

doi:10.3969/j.issn.1674-4993.2023.07.001

基于 RFID 技术的生鲜产品联合补货与配送 及其投资决策模型研究*

□ 刘亦郑, 艾学轶

(武汉科技大学 管理学院, 湖北 武汉 430065)

【摘要】无线射频识别(RFID)技术可以有效提高生鲜产品供应链的运作效率,实现产品可追溯,降低变质率。然而,RFID 技术需要大量初始投资,如何平衡 RFID 投资与收益是生鲜企业亟待解决的问题。鉴于此,文中在对生鲜产品供应链中 RFID 投资和收益进行量化的基础上,构建生鲜多品种联合补货与配送及其 RFID 投资决策模型,目标是使单位时间内系统总成本最小。通过分析模型的特征,采用飞蛾火焰算法对模型进行求解,并采用数值算例验证了算法的有效性和模型的实用性。实验结果表明:当生鲜产品的需求超过一定的规模时,采用 RFID 投资可以有效地节约系统总成本;产品的补货和配送策略在一定范围内具有很强的鲁棒性。文中丰富了生鲜产品供应链 RFID 投资决策相关的理论研究,为生鲜企业在投资 RFID 技术时如何进行库存管理提供有益参考。

【关键词】RFID 投资;联合补货与配送;生鲜产品;飞蛾火焰算法

【中图分类号】 F274

【文献标识码】 A

【文章编号】 1674-4993(2023)07-0001-07

Research on the Joint Replenishment and Delivery Problem of Fresh Product Based on RFID Technology and Its Investment Decision-making Model

□ LIU Yi-zheng, AI Xue-yi

(School of Management, Wuhan University of Science & Technology, Wuhan 430065, China)

【Abstract】Radio Frequency Identification (RFID) technology can effectively improve the operation efficiency of fresh product supply chain, realize the traceability of product and reduce the deterioration rate. However, RFID technology requires massive initial investment, which makes fresh product enterprises urgently need to balance RFID investment and benefit. In view of this, on the basis of quantifying the RFID investment and benefit of the fresh product supply chain, this paper constructed a multi-item joint replenishment and delivery and RFID investment decision-making model of fresh product, aiming at minimizing the total cost of the system per unit time. After analyzing the characteristics of the model, the moth-flame optimization (MFO) algorithm is chosen to solve the model and a numerical example is used to verify the effectiveness of the algorithm and the practicability of the model. The experimental results show that when the demand for fresh product exceeds a certain scale, RFID investment can effectively save the total cost of the system; the replenishment and delivery strategy of product has strong robustness within a certain range. This study enriches the theoretical research related to the RFID investment strategy of fresh product supply chain, and provides useful references for fresh product enterprises to make inventory decisions when investing in RFID technology.

【Key words】RFID investment; joint replenishment and delivery; fresh product; moth-flame optimization algorithm

1 引言

目前,中国生鲜零售市场规模已超 5 万亿元,并且仍保持高速增长趋势,其中生鲜电商发展迅猛。2020 年中国生鲜电商的市场规模已达到 4584 亿元,较上年增长 64%,到 2023 年将

超万亿元^[1]。如此庞大的需求量,加之生鲜产品种类繁多而且极易变质,生鲜企业的供应链面临着巨大的挑战。由于中国冷链体系不成熟,生鲜产品在整个供应链中因变质而产生的损失达到 20% - 30%^[2],远高于发达国家(约 5%)。同时自新型冠状病毒肺炎爆发以来,食品的新鲜度和安全问题受

【收稿日期】 2023-02-21

* 基金项目:国家自然科学基金青年项目(编号:71901167)

【作者简介】 刘亦郑(1997—),女,湖北武汉人,硕士,研究方向:物流与供应链管理。

艾学轶(1983—),女,湖北随州人,武汉科技大学管理学院副教授,博士,硕士生导师,研究方向:绿色物流与供应链管理,机器学习,运筹优化算法。

到越来越多消费者的高度关注^[3]。因此,企业如何制定有效的策略在保证产品的质量和安全的同时,减少从补货、存储到配送整个过程中产品的损耗,对提高企业利润水平、消费者满意度和节约社会资源有着至关重要的意义。

射频识别(RFID)技术可以有效提高生鲜产品供应链管理。利用RFID技术可以建立食品安全追溯系统^[4],实现生鲜产品从生产到销售的整个流通过程中来源可追溯、信息可查询、责任可追究。另外,RFID技术还可以快速有效地实时检测和分析存储和运输环境中影响生鲜产品新鲜度的温度和湿度等参数^[5],并通过不断调整使产品能长期处在最适宜的环境中,延缓其变质的时间,从而降低损耗产生的成本。在实际中,RFID技术已经被很多主流大型企业用来管理生鲜产品。例如,沃尔玛和特易购通过RFID技术实现和生鲜产品供应商之间的信息共享与协作。然而,RFID并没有得到大规模的应用和推广,一些中小型企业是否投资RFID以及如何投资RFID上被迫采取观望态度,原因在于不知道如何有效地采用RFID技术进行更高效地补货与配送。

目前关于应用RFID技术的研究中,RFID的投资决策模型还没有得到充分建立。王珊珊等^[6]针对库存错放问题,分析了不同渠道优势下双渠道供应链的RFID投资均衡策略。张李浩等^[7]探讨了二级供应链成员采用RFID的决策及融资选择问题。Fu^[8]针对单个生鲜零售商的两级生鲜产品供应链构建二级报童模型,探究投资RFID技术前后的利润差异。李晴晴、王炬香^[9]分别建立分散式和集中式供应链采用与不采用RFID技术时的Stakelberg博弈模型,并分析了RFID技术对生鲜产品供应链企业收益的影响。现有文献大多研究RFID投资对非变质产品供应链总利润的影响,极少探讨生鲜产品供应链管理中的RFID投资价值,其中RFID的成本设定为一个固定成本,没有关注RFID投资对供应链中不同产品产生的不同影响,也没有考虑RFID投资成本可以细分为提升不同环节的效率的多个成本。

在供应链的实际运作中,联合补货与配送(Joint Replenishment and Delivery, JRD)协同策略可以显著地提高库存管理水平和配送效率,从而带来可观的成本缩减和资源节约^[10]。企业不仅可以获得更大的议价能力,还可在更好地保证产品质量的同时快速响应零售商的需求。很多实际案例证明了JRD策略的有效性,例如,京东通过设立区域配送中心、前端配送中心并采用JRD策略,以较低的运营成本建立起能快速满足前端各个配送中心附近消费者需求的高效供应链。许多学者也在不同条件下深入研究JRD问题。王思睿等^[11]设计了一种异质品联合补货-配送协同优化模型,并通过分析模型的Lipschitz连续性等数学性质提出了新的求解框架。Carvajal等^[12]将预算和存储容量限制引入联合补货与配送系统,并利用混合矩阵启发式算法和MA算法求解模型。Cui等^[13]研究了一个涉及随机提前期和需求的联合补货与配送问题,并提出了一种混合微分人工蜂群算法。Liu等^[10]提出

了一种考虑数量折扣的联合补货与配送模型,并将它进一步扩展到存在条件约束的情况,同时采用启发式算法和混合禁忌搜索算法求解模型。上述文献的库存模型都局限于非变质产品,没有考虑生鲜产品易腐的特性对系统产生的影响。

综上,本文针对生鲜产品非立即变质的特征,考虑RFID投资对生鲜产品供应链的效率提升,包括订货效率、JIT效率和保鲜效率,构建生鲜产品联合补货与配送及其RFID投资决策模型;通过分析模型的特征,采用飞蛾火焰算法对模型进行求解,得到最优补货与配送策略、RFID投资策略和最优系统总成本,并将该成本与未采用RFID技术时的成本进行对比;通过对重要参数的敏感性进行分析,得到具有一定现实意义的管理启示。

2 模型构建

2.1 问题描述

本文考虑在一个配送中心和多个零售商环境下,多品种生鲜联合补货与配送及其RFID投资决策模型,目标是实现系统总成本最小化。基于文献^[14],RFID技术应用于生鲜产品供应链的效率提升和收益归纳于表1中。本文模型考虑RFID投资对生鲜产品供应链有三个方面的效率提升:订货效率、JIT效率和保鲜效率。

表1 RFID技术应用于生鲜产品供应链的效率提升和收益

效率因素	供应链低效操作	应用RFID的收益
订货效率	不合格采购商品检测	提升整个采购过程中库存数据的精确性和可视性
	处理假冒伪劣商品	自动计件和精确归整
	处理缺陷商品	自动核实求证
JIT效率	处理过高库存或安全库存	提升提前期管理水平,增强操作能力
	处理缺货	增强库存水平和顾客需求的可视性,提升日需求满足能力
保鲜效率	识别在架的易变质产品	快速识别已变质产品,及时处理,通过相应的设备及时降低变质率
	处理产品库存信息不实	通过货物及时交付缩短产品在库存的时间,降低变质率,提高服务水平
	处理库存损失、缩水、变质和过期无法及时构建有效存储环境	用温度、湿度传感器自动调节易变质产品的温度和湿度,减缓变质速度

2.2 模型假设与符号表示

根据生鲜产品非立即变质的特征,本文作出以下基本假设:

- ①每种产品的需求是恒定的。
- ②补货和配送的提前期均为0,且不允许缺货。
- ③对于生鲜产品 i ,存在一个固定的保鲜期 t_{di} 。在时间区间 $[0, t_{di}]$ 内,产品不发生变质;经过 t_{di} 后,产品以固定的变质率 θ_i 发生变质,且变质部分无法恢复或替换。
- ④每一种产品只能配送至一个零售商处。当某种产品需要配送至多个零售商处时,可以用合适的方式转换为这个假设,如配送至不同的零售商处的这种产品视为不同种的产品。
- ⑤在确定的基本补货周期 $T(T>0)$ 之上,配送中心在 T_i

($T_i = k_i T$) 时从每个供应商处对产品 i 进行补货,在 $\frac{T_i}{f_i}$ 时将产品 i 配送至每个零售商处。

⑥在同时订购多个产品时,每批订单需要支付一项只与订购次数有关的主要订货费用,同时,订单中的每一种产品都会产生一定的订购费用,即次要订货费用。因此,RFID 技术投资成本构成进一步划分为主要订货效率、次要订货效率、JIT 效率和保鲜效率。RFID 效率函数设置原则是:RFID 技术投资越高,其效率提高程度越高,因此降低的运作成本就越多。但是 RFID 投资值具有上限。

⑦对于不同品种的产品,采用 RFID 技术投资对供应链效率提升的程度不同。而联合补货与配送中主要订货成本是所有产品共享的,因此,统一采用相同参数的 RFID 技术投资来提升主要订货效率。

其他符号释义如下:

表 2

符号	释义
n	产品的种类数
D_i	产品 i 的需求
S	配送中心每一次补货的主要订货成本
s_i^r	对于零售商,产品 i 的次要订货成本
s_i^d	对于配送中心,产品 i 的次要订货成本
h_i^r	对于零售商,产品 i 的库存持有成本
h_i^d	对于配送中心,产品 i 的库存持有成本
c_i	产品 i 的变质成本
I_i	产品 i 的 JIT 效率因子
E_i	产品 i 的保鲜效率因子
R_i	产品 i 的次要订货效率因子
R'	主要订货效率因子
C_{Ii}	以提升产品 i 的 JIT 效率为目标的 RFID 投资水平
C_{Ei}	以提升产品 i 的保鲜效率为目标的 RFID 投资水平
C_{Ri}	以提升产品 i 的次要订货效率为目标的 RFID 投资水平
$C_{R'}$	以提升主要订货效率为目标的 RFID 投资水平
k_i	产品 i 的补货频率, $k_i \in N$
f_i	产品 i 的配送频率, $f_i \in N$

基于 Lee 和 Lee^[14] 建立的 RFID 投资决策模型和 Billington^[15] 在确定最优投资时的处理方式,本文针对生鲜产品供应链,引入保鲜效率因子和其对应的 RFID 技术投资,建立 RFID 技术投资保鲜成本和回报之间的关系。这种关系主要体现在基于 RFID 技术的保鲜投资水平和 RFID 在降低变质成本的能力。RFID 投资效率是投资成本的以 e 为底数的指数函数,因此,订货效率函数,JIT 效率函数和保鲜效率函数分别表示为:

$$I_i = V_i + (U_i - V_i)e^{-\lambda_i C_{Ii}}, 0 < V_i \leq U_i \leq 1, V_i < I_i \leq 1 \quad (1)$$

$$R_i = N_i + (M_i - N_i)e^{-\beta_i C_{Ri}}, 0 < N_i \leq M_i \leq 1, N_i < R_i \leq 1 \quad (2)$$

$$E_i = Y_i + (X_i - Y_i)e^{-\alpha_i C_{Ei}}, 0 < Y_i \leq X_i \leq 1, Y_i < E_i \leq 1 \quad (3)$$

$$R' = N' + (M' - N')e^{-\beta' C_{R'}}, 0 < N' \leq M' \leq 1, N' < R' \leq 1 \quad (4)$$

其中,

$0 < V_i \leq U_i \leq 1$, U_i 是投资于产品 i 的最低的 JIT 效率,即

无 RFID 投资时的效率, V_i 是 RFID 技术实施后产品 i 的最高 JIT 效率。

$0 < N_i \leq M_i \leq 1$, M_i 是投资于产品 i 的最低次要订货效率,即无 RFID 投资时的次要订货效率, N_i 是 RFID 技术实施后产品 i 的最高次要订货效率。

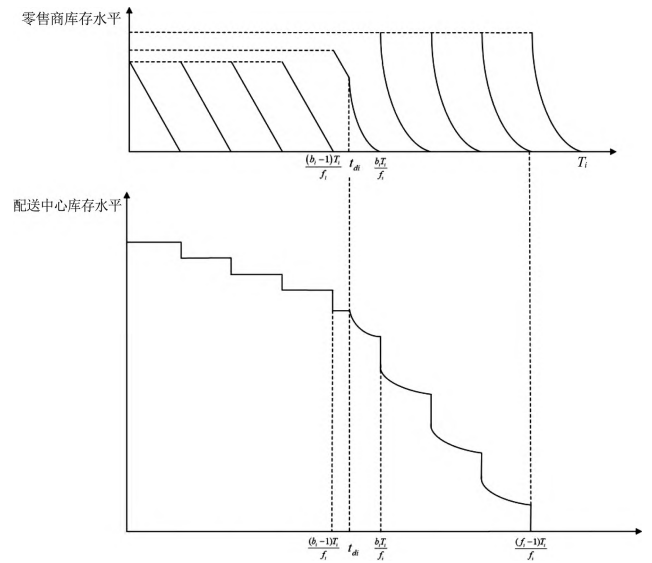
$0 < Y_i \leq X_i \leq 1$, X_i 是投资于产品 i 的最低保鲜效率,即无 RFID 投资时的保鲜效率, Y_i 是 RFID 技术实施后产品 i 的最高保鲜效率。

$0 < N' \leq M' \leq 1$, N' 是 RFID 技术的最低主要订货效率,即无 RFID 投资时的效率, M' 是 RFID 技术实施后的最高主要订货效率。

2.3 数学模型

由于本模型考虑的是多种非立即变质品的联合补货与配送,且每一种产品都是经过各自固定的保鲜期后才开始发生变质的,因此,产品 i 的库存水平随时间变化的情况可以根据 t_{di} 和 T_i 的值划分为两种情况:(1) $T_i > t_{di}$; (2) $T_i \leq t_{di}$ 。

情况 1 当 $T_i > t_{di}$ 时,在产品保鲜期 $[0, t_{di}]$ 内,产品库存水平下降仅因为该时间段内产品需求的消耗;在产品变质期 $[t_{di}, T_i]$ 内,产品库存水平下降同时受产品需求的消耗和产品的变质影响,并在 T_i 时刻下降为 0。根据配送时间段的划分, t_{di} 在 $[\frac{(b_i - 1)T_i}{f_i}, \frac{b_i T_i}{f_i}]$ 内,具体如图 1 所示。

图 1 在情况 1 下产品 i 的库存水平变化图

①库存持有成本。

对于零售商,在保鲜期 $[0, \frac{(b_i - 1)T_i}{f_i}]$ 内,产品 i 的库存在

每个配送周期 $\frac{T_i}{f_i}$ 内仅满足恒定需求 D_i 的消耗即可,因此以第

一个配送周期 $[0, \frac{T_i}{f_i}]$ 为例,产品 i 的库存水平为 $I_{ii}(t) =$

$$\frac{D_i k_i T}{f_i} - D_i t。$$

在保鲜和变质共存期 $[\frac{(b_i-1)T_i}{f_i}, \frac{b_i T_i}{f_i}]$ 内,产品 i 在 $t=t_{di}$ 时刻开始变质,考虑到 RFID 技术投资于保鲜效率,该周期内产品 i 的库存水平为:

$$\frac{dI_{2i}^r(t)}{dt} = \begin{cases} -D_i, & \frac{(b_i-1)k_i T}{f_i} < t \leq t_{di} \\ -D_i - E_i \theta_i I_{2i}^r(t), & t_{di} \leq t \leq \frac{b_i k_i T}{f_i} \end{cases} \quad (5)$$

在 $t=b_i T_i/f_i$ 时刻,产品 i 的库存水平下降至 0。因此 $I_{2i}^r(b_i T_i/f_i)=0$,求解式(5),得到:

$$I_{2i}^r(t) = \begin{cases} \frac{D_i}{E_i \theta_i} [e^{\frac{E_i \theta_i (b_i k_i T}{f_i} - t_{di})} - 1] + D_i(t_{di} - t), & \frac{(b_i-1)k_i T}{f_i} < t \leq t_{di} \\ \frac{D_i}{E_i \theta_i} [e^{\frac{E_i \theta_i (b_i k_i T}{f_i} - t)} - 1], & t_{di} \leq t \leq \frac{b_i k_i T}{f_i} \end{cases} \quad (6)$$

在变质期 $[\frac{b_i T_i}{f_i}, T_i]$ 内,在每个配送周期 $\frac{T_i}{f_i}$ 内库存需要同时满足需求的消耗和变质的损耗,考虑到 RFID 技术投资于保鲜效率,以配送周期 $[\frac{(f_i-1)T_i}{f_i}, T_i]$ 为例,产品 i 的库存水平满足 $I_{3i}^r(t) = \frac{D_i}{E_i \theta_i} [e^{E_i \theta_i (k_i T - t)} - 1]$ 。

结合 $I_{1i}^r(t)$ 、 $I_{2i}^r(t)$ 和 $I_{3i}^r(t)$,同时考虑到 RFID 技术投资于产品的 JIT 效率,对于零售商,单位时间内所有产品的平均库存持有成本为:

$$HC_1^r = \sum_{i=1}^n \frac{I_i h_i^r}{k_i T} [(b_i-1) \int_0^{\frac{k_i T}{f_i}} I_{1i}^r(t) dt + \int_{\frac{(b_i-1)k_i T}{f_i}}^{\frac{b_i k_i T}{f_i}} I_{2i}^r(t) dt + (f_i - b_i) \int_{\frac{(f_i-1)k_i T}{f_i}}^{\frac{k_i T}{f_i}} I_{3i}^r(t) dt] \\ = \sum_{i=1}^n \frac{I_i h_i^r}{k_i T} \left\{ \frac{(b_i-1)k_i^2 T^2 D_i}{2f_i^2} + \frac{1}{2} D_i \left(t_{di} - \frac{(b_i-1)k_i T}{f_i} \right)^2 \right. \\ \left. + \frac{D_i}{E_i \theta_i} \left[\left(t_{di} - \frac{(b_i-1)k_i T}{f_i} \right) \left(e^{\frac{E_i \theta_i (b_i k_i T}{f_i} - t_{di})} - 1 \right) - (k_i T - t_{di}) \right] \right. \\ \left. + \frac{D_i}{E_i^2 \theta_i^2} \left[e^{\frac{E_i \theta_i (b_i k_i T}{f_i} - t_{di})} - 1 + (f_i - b_i) \left(e^{\frac{E_i \theta_i k_i T}{f_i}} - 1 \right) \right] \right\} \quad (7)$$

对于配送中心,在每个补货周期内,其库存水平从最大库存量随着每次配送的发生逐渐下降,直至最后一次配送发生时时刻下降至 0。同时,在 $t=t_{di}$ 时刻之后,存放的产品同样开始变质。以 $(\frac{(f_i-2)T_i}{f_i}, \frac{(f_i-1)T_i}{f_i})$ 为例,考虑到存放产品变质的损耗和 RFID 技术投资于保鲜效率,配送中心的库存水平满足:

$$\frac{dI_i^d(t)}{dt} = -E_i \theta_i I_i^d(t), \quad \frac{(f_i-2)k_i T}{f_i} < t < \frac{(f_i-1)k_i T}{f_i} \quad (8)$$

在 $[\frac{b_i T_i}{f_i}, T_i]$ 内,配送中心在每个配送周期均发送 $\frac{D_i}{E_i \theta_i} (e^{\frac{E_i \theta_i k_i T}{f_i}} - 1)$ 的产品 i 至零售商处。因此,在 $t=(f_i-1)T_i/f_i$ 配送前时刻,配送中心的库存量为 $I_i^d(\frac{(f_i-1)T_i}{f_i}) = \frac{D_i}{E_i \theta_i} (e^{\frac{E_i \theta_i k_i T}{f_i}} - 1)$,结合式(8)可得:

-1),结合式(8)可得:

$$I_i^d(t) = \frac{D_i}{E_i \theta_i} [e^{\frac{E_i \theta_i k_i T}{f_i}} - e^{\frac{E_i \theta_i (f_i-1)k_i T}{f_i}}] e^{-E_i \theta_i t}, \quad \frac{(f_i-2)k_i T}{f_i} < t < \frac{(f_i-1)k_i T}{f_i} \quad (9)$$

由式(9)可得,在 $t=(f_i-2)T_i/f_i$ 配送前时刻,产品 i 的库存量为 $I_i^d(\frac{(f_i-2)T_i}{f_i}) = \frac{D_i}{E_i \theta_i} (e^{\frac{E_i \theta_i 2k_i T}{f_i}} - 1)$ 。以此类推,在 $t=b_i T_i/f_i$ 配送前时刻,产品 i 的库存量为 $I_i^d(\frac{b_i T_i}{f_i}) = \frac{D_i}{E_i \theta_i} (e^{\frac{E_i \theta_i (f_i-b_i)k_i T}{f_i}} - 1)$ 。由此可得,在 $(t_{di}, \frac{b_i T_i}{f_i})$ 内,产品 i 的库存水平满足 $I_i^d(t) = \frac{D_i}{E_i \theta_i} (e^{\frac{E_i \theta_i k_i T}{f_i}} - e^{\frac{E_i \theta_i b_i k_i T}{f_i}}) e^{-E_i \theta_i t}$ 。

根据上文可知,配送中心在第 b_i 次配送时,配送 $\frac{d_i}{E_i \theta_i} [e^{\frac{E_i \theta_i (b_i k_i T}{f_i} - t_{di})} - 1] + D_i [t_{di} - \frac{(b_i-1)k_i T}{f_i}]$ 时,配送的产品 i 至零售商处。在产品变质前,配送中心在每个配送周期 $\frac{T_i}{f_i}$ 中均配送 $\frac{D_i k_i T}{f_i}$ 的产品 i 至零售商处。因此,配送中心的最大库存水平为:

$$I_{i\max}^d = \frac{D_i}{E_i \theta_i} [e^{\frac{E_i \theta_i (k_i T - t_{di})}{f_i}} - 1] + D_i t_{di} \quad (10)$$

考虑到 RFID 技术投资于产品的 JIT 效率,对于配送中心,单位时间内所有产品的平均库存持有成本为:

$$HC_1^d = \sum_{i=1}^n \frac{I_i h_i^d}{k_i T} \int_0^{\frac{k_i T}{f_i}} I_i^d(t) dt \\ = \sum_{i=1}^n \frac{I_i h_i^d}{k_i T} \left(\int_0^{\frac{t_{di}}{f_i}} I_i^d(t) dt + \int_{\frac{t_{di}}{f_i}}^{\frac{b_i k_i T}{f_i}} I_i^d(t) dt + \int_{\frac{b_i k_i T}{f_i}}^{\frac{k_i T}{f_i}} I_i^d(t) dt \right) \quad (11)$$

$$= \sum_{i=1}^n \frac{I_i h_i^d D_i}{k_i T} \left\{ \frac{t_{di}}{2E_i \theta_i} \left[2e^{\frac{E_i \theta_i (k_i T - t_{di})}{f_i}} - e^{\frac{E_i \theta_i (b_i k_i T - t_{di})}{f_i}} - 1 \right] + \frac{t_{di}^2}{2} - \frac{k_i T t_{di}}{2f_i} \right. \\ \left. + \frac{1}{E_i^2 \theta_i^2} \left[e^{\frac{E_i \theta_i (k_i T - t_{di})}{f_i}} - e^{\frac{E_i \theta_i (b_i k_i T - t_{di})}{f_i}} - (f_i - b_i) \left(e^{\frac{E_i \theta_i k_i T}{f_i}} - 1 \right) \right] \right\}$$

因此,系统在单位时间内所有产品的平均库存持有成本为: $HC_1 = HC_1^r + HC_1^d$ 。

$$② \text{总订货成本。}$$

$$\text{考虑到 RFID 技术投资于订货效率,系统在单位时间内的总订货成本为:}$$

$$OC_1 = \frac{R'S}{T} + \sum_{i=1}^n \frac{R_i S_i^d}{k_i T} + \sum_{i=1}^n \frac{R_i f_i S_i^r}{k_i T} \quad (12)$$

$$③ \text{变质成本。}$$

系统在单位时间内所有产品的平均变质成本为:

$$DC_1 = \sum_{i=1}^n \frac{c_i}{k_i T} (I_{i\max}^d - D_i T_i) = \sum_{i=1}^n \frac{c_i D_i}{k_i T} \left[\frac{1}{E_i \theta_i} [e^{\frac{E_i \theta_i (k_i T - t_{di})}{f_i}} - 1] + t_{di} - k_i T \right] \quad (13)$$

于是,当 $T_i > t_{di}$ 时,考虑到 RFID 技术投资,系统在单位时间内的总成本为:

$$TC_1 = HC_1 + OC_1 + DC_1 + \sum_{i=1}^n (C_{fi} + C_{Ri} + C_{Ei}) + C_{R'}$$

$$TC_1(k_i, T, f_i, I_i, R_i, E_i, R', C_{fi}, C_{Ri}, C_{Ei}, C_{R'}) = \frac{R'S}{k_i T} + \sum_{i=1}^n \frac{R_i s_i^d}{k_i T} + \sum_{i=1}^n \frac{R_i f_i s_i^r}{k_i T}$$

$$+ \sum_{i=1}^n \frac{I_i h_i^d D_i}{k_i T} \left\{ \frac{t_{di}}{2E_i \theta_i} \left[2e^{E_i \theta_i (k_i T - t_{di})} - e^{E_i \theta_i \left(\frac{b_i k_i T}{f_i} - t_{di} \right)} - 1 \right] + \frac{t_{di}^2}{2} - \frac{k_i T t_{di}}{2f_i} \right\}$$

$$+ \frac{1}{E_i^2 \theta_i^2} \left[e^{E_i \theta_i (k_i T - t_{di})} - e^{E_i \theta_i \left(\frac{b_i k_i T}{f_i} - t_{di} \right)} \right] - (f_i - b_i) \left(e^{E_i \theta_i \frac{k_i T}{f_i}} - 1 \right) \right]$$

$$+ \frac{1}{E_i^2 \theta_i^2} \left[e^{E_i \theta_i \left(\frac{b_i k_i T}{f_i} - t_{di} \right)} - 1 + (f_i - b_i) \left(e^{E_i \theta_i \frac{k_i T}{f_i}} - 1 \right) \right]$$

$$+ \sum_{i=1}^n \frac{c_i D_i}{k_i T} \left[\frac{1}{E_i \theta_i} [e^{E_i \theta_i (k_i T - t_{di})} - 1] + t_{di} - k_i T \right] + \sum_{i=1}^n (C_{fi} + C_{Ri} + C_{Ei}) + C_{R'}$$

情况 2 当 $T_i \leq t_{di}$ 时,即产品的补货周期小于或等于产品的保鲜时间,零售商可以在产品发生变质前售卖所有产品。因此在这种情况下,不需要考虑产品变质带来的影响,其模型为基础 JRD 模型,具体如图 2 所示。

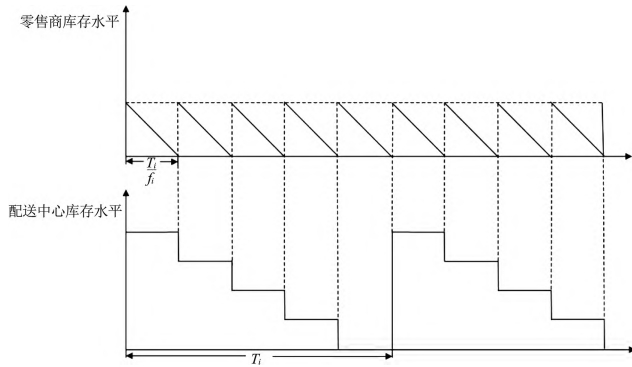


图 2 在情况 2 下产品 i 的库存水平变化图

基于 RFID 技术投资的系统在单位时间内的平均库存持有成本为:

$$HC_2 = \sum_{i=1}^n \frac{I_i (f_i - 1) k_i T D_i h_i^d}{2f_i} + \sum_{i=1}^n \frac{I_i k_i T D_i h_i^r}{2f_i} \quad (15)$$

基于 RFID 技术投资的系统在单位时间内的总订货成本为:

$$OC_2 = \frac{R'S}{k_i T} + \sum_{i=1}^n \frac{R_i s_i^d}{k_i T} + \sum_{i=1}^n \frac{R_i f_i s_i^r}{k_i T} \quad (16)$$

于是,考虑到 RFID 技术投资,系统在单位时间内的总成本为:

本为:

$$TC_2 = HC_2 + OC_2 + \sum_{i=1}^n (C_{fi} + C_{Ri}) + C_{R'}$$

$$TC_2(k_i, T, f_i, I_i, R_i, R', C_{fi}, C_{Ri}, C_{R'}) = \frac{R'S}{k_i T} + \sum_{i=1}^n \frac{R_i s_i^d}{k_i T} + \sum_{i=1}^n \frac{R_i f_i s_i^r}{k_i T} + \sum_{i=1}^n \frac{I_i (f_i - 1) k_i T D_i h_i^d}{2f_i}$$

$$+ \sum_{i=1}^n \frac{I_i k_i T D_i h_i^r}{2f_i} + \sum_{i=1}^n (C_{fi} + C_{Ri}) + C_{R'}$$

综合上述 2 种情况,结合 $T_i = k_i T$,系统在单位时间内的总成本可表示为:

$$\min TC(k_i, T, f_i, I_i, R_i, R', C_{fi}, C_{Ri}, C_{Ei}, C_{R'}) = \frac{R'S}{k_i T} + \sum_{i=1}^n \frac{R_i s_i^d}{k_i T} + \sum_{i=1}^n \frac{R_i f_i s_i^r}{k_i T}$$

$$+ \sum_{i=1}^n \frac{I_i h_i^d D_i}{k_i T} \left\{ \frac{t_{di}}{2E_i \theta_i} \left[2e^{E_i \theta_i (k_i T - t_{di})} - e^{E_i \theta_i \left(\frac{b_i k_i T}{f_i} - t_{di} \right)} - 1 \right] + \frac{t_{di}^2}{2} - \frac{k_i T t_{di}}{2f_i} \right\}$$

$$+ \frac{1}{E_i^2 \theta_i^2} \left[e^{E_i \theta_i (k_i T - t_{di})} - e^{E_i \theta_i \left(\frac{b_i k_i T}{f_i} - t_{di} \right)} - (f_i - b_i) \left(e^{E_i \theta_i \frac{k_i T}{f_i}} - 1 \right) \right]$$

$$+ \frac{1}{E_i^2 \theta_i^2} \left[e^{E_i \theta_i \left(\frac{b_i k_i T}{f_i} - t_{di} \right)} - 1 + (f_i - b_i) \left(e^{E_i \theta_i \frac{k_i T}{f_i}} - 1 \right) \right]$$

$$+ \sum_{i=1}^n \frac{c_i D_i}{k_i T} \left[\frac{1}{E_i \theta_i} [e^{E_i \theta_i (k_i T - t_{di})} - 1] + t_{di} - k_i T \right] + \sum_{i=1}^n (C_{fi} + C_{Ri} + C_{Ei}) + C_{R'}$$

其中

$T > 0$;

$f_i \in N^n$ and $f_i = 1$ for some $1 \leq i \leq n$; $k_i \in N^n$ and $k_i = 1$ for some $1 \leq i \leq n$;

$I_i = L_i + (U_i - L_i) e^{-\lambda_i C_{fi}}, 0 < L_i \leq U_i \leq 1, L_i < I_i \leq 1$

$R_i = N_i + (M_i - N_i) e^{-\beta_i C_{Ri}}, 0 < N_i \leq M_i \leq 1, N_i < R_i \leq 1$

$E_i = Y_i + (X_i - Y_i) e^{-\alpha_i C_{Ei}}, 0 < Y_i \leq X_i \leq 1, Y_i < E_i \leq 1$

$R' = N' + (M' - N') e^{-\beta' C_{R'}}, 0 < N' \leq M' \leq 1, N' < R' \leq 1$

3 算例分析

由于 JRD 问题是 NP 难题,且目标函数 (18) 是混合整数非线性的分段函数,高纬度的指数函数使求解变得更加复杂,无法用常规的非线性规划方法求解,因此,本文采用智能优化算法对模型进行求解。通过选择 3 种元启发式算法分别求解目标函数,并选取性能最好的算法。进一步,对重要参数进行敏感性分析,得到一定的管理启示。所有实验通过 MATLAB 实现,计算机配置为 CPU@ 2.40GHz 和 16.00GB RAM。

3.1 仿真结果与分析

本文选取遗传算法 (genetic algorithm, GA)^[16]、人工蜂群算法 (artificial bee colony algorithm, ABC)^[17] 和飞蛾火焰算法 (moth-flame optimization algorithm, MFO)^[18] 三种算法分别求解模型,并将实验结果进行对比。数值算例的部分参数来源

于 Cha 等^[19]和 Ai 等^[20],具体参数设置见表 2 和表 3。所有算法的参数设置基于原始文献,最大迭代次数为 500,初始种群大小为 30,每种算法分别运行 50 次后取最优解。实验结果如表 4 所示。

表 2 基本参数取值

产品	D_i	t_{di}	θ_i	s_i^r	s_i^d	h_i^r	h_i^d	c_i	S
1	600	0.0411	0.02	5	45	0.5	1	3	10
2	900	0.0822	0.02	19.4	46	1.94	1	11.64	
3	2400	0	0.02	9.5	47	0.95	1	5.7	
4	12000	0.0411	0.02	8.5	44	0.85	1	5.1	
5	18000	0.411	0.02	2.2	45	0.22	1	1.32	
6	3000	0.0822	0.02	8.2	47	0.82	1	4.92	

表 3 RFID 投资参数取值

参数	U_i	L_i	M_i	N_i	X_i	Y_i	α_i	β_i	γ_i	M'	N'	β'
	1.0	0.2	1.0	0.3	1.0	0.3	0.08	0.02	0.05	1	0.3	0.02

由表 4 可知,三种算法中 ABC 和 MFO 所得的结果均优于 GA,其中 MFO 可以在更短的时间内获得更小的最优系统总成本,因此,本文选取 MFO 算法进行后续的实验。表 5 为在相同的实验条件和参数设置的情况下系统不投资 RFID 技术时的结果。综合表 4 和表 5 可发现,系统选择不投资 RFID 技术所得的最优系统总成本 3535.98 > 2031.90,显然相较于 RFID 技术投资产生的成本,应用 RFID 技术能带来的效益更高。可见,采用 RFID 技术可以有效降低系统的最优总成本。另外,尽管某些产品用于提升效率的 RFID 最优投资值为 0,但是对于整个多产品系统而言,采用 RFID 技术能有效节约总成本,它的效率提升针对的是整个系统,而不仅仅是某个产品或者某个运营环节。

表 4 投资 RFID 时数值算例的实验结果

算法	最优配送策略 (f_i^*)	最优补货策略 (k_i^*)	最优基本补货周期 (T^*)	最优总成本 (TC^*)	平均时间 (s)
GA	[1,1,1,1,1,1]	[11,5,7,2,5,3]	0.0670	2118.31	1.41
ABC	[1,1,1,1,1,1]	[6,3,2,1,2,2]	0.1336	2032.31	3.18
MFO	[1,1,1,1,1,1]	[6,3,2,1,2,2]	0.1332	2031.96	1.36
最优 RFID 投资策略					
算法	C_{Ri}^*	C_{Ei}^*	C_{Ri}^*	C_{Ri}^*	
GA	[32.27,53.56,50.77,66.85,61.78,52.29]	[0.00,0.00,3.15,4.39,0.00,0.00]	[0.00,39.47,52.43,83.42,43.44,51.27]		0.51
ABC	[31.84,53.13,50.33,66.42,61.35,51.86]	[0.00,2.63,6.45,7.46,168.24,0.00]	[0.00,40.55,53.50,84.50,44.51,52.34]		1.58
MFO	[31.47,52.75,49.96,66.05,60.98,51.50]	[0.00,5.04,8.99,9.81,0.00,0.78]	[0.00,41.46,54.42,85.40,45.43,53.25]		2.49

表 5 未投资 RFID 时数值算例的实验结果

算法	GA	ABC	MFO
最优配送策略 (f_i^*)	[1,4,1,1,1,1]	[1,1,1,1,1,1]	[1,1,1,1,1,1]
最优补货策略 (k_i^*)	[8,5,3,1,2,2]	[6,3,2,1,2,2]	[6,3,2,1,2,2]
最优基本补货周期 (T^*)	0.0899	0.1055	0.0957
最优总成本 (TC^*)	3.625.75	3.553.02	3535.98
平均时间 (s)	1.47	3.06	1.27

3.2 主要参数敏感性分析

本节对主要参数进行敏感性分析。保持其他参数不变,分别改变参数 D_i 、 c_i 和 S ,其中 D_i 和 c_i 的变化程度为 -40%、-20%、0、20%、40%, S 的取值为 10、100、300、500 和 1000。表 6-8 给出当参数 D_i 、 c_i 和 S 分别变化时最优补货策略、最优配送策略、最优 RFID 投资策略和最优系统总成本的值, $\Delta TC(\%)$ 是 TC 变化的百分比。

表 6 D_i 的敏感性分析

ΔD_i (%)	最优配送策略 (f_i^*)	最优补货策略 (k_i^*)	最优基本补货周期 (T^*)	最优总成本 (TC^*)	ΔTC^* (%)
-40	[1,1,1,1,1,1]	[6,3,2,1,2,2]	0.1765	1710.53	-0.16
-20	[1,1,1,1,1,1]	[6,3,2,1,2,2]	0.1508	1885.18	-0.07
0	[1,1,1,1,1,1]	[6,3,2,1,2,2]	0.1332	2031.96	0.00
20	[1,1,1,1,1,1]	[6,3,2,1,2,2]	0.1200	2159.63	0.06
40	[1,1,1,1,1,1]	[7,3,2,1,2,2]	0.1083	2272.97	0.12
最优 RFID 投资策略					
ΔD_i (%)	C_{Ri}^*	C_{Ei}^*	C_{Ri}^*	C_{Ri}^*	
-40	[26.93,48.19,45.40,61.48,56.40,46.93]	[0.00,3.77,6.17,9.56,50.53,0.55]	[0.00,27.37,40.33,71.31,31.34,39.16]		0
-20	[29.50,50.78,47.98,64.07,59.00,49.52]	[0.00,4.57,7.77,9.84,168.23,0.82]	[0.00,35.26,48.22,79.21,39.23,47.06]		0
0	[31.47,52.75,49.96,66.05,60.98,51.50]	[0.00,5.04,8.99,9.81,0.00,0.78]	[0.00,41.46,54.42,85.40,45.43,53.25]		2.49
20	[33.02,54.30,51.52,67.61,62.54,53.05]	[0.00,5.28,9.96,9.52,0.00,0.00]	[0.00,46.69,59.65,90.63,50.65,58.48]		7.72
40	[34.0,55.34,52.55,68.65,63.58,54.08]	[0.00,5.11,10.60,8.72,3.71,0.00]	[3.72,51.80,64.76,95.74,55.76,63.59]		12.83

表 7 C_i 的敏感性分析

ΔC_i (%)	最优配送策略 (f_i^*)	最优补货策略 (k_i^*)	最优基本补货周期 (T^*)	最优总成本 (TC^*)	ΔTC^* (%)
-40	[1,1,1,1,1,1]	[6,3,2,1,2,2]	0.1386	1987.33	-0.02
-20	[1,1,1,1,1,1]	[6,3,2,1,2,2]	0.1356	2011.04	-0.01
0	[1,1,1,1,1,1]	[6,3,2,1,2,2]	0.1332	2031.96	0
20	[1,1,1,1,1,1]	[6,2,2,1,2,2]	0.1383	2050.39	0.01
40	[1,1,1,1,1,1]	[6,2,2,1,2,2]	0.1363	2067.48	0.02
最优 RFID 投资策略					
ΔC_i (%)	C_{Ri}^*	C_{Ei}^*	C_{Ri}^*	C_{Ri}^*	
-40	[32.27,53.56,50.77,66.85,61.78,52.29]	[0.00,0.00,3.15,4.39,0.00,0.00]	[0.00,39.47,52.43,83.42,43.44,51.27]		0.51
-20	[31.84,53.13,50.33,66.42,61.35,51.86]	[0.00,2.63,6.45,7.46,168.24,0.00]	[0.00,40.55,53.50,84.50,44.51,52.34]		1.58
0	[31.47,52.75,49.96,66.05,60.98,51.50]	[0.00,5.04,8.99,9.81,0.00,0.78]	[0.00,41.46,54.42,85.40,45.43,53.25]		2.49
20	[32.23,45.39,50.71,66.80,61.73,52.24]	[0.00,0.00,11.73,12.96,0.00,3.91]	[0.00,59.86,52.54,83.53,43.55,51.38]		0.62
40	[31.94,45.10,50.43,66.52,61.45,51.96]	[0.81,1.21,13.48,14.55,14.12,5.50]	[3.72,60.56,53.25,84.23,44.25,52.08]		1.32

表 8 S 的敏感性分析

S	最优配送策略 (f_i^*)	最优补货策略 (k_i^*)	最优基本补货周期 (T^*)	最优总成本 (TC^*)	ΔTC^* (%)
10	[1,1,1,1,1,1]	[6,3,2,1,2,2]	0.1332	2031.96	0.00
100	[1,1,1,1,1,1]	[4,2,2,1,1,1]	0.2000	2302.72	0.13
300	[1,1,1,1,1,1]	[4,2,2,1,1,1]	0.2000	2657.65	0.31
500	[1,1,1,1,1,1]	[4,2,2,1,1,1]	0.2000	2983.19	0.47
1000	[1,1,1,1,1,1]	[4,2,2,1,1,1]	0.2000	3767.85	0.85

S	最优 RFID 投资策略			
	$C_{R_i}^*$	$C_{E_i}^*$	$C_{R_i}^*$	C_R^*
10	[31.47, 52.75, 49.96, 66.05, 60.98, 51.50]	[0.00, 5.04, 8.99, 9.81, 0.00, 0.78]	[0.00, 41.46, 54.42, 85.40, 45.43, 53.25]	2.49
100	[31.49, 52.78, 58.10, 74.19, 55.25, 45.75]	[0.00, 5.06, 14.10, 18.38, 6.40, 0.00]	[0.00, 41.41, 34.09, 65.08, 59.76, 67.59]	97.30
300	[31.49, 52.78, 58.10, 74.19, 55.25, 45.75]	[0.00, 5.06, 14.10, 18.38, 0.06, 0.00]	[0.00, 41.41, 34.09, 65.08, 59.76, 67.59]	152.23
500	[31.49, 52.78, 58.10, 74.19, 55.25, 45.75]	[0.00, 5.06, 14.10, 18.38, 0.06, 0.00]	[0.00, 41.41, 34.09, 65.08, 59.76, 67.59]	177.77
1000	[31.49, 52.78, 58.10, 74.19, 55.25, 45.75]	[0.00, 5.06, 14.10, 18.38, 0.00, 0.00]	[0.00, 41.41, 34.09, 65.08, 59.76, 67.59]	177.77

根据表 6-8, 可得到以下结论:

①随着 D_i 、 c_i 和 S 的增大, 最优系统总成本 TC^* 将增大, 其中 S 值对 TC^* 值的影响最大, c_i 值对 TC^* 值的影响最小。这表明联合补货策略是有效的, 同时 RFID 通过降低产品变质率从而有效地减小了变质成本对系统的影响。

②当 D_i 逐渐增大时, T^* 逐渐减小, $C_{R_i}^*$ 、 $C_{E_i}^*$ 和 C_R^* 逐渐增加。这表明需求量增加时, 企业需要增加补货和配送的频率, 同时加大在提高订货效率和 JIT 效率上的 RFID 投资来提高订单处理和库存管理能力, 以满足更多的需求。当需求较少时, 企业可以考虑不在提高主要订货效率上进行 RFID 投资。

③当 c_i 在一定范围内增大时, T^* 逐渐减小, $C_{R_i}^*$ 逐渐减小, $C_{E_i}^*$ 和 C_R^* 逐渐增加。这表明当变质成本增加时, 企业应该缩短补货和配送周期, 同时增加提高订货效率和保鲜效率的 RFID 投资, 以确保产品的新鲜度和采购过程的精确性, 减少产品变质带来的损失。

④在一定范围内, S 的增加对于最优 RFID 投资策略的影响仅体现在增加在提高主要订货效率上的 RFID 投资。此时, 企业对于产品的 RFID 投资仅需要重新决策 $C_{R_i}^*$ 的值, 从而实现快速决策。

⑤ f_i^* 和 k_i^* 在一定范围内对于参数值的变化表现出较强的鲁棒性。这有利于帮助企业在某些参数值在一定范围内变化时更快地得到决策变量的最优值。比如, 保持最优配送策略和最优补货策略不变, 只对最优 RFID 投资策略和最优基本补货周期的值进行重新决策。

4 结论

本文将现有 RFID 投资决策模型的研究扩展到生鲜产品供应链管理中。结合生鲜产品非立即变质的特征, 考虑产品变质前补货和变质后补货两种情形, 引入 RFID 技术在系统的订货效率、JIT 效率和保鲜效率提升上的投资, 构建了多产品联合补货与配送及其 RFID 投资决策模型, 采用 MFO 算法对模型进行求解。数值算例和敏感性实验结果显示: ①在生鲜产品的联合补货与配送的过程中应用 RFID 技术可以有效节约系统的总成本, 但是对单一产品或单一环节的 RFID 技术投资是否一定节约总成本与产品的需求规模、RFID 投资于产品的效率等参数有关。②当生鲜产品需求量增加时, 企业应该

增加在提高订货效率和 JIT 效率上的 RFID 投资; 当变质成本增加时, 企业应该增加在提高订货效率和保鲜效率上的 RFID 投资, 同时可以适当减少提高 JIT 效率的 RFID 投资。③最优配送策略和最优补货策略在一定范围内具有较强的鲁棒性, 企业可以通过固定这两个最优决策的值, 只优化其他决策值来实现快速决策。

本文构建的模型不仅将传统 JRD 模型扩展到易变质的生鲜供应链领域, 同时, 进一步量化了生鲜供应链中 RFID 的投资和收益, 规范了 RFID 投资决策方法, 给生鲜企业的决策者合理投资 RFID 技术和预测其效益提供了有益的参考。在实际中, 产品的需求和提前期更多是随机的, 也会存在缺货的情况, 同时, 在多产品环境中往往会存在某些约束。因此, 进一步的研究方向可以考虑随机环境下和缺货情况下的生鲜产品联合补货与配送, 也可以引入一些约束, 比如数量折扣、资源限制等。另外, 可以设计和改进现有智能优化算法寻找更优的模型求解方法。

[参考文献]

- [1] 艾瑞咨询. 2021 年中国生鲜电商行业研究报告[R/OL]. <http://www.iresearch.com.cn/report.shtml>, 2023-02-17.
- [2] 潘永明, 陈静. 冷链物流风险分析及对策研究[J]. 物流工程与管理, 2020, 42(01): 47-48+46.
- [3] 王雨昕, 陈小丽, 高芷桑. 顾客对生鲜电商平台配送的满意度分析[J]. 物流工程与管理, 2022, 44(02): 69-71.
- [4] 王宁, 尤美虹. 果品溯源现状及 RFID 溯源系统探析[J]. 物流工程与管理, 2019, 10(41): 93-95.
- [5] 刘承子, 赵棚, 刘丽英. 药品冷链配送问题研究及解决措施探讨[J]. 物流工程与管理, 2022, 8(44): 75-77.
- [6] 王珊珊, 范小军, 郭鑫. 考虑不同渠道优势的 RFID 技术的投资均衡策略[J]. 管理学报, 2022, 19(06): 919-927.
- [7] 张李浩, 常陆雨, 范体军. 资金约束供应链 RFID 投资决策与融资优化[J]. 中国管理科学, 2021, 29(05): 45-54.
- [8] Fu N. Ordering policy of two-stage newsvendor model for fresh retailer under RFID investment[J]. Discrete Dynamics in Nature and Society, 2021(3): 1-13.
- [9] 李晴晴, 王炬香. 生鲜产品供应链 RFID 技术投资决策分析[J]. 物流科技, 2017, 40(07): 124-127.
- [10] Liu R, Zeng Y R, Qu H, et al. Optimizing the new coordinated replenishment and delivery model considering quantity discount and resource constraints[J]. Computers & Industrial Engineering, 2018, 116: 82-96.
- [11] 王思睿, 王林, 彭璐, 张金隆. 基于 Lipschitz 连续性的异质品联合补货-配送协同优化研究[J]. 中国管理科学, 2022.

(下转第 35 页)

程中,实时监测配送员的位置、配送时间、配送量等指标,预测可能出现的问题,如交通拥堵、时间延误、配送错误等,一旦发现异常情况,系统将预警信息反馈给配送员,并提供调整配送路线、联系客户确认配送地址等相应预警处理方案。通过配送预警监测,可以提高配送效率和客户满意度,降低配送出错和延误的风险,保障货物的及时到达。

在应用中可针对不同的物流需求和环节进行相应的定制化优化,以满足不同物流企业的不同需求。

6.2 智慧物流预警新机制的优势

①提高物流运作的效率 and 安全性。能实时监测物流过程中的各项指标,及时掌握物流情况和安全隐患,降低物流风险,保障货物安全,优化物流方案,提高物流效率。

②提高企业管理效率。对传感器采集的数据进行分析和处理,生成数据报表和趋势图表,帮助企业管理者更好地了解物流过程,优化物流管理,降低管理成本。能根据不同的预警情况,提供相应的处理方案,帮助企业管理者及时解决问题,降低物流风险。

③降低成本。能自动监测和分析物流过程,减少人工干预,降低人力成本。物流过程的精细化管理,可优化物流方案,从而降低物流成本。

④提高客户满意度。能及时处理物流问题,保障货物及时到达,提高客户满意度。

⑤适应性强,扩展性好。不仅能根据不同企业的需求,定制不同的预警处理方案,同时也能适应企业业务的发展,不断扩展和升级,满足企业多样化的需求。

7 结论与展望

通过对智慧物流的预警机制的研究与探索,构建了一种基于大数据挖掘和机器学习的智慧物流预警新机制,通过数

据采集、分析和预警机制的建立,有效地识别和预测潜在的物流问题,并采取相应的措施,从而提高物流运营效率和减少运营风险。但数据隐私保护、预警处理方案的完备性等问题还需进一步研究和解决,后续需持续优化智慧物流预警机制的算法模型,以提高预警精度。

[参考文献]

- [1] 李准. 基于 BIM - GIS 多层次协同技术的某高原铁路智能物流管理系统研究[J]. 铁道标准设计, 2022, 66(03): 73 - 77.
- [2] 李西文, 张航宁. 5G 背景下智慧物流现实透视与方向探索——基于京东物流、申通快递和顺丰控股的多案例研究[J]. 物流工程与管理, 2022, 44(07): 42 - 46.
- [3] 毛黎霞. 大数据技术在智慧物流中的应用分析[J]. 物流工程与管理, 2022, 44(07): 51 - 53.
- [4] 王海燕, 王湾, 侯华保, 等. 基于改进 GA - BP 的邮轮建造仓储物流风险预警研究[J]. 中国航海, 2022, 45(03): 57 - 64.
- [5] 杨扬, 徐新扬. 基于 CNN - PSO 的跨境供应链风险预警研究[J]. 公路交通科技, 2022, 39(01): 152 - 159.
- [6] 孟庆领, 张云, 王海良. 基于深度学习与漏磁探伤的桥梁缆索检测预警系统研究[J]. 桥梁建设, 2023, 53(01): 63 - 70.
- [7] 张人龙, 刘小红. 大数据环境下基于谱机器学习的云物流资源配置[J]. 统计与决策, 2021, 37(09): 177 - 179.
- [8] 彭婷, 邓旭东. 基于机器学习的天河机场物流预测研究[J]. 物流科技, 2023, 46(05): 97 - 100 + 108.

(上接第7页)

- [12] Carvajal J, Castano F, Sarache W, Costa Y. Heuristic approaches for a two - echelon constrained joint replenishment and delivery problem [J]. International journal of Production Economics, 2020, 220: 1 - 13.
- [13] Cui L G, Deng J, Zhang Y J, et al. Hybrid differential artificial bee colony algorithm for multi - item replenishment - distribution problem with stochastic lead - time and demands [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 254: 119873.
- [14] Lee I, Lee B C. An investment evaluation of supply chain RFID technologies: A normative modeling approach [J]. International Journal of Production Economics, 2010, 125(2): 313 - 323.
- [15] Billington P J. The classic economic production quantity model with setup cost as a function of capital expenditure [J]. Decision Sciences, 1987, 18(1): 25 - 42.
- [16] Deb K, Pratap A, Agarwal S, et al. A fast and elitist

multiobjective genetic algorithm: NSGA - II [J]. IEEE transactions on evolutionary computation, 2002, 6(2): 182 - 197.

- [17] Karaboga D, Basturk B. A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: Artificial bee colony (ABC) algorithm [J]. Journal of Global Optimization, 2007, 39(3): 459 - 471.
- [18] Mirjalili S. Moth - flame optimization algorithm: A novel nature - inspired heuristic paradigm [J]. Knowledge - Based Systems, 2015, 89: 228 - 249.
- [19] Cha B C, Moon I K, Park J H. The joint replenishment and delivery scheduling of the one - warehouse, n - retailer system [J]. Transportation Research Part E, 2008, 44(5): 720 - 730.
- [20] Ai X Y, Yue Y, Xu H X, et al. Optimizing multi - supplier multi - item joint replenishment problem for non - instantaneous deteriorating items with quantity discounts [J]. Plos One, 2021, 16(2): 1 - 22.