making method considering decision maker's loss aversion[J]. Chinese Journal of Management Science, 2018, 26(9): 141-147.)
- [17] Yu G F, Li D F, Fei W. A novel method for heterogeneous multi-attribute group decision making with preference deviation[J]. Computers & Industrial Engineering, 2018, 124: 58-64.
- [18] 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, 2019, 124: 75-91.
- [19] 姜明君, 陈东彦. 公平偏好下绿色供应链收益分享与绿色创新投入[J]. 控制与决策, 2020, 35(6): 1463-1468. (Jiang M J, Chen D Y. Revenue sharing and green innovation investment of green supply chain under fairness preference[J]. Control and Decision, 2020, 35(6): 1463-1468.)
- [20] 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.
- [21] 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, 2019, 126: 227-253.
- [22] 周晨希. 不确定环境下, 两阶段供应链企业间博弈分析[D]. 天津: 天津大学, 管理与经济学院, 2007: 24-44. (Zhou C X. Two-echelon supply chain games in a fuzzy Environment[D]. Tianjin: College of Management and Economic, Tianjin University, 2007: 24-44.)
- [23] Nahmias S. Fuzzy variables[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1978, 1(2): 97-110.
- [24] Liu B. Theory and practice of uncertain programming[M]. Heidelberg: Physica-Verlag, 2002: 30-65.
- [25] Liu B, Liu Y. Expected value of fuzzy variable and fuzzy expected value model[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2006, 10(4): 445-450.
- [26] Liu B, Iwamura K. Chance constrained programming with fuzzy parameters[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1998, 94: 227-237.

作者简介

王淑纳(1985—), 女, 讲师, 博士生, 从事区域经济管理、物流与供应链管理优化的研究, E-mail: shuna_wang@163.com;

胡志华(1977—), 男, 教授, 博士生导师, 从事物流与港航运作优化、大数据管理与决策等研究, E-mail: zhhu@shmtu.edu.cn.

(责任编辑: 孙艺红)