

考虑企业环境责任和政府差别权重 补贴的闭环供应链研究

张 盟, 郭健全

(上海理工大学 管理学院, 上海 200093)

摘要: 在市场需求和回收产品质量水平不确定环境下, 构建考虑 CER (企业环境责任) 和政府差别权重补贴的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市场需求不确定问题, 并采用粒子群优化算法 (PSO) 和遗传算法 (GA) 对比求解模型算例。结果表明, 企业可以根据不同需求置信水平组合制定最优回收、生产和销售策略; 系统总利润与 CER 投资成本成反比, 与 CER 投资水平的关系取决于绿色技术成熟度; 政府为了提高企业回收再制造的实施效果, 可以设置消费者补贴权重为 0.30~0.43; 企业可以根据不同的政府补贴, 合理安排回收再制造活动来提高总利润; 相较于 CER 投资, 总利润对政府补贴更敏感。

关键词: 不确定环境; 企业环境责任; 政府差别权重补贴; 粒子群优化算法; 遗传算法

中图分类号: F 274

文献标志码: A

Closed loop supply chain considering corporate environmental responsibility and government differential weighting subsidy

ZHANG Meng, GUO Jianquan

(Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Under the uncertain environment of market demand and quality level of recycled products, a total profit model for the closed-loop supply chain system was constructed considering CER (corporate environmental responsibility) and government differential weighting subsidy. The fuzzy chance constrained programming method was used to solve the problem of uncertain market demand. The particle swarm optimization algorithm (PSO) and genetic algorithm (GA) were used to solve the model example comparatively. The results show that: enterprises can formulate optimal recycling, production and sale strategies according to different confidence level combinations of market demand; the system total profit is inversely proportional to the CER investment cost parameter, and the relationship between the average total profit and CER investment level depends on green technology maturity; in order to

收稿日期: 2020-08-17

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 (16DZ1201402); 上海市科委院校能力建设项目 (16040501500)

第一作者: 张 盟 (1994-), 女, 硕士研究生。研究方向: 物流工程。E-mail: zhangmengusst@126.com

通信作者: 郭健全 (1972-), 男, 副教授。研究方向: 国际贸易、国际商务、国际物流与供应链管理。

E-mail: jasonguusst@126.com

improve the implementation effect of recycling and remanufacturing, government can set the weight of consumer subsidy between 0.30 and 0.43; enterprises can reasonably arrange recycling and remanufacturing activities according to different government subsidies to improve the total profit; the total profit is more sensitive to different government subsidies compared with the CER investment.

Keywords: *uncertain environment; corporate environmental responsibility; government differential weighting subsidy; particle swarm optimization algorithm; genetic algorithm*

随着资源短缺和环境污染的日益加剧，可持续发展逐渐受到广泛关注^[1]。回收再制造具有提高资源利用效率和降低环境污染的特点，通过花费较小成本来延长回收品的使用寿命，创造出更大的经济价值，逐渐成为企业提高竞争力的有效途径^[2]。然而，再制造闭环供应链更加复杂，如企业如何根据绿色技术水平制定合理的企业环境责任（CER）投资以及回收和制造/再制造策略，政府如何提高企业回收再制造实施效果等使得闭环供应链系统面临诸多挑战^[3]。

回收再制造活动会遇到许多不确定问题^[4]。Giri等^[5]探讨了供应中断环境下不确定需求和回收量对系统总利润的影响；Wang等^[6]研究了需求不确定条件下考虑绿色投资和销售努力的最优定价策略；Heydari等^[7]在回收质量不确定下通过建立收益共享合同对逆向供应链进行协调；Zeballos等^[8]考虑不确定回收质量，提出了基于场景分析的两阶段建模方法。上述文献单独讨论了整体市场需求或回收质量不确定问题，然而在现实闭环供应链中市场需求往往包含新产品和再制造品需求^[4]，且经常同时出现需求和回收质量不确定情况，本文研究市场需求（新产品和再制造品市场需求）和回收质量同时不确定下闭环供应链的最优决策问题。

模糊机会约束规划法是解决不确定问题的一种有效方法^[9]。Dai等^[10]运用模糊机会约束规划法处理需求不确定问题；Wu等^[11]在需求和回收不确定下建立了模糊混合整数线性规划模型，采用模糊机会约束规划法处理不确定问题；Ghahremani-Nahr等^[12]运用模糊机会约束规划法处理需求和运输成本不确定问题；Mula等^[13]运用随机规划法和模糊机会约束规划法对比求解需求不确定问题，得出后者更易获得最优解的结论。上述文献运用模糊机会约束规划法解决整体需求不确定问题，本文将整体需求进行划分，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。

CER有助于提高竞争优势和改善环境水平^[14]。Cheng等^[15]在不同市场领导者和CER转移因子决策者下，通过建立6种博弈模型来研究最优权力结构和转移模式问题；Hong等^[16]在单纯价格合同、绿色营销成本分担合同和两部分关税合同下研究了CER对总利润和环境绩效的影响；Stekelorum等^[17]通过分析中小企业环境责任对社会需求的影响，得出CER与社会需求正相关的结论；Chen等^[18]采用内容分析法建立了CER绩效衡量指标，得出企业环境投资将通过绿色战略转化为环境效益产出的结论。上述文献探讨了单周期下CER的实施问题，未考虑不同投资成本对投资水平的影响，本文研究多周期下CER的投资问题，探讨不同投资成本对最优CER投资水平的影响，为企业制定合理投资策略提供可量化参考。

政府补贴政策对回收再制造活动具有激励作用^[19]。Wang等^[20]分析了利他偏好和政府补贴制造商对回收价格、碳排放和社会总福利的影响；Wan等^[21]探讨了2个回收商竞争环境下政府补贴制造商对回收率和销售价格的影响；He等^[22]研究了新产品和再制造品竞争环境下政府补贴消费者对价格决策的影响；Ma等^[23]研究了政府补贴消费者对市场需求的影响。上述文献对补贴制造商和消费者进行了单独讨论，且单位总补贴额是固定的，未考虑回收品质量水平对补贴额的影响，本文将回收品质量水平考虑到政府补贴中，研究政府对制造商和消费者的差别权重补贴对闭环供应链最优决策的影响。

综上所述，本文在不确定环境下建立考虑CER和政府差别权重补贴的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，采用粒子群优化算法（PSO）和遗传算法（GA）对模型算例对比求解。本研究可为企业在不确定环境下制定最优回收和生产策略以及在不同CER投资成本下制定合理CER投资水平

提供参考, 同时为政府合理设置补贴权重提供借鉴。

1 模型构建

1.1 模型假设

模型假设如下:

- 在一个周期中原材料只采购一次^[24];
- 单位再制造品利润大于单位新产品利润, 否则, 制造商没有动力进行回收再制造^[25];
- 不考虑产品提前期、废弃、缺货或过剩^[26];
- 回收品质量水平服从指数分布^[26];
- 政府实行差别权重补贴政策, 消费者和制造商补贴权重为 w 和 $(1-w)$ ^[27];

f. 新产品市场需求 $D_n = \alpha_n - \tau_1 p_n + \tau_2 p_r - \mu \sqrt{wh} + k \sqrt{g}$, 再制造品市场需求 $D_r = \alpha_r - \tau_1 p_r + \tau_2 p_n + \mu \sqrt{wh} + k \sqrt{g}$, 整体市场需求 $D = \alpha_n + \alpha_r + (\tau_2 - \tau_1)(p_n + p_r) + 2k \sqrt{g}$ 。其中, α_n 和 α_r 为新产品和再制造品的潜在需求量, p_n 和 p_r 为新产品和再制造品的销售价格, τ_1 为价格敏感系数, τ_2 为交叉价格敏感系数, μ 为消费者补贴敏感系数, h 为单位再制造品补贴额, k 为 CER 投资水平敏感系数, g 为 CER 投资水平^[14]。

1.2 函数构建

定义回收率 $d = \alpha D$, D 为单位时间整体市场需求, 边际回收率 $\alpha = be^{-\varphi q}$, 其中, q 为回收品最低质量水平, $0 \leq q \leq 1$, b 和 φ 为回收率函数参数, $0 \leq b \leq 1$ 。 x 为回收品质量水平。根据模型假设, x 服从指数分布, $x \sim E(\lambda)$, λ 为指数分布参数, $q \leq x \leq 1$, x 的概率密度函数

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

1.2.1 回收成本函数

定义回收成本比率 $p = ae^{-\theta(1-x)}$, a 和 θ 为回收成本函数参数, $0 \leq a \leq 1$, p 是单位回收成本与单位生产成本的比值。 C_n 为单位新产品制造成本, C_{raw} 为单位原材料采购成本, 平均回收成本

$$V_1 = d(C_n + C_{raw})E(p) = \frac{be^{-\varphi q} D(C_n + C_{raw}) \int_{-\infty}^{+\infty} \lambda e^{-\lambda x} a e^{-\theta(1-x)} dx}{(\theta - \lambda)} = \frac{a \lambda b e^{-\varphi q} D [e^{-\lambda} - e^{-\theta + (\theta - \lambda)q}]}{(\theta - \lambda)} (C_n + C_{raw}) \quad (2)$$

1.2.2 再制造成本函数

定义再制造成本比率 $s = ce^{\delta(1-x)}$, c 和 δ 为再制造成本函数参数, $0 \leq c \leq 1$, s 为单位再制造成本与单位制造成本的比值, 平均再制造成本

$$V_2 = dC_n E(s) = be^{-\varphi q} DC_n \int_{-\infty}^{+\infty} \lambda e^{-\lambda x} ce^{\delta(1-x)} dx = \frac{c \lambda b e^{-\varphi q} DC_n [e^{\delta - (\delta + \lambda)q} - e^{-\lambda}]}{(\delta + \lambda)} \quad (3)$$

1.2.3 CER 投资成本函数

制造商提供和推广绿色产品来履行企业环境责任(CER), 通过开发绿色技术来生产绿色产品。根据 Yang 等^[14]的研究, 假设 CER 投资成本是投资水平 g 的凸函数, π 为 CER 投资成本关于投资水平 g 的参数, 代表企业开发绿色技术的难易程度, CER 投资成本

$$V_3 = \pi g^2 \quad (4)$$

1.2.4 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^[28]的研究, 针对不同回收品质量水平, 单位再制造品总补贴额 $h = p_r t(q - q_0)/q$, q_0 表示标准回收品质量水平, t 表示补贴系数关于不同回收品质量水平的调整因子, $0 \leq t \leq 1$, 消费者补贴权重为 w , $0 < w < 1$, 制造商生产再制造品的总补贴额

$$S_1 = (1-w)hd = (1-w)p_r t b e^{-\varphi q} D(q - q_0)/q \quad (5)$$

消费者购买再制造品的总补贴额

$$S_2 = whd = w p_r t b e^{-\varphi q} D(q - q_0)/q \quad (6)$$

1.3 系统模型

制造商从供应商处采购原材料用于新产品生产且从消费者处回收废旧品用于再制造活动, 并对制造品和再制造品进行 CER 投资, 消费者从制造商处购买新产品或再制造品, 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, 促进废旧品的回收再制造, 整个过程形成一个物料循环流动, 如图 1 所示。

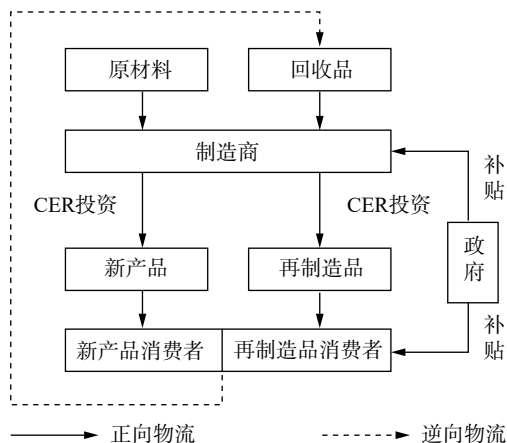


图 1 闭环供应链系统模型

Fig. 1 Closed loop supply chain system model

1.3.1 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 , $mDT_1 = dT$, $lDT_2 = DT - dT$ 。库存状况如图2所示, 定义 I_r 为最大再制造品库存; I_n 为最大新产品库存; I_u 为最大回收品库存; I_{raw} 为最大原材料库存。定义再制造率为 $(1/\gamma)D$, 制造率为 $(1/\beta)D$, 回收率为 αD , γ 为再制造率关于需求的参数, β 为制造率关于需求的参数, 再制造品和新产品的库存上升速率为 $(1/\gamma - 1)D$ 和 $(1/\beta - 1)D$, 回收品和原材料的库存下降速率为 $(\alpha - 1/\gamma)D$ 和 $(1/\beta)D$ 。

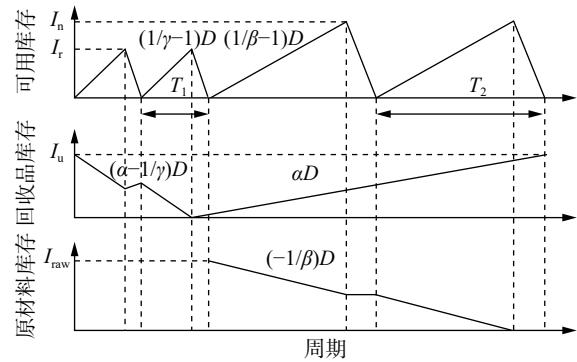


图2 库存状况($m=2$ 和 $l=2$ 仅作为例子)

Fig.2 Inventory status($m=2$ and $l=2$ are just an example)

1.3.2 平均库存持有成本

平均库存持有成本

$$\begin{aligned} V_4 = & H_r + H_n + H_u + H_{\text{raw}} = \frac{1}{2}h_s I_r T_2 \frac{1}{T} + \\ & \frac{1}{2}h_s I_n T_1 \frac{1}{T} + \frac{1}{2}h_u I_u T \frac{1}{T} + \frac{(\beta + l - 1)}{2l}h_{\text{raw}}(1 - \alpha)I_{\text{raw}} = \\ & \frac{1}{2}h_s(1 - \beta)(1 - \alpha)^2DT + \frac{1}{2m}h_s(1 - \gamma)\alpha^2DT + \\ & \frac{1}{2}h_u\left[\alpha(1 - \alpha) + \frac{1}{m}\alpha^2(1 - \gamma)\right]DT + \\ & \frac{(\beta + l - 1)}{2l}h_{\text{raw}}(1 - \alpha)^2DT \end{aligned} \quad (7)$$

式中: H_r 为再制造品平均库存持有成本; H_n 为新产品平均库存持有成本; H_u 为回收品平均库存持有成本; H_{raw} 为原材料平均库存持有成本; h_s 为单位时间单位可用库存成本; h_u 为单位时间单位回收品库存成本; h_{raw} 为单位时间单位原材料库存成本。

1.3.3 平均总利润

制造成本又称生产成本, 指生产活动的成本, 订购成本 C_0 是为补充库存而发生的成本, 原材料持有成本是指为维护原材料而发生的成本, 生产准备成本包括制造准备成本 S_1 和再制造准备成本 S_2 。

平均制造成本 V_5 、平均订购成本 V_6 、平均原材料持有成本 V_7 、平均生产准备成本 V_8 分别为

$$V_5 = (1 - \alpha)DC_n \quad (8)$$

$$V_6 = C_0/T \quad (9)$$

$$V_7 = (1 - \alpha)DC_{\text{raw}} \quad (10)$$

$$V_8 = (mS_1 + lS_2)/T \quad (11)$$

制造成本包括原材料持有成本、订购成本、制造准备成本、制造成本、原材料和新产品库存成本, 再制造成本包括回收成本、再制造准备成本、再制造成本、回收品和再制造品库存成本, 制造和再制造过程均有 CER 投资成本, 考虑 CER 和政府差别权重补贴的闭环供应链系统平均总利润

$$\begin{aligned} R = & p_n D_n + p_r D_r - V_1 - V_2 - V_3 - V_4 - V_5 - V_6 - V_7 - \\ & V_8 + S_1 = p_n(\alpha_n - \tau_1 p_n + \tau_2 p_r - \mu\sqrt{wh} + k\sqrt{g}) + \\ & p_r(\alpha_r - \tau_1 p_r + \tau_2 p_n + \mu\sqrt{wh} + k\sqrt{g}) - \\ & albe^{-\varphi q}[\alpha_n + \alpha_r + (\tau_2 - \tau_1)(p_n + p_r) + 2k\sqrt{g}] \left[e^{-\lambda} - \right. \\ & e^{-\theta + (\theta - \lambda)q} \left. \right] \frac{(C_n + C_{\text{raw}})}{(\theta - \lambda)} - c l b e^{-\varphi q} \left[e^{\delta - (\delta + \lambda)q} - \right. \\ & e^{-\lambda} \left. \right] \left[\alpha_n + \alpha_r + (\tau_2 - \tau_1)(p_n + p_r) + 2k\sqrt{g} \right] \frac{C_n}{(\delta + \lambda)} - \\ & \pi g^2 - [\alpha_n + \alpha_r + (\tau_2 - \tau_1)(p_n + p_r) + 2k\sqrt{g}] \left[\frac{1}{2l}h_s(1 - \right. \\ & \beta)(1 - \alpha)^2T + \frac{1}{2m}h_s(1 - \gamma)\alpha^2T + \frac{1}{2}h_s\alpha(1 - \alpha)T + \\ & \frac{1}{2}h_u\frac{1}{m}\alpha^2(1 - \gamma)T + \frac{(\beta + l - 1)}{2l}h_{\text{raw}}(1 - \alpha)^2T + \\ & (1 - \alpha)(C_n + C_{\text{raw}}) - (1 - w)p_r t b e^{-\varphi q} \frac{(q - q_0)}{q} \left. \right] - \\ & C_0/T - (mS_1 + lS_2)/T \end{aligned} \quad (12)$$

1.3.4 模糊机会约束规划法

模糊机会约束规划法(fuzzy chance-constrained programming)是基于可能性理论和模糊集合理论的不确定数学规划法, 其为解决不确定问题提供了有力工具^[12]。本文采用模糊机会约束规划法解决需求不确定问题。定义新产品和再制造品潜在需求量三角模糊数分别为 $d_n = (d_{n1}, d_{n2}, d_{n3})$ 和 $d_r = (d_{r1}, d_{r2}, d_{r3})$ 。模糊隶属函数

$$U_{\widetilde{d_n}}(t) = \begin{cases} \frac{t - d_{n1}}{d_{n2} - d_{n1}}, & t \in [d_{n1}, d_{n2}] \\ \frac{d_{n3} - t}{d_{n3} - d_{n2}}, & t \in [d_{n2}, d_{n3}] \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$
$$U_{\widetilde{d_r}}(t) = \begin{cases} \frac{t - d_{r1}}{d_{r2} - d_{r1}}, & t \in [d_{r1}, d_{r2}] \\ \frac{d_{r3} - t}{d_{r3} - d_{r2}}, & t \in [d_{r2}, d_{r3}] \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

由模糊机会约束规划法的清晰化定义及其引理可得

$$\begin{cases} \alpha_n \geq (1 - \alpha^{d_n})d_{n1} + \alpha^{d_n}d_{n2} \\ \alpha_n \leq (1 - \alpha^{d_n})d_{n3} + \alpha^{d_n}d_{n2} \\ \text{Pos}\{\alpha_n = d_n \geq \alpha^{d_n}\} \\ \alpha_r \geq (1 - \alpha^{d_r})d_{r1} + \alpha^{d_r}d_{r2} \\ \alpha_r \leq (1 - \alpha^{d_r})d_{r3} + \alpha^{d_r}d_{r2} \\ \text{Pos}\{\alpha_r = d_r \geq \alpha^{d_r}\} \end{cases}$$

式中: α^{d_n} , α^{d_r} 为新产品和再制造品的潜在需求置信水平; $\text{Pos}\{\cdot\}$ 表示 $\{\cdot\}$ 中事件成立的可能性。

2 算法分析

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的计算时间,元启发式算法被认为是有效的解决方式^[28],例如,遗传算法(GA)、粒子群优化算法(PSO)、蚁群算法(ACO)及禁忌搜索(TS)等。已知研究大多采用GA和/或PSO来获得此类问题的近似最优解,Guo等^[28]通过GA与PSO验证了相关模型的可信度和有效度。

粒子群优化算法和遗传算法均是元启发式随机智能优化算法^[29]。两者虽有各自优势,但单一迭代都存在局限性,PSO容易实现且收敛速度快,但易发生早熟收敛,GA具有良好的全局搜索能力,但局部搜索能力较差^[30]。本文对比使用两种算法,进一步验证模型的可信度。

2.1 粒子群优化算法

粒子群优化算法(PSO)源于对鸟群觅食行为研究的智能优化算法,在初始阶段生成一批随机解,作为鸟群个体的初始位置和速度,通过不断迭代寻找最优解^[29]。因其具有操作简单、易实现及收敛速度快等优点,而被广泛应用于物流网络构建、配送车辆路径规划等问题^[31]。PSO编写步骤如下:

- a. 随机初始化粒子位置、速度和参数值。本文设定粒子群规模为30,最大迭代次数为200,搜索空间维数为6。
- b. 根据适应度函数获得所有粒子的适应度值。本文适应度函数为式(12)。
- c. 比较历史适应度值,若当前适应度值较优,记为 p_{best} ,称为局部最优粒子,比较群体最优适应度值,若当前适应度值较优,记为 g_{best} ,称为全局最优粒子。

d. 更新粒子位置和速度。 v_{id}^k 为第 k 次迭代粒子 i 飞行速度矢量的第 d 维分量, x_{id}^k 为第 k 次迭代粒子 i 飞行位置矢量的第 d 维分量。粒子 i 的第 d 维速度和位置更新公式为

$$v_{id}^{k+1} = \omega v_{id}^k + c_1 r_1 (p_{\text{best}_{id}}^k - x_{id}^k) + c_2 r_2 (g_{\text{best}_{id}}^k - x_{id}^k) \tag{13}$$

$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^{k+1} \tag{14}$$

式中: c_1 和 c_2 为加速常数, $c_1 = c_2 = 2$; r_1 和 r_2 为增加搜索随机性的随机数,取值范围为 $[0, 1]$; ω 为调节解空间搜索范围的惯性权重,本文取 $\omega = 0.7298$ 。

e. 若达到终止条件(最大迭代次数),则输出最优解,否则返回步骤b。

2.2 遗传算法

遗传算法(GA)是一种基于遗传机制和选择原理的智能优化算法,通过复制、交叉和变异对个体进行筛选,使群体不断进化,直到满足终止条件^[30]。因其具有高效的全局搜索能力、鲁棒性、并行性等优点,而被广泛应用于物流网络构建、路径规划、设施选址等问题^[32]。GA的主要编写步骤如下:

a. 编码与初始解生成。染色体编码代表个体,一条染色体对应问题的一个解,一个基因对应解中的一个元素,本文染色体基因数为6,最大迭代次数为200,群体规模为40,采用二进制编码,随机产生单元为0/1的初始种群,如表1所示。

表 1 遗传算法初始种群
Tab.1 Initial population in the genetic algorithm

群体	二进制编码					
	q	m	l	T	p_n	p_r
1	10...1	01	10	10...0	11...1	10...1
2	01...1	00	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

- b. 计算粒子适应度值。根据适应度值越高,染色体越容易被选上的原则,选择合适的粒子适应度值。本文适应度函数 $f(x) = 1\,000/T$ 。
- c. 个体选择。个体选择的目的是提高效率和全局收敛性,个体被选择的概率 $p(x) = f(x) / \sum f(x)$ 。
- d. 交叉和变异。如表2所示,采用多点式交叉,依据交叉概率,随机产生交叉位,依据变异概率,随机选择变异位。本文交叉概率为0.7,变

异概率为 0.05。

表 2 遗传算法交叉变异过程

Tab.2 Cross mutation process in the genetic algorithm								
群体	交叉操作				变异操作			
Parent 1	1	0	1	...	1	1	1	
Parent 2	0	1	1	...	0	0	1	
Child 1	0	0	1	...	1	1	1	
Child 2	1	1	0	...	0	1	0	

e. 若满足终止条件(最大迭代次数)，则输出最优解，否则返回步骤 b。

3 计算结果

根据制造行业的实际情况和相关文献 [1, 2, 28], 设置参数值: $h_s = 2$, $h_u = 0.2$, $h_{raw} = 0.2$, $C_n = 30$, $C_{raw} = 20$, $C_0 = 1\,000$, $S_1 = 1\,500$, $S_2 = 1\,500$, $a = 0.9$, $b = 0.9$, $c = 0.1$, $\gamma = 0.6$, $\beta = 0.5$, $\varphi = 2$, $\lambda = 1$, $\tau_1 = 3$, $\tau_2 = 2$, $q_s = 0.2$, $\mu = 80$, $k = 60$, $\pi = 70$, $g = 4$, $t = 0.9$, $w = 0.4$ 。采用明尼苏达大学研究院小组收集的 movielens-20m 数据集进行模拟运算, 潜在市场需求量三角模糊数如表 3 所示。

3.1 不确定环境下的最优决策

采用均匀分布设计法以 10% 极差对 α^{d_n} 和 α^{d_r} 分别赋值 70%, 80%, 90%, 运用 MATLAB 软件编写 GA 和 PSO 代码, 进行对比求解, gap 为 PSO 和 GA 结果的差值比率, 定义 PSO 求解的 R 为 R_1 , GA 求解的 R 为 R_2 , 则 $gap = (R_1 - R_2)/R_2$ 。计算结

表 3 潜在市场需求量三角模糊数

Tab.3 Triangular fuzzy number of potential market demand

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

果如表 4 和表 5 所示。研究不同置信水平下最优决策的变化趋势, 最优决策如图 3~6 所示。

在预设最大迭代次数 200 的情况下, GA 和 PSO 分别在第 183 代和第 167 代获得最优适应度曲线。PSO 和 GA 的差值比率最大为 0.016%, 表明 2 种算法均未陷入局部最优解, 从而验证了算法的有效性和模型的可信性。本例中, 当 α^{d_n} 和 α^{d_r} 分别为 90%, q 为 0.386 9, m 和 l 分别为 3, p_n 和 p_r 分别为 73.92 和 65.57 时, 平均总利润 R 达到最大值 76 152.42, 此时 S_1 和 S_2 分别为 6624.54 和 4416.36。

由图 3~6 可以得出: a. 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 逐渐下降, S_1 和 S_2 逐渐增加, R 逐渐升高。因为, 随着 α^{d_r} 的增加, 制造商获得的补贴额逐渐增加, 因此, 平均总利润 R 逐渐增大。b. 当 α^{d_r} 一定时, 随着 α^{d_n} 逐渐增大, q 缓慢增大, p_n 和 p_r 缓慢上升, S_1 和 S_2 逐渐增加, R 逐渐升高。因为, 随着 α^{d_n} 的增加,

表 4 不同置信水平下的最优决策 (GA)

Tab.4 Optimal decision under different confidence level (GA)

不同置信水平组合		GA							
		q	m	l	p_n	p_r	R	S_1	S_2
$\alpha^{d_n} = 70\%$	$\alpha^{d_r} = 70\%$	0.459 2	1	1	74.85	68.14	68 512.36	5 021.49	3 347.65
	$\alpha^{d_r} = 80\%$	0.412 6	2	1	73.26	66.57	69 746.84	5 458.53	3 639.02
	$\alpha^{d_r} = 90\%$	0.367 5	3	1	72.52	65.09	71 574.28	5 983.34	3 987.95
$\alpha^{d_n} = 80\%$	$\alpha^{d_r} = 70\%$	0.561 7	1	2	75.38	68.41	70 639.94	5 285.14	3 523.42
	$\alpha^{d_r} = 80\%$	0.428 5	2	2	73.79	66.84	72 148.65	5 722.18	3 814.79
	$\alpha^{d_r} = 90\%$	0.374 9	3	2	73.05	65.36	74 647.92	6 247.51	4 165.01
$\alpha^{d_n} = 90\%$	$\alpha^{d_r} = 70\%$	0.573 6	1	3	76.24	68.64	73 148.65	5 659.75	3 773.16
	$\alpha^{d_r} = 80\%$	0.446 3	2	3	74.65	67.13	74 841.76	6 098.82	4 065.87
	$\alpha^{d_r} = 90\%$	0.386 9	3	3	73.91	65.58	76 143.29	6 623.63	4 415.75

表 5 不同置信水平下的最优决策 (PSO)

Tab.5 Optimal decision under different confidence level (PSO)

不同置信水平组合		PSO								gap/%
		q	m	l	p_n	p_r	R	S_1	S_2	
$\alpha^{dn} = 70\%$	$\alpha^{dr} = 70\%$	0.459 3	1	1	74.86	68.15	68 521.26	5 022.37	3 348.24	0.013
	$\alpha^{dr} = 80\%$	0.412 6	2	1	73.27	66.56	69 755.21	5 459.32	3 639.56	0.012
	$\alpha^{dr} = 90\%$	0.367 5	3	1	72.53	65.10	71 584.31	5 984.29	3 989.53	0.014
$\alpha^{dn} = 80\%$	$\alpha^{dr} = 70\%$	0.561 8	1	2	75.38	68.42	70 648.42	5 285.86	3 523.91	0.012
	$\alpha^{dr} = 80\%$	0.428 6	2	2	73.80	66.85	72 160.19	5 723.24	3 815.49	0.016
	$\alpha^{dr} = 90\%$	0.374 9	3	2	73.06	65.37	74 659.12	6 248.61	4 165.74	0.015
$\alpha^{dn} = 90\%$	$\alpha^{dr} = 70\%$	0.573 7	1	3	76.25	68.65	73 159.62	5 658.74	3 772.49	0.015
	$\alpha^{dr} = 80\%$	0.446 3	2	3	74.66	67.14	74 841.76	6 097.85	4 065.23	0.014
	$\alpha^{dr} = 90\%$	0.386 9	3	3	73.92	65.57	76 152.42	6 624.54	4 416.36	0.012

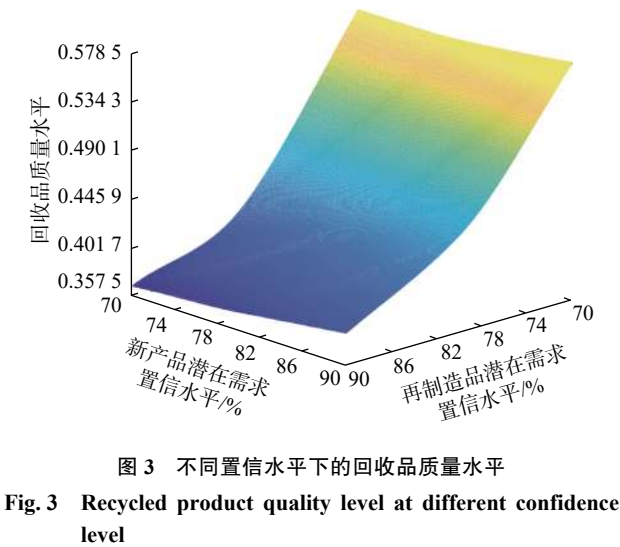


图 3 不同置信水平下的回收品质量水平

Fig. 3 Recycled product quality level at different confidence level

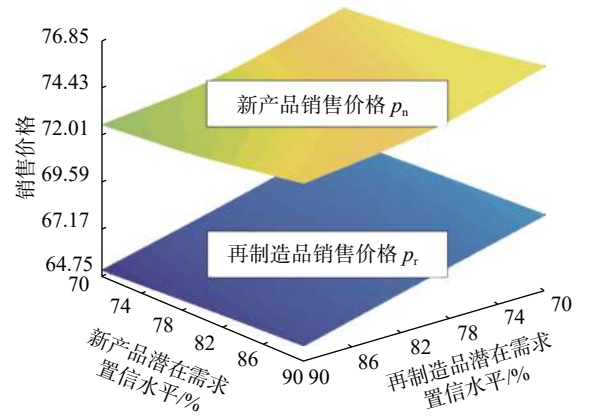


图 5 不同置信水平下的销售价格

Fig. 5 Selling price at different confidence level

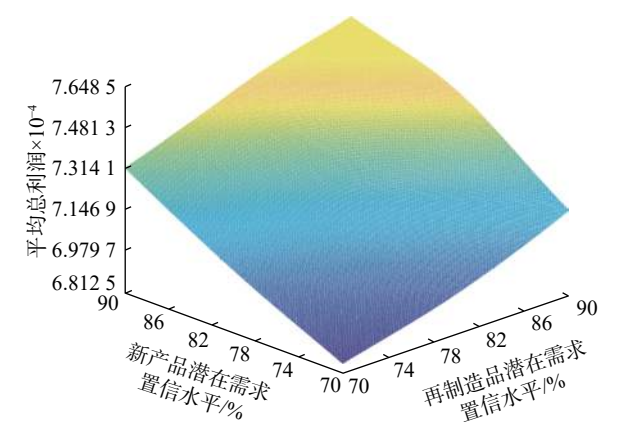


图 4 不同置信水平下的平均总利润

Fig. 4 Average total profit at different confidence level

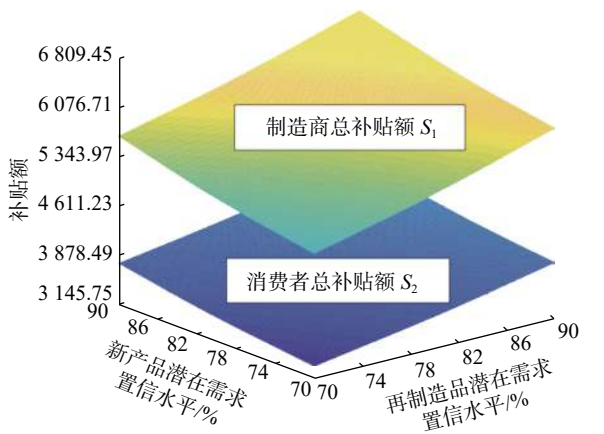


图 6 不同置信水平下的补贴额

Fig. 6 Subsidy amount at different confidence level

原材料采购运营成本逐渐减小, 因此, 平均总利润 R 逐渐增大。

可以得出如下管理建议: a. 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; b. 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; c. 企业可以根据不同潜在需求置信水平组合合理安排生产计划, 制定最优回收、生产和销售策略。

3.2 CER 投资灵敏度分析

研究 CER 投资水平 g 和投资成本参数 π 对平均总利润 R 的影响, 为企业制定合理 CER 投资水平提供参考。在 $\pi=50, 60, 70, 80$ 下求出不同 g 时的 R , 如图 7 所示, 并进一步研究不同 g 和 π 对 R 的影响, 如图 8 所示。

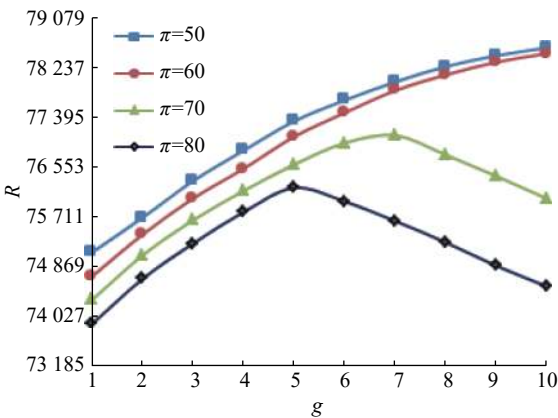


图 7 不同 g 下的平均总利润 R

Fig.7 Average total profit R under different g

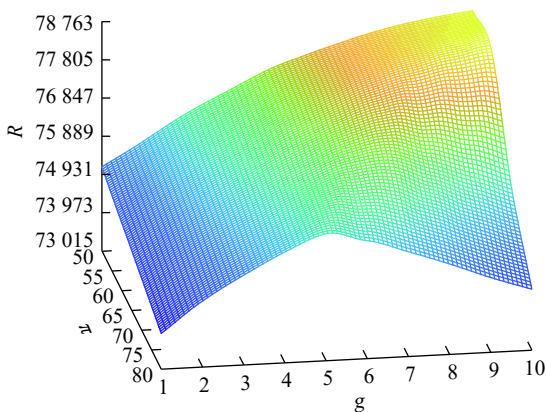


图 8 不同 g 和 π 下的平均总利润 R

Fig.8 Average total profit R under different g and π

由图 7 和图 8 可以得出: a. 当 $50 \leq \pi \leq 64$ 时, 即当 CER 投资成本较低时, 随着 CER 投资水平 g 逐渐增加, 平均总利润 R 逐渐上升, 但上升速率逐渐变缓。b. 当 $64 \leq \pi \leq 80$ 时, 即当 CER 投资成本较高时, 随着 CER 投资水平 g 逐渐增加, 平均总利润 R 先升高再下降, 且最优 CER 投资水平 g 逐

渐左移; c. 当 g 一定时, 随着 π 的逐渐增加, R 逐渐减小, 即当 CER 投资水平一定时, 随着投资成本的增加, 平均总利润逐渐减小。

可以得出如下管理建议: a. 企业应结合自身绿色技术的难易程度, 制定合理的 CER 的投资水平, 逐渐提高总利润。b. 当绿色技术比较成熟时, 企业应制定较高的 CER 投资水平, 当绿色技术处于起步或发展时期时, 企业应制定较低 CER 投资水平, 避免较高的投资成本。

3.3 政府补贴灵敏度分析

研究不同政府补贴权重对平均总利润 R 和回收品最低质量水平 q 的影响, 为政府制定合理的补贴分配权重提供参考, 同时为企业根据不同补贴制定最优回收和生产决策提供借鉴。

由图 9 和图 10 可以得出: a. 随着 w 逐渐增加, R 先上升再下降。随着 w 的增加, 再制造品需求增加带来的利润增长幅度大于制造商补贴额的下降幅度, 因此, R 逐渐升高。当消费者补贴权重大于 0.36 时, 随着 w 的增加, 再制造品需求增

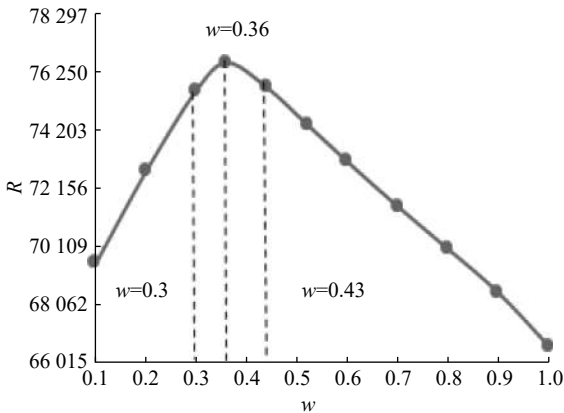


图 9 不同 w 下的平均总利润 R

Fig. 9 Average total profit R under different w

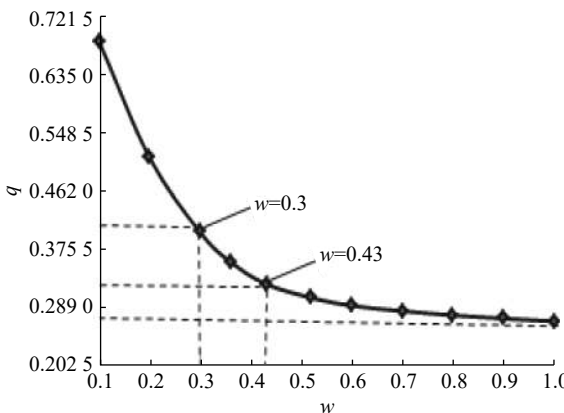


图 10 不同 w 下的回收品质质量 q

Fig. 10 Recycled product quality level q under different w

加带来的利润增长幅度小于制造商补贴额的下降幅度，因此， R 逐渐下降。b. 随着 w 逐渐增加， q 逐渐减小，且减大幅度逐渐变缓。随着 w 的增加，再制造品需求量逐渐增大，因此， q 逐渐减小。当消费者补贴权重达到 0.43 后，随着 w 的增加，再制造品销售价格逐渐升高，导致需求量增长幅度变缓，因此， q 减小速率逐渐变缓。

可以得出如下管理建议：a. 合理的政府补贴分配权重可以有效提高企业回收再制造实施效果，提升总补贴额的利用效率。b. 政府可以设置消费者补贴权重为 0.30~0.43，从而有效提高企业总利润，扩大再制造品市场需求量。c. 企业可以根据不同补贴权重，确定最优回收质量，合理安排回收再制造活动。

3.4 CER 投资和政府补贴的灵敏度分析

研究不同政府补贴权重和 CER 投资水平对总利润的影响程度，如图 11 所示。

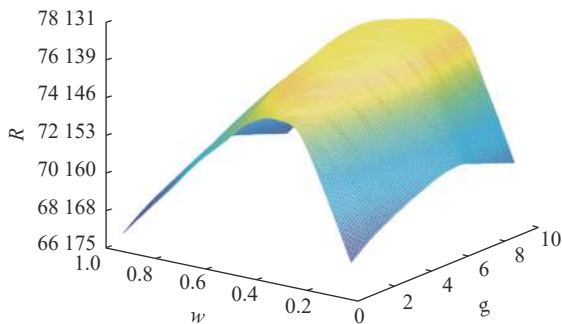


图 11 不同 g 和 w 下的平均总利润 R

Fig.11 Average total profit R under different g and w

由图 11 可以得出：a. 随着 CER 投资水平 g 和消费者补贴权重 w 的增加，平均总利润 R 均先上升再下降。b. 消费者补贴权重每增加 0.1 单位时的总利润变化幅度大于 CER 投资水平每增加 1 单位时的总利润变化幅度。

可以得出如下管理建议：a. 相较于 CER 投资，闭环供应链系统总利润对政府补贴权重更敏感。b. 企业应更加关注政府补贴动向，及时调整最优回收和生产策略。c. 企业可以根据不同补贴权重，制定合理的 CER 投资水平。

4 结束语

研究了在市场需求和回收品质量水平不确定环境下考虑 CER 和政府差别权重补贴的闭环供应链系统最优决策问题。运用模糊机会约束规划法

解决市场需求不确定问题，采用 PSO 和 GA 对算例进行对比求解，结果未陷入局部最优，从而验证了算法的有效性和模型的可信性。

本研究可为企业在不确定环境下制定最优回收、生产和销售策略以及根据 CER 投资成本制定合理的 CER 投资水平提供参考，同时为政府制定合理补贴权重提供可量化借鉴，达到提升总补贴额利用效率和提高企业回收再制造实施效果的目的。进一步研究可以考虑：新产品和再制造品竞争、运输成本和不同销售渠道、产品缺货或过剩对最优决策的影响。

参考文献：

[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 & Industrial Engineering*, 2019, 128: 886–893.

[2] GUO J Q, GAO Y. Optimal strategies for manufacturing/remanufacturing system with the consideration of recycled products[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2015, 89: 226–234.

[3] 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.

[4] 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.

[5] GIRI B C, SHARMA S. Optimal production policy for a closed-loop hybrid system with uncertain demand and return under supply disruption[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 112(3): 2015–2028.

[6] WANG L M, SONG Q K. Pricing policies for dual-channel supply chain with green investment and sales effort under uncertain demand[J]. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2020, 171: 79–93.

[7] 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(1): 607–615.

[8] ZEBALLOS L J, GOMES M I, BARBOSA-POVOA A P, et al. Addressing the uncertain quality and quantity of returns in closed-loop supply chains[J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2012, 47: 237–247.

[9] SAXENA L K, JAIN P K, SHARMA A K. A fuzzy goal programme with carbon tax policy for Brownfield Tyre

- remanufacturing strategic supply chain planning[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 198: 737–753.
- [10] DAI Z, ZHENG X T. Design of close-loop supply chain network under uncertainty using hybrid genetic algorithm: a fuzzy and chance-constrained programming model[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2015, 88: 444–457.
- [11] WU G H, CHANG C K, HSU L M. Comparisons of interactive fuzzy programming approaches for closed-loop supply chain network design under uncertainty[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2018, 125: 500–513.
- [12] GHAREMANI-NAHR J, KIAN R, SABET E. A robust fuzzy mathematical programming model for the closed-loop supply chain network design and a whale optimization solution algorithm[J]. *Expert Systems with Applications*, 2019, 116: 454–471.
- [13] MULA J, PEIDRO D, POLER R. The effectiveness of a fuzzy mathematical programming approach for supply chain production planning with fuzzy demand[J]. *International Journal of Production Economics*, 2010, 128(1): 136–143.
- [14] YANG D Y, XIAO T J, HUANG J. Dual-channel structure choice of an environmental responsibility supply chain with green investment[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 210: 134–145.
- [15] CHENG J S, LI B Y, GONG B G, et al. The optimal power structure of environmental protection responsibilities transfer in remanufacturing supply chain[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 153: 558–569.
- [16] HONG Z F, GUO X L. Green product supply chain contracts considering environmental responsibilities[J]. *Omega*, 2019, 83: 155–166.
- [17] STEKELORUM R, LAGUIR I, EIBAZ J. Can you hear the Eco? From SME environmental responsibility to social requirements in the supply chain[J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2020, 158: 120169.
- [18] CHEN C S, YU C C, HU J S. Constructing performance measurement indicators to suggested corporate environmental responsibility framework[J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2018, 135: 33–43.
- [19] 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.
- [20] WANG Y Y, FAN R J, SHEN L, et al. Recycling decisions of low-carbon e-commerce closed-loop supply chain under government subsidy mechanism and altruistic preference[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 259: 120883.
- [21] WAN N N, HONG D J. The impacts of subsidy policies and transfer pricing policies on the closed-loop supply chain with dual collection channels[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 224: 881–891.
- [22] HE P, HE Y, XU H. Channel structure and pricing in a dual-channel closed-loop supply chain with government subsidy[J]. *International Journal of Production Economics*, 2019, 213: 108–123.
- [23] MA W M, ZHAO Z, KE H. Dual-channel closed-loop supply chain with government consumption-subsidy[J]. *European Journal of Operational Research*, 2013, 226(2): 221–227.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 何璐, 郭健全. 碳税下考虑供应中断的制造/再制造企业最优策略[J]. *上海理工大学学报*, 2017, 39(6): 556–562.
- [27] 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.
- [28] 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 & Industrial Engineering*, 2020, 149: 106779.
- [29] 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.
- [30] 杨晓华, 郭健全. 新零售下生鲜产品闭环物流网络模糊规划[J]. *计算机工程与应用*, 2019, 55(2): 198–205.
- [31] 郭健全, 杨晓华. 易腐品多周期闭环物流网络鲁棒优化模型[J]. *计算机应用研究*, 2020, 37(3): 774–778.
- [32] GEN M, CHENG R W, LIN L. Network models and optimization: multiple objective genetic algorithm approach[M]. London: Springer, 2018: 710–714.

(编辑: 石 瑛)