

需求和回收不确定的闭环供应链渠道结构选择

张 盟^{1*}, 郭健全²

(1. 上海理工大学 管理学院, 上海 200093; 2. 上海理工大学 上海-汉堡国际工程学院, 上海 200093)

(* 通信作者电子邮箱 zhangmengusst@126.com)

摘 要:针对闭环供应链中销售渠道结构的最优选择问题,考虑市场需求和回收产品质量水平的不确定性,以总利润最大化为目标,构建了政府差别权重补贴下四种销售渠道结构闭环供应链系统的四个平均总利润模型。首先运用模糊机会约束规划(FCCP)法将模糊约束等价变换为清晰对应式,然后采用粒子群优化(PSO)算法和遗传算法(GA)对模型算例进行对比求解,最后对参数进行了灵敏度分析。结果表明,上述两种算法的差值比率最大为0.018%,表明两种算法均未陷入局部最优解,验证了算法的效度和模型的信度。企业可以根据潜在需求的不同置信水平制定最优回收、生产和销售策略,选择最优的渠道结构并逐渐提高总利润。

关键词:需求和回收不确定;渠道结构选择;模糊机会约束规划法;政府差别权重补贴;粒子群优化算法;遗传算法
中图分类号:TP39 **文献标志码:**A

Channel structure choice of closed-loop supply chain under uncertain demand and recovery

ZHANG Meng^{1*}, GUO Jianquan²

(1. Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. Shanghai-Hamburg College, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Aiming at the optimal choice of sales channel structure in the closed-loop supply chain, considering the uncertainty of market demand and quality level of recycled products, four average gross profit models for the closed-loop supply chain system with four sales channel structures under the government differentially weighted subsidy were constructed with the objective of maximizing the gross profit. Firstly, Fuzzy Chance Constrained Programming (FCCP) method was used to transform the fuzzy constraints into clear corresponding expressions equivalently. Then, Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm and Genetic Algorithm (GA) were used to solve numerical examples of the model comparatively. Finally, sensitivity analysis was performed on the parameters. The results show that the maximum difference ratio of the above two algorithms is 0.018%, indicating that both algorithms do not fall into the local optimal solution, which verifies the validity of the algorithms and the confidence of the models. Enterprises can formulate optimal recycling, production and sales strategies according to different confidence levels of the potential demands, choose the optimal channel structure and increase the gross profit gradually.

Key words: uncertain demand and recovery; channel structure choice; Fuzzy Chance Constrained Programming (FCCP) method; government differentially weighted subsidy; Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm; Genetic Algorithm (GA)

0 引言

随着资源浪费和环境污染日益严重,可持续发展受到广泛关注^[1]。回收再制造作为闭环供应链的重要部分,能够延长废旧品的使用寿命,缓解环境污染,降低生产成本,所以企业越来越重视回收再制造^[2]。然而,闭环供应链系统更加复杂:如在不确定环境下,企业如何选择最优渠道结构并制定最优生产决策等,使闭环供应链面临诸多挑战^[3]。

再制造闭环供应链面临更多不确定因素,市场需求、回收率、回收质量和再制造成本等主要不确定因素增加了企业在回收、生产和销售等决策上的难度^[4]。市场需求的变化极大地影响企业的生产决策,不确定回收质量同时影响着回收率

和再制造成本,因此需求和回收质量是重要的不确定因素^[4]。Kim等^[5]考虑需求不确定建立了非线性规划模型;Ma等^[6]研究了需求不确定对价格的影响;Xiong等^[7]基于回收质量不确定研究了动态定价对总利润的影响;Heydari等^[8]在回收质量不确定下建立收益共享机制来分担不确定风险。上述文献单独讨论了整体需求和回收质量不确定性,然而现实市场需求往往划分为新产品和再制品^[9],且经常同时出现需求和回收质量不确定,基于此,本文同时探讨不确定需求(新产品和再制品需求)和回收产品质量对最优决策的影响。

针对求解不确定问题的方法,Farrokhi等^[10]采用随机规划法处理需求和成本不确定问题;Kim等^[5]运用鲁棒优化解决需

收稿日期:2020-10-19;**修回日期:**2021-01-14;**录用日期:**2021-01-15。 **基金项目:**国家自然科学基金资助项目(71471110, 71631007);上海市科技创新行动计划项目(16DZ1201402);上海市科委院校能力建设项目(16040501500)。

作者简介:张盟(1994—),女,河北石家庄人,硕士研究生,主要研究方向:供应链管理、物流工程;郭健全(1972—),男,河南鲁山人,副教授,博士,主要研究方向:国际贸易、国际商务、国际物流、供应链管理。

求不确定问题;Tsao 等^[11]运用模糊机会约束规划法解决需求不确定问题。随机规划需要足够多的统计数据支持^[10];鲁棒优化过于注重置信水平,导致结果较为保守^[5];模糊机会约束规划法既可以解决缺少精确数值的问题,又能够避免结果过于保守^[11]。因此,本文采用模糊机会约束规划法解决新产品和再制造品需求不确定问题。

政府补贴对回收再制造活动具有激励作用。Wang 等^[12]研究了补贴制造商对经济效益和回收数量的影响;Sun 等^[13]基于补贴制造商建立了进化博弈论模型;Li 等^[14]探讨了政府消费补贴对社会福利和环境效应的影响;Bian 等^[15]对比研究了补贴消费者和制造商对碳减排的影响。上述文献单独讨论了补贴制造商或消费者,未考虑回收质量对补贴额的影响,本文将回收质量考虑到政府补贴中,研究政府对制造商和消费者的差别权重补贴对最优决策的影响。

针对销售渠道选择问题, Li 等^[16]采用直销渠道并研究了设计投资对均衡决策的影响;Xie 等^[17]基于双渠道销售研究了分级回收对缓解低质量回收的影响;Alamdard 等^[18]在零售商分销模式下考虑销售努力建立了六种博弈论模型;Xie 等^[19]研究了双渠道环境下闭环供应链的契约协调。上述文献只涉及单一销售渠道结构,直销和分销在不同情况下各有优劣,直销节省了产品库存成本,但是随着直销平台费用的增加,相较于分销显示出劣势,分销节省了直销平台费用,但是随着产品库存成本的增加,相较于直销显示出劣势^[20]。因此,本文建立了四

种销售渠道结构系统总利润模型,研究了不同情况下销售渠道结构的最优选择问题。

综上所述,本文以闭环供应链系统总利润最大化为目标,在市场需求和回收品质量水平不确定环境下考虑政府差别权重补贴和直销平台费用,构建了四种销售渠道结构闭环供应链系统总利润模型。运用模糊机会约束规划法解决新产品和再制造品需求不确定问题,并采用粒子群优化(Particle Swarm Optimization, PSO)算法和遗传算法(Genetic Algorithm, GA)对比求解模型算例。本研究可为企业在不确定环境下制定最优回收、生产和销售策略提供参考,同时为企业在不确定环境下选择最优销售渠道结构提供借鉴。

1 模型构建

1.1 模型假设

- 1)在一个周期中原材料只采购一次^[21];
- 2)不考虑提前期、缺货或过剩^[22];
- 3)单位再制造品利润大于单位新产品利润^[22];
- 4)回收品质量水平服从指数分布^[3];
- 5)政府实行差别权重补贴政策,消费者补贴权重为 w , 制造商补贴权重为 $1 - w, 0 < w < 1$ ^[23]。

1.2 符号说明

本文参数和决策变量的符号说明如表 1 和表 2 所示。

表 1 参数符号说明

Tab. 1 Symbol description of parameters

参数	定义	参数	定义
α_n	新产品潜在需求	t	补贴系数调整因子
α_r	再制造品潜在需求	w	消费者补贴权重
τ_1	价格敏感系数	λ	指数分布参数
τ_2	交叉价格系数	f	直销平台费率
μ	补贴敏感系数	$1/\beta$	制造速率
d	回收率	$1/\gamma$	再制造速率
α	边际回收率	C_n	单位新产品制造成本
b, φ	回收率函数参数	C_o	订购成本
a, θ	回收成本函数参数	S_1	再制造准备成本
C_{raw}	单位原材料采购成本	S_2	制造准备成本
d_n	新产品潜在需求三角模糊数	T_1	每批次再制造时间
d_r	再制造品潜在需求三角模糊数	T_2	每批次制造时间
α^{d_n}	新产品潜在需求置信水平	h_{nr}	单位时间单位可用库存(新产品和再制造品)成本
α^{d_r}	再制造品潜在需求置信水平	h_{rc}	单位时间单位回收品库存成本
c, δ	再制造成本参数	h_{raw}	单位时间单位原材料库存成本
q_s	标准回收质量水平		

表 2 决策变量符号说明

Tab. 2 Symbol description of decision variables

决策变量	定义	决策变量	定义	决策变量	定义
P_n	新产品销售价格	m	再制造批次	q	回收品质量水平
P_r	再制造品销售价格	l	制造批次	T	制造再制造周期

1.3 函数构建

整体市场需求 D 包含新产品市场需求 D_n 和再制造品市场需求 D_r ^[23], 函数为:

$$\begin{cases} D_n = \alpha_n - \tau_1 p_n + \tau_2 p_r - \mu \sqrt{wk} \\ D_r = \alpha_r - \tau_1 p_r + \tau_2 p_n + \mu \sqrt{wk} \\ D = D_n + D_r = \alpha_n + \alpha_r + (\tau_2 - \tau_1)(p_n + p_r) \end{cases} \quad (1)$$

定义回收率 $d = \alpha D$, 边际回收率 $\alpha = be^{-\varphi q}$ ^[1] ($0 \leq q \leq 1, 0 \leq b \leq 1$)。 q 为回收品质量水平, 且服从指数分布 $q \sim E(\lambda)$, λ 为指数分布参数, q 的概率密度函数为:

$$X(x) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda x}, & q < x < 1 \\ 0, & x \leq q, x \geq 1 \end{cases} \quad (2)$$

1.3.1 回收成本函数

定义回收成本比率 $p = ae^{-\theta(1-x)}$ ^[2], a 和 θ 为回收成本参

数, $0 \leq a \leq 1$, p 是单位回收成本与单位生产成本的比值。平均回收成本 $V_1 = d(C_n + C_{\text{raw}})E(p)$, 计算可得:

$$V_1 = d(C_n + C_{\text{raw}})E(p) = be^{-\varphi q} D(C_n + C_{\text{raw}}) \int_{-\infty}^{+\infty} \lambda e^{-\lambda x} a e^{-\theta(1-x)} dx = be^{-\varphi q} D(C_n + C_{\text{raw}}) \frac{a\lambda}{\theta - \lambda} [e^{-\lambda} - e^{-\theta + (\theta - \lambda)q}] \quad (3)$$

1.3.2 再制造成本函数

定义再制造成本比率 $j = ce^{\delta(1-x)}$ [3], c 和 δ 为再制造成本参数, $0 \leq c \leq 1$, j 是单位再制造成本与单位制造成本的比值, 平均再制造成本 $V_2 = dC_n E(j)$, 计算可得:

$$V_2 = dC_n E(j) = be^{-\varphi q} DC_n \int_{-\infty}^{+\infty} \lambda e^{-\lambda x} ce^{\delta(1-x)} dx = be^{-\varphi q} DC_n \frac{c\lambda}{\delta + \lambda} [e^{\delta - (\delta + \lambda)q} - e^{-\lambda}] \quad (4)$$

1.3.3 政府补贴函数

政府对制造商和消费者采取差别权重补贴政策。根据 Guo 等 [24] 的研究, 针对不同回收质量水平, 单位再制造品补贴为 $k = p_r t(q - q_s)/q$ ($0 \leq t \leq 1$), 则制造商总补贴额为:

$$S_{\text{mf}} = (1 - w)kd = (1 - w)be^{-\varphi q} Dp_r t \frac{q - q_s}{q} \quad (5)$$

消费者购买再制造品的总补贴额为:

$$S_{\text{cr}} = wkd = wbe^{-\varphi q} Dp_r t \frac{q - q_s}{q} \quad (6)$$

1.4 系统模型

制造商采购原材料用于新产品生产并回收废旧品用于再制造活动, 新产品和再制品通过直销或分销渠道进行销售, 消费者从直销/分销渠道购买新产品或再制品, 并将废旧品回收给制造商, 政府对制造商和购买再制造品的消费者进行补贴, 如图 1 所示, 整个过程形成物料循环流动。

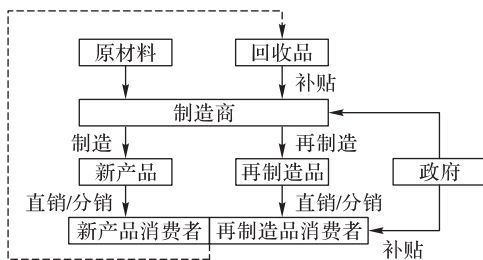


图1 闭环供应链系统模型

Fig. 1 Closed-loop supply chain system model

四种渠道结构如表 3 所示: 第 1 种渠道结构采用直销渠道销售两种产品; 第 2 种渠道结构采用直销渠道销售新产品并采用分销渠道销售再制品; 第 3 种渠道结构采用分销渠道销售新产品并采用直销渠道销售再制品; 第 4 种渠道结构采用分销渠道销售两种产品。

1.4.1 库存水平

一个周期 T 包含 l 个制造期 T_2 和 m 个再制造期 T_1 , 可得 $mDT_1 = dT$, $lDT_2 = DT - dT$ 。库存状况如图 2 所示, 再制品和新产品库存上升速度为 $(1/\gamma - 1)D$ 和 $(1/\beta - 1)D$, 回收品和原材料库存下降速度为 $(\alpha - 1/\gamma)D$ 和 $(1/\beta)D$ 。

表 3 四种不同渠道结构

Tab. 3 Four different channel structures

种类	渠道结构 CS	销售渠道	
		新产品	再制品
1	$N_s R_s$	直销渠道 S	直销渠道 S
2	$N_s R_L$	直销渠道 S	分销渠道 L
3	$N_L R_s$	分销渠道 L	直销渠道 S
4	$N_L R_L$	分销渠道 L	分销渠道 L

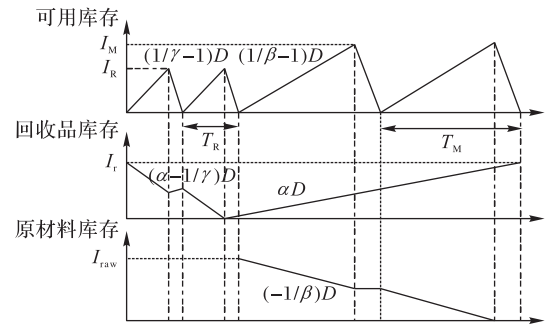


图2 库存状况 (以 $m = 2, n = 2$ 为例)

Fig. 2 Inventory status (with $m = 2, n = 2$ for example)

经过推导可得最大再制品库存 I_r 、最大新产品库存 I_n 、最大回收品库存 I_{rc} 和最大原材料库存 I_{raw} 为:

$$I_r = (1 - \gamma)\alpha DT/m \quad (7)$$

$$I_n = (1 - \beta)(1 - \alpha)DT/l \quad (8)$$

$$I_{rc} = \alpha[(1 - \alpha) + \alpha(1 - \gamma)/m]DT \quad (9)$$

$$I_{\text{raw}} = lDT_n = (1 - \alpha)DT \quad (10)$$

1.4.2 平均库存持有成本

再制品和新产品平均库存持有成本为 H_r 和 H_n 、回收品和原材料平均库存持有成本为 H_{rc} 和 H_{raw} , 计算可得:

$$H_r = \frac{1}{2} h_{\text{mr}} I_r \frac{mT_1}{T} = \frac{1}{2m} h_{\text{mr}} (1 - \gamma)\alpha^2 DT \quad (11)$$

$$H_n = \frac{1}{2} h_{\text{nr}} I_n \frac{lT_2}{T} = \frac{1}{2l} h_{\text{nr}} (1 - \beta)(1 - \alpha)^2 DT \quad (12)$$

$$H_{rc} = \frac{1}{2} h_{\text{rc}} I_{rc} \frac{T}{T} = \frac{1}{2} h_{\text{rc}} \alpha [(1 - \alpha) + \alpha(1 - \gamma)/m] DT \quad (13)$$

$$H_{\text{raw}} = \frac{1}{2} h_{\text{raw}} (1 - \alpha)^2 DT \frac{\beta + l - 1}{l} \quad (14)$$

1.4.3 平均总利润

制造成本指新产品生产成本; 订购成本指补充库存成本; 原材料持有成本指维护原材料的成本; 生产准备成本包括制造和再制造准备成本。平均制造成本 V_3 、平均订购成本 V_4 、平均原材料持有成本 V_5 、平均生产准备成本 V_6 计算可得:

$$V_3 = (1 - \alpha)DC_n \quad (15)$$

$$V_4 = C_o/T \quad (16)$$

$$V_5 = (1 - \alpha)DC_{\text{raw}} \quad (17)$$

$$V_6 = (mS_1 + lS_2)/T \quad (18)$$

直销和分销各有优劣, 通过构建四种渠道结构系统平均总利润模型, 研究不同情况下销售渠道结构的最优选择问题。

模型一 新产品和再制造品均采用直销渠道 $N_S R_S$:

$$\begin{aligned}
 TR_{SS} = & (1-f)p_n D_n + (1-f)p_r D_r - V_1 - V_2 - V_3 - \\
 & V_4 - V_5 - V_6 - H_{rc} - H_{raw} + S_{mf} = \\
 & (1-f)p_n (\alpha_n - \tau_1 p_n + \tau_2 p_r - \mu \sqrt{wk}) + \\
 & (1-f)p_r (\alpha_r - \tau_1 p_r + \tau_2 p_n + \mu \sqrt{wk}) - \\
 & be^{-\varphi q} \frac{a\lambda}{(\theta - \lambda)} [\alpha_n + \alpha_r + (\tau_2 - \tau_1)(p_n + p_r)] \\
 & [e^{-\lambda} - e^{-\theta + (\theta - \lambda)q}] (C_n + C_{raw}) - \\
 & be^{-\varphi q} [e^{\delta - (\delta + \lambda)q} - e^{-\lambda}] \frac{c\lambda}{(\delta + \lambda)} \\
 & C_n [\alpha_n + \alpha_r + (\tau_2 - \tau_1)(p_n + p_r)] - \frac{(mS_1 + lS_2)}{T} - \\
 & \left[(1-\alpha)(C_n + C_{raw}) + \frac{1}{2} h_{raw} (1-\alpha)^2 T \frac{(\beta + l - 1)}{l} \right] \\
 & [\alpha_n + \alpha_r + (\tau_2 - \tau_1)(p_n + p_r)] - \frac{C_o}{T} - \\
 & \frac{1}{2m} h_{rc} \alpha T [m(1-\alpha) + \alpha(1-\gamma)] \\
 & [\alpha_n + \alpha_r + (\tau_2 - \tau_1)(p_n + p_r)] + (1-w)p_r t be^{-\varphi q} \\
 & [\alpha_n + \alpha_r + (\tau_2 - \tau_1)(p_n + p_r)] \frac{(q - q_s)}{q} \quad (19)
 \end{aligned}$$

模型二 新产品采用直销,再制造品采用分销 $N_S R_L$:

$$\begin{aligned}
 TR_{SL} = & (1-f)p_n D_n + p_r D_r - V_1 - V_2 - V_3 - V_4 - \\
 & V_5 - V_6 - H_r - H_{rc} - H_{raw} + S_{mf} = \\
 & (1-f)p_n (\alpha_n - \tau_1 p_n + \tau_2 p_r - \mu \sqrt{wk}) + \\
 & p_r (\alpha_r - \tau_1 p_r + \tau_2 p_n + \mu \sqrt{wk}) - be^{-\varphi q} (C_n + C_{raw}) \\
 & [\alpha_n + \alpha_r + (\tau_2 - \tau_1)(p_n + p_r)] [e^{-\lambda} - e^{-\theta + (\theta - \lambda)q}] \\
 & \frac{a\lambda}{(\theta - \lambda)} - be^{-\varphi q} C_n \frac{c\lambda}{(\delta + \lambda)} [e^{\delta - (\delta + \lambda)q} - e^{-\lambda}] \\
 & [\alpha_n + \alpha_r + (\tau_2 - \tau_1)(p_n + p_r)] - \frac{(mS_1 + lS_2)}{T} - \\
 & \frac{C_o}{T} - \left[(1-\alpha)(C_n + C_{raw}) + \frac{1}{2m} h_{nr} (1-\gamma) T \alpha^2 \right] \\
 & [\alpha_n + \alpha_r + (\tau_2 - \tau_1)(p_n + p_r)] - \\
 & \frac{1}{2m} h_{rc} \alpha T [m(1-\alpha) + \alpha(1-\gamma)] \\
 & [\alpha_n + \alpha_r + (\tau_2 - \tau_1)(p_n + p_r)] - \\
 & \frac{1}{2} h_{raw} [\alpha_n + \alpha_r + (\tau_2 - \tau_1)(p_n + p_r)] \frac{(\beta + l - 1)}{l} \\
 & (1-\alpha)^2 T + (1-w)p_r t be^{-\varphi q} \frac{(q - q_s)}{q} \\
 & [\alpha_n + \alpha_r + (\tau_2 - \tau_1)(p_n + p_r)] \quad (20)
 \end{aligned}$$

模型三 新产品采用分销,再制造品采用直销 $N_L R_S$:

$$\begin{aligned}
 TR_{LS} = & p_n D_n + (1-f)p_r D_r - V_1 - V_2 - V_3 - V_4 - \\
 & V_5 - V_6 - H_n - H_{rc} - H_{raw} + S_{mf} = \\
 & p_n (\alpha_n - \tau_1 p_n + \tau_2 p_r - \mu \sqrt{wk}) + \\
 & (1-f)p_r (\alpha_r - \tau_1 p_r + \tau_2 p_n + \mu \sqrt{wk}) - be^{-\varphi q} \frac{a\lambda}{(\theta - \lambda)}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & [\alpha_n + \alpha_r + (\tau_2 - \tau_1)(p_n + p_r)] [e^{-\lambda} - e^{-\theta + (\theta - \lambda)q}] \\
 & (C_n + C_{raw}) - be^{-\varphi q} [\alpha_n + \alpha_r + (\tau_2 - \tau_1)(p_n + p_r)] \\
 & C_n \frac{c\lambda}{(\delta + \lambda)} [e^{\delta - (\delta + \lambda)q} - e^{-\lambda}] - (1-\alpha)(C_n + C_{raw}) \\
 & [\alpha_n + \alpha_r + (\tau_2 - \tau_1)(p_n + p_r)] - (1-\beta)(1-\alpha)^2 T \\
 & [\alpha_n + \alpha_r + (\tau_2 - \tau_1)(p_n + p_r)] \frac{1}{2l} h_{nr} - \\
 & \frac{1}{2m} h_{rc} \alpha T [m(1-\alpha) + \alpha(1-\gamma)] \\
 & [\alpha_n + \alpha_r + (\tau_2 - \tau_1)(p_n + p_r)] - \\
 & (\beta + l - 1)(1-\alpha)^2 T [\alpha_n + \alpha_r + (\tau_2 - \tau_1)(p_n + p_r)] \\
 & \frac{1}{2l} h_{raw} - \frac{C_o}{T} - \frac{(mS_1 + lS_2)}{T} + (1-w)p_r t be^{-\varphi q} \\
 & [\alpha_n + \alpha_r + (\tau_2 - \tau_1)(p_n + p_r)] \frac{(q - q_s)}{q} \quad (21)
 \end{aligned}$$

模型四 新产品和再制造品均采用分销渠道 $N_L R_L$:

$$\begin{aligned}
 TR_{LL} = & p_n D_n + p_r D_r - V_1 - V_2 - V_3 - V_4 - \\
 & V_5 - V_6 - H_n - H_r - H_{rc} - H_{raw} + S_{mf} = \\
 & p_n (\alpha_n - \tau_1 p_n + \tau_2 p_r - \mu \sqrt{wk}) + \\
 & p_r (\alpha_r - \tau_1 p_r + \tau_2 p_n + \mu \sqrt{wk}) - be^{-\varphi q} (C_n + C_{raw}) \\
 & [\alpha_n + \alpha_r + (\tau_2 - \tau_1)(p_n + p_r)] [e^{-\lambda} - e^{-\theta + (\theta - \lambda)q}] \\
 & \frac{a\lambda}{(\theta - \lambda)} - be^{-\varphi q} [\alpha_n + \alpha_r + (\tau_2 - \tau_1)(p_n + p_r)] \\
 & C_n \frac{c\lambda}{(\delta + \lambda)} [e^{\delta - (\delta + \lambda)q} - e^{-\lambda}] - \frac{(mS_1 + lS_2)}{T} - \\
 & \left[(1-\alpha)(C_n + C_{raw}) + \frac{1}{2l} h_{nr} (1-\beta)(1-\alpha)^2 T \right] \\
 & [\alpha_n + \alpha_r + (\tau_2 - \tau_1)(p_n + p_r)] - \frac{C_o}{T} - \\
 & \left[\frac{1}{2m} h_{nr} (1-\gamma) \alpha^2 T - (1-w)p_r t be^{-\varphi q} \frac{(q - q_s)}{q} \right] \\
 & [\alpha_n + \alpha_r + (\tau_2 - \tau_1)(p_n + p_r)] - \\
 & \frac{1}{2} h_{raw} (1-\alpha)^2 T \frac{(\beta + l - 1)}{l} \\
 & [\alpha_n + \alpha_r + (\tau_2 - \tau_1)(p_n + p_r)] - \\
 & \frac{1}{2m} h_{rc} \alpha T [m(1-\alpha) + \alpha(1-\gamma)] \\
 & [\alpha_n + \alpha_r + (\tau_2 - \tau_1)(p_n + p_r)] \quad (22)
 \end{aligned}$$

1.4.4 模糊机会约束清晰化

模糊机会约束规划(Fuzzy Chance Constrained Programming, FCCP)法的主要思想是将模糊约束转化为与之等价的确定式^[11]。定义新产品和再制造品潜在需求模糊数为

$d_n = (d_{n1}, d_{n2}, d_{n3})$ 和 $d_r = (d_{r1}, d_{r2}, d_{r3})$, 模糊隶属函数为:

$$U_{\hat{d}_n}(t) = \begin{cases} \frac{t - d_{n1}}{d_{n2} - d_{n1}}, & t \in [d_{n1}, d_{n2}] \\ \frac{d_{n3} - t}{d_{n3} - d_{n2}}, & t \in [d_{n2}, d_{n3}] \end{cases} \quad (23)$$

$$U_{\hat{d}_r}(t) = \begin{cases} \frac{t - d_{r1}}{d_{r2} - d_{r1}}, & t \in [d_{r1}, d_{r2}] \\ \frac{d_{r3} - t}{d_{r3} - d_{r2}}, & t \in [d_{r2}, d_{r3}] \end{cases} \quad (24)$$

由模糊机会约束规划法的清晰化定义及其引理可得:

$$\begin{cases} X_n \geq (1 - \alpha^d) d_{n1} + \alpha^d d_{n2}, \text{Pos}\{X_n = d_n \geq \alpha^d\} \\ X_n \leq (1 - \alpha^d) d_{n3} + \alpha^d d_{n2} \end{cases} \quad (25)$$

$$\begin{cases} X_r \geq (1 - \alpha^d) d_{r1} + \alpha^d d_{r2}, \text{Pos}\{X_r = d_r \geq \alpha^d\} \\ X_r \leq (1 - \alpha^d) d_{r3} + \alpha^d d_{r2} \end{cases} \quad (26)$$

其中: $\text{Pos}\{\cdot\}$ 表示 $\{\cdot\}$ 中事件成立的可能性。

2 算法设计

传统优化方法求解具有连续/整数混合变量和不确定约束的非线性离散优化问题需要大量计算时间,元启发式算法被认为是有效解决方式^[24],例如GA、PSO算法、蚁群优化(Ant Clony Optimization, ACO)算法、禁忌搜索(Tabu Search, TS)等。

已知研究大多采用GA和/或PSO算法获得函数优化、选址与路径规划等问题的近似最优解,其中王心月等^[3]验证了GA与PSO算法求解非线性离散优化问题时可以获得高质量解,Guo等^[24]采用PSO算法与GA对比求解函数优化问题,Soleimani等^[25]通过GA与PSO算法验证了相关模型的信度。

PSO算法和GA均是用于搜索近似最优解的元启发式智能优化算法^[26],二者各有优劣:PSO算法实现快,但易陷入局部最优;GA能够同时处理多个种群个体,降低陷入局部最优的风险,但效率相对较低^[27]。

本文主要研究闭环供应链管理问题,对比使用PSO算法和GA是为了求得高质量的近似最优解,进一步验证模型信度与算法效率。两者迭代过程具有互补优势,且相关研究采用两种算法对比验证了此类模型的信度,计算结果较好,其他如ACO算法和人工蜂群(Artificial Bee Colony, ABC)算法等可能也可以解决该问题,在以后的研究中可以考虑。

2.1 粒子群优化算法

PSO算法源于鸟群觅食行为的智能优化算法,在初始阶段生成一批随机解,通过不断迭代寻找最优解^[26]。因其操作简单和易实现等特点,而被广泛应用于物流网络构建、路径规划等问题^[28]。具体操作步骤如下:

1) 随机初始化粒子位置、速度和各项参数:本文粒子群规模为30,最大迭代次数为200,搜索空间维数为6。

2) 根据适应度函数获得粒子的适应度值:本文适应度函数为式(19)~(22)。

3) 评估适应度值:根据历史和当前适应度值,找出粒子当前最优位置 $pbest$ 和整个粒子群最优位置 $gbest$ 。

4) 更新粒子速度和位置信息: v_{id}^k 和 x_{id}^k 为第 k 次迭代粒子 i 速度和位置矢量的第 d 维分量;粒子 i 的速度和位置矢量分别为 $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, v_{i3}, \dots, v_{in})$, $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, \dots, x_{in})$ 。

粒子 i 的第 d 维速度和位置更新公式为:

$$v_{id}^{k+1} = \omega v_{id}^k + c_1 r_1 (pbest_{id}^k - x_{id}^k) + c_2 r_2 (gbest_{id}^k - x_{id}^k) \quad (27)$$

$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^{k+1} \quad (28)$$

其中: c_1 和 c_2 为加速常数; r_1 和 r_2 为随机数,取值范围为 $[0, 1]$;

ω 是惯性权重。本文 ω 取 0.729 8, $c_1 = c_2 = 2$ 。

5) 若达到终止条件(最大迭代次数),输出最优解,否则返回步骤2)。

本文PSO算法迭代收敛过程如图3所示。

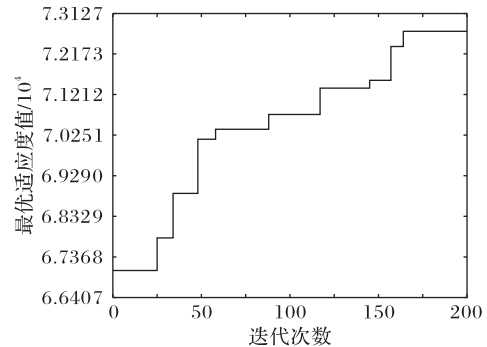


图3 PSO的迭代收敛曲线

Fig. 3 Iterative convergence curve of PSO

2.2 遗传算法

GA是基于遗传机制和自然选择的智能优化算法,通过复制、交叉和变异使群体不断进化,直到获得最优解^[27]。因其具有并行性、全局寻优能力、自动调整搜索方向等特点,被广泛应用于物流网络构建、车辆路径规划、函数优化等问题^[29]。具体操作步骤如下:

1) 染色体编码与初始化。一条染色体对应问题的一个解,一个基因对应解的组成元素。本文染色体基因数为6,最大迭代次数为200,群体规模为40,交叉和变异概率为0.7和0.03。本文采用二进制编码,随机产生0/1初始种群,如表4所示。

表4 GA的初始种群

Tab. 4 Initial population of GA

群体	二进制编码					
	q	m	l	T	P_n	P_r
1	10...1	00	10	10...0	11...1	01...1
2	01...0	01	11	01...1	10...0	01...1
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
39	11...1	11	10	10...1	10...1	10...0
40	01...1	01	01	11...1	01...1	11...0

2) 计算适应度值。根据适应度函数 $f(x) = object/1000$ 计算适应度值, $object$ 分别为式(19)~(22)。

3) 个体选择。采用赌轮盘法进行个体选择,目标函数值越大,染色体越容易被选上,被选择的概率为:

$$p_i = f_i / \sum f_i = f_i / f_{sum} \quad (29)$$

4) 交叉和变异。交叉变异过程如表5所示,依据交叉和变异概率,随机产生交叉和变异位置。

5) 若达到终止条件(最大迭代次数),输出最优解,否则返回步骤2)。

表5 GA的交叉、变异操作过程

Tab. 5 Cross and mutation process of GA

群体	交叉操作				变异操作		
Parent 1	<u>1</u>	0	1	...	1	0	1
Parent 2	<u>0</u>	1	0	...	0	<u>0</u>	<u>1</u>
Child 1	<u>0</u>	0	1	...	1	0	1
Child 2	<u>1</u>	1	0	...	0	<u>1</u>	<u>0</u>

3 算例分析

根据制造行业实际情况和相关文献^[1-2,24]研究,设置参数值: $h_{nr}=2, h_{re}=0.2, h_{raw}=0.2, C_n=30, C_{raw}=20, C_o=1000, S_1=1500, S_2=1500, a=0.9, b=0.9, c=0.1, \gamma=0.6, \beta=0.5, \varphi=2, \lambda=1, \tau_1=3, \tau_2=2, q_s=0.2, \mu=80, t=0.9, w=0.4, f=0.3$ 。本文采用数据集进行模拟运算,潜在需求三角模糊数如表 6 所示。

3.1 不确定环境下的最优决策

本文以 10% 极差对 α^{d_n} 和 α^{d_r} 分别赋值 65%、75%、85%,运用 Matlab 软件编写 GA 和 PSO 算法代码,两种算法差值比率为 $gap = |TR_{PSO} - TR_{GA}| / TR_{GA}$ 。计算结果如表 7 和表 8 所示,进一步研究如图 4 所示。

在预设最大迭代次数为 200 时,GA 和 PSO 算法分别在第 186 代和第 164 代获得最优适应度值。由表 7 和表 8 可得,两种算法的差值比率最大为 0.018%,表明两种算法均未陷入局部最优解,验证了算法效度和模型信度。以 GA 求解为例,当 CS 为 $N_S R_S$, α^{d_n} 和 α^{d_r} 为 85%, q 为 0.405 8, p_n 为 72.74, p_r 为 67.65 时, TR_{GA} 达到最大值 72 716.25,此时 S_{mf} 和 S_{cr} 分别为 5 823.46 和 3 882.37。

由图 4 可以得出:①当 α^{d_n} 一定时,随着 α^{d_r} 逐渐增大, q 逐渐减小, p_n 和 p_r 逐渐减小, S_{mf} 和 S_{cr} 逐渐增加,平均总利润逐渐升高。这是因为,随着 α^{d_r} 的增加,制造商获得的政府补贴额逐渐增加,因此平均总利润逐渐增大。②当 α^{d_r} 一定时,随着 α^{d_n} 逐渐增大, q 逐渐升高, p_n 和 p_r 逐渐增大, S_{mf} 和 S_{cr} 逐渐增加,平均总利润逐渐升高。这是因为,随着 α^{d_n} 的增加,平均原材料订购成本逐渐减小,因此平均总利润逐渐增加。

表 6 潜在需求三角模糊数
Tab. 6 Potential demand triangle fuzzy numbers

数据集	d_{n1}	d_{n2}	d_{n3}	d_{r1}	d_{r2}	d_{r3}
L_1	865	987	1 126	530	643	756
L_2	773	869	1 065	474	565	658
L_3	786	925	1 052	502	574	653
L_4	718	826	963	469	565	642
L_5	765	918	1 036	512	569	626
L_6	894	1 032	1 145	530	612	670
L_7	708	826	987	457	534	625
L_8	736	875	1 036	436	520	762
L_9	803	928	1 042	492	587	695
L_{10}	792	924	1 045	487	581	662

表 7 采用 GA 求解不同置信水平下的最优决策
Tab. 7 Optimal decision at different confidence levels by using GA

不同置信水平组合		CS	GA					
$\alpha^{d_n}/\%$	$\alpha^{d_r}/\%$		q	P_n	P_r	TR_{GA}	S_{mf}	S_{cr}
65	65	$N_L R_L$	0.507 3	73.68	69.54	65 086.28	4 564.82	3 043.21
	75	$N_L R_S$	0.423 6	71.36	67.56	66 320.76	4 885.73	3 257.15
	85	$N_L R_S$	0.358 7	70.23	66.23	67 658.29	5 485.37	3 656.91
75	65	$N_S R_L$	0.548 5	74.13	70.15	67 213.86	4 654.16	3 102.78
	75	$N_S R_S$	0.448 6	72.42	68.14	68 722.57	4 939.18	3 292.69
	85	$N_S R_S$	0.384 7	71.65	66.96	71 241.84	5 547.96	3 698.64
85	65	$N_S R_L$	0.592 7	75.54	71.82	69 874.58	5 059.75	3 373.16
	75	$N_S R_S$	0.457 3	73.68	68.95	71 415.68	5 328.57	3 552.38
	85	$N_S R_S$	0.405 8	72.74	67.65	72 716.25	5 823.46	3 882.37

表 8 采用 PSO 求解不同置信水平下的最优决策
Tab. 8 Optimal decision at different confidence levels by using PSO

不同置信水平组合		CS	PSO						gap/%
$\alpha^{d_n}/\%$	$\alpha^{d_r}/\%$		q	P_n	P_r	TR_{PSO}	S_{mf}	S_{cr}	
65	65	$N_L R_L$	0.507 4	73.69	69.53	65 096.04	4 565.50	3 043.67	0.015
	75	$N_L R_S$	0.423 7	71.35	67.57	66 312.13	4 885.09	3 256.73	0.013
	85	$N_L R_S$	0.358 6	70.24	66.24	67 650.17	5 486.03	3 657.35	0.012
75	65	$N_S R_L$	0.548 4	74.12	70.16	67 224.61	4 653.42	3 103.28	0.016
	75	$N_S R_S$	0.448 7	72.41	68.13	68 710.19	4 940.07	3 293.31	0.018
	85	$N_S R_S$	0.384 6	71.64	66.97	71 252.53	5 547.13	3 698.09	0.015
85	65	$N_S R_L$	0.592 8	75.53	71.83	69 862.71	5 058.87	3 372.59	0.017
	75	$N_S R_S$	0.457 3	73.67	68.96	71 425.68	5 329.32	3 552.87	0.014
	85	$N_S R_S$	0.405 7	72.75	67.64	72 706.80	5 822.70	3 881.92	0.013

管理启示:①随着再制造品潜在需求置信水平的增加,企业应生产较多的再制造品,通过增加政府补贴额来提高总利润;②随着新产品潜在需求置信水平的增加,企业应生产较多的新产品,通过降低采购运营成本来提高总利润;③企业可以根据新产品和再制造品潜在需求置信水平的不同组合制定最优回收、生产和销售决策,逐渐提高总利润。

3.2 不确定环境下的最优渠道结构选择

在新产品和再制造品需求不确定环境下,为进一步可视

化分析销售渠道结构的最优选择问题,本文将销售渠道结构数值量化为:第 1 至第 4 种渠道结构分别赋值 1、2、3、4,销售渠道数值量化为:直销渠道赋值 10,分销渠道赋值 20。

由图 5 可以得出,①当 α^{d_n} 一定时,随着 α^{d_r} 逐渐增大,新产品由分销渠道逐渐变为直销渠道。②当 α^{d_r} 一定时,随着 α^{d_n} 逐渐增大,再制造品由分销渠道逐渐变为直销渠道。③当 $78\% < \alpha^{d_n} < 95\%$, $78\% < \alpha^{d_r} < 95\%$ 时,即当新产品和再制造品潜在需求置信水平较高时,为了避免较高的可用库存(新产品和再

制造品库存)成本,选择渠道结构 1 最优;当 $45\% < \alpha^d < 78\%$, $78\% < \alpha^d < 95\%$ 时,即当新产品潜在需求置信水平较低,再制造品潜在需求置信水平较高时,为了避免较高的新产品直销平台费用和再制造品库存成本,选择渠道结构 3 最优;当 $45\% < \alpha^d < 78\%$, $45\% < \alpha^d < 78\%$ 时,即当两种产品潜在需求置信水平较低时,为了避免较高的直销平台费用,选择渠道结构 4 最优;当 $78\% < \alpha^d < 95\%$, $45\% < \alpha^d < 78\%$ 时,即当新产品潜在需求置信水平较高,再制造品潜在需求置信水平较低时,为了避免

较高的新产品库存成本和再制造品直销平台费用,选择渠道结构 2 最优。

管理启示:①不确定新产品和再制造品需求会影响最优销售渠道结构选择,企业可以结合不同潜在需求置信水平,对销售渠道进行调整;②随着新产品和再制造品潜在需求置信水平的提高,企业应将新产品和再制造品从分销渠道逐渐调整为直销渠道;③企业可以根据不同潜在需求置信水平组合选择最优销售渠道结构,逐渐提高总利润。

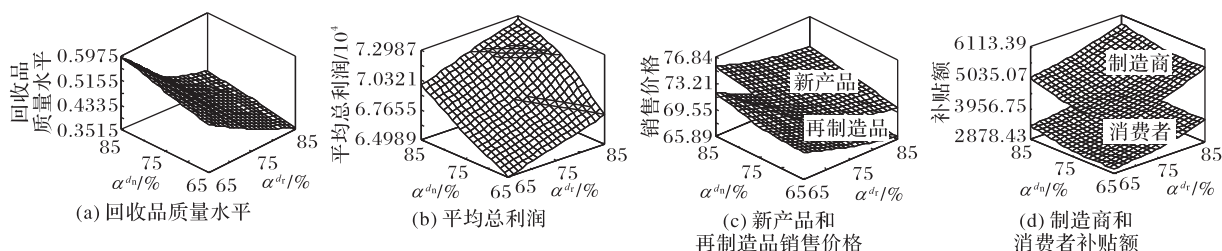


图 4 不同潜在需求置信水平对最优决策的影响

Fig. 4 Influence of different confidence levels of potential demands on optimal decision

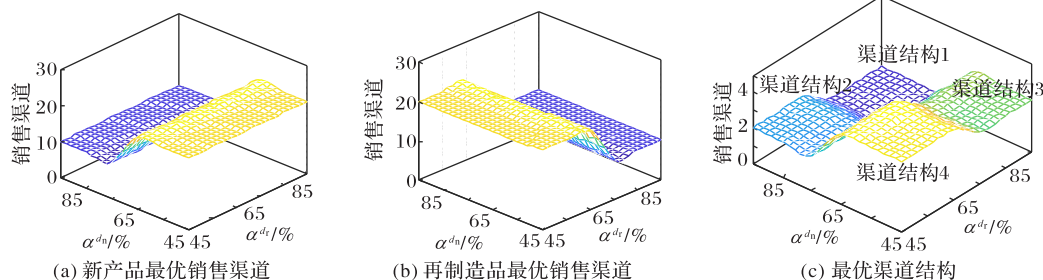


图 5 不同潜在需求置信水平下的最优销售渠道和渠道结构

Fig. 5 Optimal sales channels and channel structures under different confidence levels of potential demands

4 结语

基于不确定市场需求和回收品质量水平,综合考虑政府差别权重补贴和直销平台费用,构建了四种销售渠道结构下的闭环供应链系统总利润模型,研究了闭环供应链系统的最优决策问题。采用 PSO 算法和 GA 对比求解模型算例,验证了算法的效度和模型的信度。

本研究可为企业在不确定环境下制定回收、生产和销售策略提供参考,同时为企业选择最优销售渠道结构提供借鉴。本文采用 PSO 算法和 GA 求解模型,进一步研究可以考虑 ACO 算法、ABC 算法等其他元启发算法。

参考文献 (References)

- [1] GUO J Q, HE L, GEN M. Optimal strategies for the closed-loop supply chain with the consideration of supply disruption and subsidy policy [J]. Computers and Industrial Engineering, 2019, 128: 886-893.
- [2] GUO J Q, YA G. Optimal strategies for manufacturing/remanufacturing system with the consideration of recycled products [J]. Computers and Industrial Engineering, 2015, 89: 226-234.
- [3] 王心月,郭健全. 碳税下多周期闭环混合系统的补贴策略模型 [J]. 计算机工程与应用, 2018, 54(14): 236-240, 270. (WANG X Y, GUO J Q. Subsidy strategy model of multi-period closed-loop hybrid system under carbon tax [J]. Computer Engineering and Applications, 2018, 54(14): 236-240, 270.)
- [4] PENG H, SHEN N, LIAO H L, et al. Uncertainty factors, methods, and solutions of closed-loop supply chain — a review for

current situation and future prospects [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 254: No. 120032.

- [5] KIM J, CHUNG B D, KANG Y, et al. Robust optimization model for closed-loop supply chain planning under reverse logistics flow and demand uncertainty [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 196: 1314-1328.
- [6] MA H G, LI X. Closed-loop supply chain network design for hazardous products with uncertain demands and returns [J]. Applied Soft Computing, 2018, 68: 889-899.
- [7] XIONG Y, LI G D, ZHOU Y, et al. Dynamic pricing models for used products in remanufacturing with lost-sales and uncertain quality [J]. International Journal of Production Economics, 2014, 147(Pt C): 678-688.
- [8] HEYDARI J, GHASEMI M. A revenue sharing contract for reverse supply chain coordination under stochastic quality of returned products and uncertain remanufacturing capacity [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 197(Pt 1): 607-615.
- [9] 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.
- [10] FARROKH M, AZAR A, JANDAGHI G, et al. A novel robust fuzzy stochastic programming for closed loop supply chain network design under hybrid uncertainty [J]. Fuzzy Sets and Systems, 2018, 341: 69-91.
- [11] TSAO Y C, THANH V V, LU J C, et al. Designing sustainable

- supply chain networks under uncertain environments: fuzzy multi-objective programming[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 174: 1550-1565.
- [12] WANG Z, HUO J Z, DUAN Y R. Impact of government subsidies on pricing strategies in reverse supply chains of waste electrical and electronic equipment [J]. *Waste Management*, 2019, 95: 440-449.
- [13] SUN H X, WAN Y, ZHANG L L, et al. Evolutionary game of the green investment in a two-echelon supply chain under a government subsidy mechanism [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 235: 1315-1326.
- [14] LI B, CHEN W C, XU C C, et al. Impacts of government subsidies for environmental-friendly products in a dual-channel supply chain [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 171: 1558-1576.
- [15] BIAN J S, ZHANG G Q, ZHOU G H. Manufacturer vs. consumer subsidy with green technology investment and environmental concern [J]. *European Journal of Operational Research*, 2020, 287(3): 832-843.
- [16] LI Q B, SUN H, ZHANG H, et al. Design investment and advertising decisions in direct-sales closed-loop supply chains[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 250: No. 119552.
- [17] XIE J P, ZHANG W S, LIANG L, et al. The revenue and cost sharing contract of pricing and servicing policies in a dual-channel closed-loop supply chain [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 191: 361-383.
- [18] ALAMDAR S F, RABBANI M, HEYDARI J. Pricing, collection, and effort decisions with coordination contracts in a fuzzy, three-level closed-loop supply chain [J]. *Expert Systems with Applications*, 2018, 104: 261-276.
- [19] XIE J P, LIANG L, LIU L H, et al. Coordination contracts of dual-channel with cooperation advertising in closed-loop supply chains[J]. *International Journal of Production Economics*, 2017, 183(Pt B): 528-538.
- [20] TALEIZADEH A A, MOKHTARZADEH M. Pricing and two-dimensional warranty policy of multi-products with online and offline channels using a value-at-risk approach[J]. *Computers and Industrial Engineering*, 2020, 148: No. 106674.
- [21] GUO J Q, KO Y D, HWANG H. A manufacturing/remanufacturing system with the consideration of required quality of end-of-used products [J]. *Industrial Engineering and Management Systems*, 2010, 9(3): 204-214.
- [22] ZHANG 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.
- [23] 黄晓婷,朱晓峰. 考虑消费者异质需求的闭环供应链决策和契约优化——基于差别权重补贴视角[J]. *科技管理研究*, 2019, 39(24): 201-209. (HUANG X T, ZHU X F. Decision and contract optimization of closed-loop supply chain considering heterogeneous demands of consumer: based on perspective of differential weight subsidy [J]. *Science and Technology Management Research*, 2019, 39(24):201-209.)
- [24] GUO J Q, YU H L, GEN M. Research on green closed-loop supply chain with the consideration of double subsidy in e-commerce environment [J]. *Computers and Industrial Engineering*, 2020, 149: No. 106779.
- [25] SOLEIMANI H, KANNAN G. A hybrid particle swarm optimization and genetic algorithm for closed-loop supply chain network design in large-scale networks[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2015, 39(14): 3990-4012.
- [26] 郭健全,王心月. 碳交易下生鲜电商跨区域闭环物流网络及路径[J]. *计算机集成制造系统*, 2017, 23(4):874-882. (GUO J Q, WANG X Y. Network and route planning of cross-regional closed-loop logistics for fresh food e-commerce under environment of carbon trading [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2017, 23(4):874-882.)
- [27] 霍晴晴,郭健全. 基于改进遗传算法的生鲜多目标闭环物流网络模型[J]. *计算机应用*, 2020, 40(5):1494-1500. (HUO Q Q, GUO J Q. Multi-objective closed-loop logistics network model of fresh foods based on improved genetic algorithm [J]. *Journal of Computer Applications*, 2020, 40(5): 1494-1500)
- [28] 杨晓华,郭健全. 模糊环境下多周期多决策生鲜闭环物流网络[J]. *计算机应用*, 2019, 39(7):2168-2174. (YANG X H, GUO J Q. Multi-period multi-decision closed-loop logistics network for fresh products with fuzzy variables [J]. *Journal of Computer Applications*, 2019, 39(7) :2168-2174.)
- [29] GEN M, CHENG R W, LIN L. *Network Models and Optimization: Multiobjective Genetic Algorithm Approach* [M]. London: Springer, 2008: 710-714.

This work is partially supported by the National Natural Science Foundation of China (71471110, 71631007), the Shanghai Science and Technology Innovation Action Project (DZ1201402), the University Capacity Building Project of Science and Technology Commission of Shanghai Municipality (16040501500).

ZHANG Meng, born in 1994, M. S. candidate. Her research interests include supply chain management, logistics engineering.

CUO Jianquan, born in 1972, Ph. D., associate professor. His research interests include international trade, international commerce, international logistics, supply chain management.