

中断风险下易腐品多目标闭环供应链网络模型

孙中嘉, 郭健全

(上海理工大学 管理学院, 上海 200093)

摘要: 在当今全球化和高度不确定的商业环境中, 供应链网络容易遭遇设施中断、路径中断等多重中断风险。同时考虑到易腐品需求波动大、易损耗、退货率高、处理不当会污染环境等问题, 以最小经济成本、最小环境影响、最大社会效益为目标, 提出缓解中断风险的策略并构建了不确定条件下易腐品多目标闭环供应链网络模型。为了减少不确定参数的影响, 实现最优设施选址与最佳配送路径的决策安排, 将易腐品需求量和退货量设定为三角模糊值, 采用模糊机会约束方法解决模型中的不确定约束问题。以上海市某易腐品企业为例, 通过遗传算法和粒子群算法对模型进行求解。结果表明, 采用缓解中断风险的策略可以显著改善供应链网络在中断情况下的表现, 且相对于单目标优化, 多目标优化整体表现更优。

关键词: 易腐品; 供应链网络中断; 需求量和回收量不确定; 供应链网络多目标优化; 模糊机会约束方法

中图分类号: F 272 文献标志码: A

Multi-objective closed-loop supply chain network model for perishable products under disruption risk

SUN Zhongjia, GUO Jianquan

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

Abstract: Considering today's globalized and highly uncertain business environment, the supply chain network is prone to the risk of disruption. At the same time, in view of the issues, such as demand fluctuation, high return rate and environmental pollution caused by improper treatment, the strategies to mitigate the interruption risk were proposed and a multi-objective closed-loop supply chain network model of perishable products under uncertain conditions concerning minimum economic cost, the minimum environmental impact and the maximum social benefit was constructed. In order to reduce the influence of uncertain parameters and realize the decision-making arrangement of the optimal facility location and the optimal distribution path, the demand and return quantity of perishable products were set as triangular fuzzy values, and the fuzzy constraints in the model were equivalently transformed into clear correspondences by using fuzzy chance constraint method. Taking a perishable product enterprise

收稿日期: 2020-11-18

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资助项目 (16DZ1201402); 上海市科委院校能力建设项目 (16040501500); 西安外事学院研究项目 (XAIU-KT201802-2)

第一作者: 孙中嘉 (1994-), 男, 硕士研究生。研究方向: 物流工程。E-mail: sunzhongjiausst@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: jasonguousst@126.com

in Shanghai as an example, genetic algorithm (GA) and particle swarm optimization (PSO) algorithm were used to solve the model. The calculating results show that the performance of supply chain network can be significantly improved by using the strategy of mitigating disruption risk, and the overall performance of multi-objective optimization of closed-loop supply chain network is better than that of single objective optimization.

Keywords: *perishable products; supply chain network disruption; uncertain demand and recovery; multi-objective optimization of supply chain network; fuzzy chance constraint method*

随着经济和社会的高速发展以及环境污染、生态破坏等问题的加剧，消费者和企业对于环境和社会影响的关注日益增强，这给闭环供应链网络的设计提出了更高的要求^[1]。近年来，越来越多的学者把供应链网络设计与可持续发展战略联系在一起，希望实现经济、环境、社会三者的多目标可持续发展^[2-3]。同时，供应链也具有一定的脆弱性，供需失衡、自然灾害、重大疫情等问题都可能造成供应链网络的中断，从而带来巨大的损失。尤其是对一些需要特殊储运条件的产品而言，设计供应链网络以应对中断风险更加具有现实意义^[4]。

供应链网络中断是目前供应链设计需要面对的主要风险之一，在高度不确定的环境影响下，网络中的任何一个节点、设施或者路径都有可能中断^[5]。许多学者已经对供应链网络的中断问题进行了研究，横向转运、建立中间设施、购买紧急库存等风险缓解策略也已经被提出并使用。Tang等^[6]认为，在库存系统中保留紧急库存是提高供应链的灵活性和绩效的一种风险缓解策略。Yavari等^[7]在采用购买紧急库存之外还提出了设立中间设施、横向转运两种弹性策略来应对供应链和电网的双重中断。考虑到供应链网络的特性，本文选取了横向转运和紧急库存两种方法来缓解其中断风险。

需求量、退货量等的不确定性也是供应链网络规划中复杂且重要的影响因素，如果考虑不周会给供应链网络的运行带来负面影响^[1,8]。常见的解决不确定性的方法有随机规划、鲁棒优化和模糊规划等。比较3种方法可以发现：随机规划可以较精确地求得不确定问题的最优解，但是需要足够多的历史统计数据支持^[9]；鲁棒优化面对不确定参数时具有一定的稳定性，但容易导致结果过于保守^[10]。相对而言，模糊规划既可解决缺少精确数值的问题，又能避免结果过于保守，使模型

具有灵活性，也更符合企业决策的实际情况^[11]。因此，本文选用模糊规划的方法解决需求量和回收量的不确定性问题。

在有关供应链网络的研究中，易腐品因其固有的易腐性而广受关注。尤其是在供应链网络中断的情况下，考虑到易腐品需要特殊的储运条件、生命周期短、处理不当会污染环境以及需求波动性强等问题^[12]，对易腐品的供应链网络进行优化设计可以有效减少损失。章添霞等^[13]针对易腐品供应链网络的特征，建立了一个混合整数非线性模型以寻求运输速度和腐败率的变化对整个供应链的影响。Biuki等^[14]从可持续性的角度出发，针对易腐产品的主要特点，构建了一个包括选址、路径和库存问题的集成模型。

综上所述，现有文献既有从中断角度为供应链网络提高缓解措施的，也有从可持续角度进行多目标供应链网络设计的，但是较少文献同时考虑这两个方向。基于此，本文考虑到易腐品需求和回收量的不确定性及其供应链网络中可能存在的中断风险，同时考虑供应链网络中的经济成本、环境影响和社会效益3个目标，采用横向运转和紧急库存两种缓解风险措施来应对中断风险，并构建了模糊环境下易腐品多目标可持续闭环供应链网络模型。为求解该模型，利用模糊机会约束规划方法解决约束中的不确定问题；并通过LP指标将原多目标问题转换为单目标优化模型。最后以上海市某易腐品企业为例，采用遗传算法(GA)和粒子群算法(PSO)分别对模型进行求解，确定了模型的适应度、选址方案和最优路径。

1 易腐品闭环供应链网络模型

1.1 易腐品闭环供应链网络结构

易腐品闭环供应链网络结构如图1所示，主要由供应商、仓库、中转中心、处理中心、回收

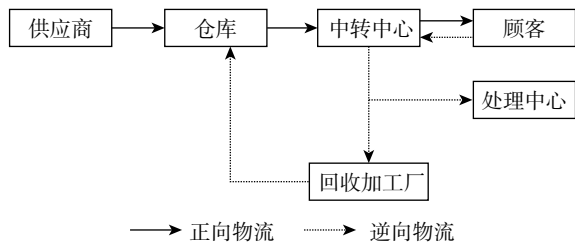


图1 易腐品闭环供应链网络结构图

Fig.1 Structure of closed-loop supply chain network for perishable products

加工厂5部分组成。

在正向过程中,运输车辆在规定时间内将供应商提供的易腐品运送至附近的仓库进行集中储存;仓库将一定数量的易腐品运送至中转中心进行分类包装;中转中心根据顾客的需求进行配送。

在逆向过程中,顾客将退货品送至中转中心,由中转中心对退回的产品进行分类检验。其中,有一定残值的易腐品在被消毒后运送至回收加工厂进行再循环加工,而无残值的易腐品残渣将被送至处理中心进行环保处理^[15]。

1.2 模糊多目标模型

1.2.1 模型假设

- 供应链网络中的设施和路径中断概率是随机的,且相互独立;
- 中断情况下只有中转中心才被允许在同一级别设施之间运输,在供应链网络中的其他层次不允许进行这种类型的横向转运^[7];
- 允许客户的需求量因供应链网络中断而不被满足,并且会产生相应的惩罚成本;
- 在逆向供应链网络中,退货易腐品只考虑第三方再加工与无残值废弃物处理两道工序^[1];
- 各设施节点的处理能力是确定并有限的;
- 模型中供应商、仓库、中转中心、处理厂、回收加工厂的候选位置和数量已知且各节点间的运输成本与其运输量和货车行驶距离成正比。

1.2.2 符号

S 代表供应商数量, $S \in \{1, 2, \dots, n_s\}$; W 代表仓库数量, $W \in \{1, 2, \dots, n_w\}$; J 代表中转中心数量, $J, J' \in \{1, 2, \dots, n_j\}$; P 代表回收加工厂数量, $P \in \{1, 2, \dots, n_p\}$; I 代表顾客数量, $I \in \{1, 2, \dots, n_i\}$; L 代表处理中心数量, $L \in \{1, 2, \dots, n_l\}$; K 代表运输路线, $K \in \{1, 2, \dots, n_k\}$ 。

1.2.3 参数

F_s 代表供应商的固定建设成本; F_w 代表仓库

的固定建设成本; F_j 代表中转中心的固定建设成本; F_p 代表回收加工厂的固定建设成本; F_l 代表处理中心的固定建设成本; O_s 代表供应商的运营成本; O_w 代表仓库的运营成本; O_j 代表中转中心的运营成本; O_p 代表回收加工厂的运营成本; O_l 代表处理中心的运营成本; ma_w 代表仓库的设备维持成本; ma_j 代表中转中心的设备维持成本; ma_p 代表回收加工厂的设备维持成本; ma_l 代表处理中心的设备维持成本; hr_w 代表仓库库存持有成本; δ_w 代表仓库购买应急库存成本; G 代表因中断而产生的单位缺货惩罚成本; $d_{sw}, d_{wj}, d_{jp}, d_{jl}, d_{ji}, d_{ij}, d_{pw}, d_{jj'}$ 分别代表两节点间的距离; $u_{sw}, u_{wj}, u_{jp}, u_{jl}, u_{ji}, u_{ij}, u_{pw}, u_{jj'}$ 分别代表两节点之间的单位运输成本; $Q_{sw}, Q_{wj}, Q_{jp}, Q_{jl}, Q_{ij}, Q_{pw}, Q_{ji}, Q_{jj'}$ 分别代表两节点间的运输量; q_{CO_2} 代表车辆行驶单位重量单位距离排放的 CO_2 ; f_w 代表仓库为员工创造的工作岗位; f_j 代表中转中心为员工创造的工作岗位; f_p 代表回收加工厂为员工创造的工作岗位; f_l 代表处理中心为员工创造的工作岗位; H_w 代表仓库给予员工的培训时数; H_j 代表中转中心给予员工的培训时数; H_p 代表回收加工厂给予员工的培训时数; H_l 代表处理中心给予员工的培训时数; P_x 代表中断场景 x 发生的概率; ω_f 和 ω_H 分别是创造的工作岗位和为员工提供的培训时数所占的权重; ca_w, ca_j, ca_p, ca_l 分别代表各个设施的处理能力; α 代表回收产品的处理率; β 代表回收产品的加工率; R_i 代表消费者退货量, 模糊值; D_i 代表消费者需求量, 模糊值。

1.2.4 决策变量

X_w 为0-1变量, 若选择仓库 w , 则 $X_w = 1$, 否则为0;

X_j 为0-1变量, 若选择中转中心 j , 则 $X_j = 1$, 否则为0;

X_p 为0-1变量, 若选择回收加工厂 p , 则 $X_p = 1$, 否则为0;

X_l 为0-1变量, 若选择处理中心 l , 则 $X_l = 1$, 否则为0;

Y_w 为0-1变量, 若仓库购买了紧急库存, 则 $Y_w = 1$, 否则为0;

$K_{sw}, K_{wj}, K_{jp}, K_{jl}, K_{ji}, K_{ij}, K_{pw}, K_{jj'}$ 为0-1变量, 若在两节点间运输时选择路线 K , 则 $K_{sw}, K_{wj}, K_{jp}, K_{jl}, K_{ji}, K_{ij}, K_{pw}, K_{jj'}$ 为1, 否则为0。

1.2.5 数学模型的建立

最小经济成本：

$$\begin{aligned} E_{1\min} = & \sum_{s=1}^S F_s X_s + \sum_{w=1}^W F_w X_w + \sum_{j=1}^J F_j X_j + \sum_{p=1}^P F_p X_p + \\ & \sum_{l=1}^L F_l X_l + \sum_{s=1}^S O_s X_s + \sum_{w=1}^W O_w X_w + \sum_{j=1}^J O_j X_j + \\ & \sum_{p=1}^P O_p X_p + \sum_{l=1}^L O_l X_l + \sum_{w=1}^W hr_w + \\ & \sum_{s=1}^S \sum_{w=1}^W d_{sw} u_{sw} Q_{sw} K_{sw} + \sum_{w=1}^W \sum_{j=1}^J d_{wj} u_{wj} Q_{wj} K_{wj} + \\ & \sum_{j=1}^J \sum_{l=1}^L d_{jl} u_{jl} Q_{jl} K_{jl} + \sum_{j=1}^J \sum_{p=1}^P d_{jp} u_{jp} Q_{jp} K_{jp} + \\ & \sum_{p=1}^P \sum_{w=1}^W d_{pw} u_{pw} Q_{pw} K_{pw} + \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I d_{ji} u_{ji} Q_{ji} K_{ji} + \\ & \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J d_{ij} u_{ij} Q_{ij} K_{ji} + P_x \left(\sum_{j=1}^J \sum_{j'=1}^{J'} d_{jj'} u_{jj'} Q_{jj'} K_{jj'} + \right. \\ & \left. \sum_{w=1}^W \delta_w Y_w \right) + P_x G \left(\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I D_i - Q_{ji} \right) \end{aligned} \quad (1)$$

最小环境影响：

$$\begin{aligned} E_{2\min} = & q_{\text{CO}_2} \left(\sum_{s=1}^S \sum_{w=1}^W d_{sw} u_{sw} Q_{sw} K_{sw} + \right. \\ & \sum_{w=1}^W \sum_{j=1}^J d_{wj} u_{wj} Q_{wj} K_{wj} + \sum_{j=1}^J \sum_{l=1}^L d_{jl} u_{jl} Q_{jl} K_{jl} + \\ & \sum_{j=1}^J \sum_{p=1}^P d_{jp} u_{jp} Q_{jp} K_{jp} + \sum_{p=1}^P \sum_{w=1}^W d_{pw} u_{pw} Q_{pw} K_{pw} + \\ & \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I d_{ji} u_{ji} Q_{ji} K_{ji} + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J d_{ij} u_{ij} Q_{ij} K_{ji} + \\ & \left. P_x \sum_{j=1}^J \sum_{j'=1}^{J'} d_{jj'} u_{jj'} Q_{jj'} K_{jj'} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

最大社会效益：

$$\begin{aligned} E_{3\max} = & \omega_f \left(\sum_{w=1}^W f_w X_w + \sum_{j=1}^J f_j X_j + \sum_{p=1}^P f_p X_p + \right. \\ & \left. \sum_{l=1}^L f_l X_l \right) + \omega_H \left(\sum_{w=1}^W H_w X_w + \sum_{j=1}^J H_j X_j + \right. \\ & \left. \sum_{p=1}^P H_p X_p + \sum_{l=1}^L H_l X_l \right) \end{aligned} \quad (3)$$

E_1 表示易腐品回收网络中全部成本之和，包含各设施固定建设成本、供应链网络运行成本、

持有库存成本、运输成本、紧急库存购买成本、横向转运成本以及因中断而导致的缺货惩罚成本。

E_2 表示易腐品回收网络中的环境影响，由于模型中的碳排放主要来自运输过程，因此，本文以运输过程中产生的 CO_2 来衡量该闭环供应链网络的环境影响。

E_3 表示易腐品回收网络中的社会效益。衡量社会效益的方法多种多样，Ramos 等^[16]认为提供工作岗位机会是社会效益的重要衡量指标。另一方面，适当的培训可以使员工更加适应岗位，掌握必要的工作能力，同时也降低了工伤的风险。

s.t.

$$\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I Q_{ji} = D_i, \forall i, j \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J Q_{ij} = R_i, \forall i, j \quad (5)$$

$$\sum_{w=1}^W \sum_{j=1}^J Q_{wj} = \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I Q_{ji}, \forall i, j, w \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J Q_{ij} = \sum_{j=1}^J \sum_{p=1}^P Q_{jp} + \sum_{j=1}^J \sum_{l=1}^L Q_{jl}, \forall i, j, p, l \quad (7)$$

$$\sum_{s=1}^S \sum_{w=1}^W \sum_{p=1}^P Q_{sw} + Q_{pw} \leq ca_w, \forall s, w \quad (8)$$

$$\alpha \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J Q_{ij} \leq ca_l, \forall w, j, l \quad (9)$$

$$\beta \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J Q_{ij} \leq ca_p, \forall w, j, p \quad (10)$$

$$\sum_{w=1}^W \sum_{j=1}^J Q_{wj} \leq ca_j, \forall w, j \quad (11)$$

$$\sum_{w=1}^W X_w \geq 1 \quad (12)$$

$$\sum_{j=1}^J X_j \geq 1 \quad (13)$$

$$\sum_{p=1}^P X_p \geq 1 \quad (14)$$

$$\sum_{l=1}^L X_l \geq 1 \quad (15)$$

$$\sum_{s=1}^S \sum_{w=1}^W \sum_{j=1}^J \sum_{p=1}^P \sum_{l=1}^L K_{sw} K_{wj} K_{jp} K_{jl} K_{ji} K_{ij} K_{pw} \geq 0 \quad (16)$$

$$Q_{sw}, Q_{wj}, Q_{jp}, Q_{jl}, Q_{pw}, Q_{ji} \geq 0 \quad (17)$$

式(4)~(7)表示闭环供应链网络中的货物流量均衡约束; 式(8)~(11)分别表示仓库、回收加工厂、处理厂和中转中心的容量约束; 式(12)~(15)表示闭环供应链网络中至少有一个仓库、中转中心、处理中心和回收加工厂; 式(16)表示在整个闭环供应链网络的运输过程中至少有一条线路被完整地地完成; 式(17)表示供应系统中的运输量是非负的整数。

2 模型求解

2.1 模糊机会约束规划

为了解决模型中存在的不确定问题, 减少模糊参数对网络优化的影响, 采用模糊机会约束规划的方法(FCCP), 将模型中的模糊约束转化为等价的清晰式。将需求量和退货量看作三角模糊参数, 即 $\tilde{D} = (D_{i1}, D_{i2}, D_{i3})$, $\tilde{R} = (R_{i1}, R_{i2}, R_{i3})$, 其模糊隶属函数如式(18)所示, 模糊隶属函数图像如图2所示。

$$\left\{ \begin{aligned} U_{\tilde{D}_1} &= \begin{cases} \frac{t-D_{i1}}{D_{i2}-D_{i1}}, & t \in [D_{i1}, D_{i2}] \\ \frac{D_{i3}-t}{D_{i3}-D_{i2}}, & t \in [D_{i2}, D_{i3}] \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \\ U_{\tilde{R}_1} &= \begin{cases} \frac{t-R_{i1}}{R_{i2}-R_{i1}}, & t \in [R_{i1}, R_{i2}] \\ \frac{R_{i3}-t}{R_{i3}-R_{i2}}, & t \in [R_{i2}, R_{i3}] \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \end{aligned} \right. \quad (18)$$

根据模糊机会约束规划方法, 有以下定义:

$$\begin{cases} P\{z(x) \geq \tilde{r}\} = \sup\{U_r(l) | l \leq z(x)\} \\ P\{z(x) \leq \tilde{r}\} = \sup\{U_r(l) | l \geq z(x)\} \\ P\{z(x) = \tilde{r}\} = U_r(z(x)) \end{cases}$$

式中: $P\{\cdot\}$ 表示 $\{\cdot\}$ 事件的可能性; $z(x)$ 表示 x 的

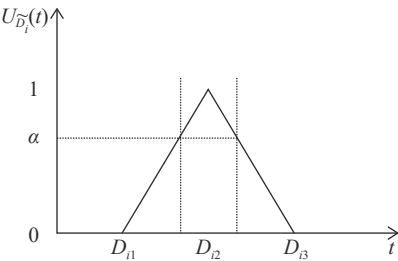


图2 模糊隶属函数
Fig. 2 Fuzzy membership function

函数; $\sup\{\cdot\}$ 表示 $\{\cdot\}$ 事件的最小上界值; U_r 表示模糊变量对应的模糊隶属函数; $\tilde{r}$ 表示模糊变量。

从以上定义可推出 FCCP 的相关引理如下: 若三角模糊数 r 为 $(r, r, \tilde{r})$, 则对任意给定的置信水平 $\alpha(0 \leq \alpha \leq 1)$, 当且仅当满足特定条件 $\begin{cases} z(x) \geq (1-\alpha)r + \alpha\tilde{r} \\ z(x) \leq (1-\alpha)\tilde{r} + \alpha r \end{cases}$ 时, 有 $P\{\tilde{r} = z\} \geq \alpha$ 成立^[17]。

此处字母符号为模糊机会约束清晰化的推导过程所使用, 与模型所用的符号相互独立。

根据引理, 约束(4), (5)可转换为如下清晰等价约束:

$$\begin{cases} Q_{ji} \geq (1-\alpha^d)D_{i1} + \alpha^d D_{i2} \\ Q_{ji} \leq (1-\alpha^d)D_{i3} + \alpha^d D_{i2} \end{cases} \quad (19)$$

此时, $P\{Q_{ji} = D_i\} \geq \alpha^d$ 。

$$\begin{cases} Q_{ji} \geq (1-\alpha^r)R_{i1} + \alpha^r R_{i2} \\ Q_{ji} \leq (1-\alpha^r)R_{i3} + \alpha^r R_{i2} \end{cases} \quad (20)$$

此时, $P\{Q_{ji} = R_i\} \geq \alpha^r$ 。

式中, α^d 和 α^r 分别为需求和回收的三角模糊数。

2.2 多目标问题处理

本文研究的是一个目标不一致的多目标问题, 相较于单目标问题来说多目标的各子目标间可能存在冲突, 即一个目标有较好的表现可能会导致其他子目标的表现不佳^[18]。为了获得模型的 Pareto 最优解, 通过 LP 指标法来将原多目标问题转换为单目标优化模型求解。根据文献^[19], 用 E_1^*, E_2^*, E_3^* 分别表示 3 个子目标 E_1, E_2, E_3 的理想解, $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ 表示 3 个子目标对应的权重。从而, 本文的多目标模型可被等价转换为如下 LP 指标式:

$$E_{4min} = \omega_1 \frac{E_1 - E_1^*}{E_1^*} + \omega_2 \frac{E_2 - E_2^*}{E_2^*} + \omega_3 \frac{E_3 - E_3^*}{E_3^*} \quad (21)$$

其中, 各子目标函数的权重大小可以根据企业的实际情况来确定其优先级。如果更注重经济目标, 则将 ω_1 取较大值, 若更加关心环境问题或者社会效益则分别提高 E_2 和 E_3 的权重值。

2.3 遗传算法和粒子群算法

2.3.1 遗传算法编写过程

遗传算法是模拟基因重组和进化的元启发式算法, 它因其具有高效的全局搜索能力而被广泛应用, 尤其是可解决网络设计、路径规划、设施选址等复杂问题^[20-21]。本文利用 GA 来解决模糊环境下的多目标闭环供应链网络设计、选址和路径规划问题, 具体操作分为如下几个步骤。

a. 编码: 在生物进化过程中, 每个生物体都

有自己独一无二的基因序列，本文的染色体数组反映了设施 W , J , P , L 是否建立、车辆是否在路线 K 上运输，染色体如图 3 和图 4 所示。在 GA 的过程中，自动确定仓库、中转中心、回收加工厂以及处理中心是否开放并规划相应路线。

另一方面，因为本文要解决的是一个多目标问题，所以通过不同的编码序列来表示各种多目标组合。本文用 $E = \{E^1, E^2, E^3, \dots, E^n\}$ 来表示多目标集合，其中， $E^1, E^2, E^3, \dots, E^n$ 表示集合中的 n 个多目标组合，而根据模型，每个多目标组合又包

W		J			P		L	
1	0	1	1	0	1	0	1	0

图 3 染色体 1
Fig. 3 Chromosome 1

$V(K)$ 1 2 $\dots$ 6				$JL(K)$ 1 2 $\dots$ 48				$LJ(K)$ 1 2 $\dots$ 28				$II'(K)$ 1 2 $\dots$ 48			
1	0	$\dots$	1	1	0	$\dots$	1	1	0	$\dots$	1	1	0	$\dots$	1

图 4 染色体 2
Fig. 4 Chromosome 2

多目标集合	E^1			E^2			$\dots$	E^n		
多目标组合子目标	E_1^1	E_2^1	E_3^1	E_1^2	E_2^2	E_3^2	$\dots$	E_1^n	E_2^n	E_3^n
代码	100	010	001	101	001	111	$\dots$	011	000	110

图 5 染色体组 3
Fig.5 Chromosome 3

括 3 个子目标 E_1^n, E_2^n, E_3^n ，其子目标矩阵对应的编码如图 5 所示。

b. 适应度评估与选择：首先，对子目标进行适应度评估，在满足约束(4)~(17)，(22)~(24)的条件下，利用目标函数(1)，(2)，(3)，(21)计算初始本体的适应度值；其次，使用轮盘赌策略再次进行选择和优胜劣汰。

c. 交叉和变异：交叉操作生成的新子代能同时继承其父母的基因，从而也具备了相对更高的适应度值；变异发生的概率非常小，本文染色体变异概率为 0.05，个体的基因有一定的概率发生变异，从而成为适应度值更高的个体。交叉和变异保障了遗传算法局部搜索的能力。

d. 终止迭代：在算法进程中达到预设的最大迭代次数 400 时，即可终止迭代。否则跳转至步骤 b 继续优化。

2.3.2 粒子群算法编写过程

粒子群算法是源于鸟群和鱼群群体运动行为而形成的一种群体智能优化算法，因其具有操作简单、参数少、收敛速度较快^[22]等优点，被广泛应用于物流网络构建、配送车辆路径规划等问题中搜索近似最优解^[23]。

- PSO 具体步骤如下：
- a. 随机初始化粒子的速度和位置以及算法的各项基本参数。
 - b. 根据目标函数(1)~(3)得到所有粒子的适

应度值。

c. 交叉并不断更新迭代粒子的速度和位置并比较，若当前适应度值大于自身最好的适应度值，则设置当前位置为 P_{best} ；若本次迭代后，所有粒子中最优的适应度值大于先前的最好适应度值，则设置群体最优位置为 G_{best} 。

d. 根据约束条件(4)~(17)，(22)~(24)更新粒子位置和速度。

e. 若粒子达到最优适应度值，终止算法，否则转向步骤 b，本文设置最大迭代次数为 400，粒子数量为 50。

3 算 例

3.1 数据来源

以上海市某经营蔬果的易腐品企业为例，通过对企业进行调查，选择一个易腐品供应商坐标为 (2.5, 4.2)，两个仓库位置坐标为 w_1 (4.5, 6.2)， w_2 (5.1, 17.3)，3 个候选中转中心位置坐标为 j_1 (5.5, 5.0)， j_2 (6.7, 7.3)， j_3 (7.7, 3.3)，两个候选的回收加工厂的位置坐标为 p_1 (1.6, 3.9)， p_2 (1.1, 5.1)，两个候选的处理中心位置坐标为 l_1 (2.7, 7.0)， l_2 (1.5, 8.0)。零售店位置坐标及需求和退货量的三角模糊值如表 1 所示，各节点的位置由谷歌地图得到。相关参数数值见表 2。

易腐品闭环供应链网络中的任何一个节点、

表 1 零售商位置坐标及需求、退货模糊量

Tab.1 Location coordinates of retailers and fuzzy quantity of demand and return

编号	坐标	D_i	R_i
I_1	(5.6, 4.4)	16.0	2.6
I_2	(6.5, 9.7)	16.8	2.3
I_3	(10.5, 5.3)	22.5	3.5
I_4	(3.3, 9.2)	18.4	3.0
I_5	(13.2, 7.7)	17.2	2.8

设施或者路径中断都会对供应链系统造成严重影响。为评估所提出的缓解中断风险措施在易腐品闭环供应链网络系统中的表现,运用模型在 4 种不同的情境下考察该闭环供应链网络中的多目标计算结果、设施选址和路径规划,其中情境 1 为供应链网络不中断的情况,情境 2 为仓库 w_1 设施运营中断,情境 3 为仓库 w_1 与中转中心 j_2 之间的配送路径中断,情境 4 为仓库 w_1 运营以及仓库 w_1 与中转中心 j_2 之间的配送路径同时中断的情况。

另一方面,为考虑易腐品需求量与退货量的置信水平对最优策略的影响,采用均匀分布法对 α^d 和 α^r 分别赋值 70%, 80%, 90%, 然后将两类模糊参数的置信水平两两交叉,生成 9 种不同的情况($\alpha^d=70\%$, $\alpha^r=70\%$; $\alpha^d=70\%$, $\alpha^r=80\%$; $\alpha^d=70\%$, $\alpha^r=90\%$; $\alpha^d=80\%$, $\alpha^r=70\%$; $\alpha^d=80\%$, $\alpha^r=80\%$; $\alpha^d=80\%$, $\alpha^r=90\%$; $\alpha^d=90\%$, $\alpha^r=70\%$; $\alpha^d=90\%$, $\alpha^r=80\%$; $\alpha^d=90\%$, $\alpha^r=90\%$)。

3.2 结果分析

运用 Matlab2018b 针对上文提到的 4 种情境分别编写 GA 与 PSO 代码,将 PSO 与 GA 的迭代曲线进行对比后,发现两者差距很小,为了验证了双算法的有效性,使用优化软件 CPLEX 精确求解。其中,以 GA 为例的各场景目标优化结果如表 3 所示,各场景的多目标最优路径如图 6~9 所示;PSO 与 GA 分别对应的迭代满意度如图 10、11 所示;选择不同缓解措施的闭环供应链网络在不同场景下的多目标表现结果如表 4 所示;不同置信水平下,PSO 与 GA 算法对应的各目标优化结果如表 5 所示。

由表 3 可知,从多目标角度分析结果可得: a. 在所提出的 4 种情境下,相较于单独优化经济目标的情况,多目标最优组合中的经济成本都较高,但都低于该情境下单独优化环境目标和单独

表 2 相关参数取值

Tab.2 Values of relevant parameters

参数	取值	参数	取值
F_s	50000 元	O_s	55000 元
F_{w1}	23000 元	O_{w1}	21000 元
F_{w2}	31000 元	O_{w2}	26000 元
F_{j1}	41000 元	O_{j1}	24000 元
F_{j2}	52000 元	O_{j2}	27000 元
F_{j3}	56000 元	O_{j3}	35000 元
F_{p1}	64000 元	O_{p1}	33000 元
F_{p2}	67000 元	O_{p2}	39000 元
F_{l1}	26000 元	O_{l1}	20000 元
F_{l2}	30000 元	O_{l2}	28000 元
ma_{w1}	12000 元	ω_r	0.6
ma_{w2}	23000 元	ω_H	0.4
ma_{j1}	35000 元	α	0.3
ma_{j2}	42000 元	β	0.7
ma_{j3}	45000 元	ca_{w1}	15 t
ma_{p1}	53000 元	ca_{w2}	17 t
ma_{p2}	56000 元	ca_{j1}	18 t
ma_{l1}	15000 元	ca_{j2}	22 t
ma_{l2}	21000 元	ca_{j3}	26 t
hr_{w1}	12000 元	ca_{p1}	20 t
hr_{w2}	15000 元	ca_{p2}	20 t
δ_{w1}	20000 元	ca_{l1}	25 t
δ_{w2}	20000 元	ca_{l2}	22 t
qCO_2	200 g/km	G	50 元
H_{w1}	240 h	f_{w1}	140 人
H_{w2}	240 h	f_{w2}	130 人
H_{j1}	160 h	f_{j1}	150 人
H_{j2}	160 h	f_{j2}	140 人
H_{j3}	160 h	f_{j3}	160 人
H_{p1}	100 h	f_{p1}	125 人
H_{p2}	120 h	f_{p2}	120 人
H_{l1}	160 h	f_{l1}	90 人
H_{l2}	160 h	f_{l2}	95 人

优化社会目标时的经济成本。b. 相较于单独优化环境目标的情况,多目标最优组合中的环境影响更大,但同时也具有更低的经济成本和社会效益。c. 多目标最优组合中社会效益均小于各情境

表 3 各目标最优 GA 计算结果

Tab.3 Optimal GA calculation results of each target

情境	经济成本最小	环境影响最小	社会效益最大	多目标最优
情境1	(1903281, 213026, 6.1)	(2610020, 168900, 6.2)	(2743980, 192000, 8.6)	(2100100, 190130, 7.9)
情境2	(1954370, 217648, 4.3)	(2430205, 174531, 7.0)	(2610023, 219310, 8.7)	(2270301, 197000, 7.4)
情境3	(1940500, 234680, 5.5)	(2521083, 183030, 7.1)	(2881832, 214201, 8.9)	(2010302, 197070, 7.6)
情境4	(2014870, 265392, 3.4)	(2781368, 199700, 6.3)	(2792657, 234542, 8.7)	(2280703, 209200, 7.5)

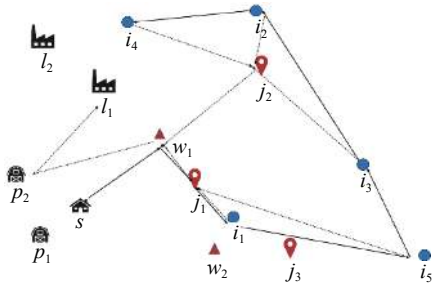


图 6 情境 1 多目标最优

Fig. 6 Multi-objective optimization of scenario 1

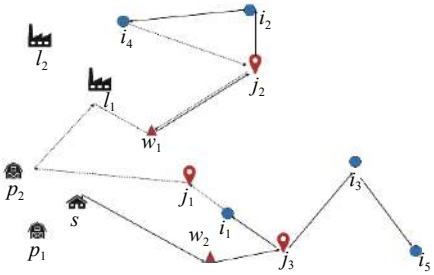


图 7 情境 2 多目标最优

Fig. 7 Multi-objective optimization of scenario 2

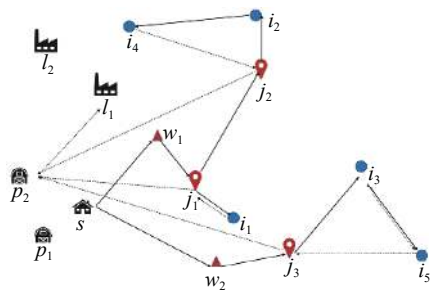


图 8 情境 3 多目标最优

Fig. 8 Multi-objective optimization of scenario 3

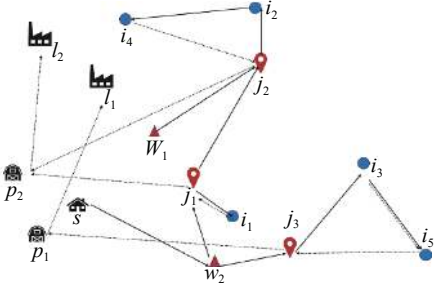


图 9 情境 4 多目标最优

Fig. 9 Multi-objective optimization of scenario 4

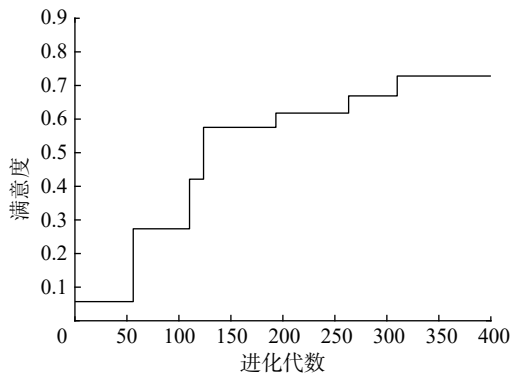


图 10 PSO 收敛性

Fig. 10 Convergence of PSO

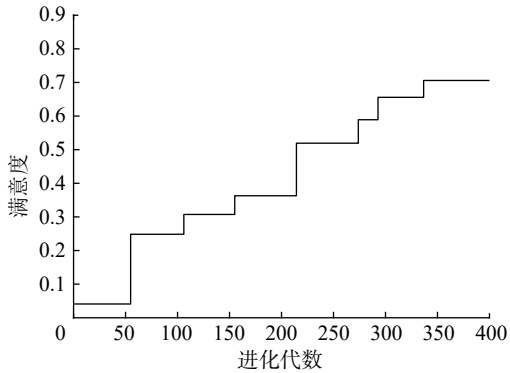


图 11 GA 收敛性

Fig. 11 Convergence of GA

下单独优化社会目标时的社会效益，但高于经济、环境单目标最优时的社会效益水平。d. 根据不同的权重值，使不同的目标函数得以平衡也是多目标优化的目的。

由表 4、图 6~9，从中断的角度分析结果可知：a. 当供应链网络中的某个设施运营中断时采取启用紧急库存的方法能够使供应链网络依然保持正常的运行，从而避免无法满足顾客的需求，

表 4 不同缓解措施下各场景的多目标计算结果

Tab.4 Multi-objective calculation results of different scenarios under different mitigation measures

情境	无缓解措施	紧急库存	横向转运	紧急库存+横向转运
情境1	(1 314 870, 165 392, 7.4)	(1 510 080, 171 139, 7.7)	(1 600 802, 187 031, 7.7)	(2 100 100, 190 130, 7.9)
情境2	(2 554 370, 217 648, 4.3)	(2 030 205, 174 531, 7.0)	(2 110 023, 189 310, 6.7)	(2 270 301, 197 000, 7.4)
情境3	(2 240 500, 234 680, 5.5)	(1 881 832, 194 201, 6.9)	(1 521 083, 173 030, 7.1)	(2 010 302, 197 070, 7.6)
情境4	(2 614 870, 265 392, 3.4)	(2 181 368, 199 700, 6.3)	(2 192 657, 194 542, 6.7)	(2 280 703, 209 200, 7.5)

表 5 PSO 与 GA 对应的不同置信水平各目标优化结果

Tab.5 Optimization results of PSO and GA corresponding to different confidence levels of each objective

置信水平	GA最优	GA候选点	PSO最优	PSO候选点
$\alpha^d=70\%, \alpha^r=70\%$	(1 880 703, 209 200, 7.5)	$j_1w_2p_1l_1$	(1 880 699, 209 190, 7.5)	$j_1w_2p_2l_1$
$\alpha^d=70\%, \alpha^r=80\%$	(1 900 703, 217 205, 7.7)	$j_1w_2p_1l_1$	(1 900 701, 217 199, 7.6)	$j_1w_2p_1l_2$
$\alpha^d=70\%, \alpha^r=90\%$	(2 180 703, 229 200, 8.3)	$j_1w_2p_1l_1$	(2 180 688, 226 993, 8.2)	$j_1w_2p_1l_1$
$\alpha^d=80\%, \alpha^r=70\%$	(1 980 703, 219 260, 7.6)	$j_2w_1p_2l_2$	(1 980 867, 220 261, 7.6)	$j_2w_2p_2l_2$
$\alpha^d=80\%, \alpha^r=80\%$	(1 980 703, 219 200, 8.2)	$j_2w_1p_2l_2$	(1 990 703, 220 121, 8.3)	$j_2w_1p_2l_1$
$\alpha^d=80\%, \alpha^r=90\%$	(2 304 703, 249 200, 8.5)	$j_1w_2p_1l_1$	(2 304 722, 250 209, 8.5)	$j_1w_2p_1l_1$
$\alpha^d=90\%, \alpha^r=70\%$	(2 180 000, 219 505, 8.5)	$j_3w_2p_2l_1$	(2 202 350, 224 347, 8.6)	$j_3w_2p_2l_1$
$\alpha^d=90\%, \alpha^r=80\%$	(2 480 730, 259 200, 8.7)	$j_3w_2p_2l_1$	(2 495 621, 260 211, 8.8)	$j_3w_2p_2l_1$
$\alpha^d=90\%, \alpha^r=90\%$	(2 680 703, 269 200, 9.5)	$j_3w_2p_2l_2$	(2 710 420, 269 830, 9.6)	$j_3w_2p_1l_2$

并且相较于采取横向运转措施的供应链网络而言不需要产生更多的运输成本和碳排放；b. 当某条配送路径发生中断时，采用横向转运措施相较于其他策略而言选址更加灵活，可以选择就近的同等级设施来进行转运，从而有效减少货车的运输距离和碳排放，同时带来更低的经济成本和环境影响；c. 当设施和路径同时发生中断时，同时采取紧急库存和横向转运两种措施的供应链网络综合表现最佳。

由表 5，从模糊角度分析结果可知：a. 消费者的需求量和退货量都随着两者的置信水平增加而增加，这使得网络运输量增加，从而需要更多的成本，碳排放也会随之增加，同时各节点也提供了更多的工作机会；b. 随着置信水平的改变，节点的选址和配送路径的选择也作出了灵活的变化。由此可见，三角模糊量的置信水平变化对选址和路径的最优规划有着显著影响。

4 总结与展望

本文将易腐品作为研究对象，考虑到其闭环供应链网络中可能出现的设施和路径中断的情

况，以最小经济成本、最小环境影响和最大社会效益为目标，在需求量和回收量不确定的条件下建立了易腐品模糊多目标闭环供应链网络模型并进行计算。结果表明：当供应链网络遭遇中断的情况时，采取横向转运、紧急库存等缓解措施可以有效缓解风险，保障供应链网络系统的稳定运行；同时，在保证稳定性的前提下，对闭环供应链网络进行多目标优化也是非常必要的。虽然多目标优化下的供应链各子目标都作出了一定程度上的妥协，但是其总体满意度相比单目标优化而言更高，更能兼顾供应链系统中各目标的平衡，促进供应链网络的可持续发展。

本文在以往研究的基础上考虑了易腐品闭环供应链网络中断的情况以及多目标优化，使得该研究更具现实意义。在未来的研究里，有必要进一步优化中断情况下闭环供应链网络在供应时间和按时交付率等目标上的表现。另外，在算例部分，本文仅针对易腐物进行研究，下一步可考虑研究此模型对于其他类型产品的适用性。

参考文献：

[1] 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, 783.
- [2] MOTA B, GOMES M I, CARVALHO A, et al. Sustainable supply chains: an integrated modeling approach under uncertainty[J]. *Omega*, 2018, 77: 32–57.
- [3] MOTA B, GOMES M I, CARVALHO A, et al. Towards supply chain sustainability: economic, environmental and social design and planning[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 105: 14–27.
- [4] HATEFI S M, JOLAI F. Robust and reliable forward-reverse logistics network design under demand uncertainty and facility disruptions[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2014, 38(9/10): 2630–2647.
- [5] PENG P, SNYDER L V, LIM A, et al. Reliable logistics networks design with facility disruptions[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2011, 45(8): 1190–1211.
- [6] TANG C, TOMLIN B. The power of flexibility for mitigating supply chain risks[J]. *International Journal of Production Economics*, 2008, 116(1): 12–27.
- [7] YAVARI M, ZAKER H. Designing a resilient-green closed loop supply chain network for perishable products by considering disruption in both supply chain and power networks[J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2020, 134: 106680.
- [8] 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.
- [9] 李进. 低碳环境下闭环供应链网络设计多目标鲁棒模糊优化问题[J]. *控制与决策*, 2018, 33(2): 293–300.
- [10] 霍晴晴, 郭健全. TBL 理论下 3C 产品可持续闭环物流网络模糊优化[J]. *计算机工程与应用*, 2020, 56(19): 237–243.
- [11] 李伯棠, 赵刚, 张鑫. 低碳闭环物流网络模糊目标规划模型及算法[J]. *计算机集成制造系统*, 2019, 25(8): 2087–2100.
- [12] DIABAT A, JABBARZADEH A, KHOSROJERDI A. A perishable product supply chain network design problem with reliability and disruption considerations[J]. *International Journal of Production Economics*, 2019, 212: 125–138.
- [13] 章添霞, 李慧. 考虑运输速度和碳排放的易腐食品供应链网络优化研究[J]. *工业工程*, 2016, 19(4): 83–89, 97.
- [14] BIUKI M, KAZEMI A, ALINEZHAD A. An integrated location-routing-inventory model for sustainable design of a perishable products supply chain network[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 260: 120842.
- [15] 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.
- [16] RAMOS T R P, GOMES M I, BARBOSA-PÓVOA A P. Planning a sustainable reverse logistics system: balancing costs with environmental and social concerns[J]. *Omega*, 2014, 48: 60–74.
- [17] KHISHTANDAR S. Simulation based evolutionary algorithms for fuzzy chance-constrained biogas supply chain design[J]. *Applied Energy*, 2019, 236: 183–195.
- [18] RIBEIRO V H A, REYNOSO-MEZA G. A holistic multi-objective optimization design procedure for ensemble member generation and selection[J]. *Applied Soft Computing*, 2019, 83: 105664.
- [19] HASANI A, MOKHTARI H, FATTAHI M. A multi-objective optimization approach for green and resilient supply chain network design: a real-life case study[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 278: 123199.
- [20] 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.
- [21] 胡东方, 吴盘龙. 基于遗传算法的个性化服务型产品设计[J]. *计算机集成制造系统*, 2019, 25(8): 2036–2044.
- [22] 雷开友. 粒子群算法及其应用研究[D]. 重庆: 西南大学, 2006.
- [23] GUO J Q, YA G. Optimal strategies for manufacturing/remanufacturing system with the consideration of recycled products[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2015, 89: 226–234.

(编辑: 丁红艺)