

分类号 F253.2
密 级 公开

单位代码 10618
学 号 622190910020



重庆交通大学

专业硕士学位论文

考虑保鲜技术投资的联合补货与定价 协同决策

研究生姓名: 李亚丽
导师姓名及职称: 崔利刚 教授

申请专业学位类别 工程硕士 学位授予单位 重庆交通大学
论文提交日期 2022 年 4 月 12 日
专业领域名称 物流工程 论文答辩日期 2022 年 5 月 28 日

2022 年 6 月 13 日

Joint Replenishment and Pricing Decision of Multi-item Considering Investment of Fresh Preservation Technology

A Dissertation Submitted for the Degree of Master

Candidate: Li Yali

Supervisor: Prof. Cui Ligang

Chongqing Jiaotong University, Chongqing, China

重庆交通大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：李亚丽

日期：2022年6月13日

重庆交通大学学位论文授权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权重庆交通大学可以将本学位论文的全部内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。同时授权中国科学技术信息研究所将本人学位论文收录到《中国学位论文全文数据库》，并进行信息服务（包括但不限于汇编、复制、发行、信息网络传播等），同时本人保留在其他媒体发表论文的权利。

学位论文作者签名：李亚丽
日期：2022年6月13日

指导教师签名：陈利刚
日期：2022年6月13日

本人同意将本学位论文提交至中国学术期刊（光盘版）电子杂志社 CNKI 系列数据库中全文发布，并按《中国优秀博硕士学位论文全文数据库出版章程》规定享受相关权益。

学位论文作者签名：李亚丽
日期：2022年6月13日

指导教师签名：陈利刚
日期：2022年6月13日

摘要

随着社会生产力的不断提高以及市场竞争的日益加剧,对新鲜蔬菜、水果和水产品等生鲜品的种类与质量要求的越来越高。市场上单一的产品已经不能满足目前的需求,取而代之的是品种繁多、规格不同的产品,生鲜产品具有易损耗、不易存储等特点,保鲜技术对于生鲜零售业来说必不可少,在多品情景下,寻求保鲜技术投入与产品收益之间的平衡关系一直是零售商所关注的问题。且生鲜产品在库存与定价方面一直深受关注,定价太高或库存过多,产品的需求与销量都会产生影响,定价太低或库存过少,又会减少零售商的利润,使其失去销售机会。因此,本文主要研究在多品联合补货(Joint Replenishment Problem, JRP)的策略下,进行合理的保鲜技术投资,研究生鲜品的库存与定价问题,从而减少相应的运作成本、投资成本和变质成本,使企业获得更大的利润回报。本文的主要研究内容如下:

(1) 以生鲜产品的特点及库存问题为背景,考虑到产品价格的增长会引起需求的下降,刻画需求与价格相关的指数函数,并在经典经济订货批量(Economic Order Quantity, EOQ)库存模型的基础上,采用多品联合补货的策略进行补货,以总利润最大为目标函数,构建生鲜产品的联合补货与定价协同决策模型。

(2) 考虑到保鲜技术的投入可以延缓产品的变质,引入保鲜技术投资参数,刻画变质率与保鲜技术投资相关的指数函数,并在研究生鲜品的多品联合补货与定价问题的基础上,以总利润最大为目标函数,构建考虑保鲜技术投资的联合补货与定价协同决策模型。

(3) 设计一种改进的差分进化算法(Differential Evolutionary, DE)对模型进行求解,并应用 MATLAB 编写程序进行相关算法实验,首先进行算法参数测试,得到改进后 DE 算法的最佳参数组合,其次选择三种算法与其进行对比分析,验证了自适应差分进化算法(Adaptive differential evolution algorithm, ADEA)算法在求解精度与求解速度上的高效性与稳定性。

(4) 对模型的重要参数进行数值实验与敏感度分析,为零售商提出了有效的管理意见。数值实验结果表明,采用联合补货策略比单独补货能获得更高的利润;投入保鲜技术有利于使企业获得更大的利润;保鲜技术投入所获得的利润是有限的,并不会随着资金规模的增大而持续增大。

关键词: 多品联合补货, 定价, 保鲜技术投资, 自适应差分进化算法

ABSTRACT

With the continuous improvement of social productivity and the increasing market competition, the requirements for the types and quality of fresh vegetables, fruits and aquatic products are higher and higher. At present, a single product in the market can no longer meet the current demand. Instead, a wide variety of products with different specifications are replaced. There are great challenges for storing the fresh products with quality fast deterioration feature. Preservation technology is essential for fresh retail industry. Therefore, it is urgent to initiate novel research on balancing the investment cost in fresh preservation technology and the pricing of fresh items. Moreover, fresh products have been deeply concerned about inventory and pricing. If the pricing is too high or the inventory is too high, the demand and sales volume of products will be affected. If the pricing is too low or the inventory is too small, the profits of retailers will be reduced, and sales opportunities will be lost. Therefore, this thesis mainly studies the reasonable investment in preservation technology under the strategy of multi-item joint replenishment (JRP), and studies the inventory and pricing of fresh items, thus reduce the corresponding operation cost, investment cost and deterioration cost, and make the enterprise obtain greater profit return. The main research contents of this thesis are as follows:

(1) Taking the characteristics of fresh products and the inventory problem as the background, considering that the increase of product price will lead to the decline of demand, an exponential function related to demand and price is constructed. Based on the classical economic order quantity (EOQ) inventory model, the multi-item joint replenishment strategy is adopted for replenishment, with the maximum total profit as the objective function, The joint replenishment and pricing decision model of fresh products is constructed.

(2) Considering that the input of preservation technology can delay the deterioration of products, the investment parameters of preservation technology are introduced, and the exponential function related to the deterioration rate and preservation technology investment is constructed. Basis on studying the multi-item joint replenishment and pricing of fresh products, taking the maximum total profit as the objective function, a collaborative decision-making model of joint replenishment and pricing considering preservation technology investment is constructed.

(3) An improved differential evolution algorithm (DE) is designed to solve the model, and the MATLAB program is used for relevant algorithm experiments. Firstly, the algorithm parameters are tested to obtain the best parameter combination of the improved DE algorithm. Secondly, three algorithms are selected for comparative analysis to verify the efficiency and stability of adaptive differential evolution algorithm (ADEA) in solution accuracy and solution speed.

(4) Numerical experiments and sensitivity analysis are carried out on the important parameters of the model, which puts forward effective management suggestions for retailers. The numerical results show that the joint replenishment strategy can obtain

higher profits than the single replenishment strategy; Investment in preservation technology is conducive to making enterprises obtain greater profits; The profit from fresh preservation technology investment is limited and will not continue to increase with the increase of capital scale.

KEY WORDS: joint replenishment, preservation technology investment, pricing, adaptive evolution algorithm

目 录

第一章 绪论	1
1.1 研究背景及研究意义	1
1.1.1 研究背景	1
1.1.2 研究意义	2
1.2 研究目标及研究内容	2
1.2.1 研究目标	2
1.2.2 研究内容	3
1.3 论文章节安排及创新点	3
1.3.1 论文章节安排	3
1.3.2 创新点	4
1.4 研究方法与技术路线图	5
第二章 文献综述	6
2.1 生鲜产品库存管理研究	6
2.1.1 生鲜产品需求研究	6
2.1.2 生鲜产品变质率研究	8
2.1.3 生鲜产品定价问题研究	9
2.2 考虑保鲜技术的生鲜产品库存研究	10
2.3 多品联合补货问题研究	11
2.3.1 多品联合补货问题的优势	11
2.3.2 多品联合补货问题的模型研究	11
2.3.3 多品联合补货问题的求解研究	12
2.4 研究评述	12
第三章 生鲜产品的联合补货与定价协同决策	14
3.1 问题描述	14
3.2 模型假设与符号说明	14
3.3 模型构建	15
3.4 模型求解	18
3.4.1 差分进化算法	18
3.4.2 改进的差分进化算法设计	20
3.5 数值与算例分析	22
3.5.1 实验数据	23

3.5.2 算法实验	23
3.5.3 数值实验	29
3.5.4 敏感性分析	30
3.6 本章小节	33
第四章 考虑保鲜技术投资的联合补货与定价协同决策	35
4.1 问题描述	35
4.2 模型假设与符号说明	35
4.3 模型构建	36
4.4 模型求解	39
4.5 数值与算例分析	41
4.5.1 实验数据	42
4.5.2 数值实验	42
4.5.3 敏感性分析	43
4.6 本章小节	47
第五章 总结与展望	49
5.1 研究结论	49
5.2 研究展望	50
致 谢	51
参考文献	52
在学期间发表的论文及学术成果	59

第一章 绪论

1.1 研究背景及研究意义

1.1.1 研究背景

近年来,随着人民生活水平与消费水平的不断提高,人们对食物品质的要求也越来越高。其中,生鲜产品由于富含人类不可或缺的营养价值也逐渐成为人们日常生活中的必需品。

我国生鲜农产品的产销量在世界各国中都名列前茅,各种生鲜农产品的产量稳步增长,据我国国家统计局统计的数据显示,截至2020年底,我国水果产量已经达到28692.4万吨,同比增长4.7%;蔬菜产量达到72102.6万吨,同比增长2.5%;水产品产量为6549万吨,同比增长1.1%;由于受到猪瘟、疫情等影响,导致肉类的产量有所下滑,肉类产量为7748.4万吨,同比下降0.1%;奶类产量为3529.6万吨,同比增长7.0%。总的来看,我国对于生鲜品具有很大的需求量,生鲜交易的规模也在不断扩大。然而,我国由于生鲜供应链的发展相对落后,每年都会有大量的生鲜产品在供应链过程中损耗,造成严重的经济损失。与发达国家相比,我国生鲜产品在供应链过程中的损耗达到25%-30%,而发达国家仅为5%左右^[1]。其中,存储过程中的变质损耗占比较大。因此,如何保障生鲜产品的品质、优化库存控制策略、降低变质损失成本,是冷链企业亟待解决的问题。

对生鲜农产品供应链中的企业来说,降低运营成本、提高收入是首要任务,在供应链运营管理领域,库存与定价是两个最为关键,也最为基础的决策问题。由于生鲜农产品易变质的特点,其库存与定价决策也更为复杂。对于一般商品而言,库存的减少是由于外部的需求,而对于生鲜品来说,库存的减少还归结于储存过程中的变质损耗。相比于一般商品的定价策略,生鲜品的定价策略也更为复杂,由于生鲜品的保质期较短,在销售过程中质量上更容易发生变化,消费者在购买商品时不仅与商品的价格相关还与质量相关^[2]。更进一步说,库存和定价决策并不是相互独立的,库存的高低也会对定价决策产生影响,因此,在考虑产品易逝性的情形下,研究供应链库存与定价的问题是非常有必要的。

冷链商品品类繁多、规格各异,保鲜需求差异大,大量的生鲜农产品每年由于没有使用先进的冷冻冷藏设备和保鲜技术造成的经济损失高达750亿元,影响了冷链行业的高效发展^[3]。对比来看,欧美发达国家因使用先进的保鲜技术及高效的冷链系统所造成的生鲜损耗远远低于我国。特别是,农产品冷链配套设施建设投入不足,各环节容易出现脱冷的现象,保鲜产品损耗严重。面对行业普遍的高

损耗率,相比之下永辉超市的损耗率仅有 4%,究其原因除自身经营高效外,与其在冷链服务中的巨大技术投入是离不开的。因此,随着保鲜投入持续加大,冷链企业对保鲜产品的补货、库存管理和产品定价联合决策的要求也越来越高。

另外,随着贸易全球化的加深,如何将有限的资源进行合理的优化配置以实现生鲜产品补货过程的规模效应和协同效应显得尤为重要,越来越多的企业开始关注如何科学合理的对多种商品进行采购,从而节约总成本。JRP 问题是一个对多种产品进行补货的库存决策问题,企业之间实施联合补货,可以实现批量采购,减少订购次数,共享主要采购费用,获取数量折扣,从而节约总成本。因此,联合补货问题得到了越来越多大型企业和跨国集团的重视,如像沃尔玛、教育机构等这样的大型企业,由于其供应商众多,采购商品的种类多且数量大,传统的补货方式不仅复杂度高,其成本也非常高昂,而联合补货可以集中调度采购的资源,避免浪费。与多次小批量运输相比,单次大批量运输更能节约补货过程中的成本,获得数量折扣,从而减少补货过程中的成本,增加企业的利润。据研究发现,多品联合补货比单独补货将会节约 7%~15% 的成本^[4]。

1.1.2 研究意义

本文基于传统生鲜品的库存问题,研究多种生鲜品的联合补货与定价问题,分析保鲜技术投资对生鲜产品的补货、定价决策与总利润的影响,具有重要的理论意义与实践意义。

(1) 理论意义

本文以利润最大化为目标,针对生鲜产品库存管理的难度以及价格的不稳定性,通过采用多品联合采购的策略进行补货,探究需求与价格相关的多品补货与定价问题,对于多产品的补货与定价模型提出了一种新的模型,为企业在研究多种生鲜品补货与定价问题时提供了理论支持。

(2) 实践意义

本文在多品联合补货与定价模型的基础上,加入保鲜技术投资参数,构建基于保鲜技术投资下生鲜品的联合补货与定价模型,探究保鲜技术的投资与收益之间的平衡问题。为企业在进行保鲜技术投资决策时提供了一定的可行性分析,帮助企业在生鲜多品补货与定价过程中做出最优的决策,提高企业的消费者服务水平和企业竞争力。

1.2 研究目标及研究内容

1.2.1 研究目标

首先,梳理相关文献,概括和总结生鲜产品库存管理的研究现状、基于保鲜技术相关的易逝品库存研究现状以及多品联合补货策略的研究现状,综合分析当前国内外对于生鲜产品重要参数的研究成果以及多品联合补货的优势,了解构建

模型的可行性和科学性。

其次，将多品联合补货的策略考虑进库存模型中，以利润最大化为目标函数，引入与价格相关的需求函数，研究生鲜产品的联合补货与定价协同决策问题，并且考虑保鲜技术投资对变质率的影响，进一步研究生鲜品的多品补货、定价以及保鲜技术投资之间的决策问题。

再次，针对相关模型，在传统 DE 算法的基础上设计 ADEA 算法对模型进行求解，提高求解的效率。通过算法实验，寻找 ADEA 算法求解模型的最佳参数组合，通过对多个算法进行对比分析，验证 ADEA 算法的求解效率及稳定性。

最后，针对算法与模型进行相关的算法实验与数值实验，得出相关结论。并对模型的重要参数进行敏感性分析，深入剖析各个参数的变化对总利润带来的影响，得出有实践意义的管理启示。

1.2.2 研究内容

在实际生活中，零售商为了提高竞争力、节约成本通常会一次性采购多种产品，文章以生鲜产品的特点及库存问题为背景，通过将非立即变质品的库存模型与多品联合补货问题结合起来，目标函数是使单位时间的总利润最大，研究了生鲜产品的库存决策问题，本文的研究内容主要包括以下三个方面：

(1) 在非立即变质品库存决策问题的研究基础上，考虑采用多品联合补货的方式进行补货。并在此基础上，考虑到需求与定价之间的关系，构建更加符合实际情况的需求函数，通过研究生鲜品的定价以及多品补货的库存决策问题，构建关于多种生鲜产品的联合补货与定价协同模型，并通过数值实验和模型参数的敏感性进行分析，得出相关结论并为零零售商提供有实践意义的管理见解。

(2) 考虑到生鲜产品的变质率是可控的，保鲜技术的投入可以影响产品的变质率。本文在多品联合补货与定价模型的基础上，加入保鲜技术投资参数，刻画了变质率与保鲜技术投资相关的函数，构建基于保鲜技术投资下生鲜品的联合补货与定价模型，并通过数值实验和模型参数的敏感性进行分析，得出相关结论并为零零售商提供有实践意义的管理启示。

(3) 改进传统 DE 算法中变异算子和交叉算子在进化过程中保持不变的形式，使其随着迭代次数的变化进行调整，设计 ADEA 算法对模型进行求解。通过实验测试，确定 ADEA 算法求解模型的最佳参数，通过与多种算法进行对比，证明此算法的优势。

1.3 论文章节安排及创新点

1.3.1 论文章节安排

本文首先对生鲜产品的库存管理、考虑保鲜技术的易逝品库存管理以及多品联合补货问题等三个方面的文献进行梳理与归纳，构建生鲜产品的联合补货与定

价模型以及考虑保鲜技术投资相关的联合补货与定价模型，并设计一种改进的 DE 算法对模型进行求解。本文共分为五个部分：

第一章为绪论部分。首先阐述本文的研究背景及研究意义，分析生鲜品在库存管理以及定价方面的问题，论述多品联合补货策略的重要性。随后介绍文章的研究目标及研究内容、本文的创新点以及文章章节安排，最后说明本文的研究方法与技术路线。

第二章为文献综述部分。首先对生鲜产品的库存管理方面的现状进行综述，主要综述生鲜品需求率、变质率、定价等方面，其次，对保鲜技术相关的易逝品库存管理方面的现状进行综述。最后，对多品联合补货问题的现状进行综述，主要从多品联合补货问题的优势、模型以及模型求解等方面进行综述。

第三章是模型构建与求解。以生鲜品为研究对象，刻画需求与定价相关的函数，采用多品联合补货的策略进行补货，构建生鲜产品的联合补货与定价协同模型，并设计一种改进的 DE 算法对模型进行求解，测试 ADEA 算法的最优参数组合，同时与其他几种算法进行对比，证明算法的有效性。最后，对模型进行相关数值实验和主要参数的灵敏度分析，得出有益的管理启示。

第四章是模型构建与求解。在第三章的研究基础上，引入保鲜技术参数，构建保鲜技术投资相关的补货与定价模型，继续采用 ADEA 算法求解模型并进行相关的数值实验，同时对模型中的主要参数进行灵敏度分析，观察最优策略的变化，针对相关变化为零售商提供有益的管理启示。

第五章为全文的总结与展望。梳理与总结本文的研究内容，针对本文的不足之处提出未来的研究方向。

1.3.2 创新点

本文的创新点主要体现在以下三点：

(1) 本文从生鲜品的库存问题出发，考虑到在研究生鲜品的库存与定价问题时，大部分学者重点关注单一品种，多品补货的策略尚未得到重视，因此，本文在生鲜品 EOQ 库存模型的基础上，构建需求与价格相关的指数函数，采用 JRP 的策略对商品进行补货，首次研究了生鲜产品的联合补货与定价协同决策问题。

(2) 本文考虑到生鲜产品离不开保鲜技术且保鲜技术的投入与收益一直以来都是零售商关注的重点，本文在多品联合补货与定价问题的研究基础上，引入保鲜技术投资参数，刻画保鲜技术与变质率相关的指数函数，研究了保鲜技术投资、定价和补货协同决策问题。

(3) 联合补货问题是一个 NP-hard 题，需要采用进化算法对模型进行求解，本文改进标准 DE 算法的交叉策略和变异策略，提出一种自适应差分进化算法求解模型，提高了算法的求解效率。

1.4 研究方法与技术路线图

对于文献综述部分，主要使用的是文献搜索的方法，整理和分析生鲜品库存管理的研究现状、考虑保鲜技术的易逝品库存研究现状以及多品联合补货问题的研究现状。在数学模型构建部分，采用数学建模的方法，研究经典 EOQ 库存模型与联合补货问题共同决策问题，构建生鲜产品联合补货与定价决策的模型。在模型求解部分，通过设计算法，改进传统的 DE 算法中变异算子和交叉算子在进化过程中保持不变的形式，使其随着迭代次数的变化进行调整。在实验方面，通过数值模拟的方式，进行算法实验、数值实验以及模型参数的敏感性分析。本文的技术路线图如图 1-1 所示：

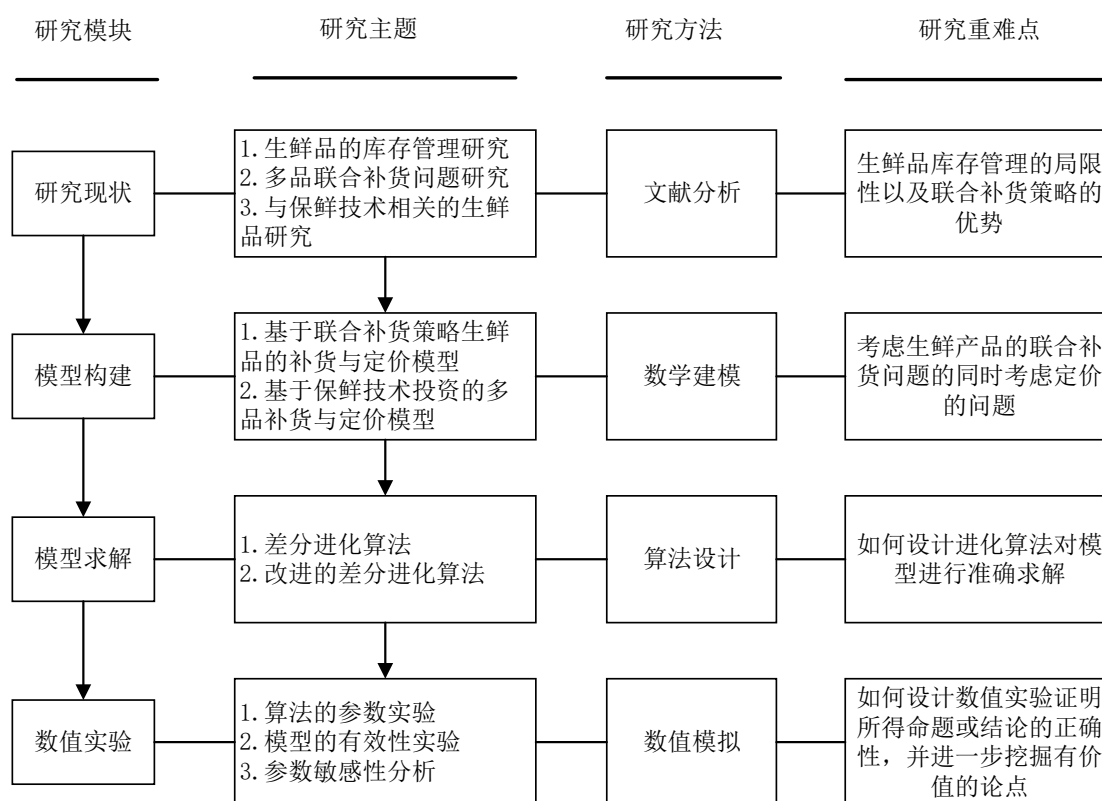


图 1-1 技术路线图

第二章 文献综述

2.1 生鲜产品库存管理研究

2.1.1 生鲜产品需求研究

需求作为生鲜农产品研究库存模型的主要参数之一，对生鲜农产品的库存模型构建有很大的影响。对于易腐品需求方面的研究主要包括确定需求和随机需求两个方面，本节主要从这两方面对已有的研究成果进行综述。

(1) 确定需求

根据已有的研究成果来看，确定需求主要包括常数需求和确定因素下的需求函数，如与库存水平相关的需求函数、与价格相关的需求函数和与时间相关的需求函数。

需求为固定常数的情况通常是企业根据以往经验已知需求量或为简化条件便于问题研究。Ai 等^[5]以非立即变质品为研究对象，考虑了需求率不变且目标函数具有指数函数的分段函数，研究了缺货情况下的非立即变质品的最优补货策略。李业梅和黄少安^[6]假设零售商的需求为固定需求，研究了供应商、零售商以及客户构成的二级贸易信贷下非立即变质食品的订货策略。Yang^[7]在需求率为常数的情况下，允许商品存在通货膨胀与部分积压，建立了生鲜品的两仓库库存模型。Jaggi 等^[8]在需求率为常数和完全积压的条件下，提出了先进先出的策略，研究了非立即变质品的双仓库模型。Palanivel 和 Uthayakumar^[9]假设需求是已知且恒定的，考虑到通货膨胀和货币时间价值在有限计划期内的影响，构建了通货膨胀和部分积压条件下的非瞬时变质物品的双仓库模型。Tripathi 和 Misra^[10]在需求率为常数的情况下，利用微积分的原理推导了易腐品的库存模型。

需求与库存水平相关的需求函数通常用来描述需求受现有库存水平变化的情况。李贵萍等^[11]假设需求依赖于库存水平，研究了缺货情况下非立即变质品的库存策略问题。Bai 等^[12]在制造商、零售商与顾客组成的二级供应链系统中，促销活动成本由双方共同承担，构建了需求依赖于库存水平的两级供应链变质品的库存模型。Duan 等^[13]考虑生鲜品是否存在缺货的情况，研究了不允许缺货和缺货情况下的生鲜品库存问题，其中需求受库存水平的影响。段永瑞等^[14]将商品储存在展示区和仓库两个地方，构建了需求依赖于有限展示区库存量的易腐品库存模型，分析了易腐品零售商的订货和转运策略。Palanivel 等^[15]在考虑通货膨胀和部分积压的情形下，研究了需求与库存水平相关的非立即变质品的两仓库经济订货批量模型。王金妹和陈小琼^[16]放松了传统库存模型中价格不变的假设条件，考虑到需

求不仅是随机的且还受到库存水平的影响,研究了生鲜农产品的库存问题。

需求与价格相关的函数通常用来描述需求受生鲜品价格的变化而变化的情况。Dye^[17]假设需求受价格的影响且会随着时间的变化而变化,研究了允许有缺货成本的易变质品库存控制模型。Taleizadeh 等^[18]假设需求依赖于价格,采用了 Stackelberg 博弈理论,在单个供应商与多个零售商组成的两级供应链系统中,构建了供应商管理库存模型。魏锋^[19]在需求是价格弹性函数的基础上,考虑到是否存在缺货的情况,研究了允许缺货和不允许缺货两种情况下生鲜品的库存模型。Papachristos 和 Skouri^[20]刻画了需求率随价格增加而递减的任意凸函数,考虑到缺货延供给率与等待时间相关,构建了需求与价格相关的易变质品库存与定价模型。Wu 等^[21]以利润最大化为目标,构建了需求对价格敏感的单个非立即变质品的库存模型。Chen 等^[22]考虑到生鲜产品有限的货架期,研究了需求取决于当前时期的价格和一个随机项的联合定价和库存控制问题。江文辉等^[23]考虑了碳限额与交易政策的问题,刻画了需求与价格和时间相关的函数,构建了有限规划时域内变质品的联合定价和库存优化模型。

需求依赖于时间相关的函数通常用来描述需求受产品变质时间的变化而改变或受季节的情况。Chakrabarty 等^[24]在需求为时间指数函数的部分缺货和通货膨胀的情况下,研究了具有容量约束变质品的双仓库模型。Mandal^[25]研究了需求率是时间和时间相关持有成本的三次函数的易变质物品,建立了一个具有时变变质率的现实库存模型。Teng 和 Lou^[26]考虑了随时间变化的需求函数,建立了具有上游和下游贸易信贷的经济订货批量模型。Zhou^[27]等刻画了产品需求率为时间的指数函数,以成本最小为目标函数,研究了缺货情况下生鲜产品的订货决策和库存控制问题。赵忠等^[28]考虑了需求受时间的影响,研究了分销商、零售商和多个顾客组成的两级信用支付条件下的生鲜品库存模型。Kaya 和 Polat^[29]假设需求受时间和价格共同影响,研究了确定需求下生鲜品的定价与库存协同决策问题,寻找改变价格的最佳时间、最优价格和最佳订购量。

(2) 随机需求

在实际运营中,消费者的购买行为是随机的,生鲜产品的需求具有不确定性,确定性的需求不能够准确描述需求的变化趋势,因此,越来越多的学者开始关注易腐品的需求随机的情况。

根据已有的研究成果来看,随机需求主要包括已知概率分布的需求和任意概率分布的需求。Molana 等^[30]以液体型的变质品为研究对象,在需求服从泊松分布的情形下,根据(r, nQ)政策连续审查库存,研究了变质品的库存策略和所需的包装尺寸。Liao 和 Deng^[31]克服了经典 EOQ 模型的局限性,提出了一个随机需求率、随机采购量的进化环境可持续 EOQ 模型。冯颖和张炎治^[32]考虑多个补货周期的情

况, 根据 (r, Q) 政策连续审查库存, 以总成本最小为目标, 研究了随机需求下的易变质产品库存模型。Heydari 等^[33]刻画了随机需求的相关函数, 研究了延期支付下的两级生鲜品供应链协调问题。Ferguson 和 Ketzenberg^[34]假设需求是不确定的, 在单一供应商、若干个零售商和顾客组成的两级冷链系统中, 研究了易腐品在运输过程中的巨大损耗问题, 并且证明了共享产品的时间信息有助于零售商制定正确的易腐品补货策略。Chua 等^[35]假设需求是不确定的, 研究了短期货架易逝品的最优价格决策和订货策略。

2.1.2 生鲜产品变质率研究

生鲜品具有易变质等特性, 而变质率是刻画这一特性的重要参数。目前, 由于生鲜品在流通与库存过程中的变质损失太大, 为改善这一现象, 学者们对不同变质率情况下的生鲜品库存问题进行了研究, 包括变质率为常数、变质率为时间的函数、变质率服从 Weibull 分布的函数等几种情况。

(1) 变质率为常数

变质率为常数通常是为了简化其研究问题的复杂性, Ghare 和 Schrader^[36]于 1976 年首次提出了基于常数变质率的易变质品库存模型。在近期的研究中, 常数变质率仍被使用, 大多情况下是在研究新问题时简化问题的难度, 使创新点被充分研究。Dave^[37]假设不存在缺陷品, 不考虑产品的提前期, 研究了变质率为常数的变质品的库存模型。Chang^[38]假设变质率为确定性常数, 研究需求依赖于库存的非立即变质品最优补货策略。Balkhi 和 Benkherouf^[39]研究了变质率为确定性常数、需求依赖于库存和时间的变质品库存模型。Tripathi 和 Misra^[10]在利用积分求最大值与最小值的方法构建易腐品库存模型来确定最佳订货量时, 假设变质率为常数。何燕平^[40]在假设变质率为常数的基础上, 考虑到资金使用成本受等待时间的影响, 在缺货的情况下分别构建了固定需求与时变需求两种情况下的库存控制模型, 确定最优库存策略。

(2) 变质率为时间的函数

纵观国内外的研究进程不难发现, 变质率为时间的线性函数是基于变质率为常数的基础上研究出来的, 变质率与时间的相关函数是用来描述生鲜品的变质率受时间的变化而变化, Mukhopadhyay 等^[41]刻画了需求与价格相关的幂函数, 构建了一个需求受价格影响的变质品库存模型, 且变质率与时间成正比。Yang^[42]假设需求与库存量相关, 研究了缺货情况下变质率与时间呈指数函数的易变质品库存模型。Tripathy 等^[43]在变质率与时间相关的线性函数的研究基础上, 构建了允许延期支付和不允许延期支付情况下的易腐品最优订货策略。Ahmed 等^[44]假设变质率与时间相关, 需求率为梯形的函数, 研究了部分缺货情况下的易腐品库存模型。Ferguson 和 Ketzenberg^[34]考虑到变质率与时间的边际价值比率, 商品的变质会降低

市场的需求,研究了易逝品的供应链协调问题。Krishnaraj 和 Ramasamy^[45]假设变质率为时间的线性函数,需求依赖于库存的情况,研究了允许延期支付的两级供应链易腐品的库存问题。

(3) 变质率服从 Weibull 分布的函数

Zhou^[27]刻画了变质率为关于三参数的 Weibull 函数,以成本最小为目标函数,研究了缺货情况下生鲜产品的订货决策和库存控制问题。王道平等^[46]考虑了需求依赖于瞬时库存水平与缺货的情况,以系统最小总成本为目标,研究了变质率服从三参数 Weibull 分布的易腐品库存优化问题。Singh 和 Pattnayak^[47]放松了变质率为常数的情况,研究了变质率服从两参数 Weibull 分布下的易腐品库存模型。Yang^[48]考虑到变质程度越大,订单数量就会越多,在两仓库部分积压库存模型的基础上,引入变质率服从三参数 Weibull 分布的函数,目标是推导出使单位时间内总成本最小的最优补货策略。王宪杰等^[49]为保障供应链上每一个商家的利润,在价格折扣函数的基础上加入最优安全系数调整价格,研究了变质率服从 Weibull 分布的一体化库存决策与价格协调问题。张新功和莫宁^[50]考虑商品变质时带来的成本,引入价格折扣,研究了变质率服从 Weibull 分布的易腐品库存订货与定价决策问题。

2.1.3 生鲜产品定价问题研究

定价是衡量零售商盈利能力的一个重要指标。在对库存管理问题的研究中,销售价格已经成为众多学者所研究的决策问题,并进一步推广到易腐品的库存研究中。从已有的研究看来,易腐品定价研究包括价格折扣、允许延期支付等相关方面。

(1) 价格折扣

上游企业为了增加其竞争力,刺激下游企业扩大购买量,通常会给予一定的价格折扣。Chua 等^[35]研究了一类不确定性需求下的具有短生命周期约束的易腐品最优定价决策,并讨论了消费者选择行为如何影响零售商的价格折扣。张新功和莫宁^[50]考虑商品变质时带来的成本,引入价格折扣,研究了需求率依赖于价格的易腐品库存订货与定价决策问题,研究表明,零售商在保鲜期后引入价格折扣越高所获得的销量越大。周优军等^[51]假设需求受价格和产品生命周期共同影响,研究了短生命周期产品易变质品的基于数量价格折扣和临时价格折扣的单级最优定价问题。Snigdha 和 Swati^[52]考虑商品新鲜度的下降会导致需求的下降,零售商将会在商品的新鲜度开始下降时给予一定的价格折扣,以促进生鲜品的销售量,从而增加系统的整体利润。王方杰^[53]分析生鲜产品的需求不仅与价格相关还与时间相关,为了在销售周期内获得最优的利润,向超过保鲜期的生鲜品提供价格折扣,构建了以利润最大化为目标函数的库存与定价决策模型。

（2）延期支付

供应商为了建立稳定的合作伙伴关系以及增加其竞争力，通常会向零售商提供一定的延迟付款期限，该期限一般称为结汇期限。Haley 和 Higgins^[54]虑到所购买的商品全部或部分先由贸易信贷提供资金，在经济订货批量模型的背景下研究了库存政策和贸易信贷政策之间的关系。Ghosh 等^[55]在允许部分延迟且需求依赖价格的情况下，确定了易腐品的最优订购价格和最佳订货批量。赵连霞等^[56]分析批发商为了减少因变质带来的损失，会采取延期支付的策略刺激顾客的购买行为和采取延期交货策略减少变质损失两种情况，或者在两种策略下采取集成策略，在此背景下，研究了批发商如何选择这两种营销策略使系统的总利润最大。王道平等^[57]在多个供应商和单个零售商组成的供应链系统中，考虑需求不仅与自身的价格相关，而且还取决于其他产品的价格，研究了延期支付条件下零售商如何对商品的订货与定价做出决策。黄远良等^[58]考虑到产品的新鲜度会影响顾客的购买行为，且新鲜度可以投入一定的资金进行控制延缓其下降的速度，研究了在允许延期付款情形下生鲜度可控的库存管理策略。

2.2 考虑保鲜技术的生鲜产品库存研究

在上述研究生鲜品的库存管理中，大多数的库存模型都假设产品在存储、运输、销售过程中的变质率是自然现象不能改变的，产品的变质率主要是常数或线性函数。而在实际生活中，虽然产品的变质是自然现象且不能停止，但是可通过一些先进的保鲜技术或设备来影响产品的变质率，也可通过调节温度和湿度来保存某些生鲜品以此延长产品的生命周期。因此，考虑库存决策和保存技术投资决策是实用且重要的。

保鲜技术一直与生鲜品息息相关，对于大多数中小企业来说，保鲜技术的投入确实可以延缓生鲜品的腐败变质，但是投资保鲜技术的成本也会随之增加，因此，在生鲜品的库存管理中，研究保鲜技术的最优投资决策对企业而言至关重要。李贵萍等^[59]考虑到加入保鲜技术会延长生鲜品的质量下降，假设生鲜品的需求与产品的质量、价格有关，研究了生鲜品的订购、定价与保鲜技术投资的联合决策问题。王磊和但斌^[60]在研究多种生鲜品定价的基础上，考虑存在初始订货量与潜在市场容量的情况，构建了新鲜度和价格相关且随时间变化的生鲜品的最优定价与最优保鲜投入。Zhang 等^[61]研究了一个供应商与一个零售商共同投资保鲜技术以减少易变质物品的损失，建立了一个变质率可控且需求依赖于价格的供应链模型。艾学轶等^[62]以单个非立即变质品为研究对象，考虑到非立即变质品随着时间的流逝会发生变质，加入保鲜技术以延缓非立即变质品的变质，建立了需求与价格相关的生鲜品的定价、库存与投资联合决策模型。He 等^[63]以一种易变质的季节性产品为研究对象，考虑其变质率可以通过保鲜技术来控制，研究了关于保存技术投

资、市场价格和订购频率的最优决策问题。Dye^[64]以非立即变质品为研究对象,刻画了变质率与保存技术相关的函数,建立了考虑保存技术投资的库存模型。Tsao^[65]在供应商向拥有配送中心的零售商提供信用期,研究了基于延期支付环境下的分段非线性库存问题,寻找配送中心的最佳位置和数量、最佳的补货周期时间和最佳的保存技术投资值,建立了联合选址、库存和保存决策模型,以使系统总利润最大。Chen 和 Dye^[66]以最小化总成本为目标函数,为找到最佳的补给和保存技术投资策略,建立了一个时变需求的变质品库存模型,证明了最优保存技术投资策略不仅存在而且唯一。

2.3 多品联合补货问题研究

多品联合补货问题针对同一供应商订购多种产品,通过设计组合策略,将具有共同特征的商品组合补货,以减少总订购次数,共享固定的订购资源,获取数量折扣,从而降低总成本^[67]。本小节主要从联合补货问题的优势、联合补货问题的模型研究、联合补货问题的求解研究等三个方面进行综述。

2.3.1 多品联合补货问题的优势

联合补货主要是为了通过分组的方式减少产品的主要订购成本,使企业获得数量折扣,降低企业的总成本,相关研究表明^[68],企业在采用联合补货的策略下降低了 5%~12% 的成本。Silver^[69]对比联合补货和经济订货批量补货的形式,得出了联合补货策略的优势,并给出了一种不计主要订货成本的分组策略。文晓巍和达庆利^[70]提出了单独补货策略、统一补货策略和联合补货策略,研究了基于不同补货策略的多产品库存模型,研究发现,大多数情况下,采用联合补货比其他两个补货策略更容易节省系统总成本。Moutaz 和 Suresh^[71]的研究表明采用联合补货的策略可以降低成本,主要订购成本越高,联合补货带来的节约就越显著。Wang 等^[72]构建了考虑分组限制的联合补货模型,所提出的模型成功地降低了两个电力公司维修材料库存的总成本。Chen 和 Chen^[73]在一个多产品、多层次的供应链中生产、分销和销售生鲜品,研究了生鲜品的联合补货、渠道协调和商品库存管理的协调策略问题,并通过数值实验验证了多产品联合补货和渠道协调的有效性。张云丰等^[74]增加价格折扣约束,建立零售商独立采购模型和零售商联合采购模型,以最小单位时间成本对其进行比较,证明零售商联合采购的优越性。

2.3.2 多品联合补货问题的模型研究

多品联合补货问题的基础模型主要由主要订购成本、次要订购成本和库存持有成本构成。艾学轶等^[75]考虑了变质前补货和变质后补货两种情况,建立了变质期间时变需求的多品联合补货模型。崔利刚等^[76]以 B2C 电商商品的采配问题为研究背景,假设商品的需求不确定性,以系统总成本最小化为目标函数,利用模糊随机期望值方法,构建了基于模糊随机需求的 B2C 多品联合采配协同模型。曾宇

容等^[77]考虑到在采购过程中因商品的异质性需要进行分组补货, 协同决策供应商的选择问题、订货量的分配问题和商品的采购周期问题, 构建了基于联合补货策略的供应商选择与商品订货量分配协同决策模型。Ongkunaruk 等^[78]提出了一个联合补货问题, 用于确定多个有缺陷品的最优再订购策略, 并考虑了装运约束、预算约束和运输能力约束。Wang 等^[79]在一个供应商和多个零售商的组成的冷链系统中, 将碳交易和联合补货进行结合, 研究了考虑碳交易情形下的联合补货与配送决策。Wee 等^[80]提出了一种新的逆权模糊非线性规划方法来建立易变质品的联合补货模型, 其目标是在模糊需求和短缺成本约束下使库存投资利润和收益最大化。王林等^[81]考虑到采购成本的有限性以及最大载重量的约束情况, 构建了一种基于联合补货策略的配送中心选址和库存协同优化模型。

2.3.3 多品联合补货问题的求解研究

鉴于 JRP 问题 NP-hard 性质, 智能进化算法被广泛应用于求解多种优化问题。例如, 陈昊等^[82]为了解决大规模全局优化中的维度缺失、进化停滞等问题, 提出了基于维度缺失检测与恢复的协同进化算法。梁正平等^[83]针对不同个体不同维度的决策变量分别进行自适应变化响应并设计了动态多目标进化算法。Cha 等^[84]研究了一种更灵活的仓库联合补货和交货调度策略, 并设计了混合遗传算法求解模型, 实验结果证明了遗传算法在处理资源限制方面的优势。Cui 等^[85]假设一家 B2C 电子商务公司拥有多个区域配送中心, 研究了具有随机提前期和随机需求的多品联合补货配送问题, 并结合了差分进化算法在全局搜索中的优势和人工蜂群算法在精细搜索中的优势, 设计了一种混合差分人工蜂群算法求解模型。王林等^[86]考虑存在缺陷品的情况, 构建了缺货情况下的配送中心选址和库存集成优化模型, 为了增加收敛速度和全局寻优的能力, 设计了一种改进的自适应混合差分蛙跳算法对模型进行求解。

在求解 JRP 问题时, 差分进化算法被认为具有易于编码和求解效率高的优势^[87]。标准 DE 算法由 Storn 和 Price^[88]首次提出, 是一种高效的全局优化算法。大量研究表明, DE 算法在后期的进化过程中, 容易陷入局部最优解^[89]。基于此, 本文改变标准 DE 算法中交叉算子和变异算子在进化过程中保持不变的形式, 使其随着迭代次数的变化进行变化, 使交叉算子和变异算子在初期具有较大值, 保证种群的多样性, 然后逐步降低, 到后期能够保留较好的个体并防止算法陷入局部最优解, 从而求得全局最优解。

2.4 研究评述

本章从生鲜产品的库存管理、考虑保鲜技术的易变质品库存研究以及多品联合补货问题等三个方面对国内外相关文献进行梳理总结, 从已有的研究可以看出,

生鲜产品的库存管理和联合补货问题受到了国内外学者的广泛关注,对该领域的研究也有了一定的成果。通过以上的文献综述可以总结出以下 4 点:

(1) 近年来,众多学者对生鲜品库存管理进行了研究,生鲜产品在库存管理方面已取得很大进展,然而,大部分研究生鲜品的库存管理时,主要针对生鲜品的重要参数需求率、变质率、定价等方面进行研究,易腐品的库存与定价联合决策时重点关注单一品种,多品补货和库存决策尚未引起足够重视。在实际中,零售商为了提高竞争力、节约成本通常会一次性采购多种产品。

(2) 对于生鲜产品的库存模型来说,大多数的库存模型都假设产品的变质率是自然现象不能改变的,而在实际过程中,可通过一些先进的保鲜技术或设备来影响产品的变质率,当生鲜品开始变质时,零售商可以投资保鲜技术或设备来减少因变质带来的经济损失。事实上,生鲜产品离不开保鲜技术或保鲜设备,大量研究也表明,降低产品的变质率有利于增加企业的利润。

(3) 多品联合补货策略已被证实在获取数量折扣、降低库存成本方面是非常有效的策略。然而,由于生鲜产品具有易腐败、不易储存等特点,鲜少有关生鲜品联合补货问题的研究。部分文献考虑生鲜产品的联合补货问题时并未考虑到定价的问题,当同时考虑补货与定价时,一般考虑的都是传统 EOQ 的补货形式,很少有文献研究多品联合补货的策略进行补货。

(4) 鉴于 JRP 问题 NP-hard 性质,大多数学者采用进化算法进行求解,常见的求解 JRP 的算法有 DE、遗传算法(Genetic Algorithm, GA)、粒子群算法(Particle Swarm Optimization, PSO)和模拟退火算法(Simulate Anneal, SA)等。研究表明 DE 算法具有便于编码和求解效率高的优势,是一种全局的优化算法,但在后期的进化过程中,收敛速度会变慢,也会容易陷入局部最优解,算法还存在进一步改进和优化的空间。因此,本文对标准 DE 算法进行改进,设计 ADEA 算法对模型进行求解,保证初始种群的多样性,避免陷入局部最优。

第三章 生鲜产品的联合补货与定价协同决策

生鲜产品的库存问题已经得到广泛研究，但大多数都是围绕单个品种且都是以传统的 EOQ 模型进行研究，鲜少有文章考虑生鲜产品的联合补货问题。本章节主要以同一类型的多个生鲜产品为研究对象，考虑产品的变质率，引入与价格相关的需求函数，采用联合补货的策略对多种商品进行补货，研究生鲜产品的多品联合补货策略以及面向消费者的定价问题。由于联合补货问题属于 NP-hard 题，本文的研究对象又是非立即变质品，增加了求解难度，鉴于此，本文首先对目标函数进行化简，去掉目标函数中的指数函数，并对传统的 DE 算法进行改进，设计一种快速高效的自适应差分进化算法对模型进行求解。

本章 3.1 节是对生鲜品库存管理与定价决策的问题描述。3.2 节是模型假设与符号说明。3.3 节是根据问题描述构建生鲜产品的联合补货与定价决策模型。3.4 节介绍求解模型的 DE 算法以及改进的 DE 算法。3.5 节首先进行算法实验，寻找算法最优参数组合，其次进行数值实验与重要参数的敏感性分析，得出相关结论与管理启示。

3.1 问题描述

在全球一体化快速发展的进程中，随着不同企业之间产品的质量和价格的差异性越来越小，企业已从产品价格、质量的竞争转变成供应链的竞争，而供应链的竞争往往体现在多品采购方面。多品联合采购主要向一个供应商或多个供应商同时采购多种商品，从而减少补货次数，降低补货成本，增加企业的竞争力。对于生鲜零售商来说，生鲜农产品具有易损耗、不易存储等特性，面对多样化的消费者需求，如何制定库存策略以及定价策略以实现总利润最大是零售商最主要的问题。

基于上述问题，在单个供应商和单个零售商构成的供应链系统中，零售商向供应商一次采购多种的生鲜商品，整个过程中，零售商不仅需要考虑商品易变质的特性，也需要合理地协调商品的采购周期、采购量并且制定合理的价格，使得总利润最大。

3.2 模型假设与符号说明

根据非立即变质品的特性和联合补货问题做如下假设：

- (1) 考虑同一类型的多个非立即变质品
- (2) 不考虑补货的提前期，且不允许缺货
- (3) 市场需求与市场价格成线性相关，即 $D_i(p) = a_i p_i^{-b_i}$ ，其中 a_i 是产品 i 的需

求规模, b_i 是产品 i 的价格敏感系数^[21];

(4) 采用周期性查看库存策略, 所有产品的补货都建立在一个确定的基本补货周期 T 之上, 产品 i 的补货周期 T_i 是这个基本补充周期的整数(k_i)倍, 即 $T_i = k_i T$;

(5) 产品 i 进入库存后存在一个固定的保鲜期 t_{di} , 在 $[0, t_{di}]$ 时段内, 产品不发生变质, 经过 t_{di} 后, 产品 i 以固定的变质率 θ_i 发生变质;

其他符号定义如表 3.1 所示:

表 3.1 模型参数及其含义

符号	含义及描述
n	产品的种类数
h_i	单位产品 i 单位时间的库存持有成本
s_i	产品 i 订货时的次要订货成本
S	每一次补货的主要订货成本
p_i	产品 i 单位时间的销售价格
c_i	产品 i 单位时间的采购价格
Q_i	一个补货周期内产品 i 的补货量
$I_{1i}(t)$	产品 i 变质前的库存水平
$I_{2i}(t)$	产品 i 变质后的库存水平

3.3 模型构建

商品进入库存后不会立即变质, 会有一定的保鲜期 t_{di} , 只有过了保鲜期商品才会开始变质, 在保鲜期内商品不会发生变质, 在一个补货周期 T 内, 零售商的利润主要来自于商品销售, 其成本则包括库存持有成本、平均购买成本以及订货成本, 模型的目标函数是单位时间的总利润最大。

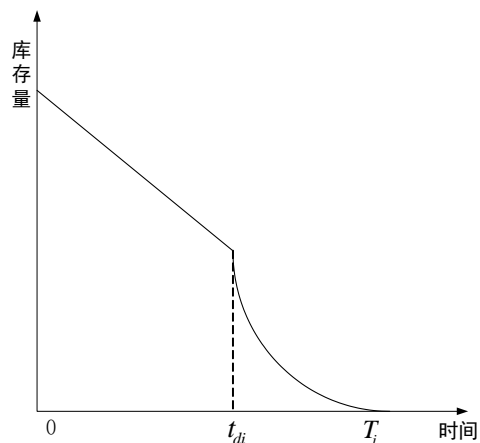


图 3-1 情况 1 ($T_i > t_{di}$)

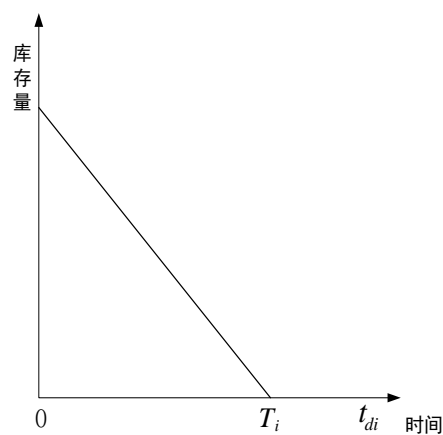


图 3-2 情况 2 ($T_i \leq t_{di}$)

由于本模型考虑的是多种产品的联合补货策略,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。因此,对于产品 i ,其库存水平随时间的变化可能存在如下两种情况:1) $T_i > t_{di}$ 和2) $T_i \leq t_{di}$ 。如图3-1和3-2所示。

情况1: 当 $T_i > t_{di}$ 时,在产品保鲜期 $[0, t_{di}]$ 内,由于产品还未发生变质,产品库存水平呈线性下降的原因是由于消费者需求的消耗导致的;在产品变质期 $[t_{di}, T_i]$ 内,产品开始发生变质,产品库存水平呈非线性下降的原因除了消费者需求的消耗还有产品因变质带来的损耗,并在 T_i 时刻下降为0。则库存随时间的变化情况为

$$\frac{dI_{li}(t)}{dt} = -D_i(p), 0 < t \leq t_{di} \quad (3.1)$$

在 $t=0$ 时刻,产品 i 的库存水平为 Q_i ,求解式(3.1),得到

$$I_{li}(t) = Q_i - D_i(p)t, 0 < t \leq t_{di} \quad (3.2)$$

在变质期 $[t_{di}, T_i]$ 区间内,产品 i 的库存水平满足

$$\frac{dI_{2i}(t)}{dt} = -D_i(p) - \theta_i I_{2i}(t), t_{di} < t \leq T_i \quad (3.3)$$

在 $t=T_i$ 时刻,产品 i 的库存水平下降至0。因此 $I_{2i}(T_i)=0$,求解式(3.3),得到

$$I_{2i}(t) = \frac{D_i(p)}{\theta_i} [e^{\theta_i(T_i - t_{di})} - 1], t_{di} < t \leq T_i \quad (3.4)$$

在 $t=t_{di}$ 处,由函数的连续性可知, $I_{li}(t_{di})=I_{2i}(t_{di})$,联合式(3.2)和(3.4)可得每周期的补货量为

$$Q_i = \frac{D_i(p)}{\theta_i} [e^{\theta_i(T_i - t_{di})} - 1] + D_i(p)t_{di} \quad (3.5)$$

将式(3.5)代入(3.2),得到

$$I_{li}(t) = \frac{D_i(p)}{\theta_i} [e^{\theta_i(T_i - t_{di})} - 1] + D_i(p)(t_{di} - t), 0 < t \leq t_{di} \quad (3.6)$$

(1) 平均库存持有成本

平均库存持有成本与单位时间的库存持有成本和库存量有关,从图3-1可以看出,商品的库存量包括变质前 $[0, t_{di}]$ 内的库存量和变质期内 $[t_{di}, T_i]$ 的库存量,因此,单位时间内所有产品的平均库存持有成本为

$$HC_1 = \sum_{i=1}^n \frac{h_i}{T_i} \left[\int_0^{t_{di}} I_{li}(t) dt + \int_{t_{di}}^{T_i} I_{2i}(t) dt \right]. \quad (3.7)$$

式(3.4)和(3.6)代入(3.7),得到

$$HC_1 = \sum_{i=1}^n \frac{h_i D_i(p)}{T_i} \left\{ \frac{t_{di}}{\theta_i} [e^{\theta_i(T_i - t_{di})} - 1] - \frac{1 + \theta_i(T_i - t_{di}) - e^{\theta_i(T_i - t_{di})}}{\theta_i^2} + \frac{t_{di}^2}{2} \right\} \quad (3.8)$$

(2) 平均购买成本

平均购买成本与产品自身的采购成本和采购量相关,因此,单位时间内所有产品的购买成本为

$$PC_1 = \sum_{i=1}^n \frac{c_i Q_i}{T_i} = \sum_{i=1}^n \frac{c_i D_i(p)}{k_i T} \left\{ \frac{1}{\theta_i} [e^{\theta_i(T_i - t_{di})} - 1] + t_{di} \right\} \quad (3.9)$$

(3) 总订货成本

总订货成本包括主要订货成本和次要订货成本，其中，主要订购成本包括订购所有货物时所产生的一次费用，如油费、过路费等，次要订货费用与产品的数量有关，包括订购每件产品所花费的费用，如装卸费、包装费等。因此，单位时间内所有产品的总订货成本为

$$OC_1 = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^n \left(S + \frac{s_i}{k_i} \right) \quad (3.10)$$

(4) 销售收入

零售商的收入主要与商品的销售价格以及需求量有关，因此所有产品的总收入为

$$SR_1 = \sum_{i=1}^n p_i D_i(p) \quad (3.11)$$

因此，当 $T_i > t_{di}$ 时，则零售商的总利润可表示为：

$$\begin{aligned} \Pi_1(p_i, T, k_i) &= SR_1 - PC_1 - HC_1 - OC_1 \\ &= \sum_{i=1}^n p_i D_i(p) - \sum_{i=1}^n \frac{c_i D_i(p)}{k_i T} \left\{ \frac{1}{\theta_i} [e^{\theta_i(T_i - t_{di})} - 1] + t_{di} \right\} - \sum_{i=1}^n \frac{h_i D_i(p)}{T_i} \\ &\quad \left\{ \frac{t_{di}}{\theta_i} [e^{\theta_i(T_i - t_{di})} - 1] - \frac{1 + \theta_i(T_i - t_{di}) - e^{\theta_i(T_i - t_{di})}}{\theta_i^2} + \frac{t_{di}^2}{2} \right\} - \frac{1}{T} \sum_{i=1}^n \left(S + \frac{s_i}{k_i} \right) \end{aligned} \quad (3.12)$$

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期，零售商能在产品发生变质前售完所有的产品，故在该情况下，不考虑产品的变质损耗，库存水平的下降仅与消费者需求的消耗有关，则单位时间的总利润为

$$\Pi_2(p_i, T, k_i) = \sum_{i=1}^n (p_i - c_i) D_i(p) - \sum_{i=1}^n \frac{h_i D_i(p) T_i}{2} - \frac{1}{T} \sum_{i=1}^n \left(S + \frac{s_i}{k_i} \right) \quad (3.13)$$

综合上述 2 种情况，结合 $T_i = k_i T$ ，系统单位时间内的总利润可表示为

$$\begin{aligned} \Pi(p_i, T, k_i) &= \sum_{i=1}^n \frac{[1 + \text{sign}(k_i T - t_{di})]}{2} \left\{ p_i D_i(p) - \frac{c_i D_i(p)}{k_i T} \left\{ \frac{1}{\theta_i} [e^{\theta_i(T_i - t_{di})} - 1] + t_{di} \right\} - \frac{h_i D_i(p)}{k_i T_i} \left\{ \frac{t_{di}}{\theta_i} [e^{\theta_i(T_i - t_{di})} - 1] - \frac{1 + \theta_i(T_i - t_{di}) - e^{\theta_i(T_i - t_{di})}}{\theta_i^2} \right\} - \frac{s_i}{k_i T} \right\} + \\ &\quad \sum_{i=1}^n \frac{[1 - \text{sign}(k_i T - t_{di})]}{2} \left\{ p_i D_i(p) - c_i D_i(p) - \frac{h_i D_i(p) T_i}{2} - \frac{s_i}{k_i T} \right\} - \frac{S}{T} \end{aligned} \quad (3.14)$$

本文的目标函数不仅属于 NP-hard 题，也包含了高维度的指数函数式，直接求解目标函数非常复杂，因此，本文首先对目标函数进行化简，采用泰勒展开的方式去掉目标函数中的指数函数式，接着采用进化算法对模型进一步求解。令：

$$e^{\theta_i(T_i - t_{di})} \approx 1 + \theta_i(T_i - t_{di}) + \frac{1}{2} \theta_i^2 (T_i - t_{di})^2 \quad (3.15)$$

因此，情况 1 中的库存持有成本以及平均采购成本近似为

$$HC_1 = \sum_{i=1}^n \frac{h_i D_i(p)}{2k_i T} [\theta_i t d_i (k_i T - t d_i)^2 + (k_i T)^2] \quad (3.16)$$

$$PC_1 = \sum_{i=1}^n \frac{c_i D_i(p)}{k_i T} \left[\frac{1}{2} \theta_i (k_i T - t d_i)^2 + k_i T \right] \quad (3.17)$$

则情况 1 下的总利润化简为

$$\begin{aligned} \Pi_1(p_i, T, k_i) = & \sum_{i=1}^n p_i D_i - \sum_{i=1}^n \frac{c_i D_i(p)}{k_i T} \left[k_i T + \frac{1}{2} \theta_i (k_i T - t d_i)^2 \right] - \\ & \sum_{i=1}^n \frac{h_i D_i(p)}{2k_i T} [\theta_i t d_i (k_i T - t d_i)^2 + (k_i T)^2] - \frac{1}{T} \sum_{i=1}^n (S + \frac{s_i}{k_i}) \end{aligned} \quad (3.18)$$

综合情况 1 和情况 2，结合 $T_i = k_i T$ ，目标函数的表达式可近似表示为

$$\begin{aligned} \Pi(p_i, T, k_i) = & \sum_{i=1}^n \frac{[1 + \text{sign}(k_i T - t d_i)]}{2} \{ p_i D_i(p) - \frac{c_i D_i(p)}{k_i T} \left[k_i T + \frac{1}{2} \theta_i (k_i T - t d_i)^2 \right] - \\ & \sum_{i=1}^n \frac{h_i D_i(p)}{2k_i T} [\theta_i t d_i (k_i T - t d_i)^2 + (k_i T)^2] - \frac{s_i}{k_i T} \} + \sum_{i=1}^n \frac{[1 - \text{sign}(k_i T - t d_i)]}{2} \\ & \{ p_i D_i(p) - c_i D_i(p) - \frac{h_i D_i(p) T_i}{2} - \frac{s_i}{k_i T} \} - \frac{S}{T} \end{aligned} \quad (3.19)$$

3.4 模型求解

由于联合补货问题属于 NP-hard 题，最开始，求解 JRP 问题以启发式算法为主，近年来，进化算法受到了大量学者的关注。DE 算法是进化算法的一种，由 Storn 和 Price^[88]于 1997 年首次提出用于求解复杂优化问题的随机搜索算法，由于其操作简单、参数较少等优势被越来越多的人采用。然而，传统的 DE 算法在后期的进化过程中，收敛速度会变慢，容易陷入局部最优解。因此，本文尝试改进传统的 DE 算法，设计一种自适应差分进化算法对模型进行求解，提高求解的效率。

3.4.1 差分进化算法

差分进化算法与遗传算法一样都是按照自然界适者生存、优胜劣汰的选择规律淘汰较差的个体，保留较好的个体。在流程上也非常相似，主要包括变异、交叉、选择等过程，但与遗传算法不同的是，差分算法的变异策略与交叉策略没有遗传算法的种类多。DE 算法主要包括参数设置、种群初始化、变异、交叉、选择等以下过程：

(1) 参数设置

DE 算法的控制参数主要包括种群规模 NP、变异概率因子 F 和交叉概率因子 CR，选取合适的参数对算法的性能至关重要。

一般地，种群规模 NP 越大则种群的多样性越大，增加了种群在局部最优逃脱的可能性，有利于全局搜索，但也增加了目标函数的计算速度和计算时间。种群多样性较小，虽有利于进行局部搜索，收敛速度快，但是容易陷入局部最优。

变异概率因子 F 用于控制差分向量对于个体的影响，一般在 [0,1] 之间选取。F 较大对于基向量的扰动较大，有利于保持种群多样性，F 较小扰动较小，种群的多

样性丧失过快，容易陷入局部最优。

交叉概率因子 CR 决定了变异向量和目标向量对实验向量的贡献，一般在 $[0,1]$ 之间选取。 CR 越大，有利于开拓新空间，但在进化后期不利于保持种群多样性，容易陷入局部最优。 CR 越小，有利于保持种群的多样性，降低了“早熟”的风险。

(2) 种群初始化

种群初始化是在一个解空间中随机生成多个可行解，每个可行解都可以视作种群中的个体，将这些个体通过编码表示为染色体，形成一个初始种群且种群大小在后续的过程中保持不变。若整个种群规模为 NP ，染色体长度为 D ，则种群 P 表示为

$$P = \{X_i^G \mid X_i^G = (X_{i,1}^G, X_{i,2}^G, \dots, X_{i,D}^G), i = 1, 2, \dots, NP\} \quad (3.20)$$

其中， i 为个体在种群中的序列； G 为进化代数； X_i^G 是 NP 个个体向量；

设个体 X_i^G 中第 j 个元素 $X_{i,j}^G$ 的上下界分别是 $X_{i,j}^{Upper}$ 和 $X_{i,j}^{Lower}$ ，依照式 (3.21) 生成随机的初始种群个体：

$$X_{i,j}^0 = X_{i,j}^{Lower} + rand(0,1) \times (X_{i,j}^{Upper} - X_{i,j}^{Lower}) \quad (3.21)$$

其中 $i = 1, 2, \dots, NP, j = 1, 2, \dots, D$ ， $rand(0,1)$ 是指按照均匀分布随机产生落在 0 和 1 之间的实数值。

(3) 变异操作

变异过程由变异算子进行控制，以产生新的染色体，针对种群中父代染色体 X_i^G 通过变异产生新的染色体，新的染色体通过公式 (3.22) 产生：

$$V_i^{G+1} = X_{r1}^G + F \times (X_{r2}^G - X_{r3}^G) \quad (3.22)$$

其中， F 是变异算子，用于控制变异程度，通常 $F \in [0,1]$ 。 $r1, r2, r3$ 是三个随机产生的有别于 i 的种群中三个不同位置的染色体，即 $r1 \neq r2 \neq r3 \neq i$ 。同时，我们也应该意识到要成功实现变异操作，必须保证种群规模 $NP \geq 4$ 。

(4) 交叉操作

交叉操作环节将产生新的自带种群。因此，将种群中目标向量个体 $X_{i,j}^G$ 和变异向量 $V_{i,j}^{G+1}$ 进行交叉操作，则可得到新的实验个体 $U_{i,j}^{G+1}$ 。为保证个体 $X_{i,j}^G$ 的进化，首先要进行随机选择，使得新的实验个体 $U_{i,j}^{G+1}$ 至少有一位由 $V_{i,j}^G$ 提供。交叉操作如式 (3.23) 所示：

$$U_{i,j}^{G+1} = \begin{cases} V_{i,j}^{G+1}, rand(j) \leq CR \text{ or } j = r \\ X_{i,j}^G, \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.23)$$

式中，为 $CR \in [0,1]$ 交叉算子， CR 越大产生新个体的机会越大，越能增加种群的多样性，但也导致进化过程的不稳定。 $rand(j)$ 用于产生随机数，且有 $rand(j) \in (0,1)$ ，

r 为 $[1,D]$ 之间随机产生的参数, 用来确保实验向量至少能从变异向量中获得一个参数。

(5) 选择操作

选择操作是对子代新个体进行选择判断, 用以更新种群的操作, 即在选择操作中, 通过比较实验向量的适应度值和目标向量的适应度值来决定谁进入下一代, 当目标函数为总成本函数时, 选择适应度值小的进入下一代, 当目标函数为总利润函数时, 选择适应度值大的进入下一代, 如极大值问题, 选择规则是:

$$X_i^{G+1} = \begin{cases} u_i^{G+1}, & \text{fitness}(u_i(G)) > \text{fitness}(x_i(G)); \\ x_i^G, & \text{Otherwise.} \end{cases} \quad (3.24)$$

$\text{fitness}()$ 为适应度函数, 通常为问题的目标函数。染色体更新操作发生条件是, 当新的染色体的适应度函数优于当前的适应度函数, 用新的染色体更新当前染色体, 否则, 当前染色体不进行更新。

3.4.2 改进的差分进化算法设计

传统的 DE 算法在后期的进化过程中, 收敛速度会变慢, 也会容易陷入局部最优解等情况, 调整变异算子和交叉算子既能保证种群个体在初期的多样性, 又能保证在全局得到最优解。为此, 本文尝试改进传统 DE 算法中变异算子和交叉算子在进化过程中保持不变的形式, 使其随着迭代次数的变化进行调整。改进的 ADEA 算法设计流程如下:

(1) 染色体编码。在对染色体编码时, 用 n 表示物品数, 产生长度为 $2n+1$ 的个体, 例如, 如果采购 6 种物品, 则染色体长度为 13, 染色体第 1 部分的 6 个基因是物品 i 的周期乘子 k_i ; 染色体第 2 部分的 1 个基因是物品的补货周期 T ; 染色体第 3 部分的 6 个基因是物品 i 的定价 p_i ; 如图 3-3 所示

1	1	2	1	1	2	0.14	4.36	2.47	2.69	3.46	14.28	16.31
---	---	---	---	---	---	------	------	------	------	------	-------	-------

图 3-3 染色体 ($n=6$)

(2) 初始化种群, 进行相关设置。设置 ADEA 相关参数染色体规模 NP、染色体长度为 D 、差分进化算子 CR_{\min} CR_{\max} F_{\min} F_{\max} , 按照参数设置内随机赋值的方式产生初始种群, 如下式:

$$k_i = \text{randi}([1,5]) \quad (3.25)$$

$$T = \text{rand}(0,1) \quad (3.26)$$

$$p_i = 50\text{rand}(0,1) \quad (3.27)$$

其中, $randi([1,5])$ 函数表示按照均匀分布的方式产生 1 至 5 的随机整数, $rand(0,1)$ 函数表示生成 (0,1) 之间均匀分布的随机数。

(3) 变异操作。选择种群的第($t=G$)代染色体作为变异的目标向量, 随机产生三个不同整数的第 r_1 、 r_2 、 r_3 条的染色体, 前六个基因按照 (3.29) 式进行变异操作, 后七个基因按照 (3.30) 式进行变异操作。

$$F = F_{\min} + (F_{\max} - F_{\min}) \times e^{\left(1 - \frac{GenM}{GenM - G + 1}\right)} \quad (3.28)$$

$$V_i(G+1) = round(X_{r_1}(G) + F \times (X_{r_2}(G) - X_{r_3}(G))) \quad (3.29)$$

$$V_i(G+1) = X_{r_1}(G) + F \times (X_{r_2}(G) - X_{r_3}(G)) \quad (3.30)$$

其中, F_{\min} 是变异算子的最小值, F_{\max} 是变异算子的最大值, $GenM$ 是最大迭代代数, G 是当前迭代的代数, F 为变异算子通常取值 [0,1] 之间, $round()$ 函数表示按照四舍五入的方式进行取整, V_i 是变异后的染色体, X_{r_1} 代表第 r_1 条染色体上的一个个体。

(4) 交叉操作。对每一个维度随机产生一个长度为 $13=(6+1+6)$ 的向量, 通过式 (3.32) 将目标向量 X_{ij}^G 和变异向量 v_{ij}^{G+1} 进行交叉操作, 产生实验向量 u_{ij}^{G+1}

$$CR = CR_{\max} - \frac{G(CR_{\max} - CR_{\min})}{GenM} \quad (3.31)$$

$$u_{ij}^{G+1} = \begin{cases} v_{ij}^{G+1}, & rand(j) \leq CR \text{ or } j = r; \\ x_{ij}^G, & \text{Otherwise.} \end{cases} \quad (3.32)$$

其中: $i=1,2,\dots,Np$, $j=1,2,\dots,Nd$, CR_{\min} 是交叉算子的最小值, CR_{\max} 是交叉算子的最大值, CR 为交叉算子通常取值 [0,1] 之间; r 为 [1, d] 之间的一个随机整数, 保证实验向量中至少有一个元素来自变异向量。

(5) 选择及更新操作。根据式 (3.33) 选择规则, 计算每个染色体的适应度值, 并将目标向量和实验向量的适应度值进行比较, 由于本文的适应度值为利润, 适应值越大代表染色体越好, 选择适应度值较高的染色体进入下一代种群, 重复步骤 (3) ~ (5), 直至达到最大的迭代数量。

$$X_i^{G+1} = \begin{cases} u_i^{G+1}, & fitness(u_i(G)) > fitness(x_i(G)); \\ x_i^G, & \text{Otherwise.} \end{cases} \quad (3.33)$$

(6) 输出最优结果。当最大的迭代数量达到以后, ADEA 算法即停止运行, 输出最佳适应度、最佳适应度对应染色体以及最优解。当最佳适应度对应的染色体 k_i 、 T 、 p_i 已知时, 通过公式 (3.5) 可求出产品 i 的补货量 Q_i^* 。

ADEA 算法求解 JRP 问题的流程图如图 3-4 所示

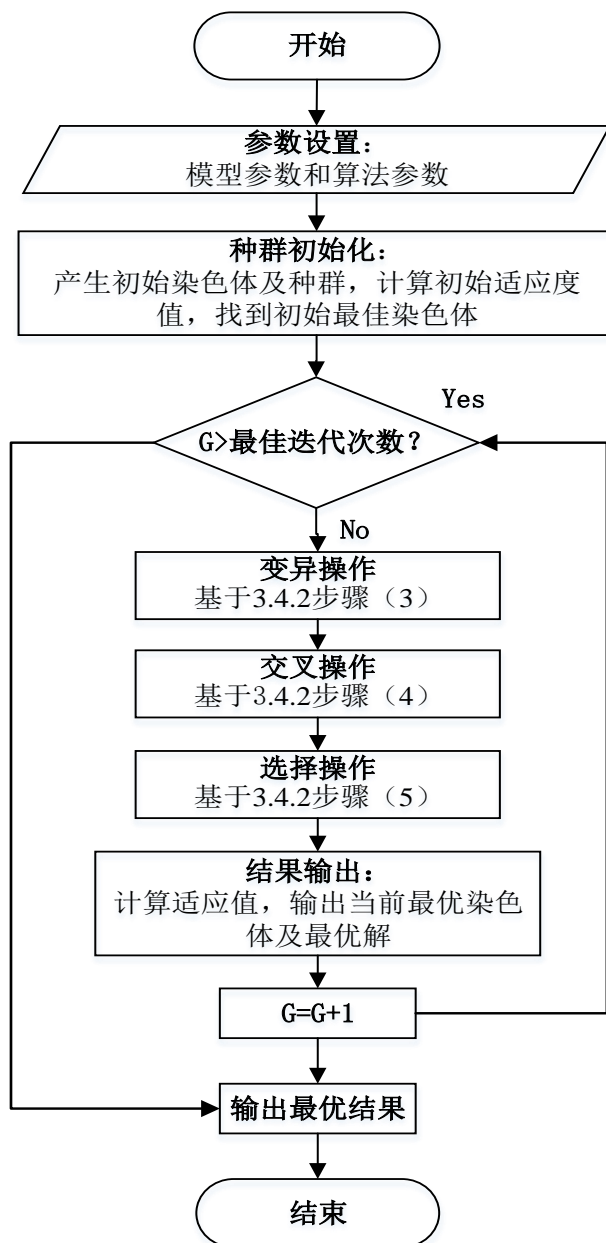


图 3-4 ADEA算法流程图

3.5 数值与算例分析

基于非立即变质品的特点与库存背景, 构建生鲜产品的联合补货与定价决策模型, 对传统 DE 算法进行改进, 设计 ADEA 算法对模型进行求解。本节通过算法实验首先得出 ADEA 的最佳参数设置, 并与其他算法进行对比分析, 验证此算法的有效性, 其次, 进行数值实验, 得出本章的结论, 验证模型的有效性, 最后, 对模型的重要参数进行敏感性分析, 探究参数对总利润的影响。

故本节主要分为三个研究部分, 第一部分是研究 ADEA 算法的求解效率及稳定性, 得到 ADEA 算法的最佳参数组合。第二部分是对模型的有效性分析。第三部分是对模型的重要参数进行敏感性分析。实验环境如下: 算法运行硬件环境为一

台 2.70GHz CPU 的个人电脑上, 4GB RAM, 运行的软件环境为 Windows 8 Home Premium, 程序采用 Matlab R2016b 编码。

3.5.1 实验数据

数值算例的部分参数来源于文献^[90]。表 3.2 列出了实验的所有初始化参数, 该算法的比较算法有 GA、PSO 和 DE 算法。所有算法的总体规模和最大迭代次数分别被相等地设置为 30 和 200。虽然遗传算法、粒子群算法和差分进化算法的性能在许多研究中得到了证明, 但由于本文首次把联合补货与定价相结合, 目标函数为利润最大化。因此, 我们不会提供前缀值, 而是为每个测试算法提供控制参数的域。通过参考前人的经验, 表 3.3 给出了各算法的控制参数设置和进化策略。

表 3.2 实验数据参数

商品	a_i	b_i	h_i	s_i	c_i	θ_i	t_{di}	S
1	250000	2.5	0.97	32	7.7	0.2	0.1	200
2	400000	3	1.66	27	2.29	0.7	0.07	
3	100000	5	0.24	40	0.99	0.1	0.13	
4	100000	2	2.65	52	5.6	0.2	0.05	
5	200000	2	3	26	9.1	0.9	0.03	
6	300000	2.5	1.98	31	5.36	0.4	0.08	

表 3.3 GA、PSO、ADEA和DE算法的设置

	选择	变异算子	交叉算子	Pop size	Max step	Running times
GA	轮盘赌策略	[0.1:0.2:0.9]	[0.1:0.2:0.9]	30	200	30
PSO	精英策略	C1,C2:[0.2:0.4:2.0]	——	30	200	30
DE	贪婪策略	[0.2:0.4:1.0]	[0.1:0.2:0.9]	30	200	30
ADEA	贪婪策略	F_{\min} :[0.1:0.2:0.5] F_{\max} :[0.9:0.8:0.5]	CR_{\min} :[0.1:0.2:0.5] CR_{\max} :[0.9:0.8:0.5]	30	200	30

3.5.2 算法实验

(1) 算法性能验证

首先进行试点试验, 为进一步研究寻找合适的控制参数组合。用上述 6 种商品的算例进行实验, 分别测试 GA、DE、PSO、ADEA 在各自参数设置组合下算法的搜索效果。为了客观全面的体现算法性能, 每种参数组合下 4 种算法都重复运

行 30 次并统计了三个指标分别为平均总利润 Ave Π 、标准差 Std Err、运行时间 C.T.(S)。

表 3.4 GA、PSO、DE和ADEA算法的测试结果

	No.	Crossover	Mutation	Ave Π	Std Err	C.T.(S)
GA	1	0.1	0.1	25222.67	2710.95	0.03
	2	0.5	0.1	26886.33	2771.96	0.04
	3	0.9	0.1	25865.93	2429.93	0.05
	4	0.1	0.5	28771.06	1735.52	0.03
	5	0.5	0.5	29974.84	1194.91	0.04
	6	0.9	0.5	30522.57	637.60	0.06
	7	0.1	0.9	29322.84	914.77	0.03
	8	0.5	0.9	30401.40	943.76	0.05
	9	0.9	0.9	30675.35	615.18	0.05
PSO	1	0.6	0.6	26698.04	2152.18	0.21
	2	1.0	0.6	27575.26	1843.33	0.21
	3	1.4	0.6	27100.94	1893.54	0.21
	4	1.8	0.6	27727.42	1986.72	0.20
	5	0.6	1.0	26135.31	1895.08	0.21
	6	1.0	1.0	26433.21	2796.18	0.21
	7	1.4	1.0	26502.18	1559.97	0.21
	8	1.8	1.0	26247.46	2451.90	0.21
	9	0.6	1.4	24355.86	2728.23	0.21
	10	1.0	1.4	24176.44	2693.03	0.21
	11	1.4	1.4	24147.20	2640.95	0.21
	12	1.8	1.4	24519.17	2746.99	0.20
	13	0.6	1.8	22776.55	2877.34	0.21
	14	1.0	1.8	23459.91	2750.27	0.21
	15	1.4	1.8	23632.02	2952.83	0.20
	16	1.8	1.8	23517.48	2786.93	0.21
DE	1	0.3	0.2	30634.18	630.85	0.09
	2	0.6	0.2	30778.60	482.07	0.09
	3	0.9	0.2	30692.49	382.38	0.09
	4	0.3	0.6	31055.70	0.01	0.09
	5	0.6	0.6	31055.71	0.00	0.09
	6	0.9	0.6	30967.98	153.04	0.09
	7	0.3	1.0	30846.18	96.74	0.09
	8	0.6	1.0	31040.92	12.11	0.09
	9	0.9	1.0	30491.58	393.85	0.09

续表 3.4 GA、PSO、DE 和 ADEA 算法的测试结果

	No.	Crossover	Mutation	Ave Π	Std Err	C.T.(S)
	1	0.1	0.9	31055.28	2.32	0.10
	2	0.2	0.8	31055.71	0.00	0.09
ADEA	3	0.3	0.7	31055.29	2.32	0.09
	4	0.4	0.6	31055.29	2.32	0.09
	5	0.5	0.5	31011.40	208.15	0.09

具体来说,在表 3.4 中,对于 GA 算法,当控制参数的组合,即交叉概率和变异概率等于 (0.9,0.9) 时,分别达到最大的利润和最小的标准误差。对于 PSO 算法,当两个控制参数 C1 和 C2 的组合等于 (1.8,0.6) 时,利润与标准误差相对最佳。对于 DE 算法,当其变异概率和交叉概率的组合为 (0.6,0.6) 时,得到最佳结果。对于 ADEA 算法,当交叉概率和变异概率的取值范围都在 [0.2,0.8] 时,最大利润和标准误差达到最佳。因此,基于这些参数组合进行以下实验。而本文主要采用 ADEA 算法进行求解模型,由表 3.4 也可以看出,虽然 DE 和 ADEA 的求解精度大致相同,但变异算子对 DE 算法的影响很大,改变变异算子,DE 算法的结果将变化很大。而 ADEA 算法将通过迭代次数的变化不断调整变异算子,使结果更加稳定。

为了更有说服力地证明不同组合对种群规模的影响以及每种算法的最大迭代次数对模型搜索结果的影响,在 4 种算法上都进行实验,每种组合运行 30 次,统计平均总利润 Ave Π 、标准差 Std Err、运行时间 C.T.(S),结果收集在表 3.5 中。

表 3.5 GA、PSO、DE 和 ADEA 算法在不同种群规模和最大步长组合下的结果

(Popsiz e, Maxstep)	GA			PSO			DE			ADEA		
	Ave Π	Std Err	C.T (S)	Ave Π	Std Err	C.T. (S)	Ave Π	Std Err	C.T. (S)	Ave Π	Std Err	C.T. (S)
(20,100)	29002.05	1996.81	0.02	25405.95	2757.81	0.07	30842.16	246.51	0.03	30866.73	313.50	0.03
(20,200)	30588.35	656.36	0.04	26086.93	2783.99	0.15	31055.71	0.01	0.07	31019.63	145.93	0.06
(20,400)	30880.13	249.27	0.08	26529.45	2744.59	0.28	31004.67	279.54	0.12	31055.71	0.00	0.12
(30,100)	30015.42	1100.51	0.03	27518.09	1743.64	0.11	30944.30	53.04	0.05	31014.83	108.66	0.05
(30,200)	30799.41	344.98	0.06	27537.82	1813.70	0.21	31055.71	0.00	0.09	31055.71	0.00	0.09
(30,400)	30949.27	140.99	0.11	28011.53	1272.53	0.41	31055.71	0.00	0.17	31055.71	0.00	0.17
(50,100)	30592.83	562.56	0.05	27423.61	1878.20	0.17	30953.56	51.46	0.07	31032.80	83.26	0.07
(50,200)	30733.32	627.05	0.09	28582.91	1078.46	0.33	31055.71	0.00	0.14	31055.71	0.00	0.14
(50,400)	31027.77	35.93	0.21	28664.77	914.94	0.67	31055.71	0.00	0.29	31055.71	0.00	0.28

由表 3.5 可以看出, GA 和 PSO 在组合 (50,400) 中达到最大利润和最小标准误差, DE 和 ADEA 在组合 (30,200) 中达到最大利润和最小标准误差。因此, 通过平衡四个评估标准的结果, 即目标值的均值和标准差以及运行时间, 在随后的实验中, GA 和 PSO 算法的种群大小和最大搜索迭代次数的选择组合是 (50,400), DE 和 ADEA 算法的种群大小和最大搜索迭代次数的选择组合是 (30,200)。

从表 3.5 也可以看出, GA 和 PSO 搜索到的平均总利润随着种群规模和迭代次数在逐渐增加, 但在 (50,400) 也没有出现稳定收敛, 说明 GA 和 PSO 的搜索效率太低, 难以通过调整算法参数, 使得算法性能提高。ADEA 和 DE 搜索到的平均总利润随着种群规模和迭代次数在逐渐增加并且在 (30,200) 之后达到稳定收敛, 尽管在 (50,100) 中表现出不稳定的情况, 主要是由于迭代次数太小的缘故, 总的看来, ADEA 和 DE 不管在收敛精度还是标准差方面都比 GA 和 PSO 具有优势。

为了更直观的看出 ADEA 算法的优势, 采用以上试点实验 ADEA 得到的较好参数: 种群规模为 30、最大迭代次数为 200, 交叉概率和变异概率的取值范围都在 [0.2,0.8], 画出图 3.5 为 ADEA 算法重复运行 30 次的结果。从图中可以看出, 30 次的运行结果最终收敛到一条线上, 且每一次运行的结果都找到了最优解 31055.71, 证明了 ADEA 算法高效的搜索能力与稳定性。

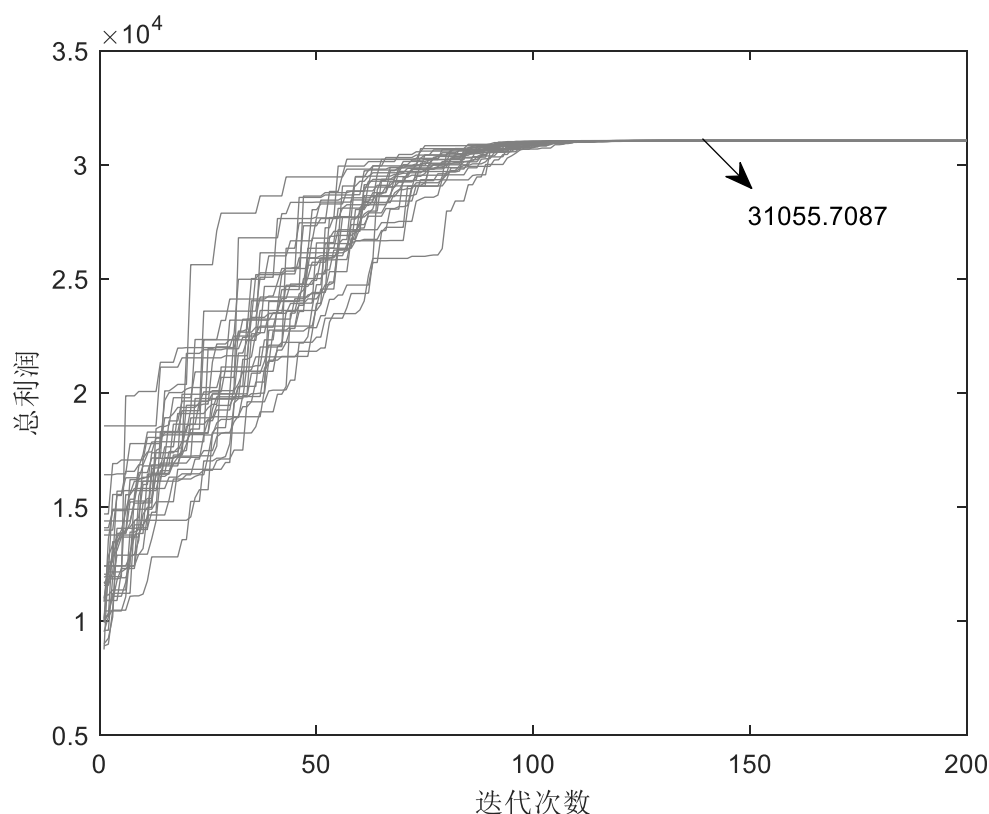


图 3-5 ADEA 重复运行 30 次所得的结果

(2) 对比结果与分析

由试点实验获得了较好的算法参数设置, 采用这些参数对四种算法进行实验, 每个算法运行 30 次并统计了 4 项指标, 每种算法搜索到的最优解 Best result、平均总利润 Ave Π 、标准差 Std Err 以及运行时间 C.T.(S)。实验结果如表 3.6 所示。

表 3.6 基于GA、PSO、DE和ADEA的计算结果

算法	Best result				Ave Π	Std Err	C.T.(S)
	k	T	p_i	Π			
GA	2,1,1,	0.1222	13.20,3.56,1.27,	31033.12	31026.13	46.68	0.17
	2,1,1		11.99,19.12,9.16				
PSO	2,1,4,	0.1213	12.80,3.63,1.36,	28891.83	29048.87	941.73	0.67
	2,1,1		12.29,14.70,9.80				
DE	2,1,1,	0.1234	13.14,3.62,1.26,	31055.71	31055.70	0.01	0.09
	2,1,1		12.03,19.16,9.17				
ADEA	2,1,1,	0.1234	13.15,3.62,1.26,	31055.71	31055.71	0.00	0.06
	2,1,1		12.03,19.16,9.17				

由表 3.6 可以看出: 四种算法在求解结果上的差异, 从求得平均利润来看, ADEA 和 DE 算法求出的结果大致相同, 大于 PSO 和 GA 求得平均利润; 从标准差来看, ADEA 和 DE 算法的标准差最低, PSO 算法的标准差最高; 从搜索的时间上来看, ADEA 的搜索时间是最快的, PSO 的搜索时间最慢。因此, ADEA 算法不管是在求解精度还是求解速度方面, 与其他算法相比都具有较大的优势。

为了更直观的看出四种算法的对比情况, 采用以上试点实验得到的较好参数组合 (30,200), 并用 Matlab R2016b 运行出 GA、PSO、ADEA 和 DE 算法下求解最优解的变化情况图 3-6。从图 3-6 中可以看出, 相比 GA、PSO 和 DE, ADEA 具有更高的收敛精度, 从收敛速度来看, GA 在 30 代左右收敛, PSO 在 80 代左右收敛, DE 和 ADEA 则在 110 代左右收敛, 说明 GA 和 PSO 较早陷入了局部最优, 收敛停滞。

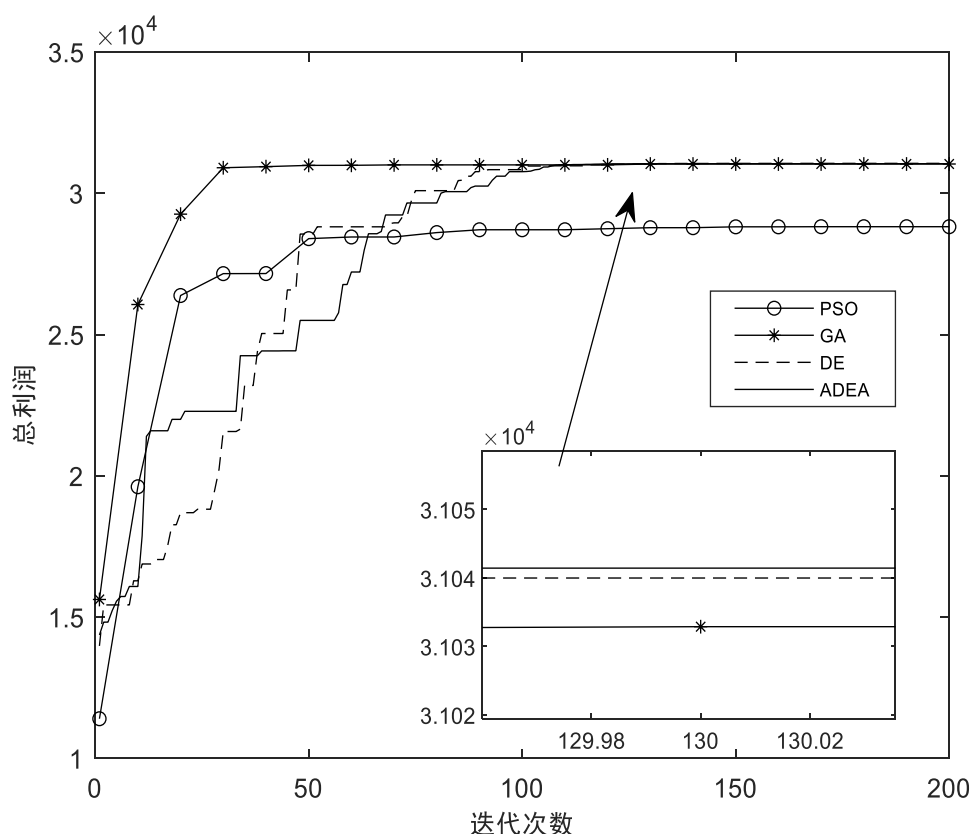


图 3-6 GA、PSO、DE和ADEA算法下最优解的变化情况

3.5.3 数值实验

为了证明模型的有效性,本小节基于不同的 s 值,采用联合补货的策略(策略1)与单独补货的策略(策略2)进行对比分析,实验结果表3.7所示,所有的实验数据是根据表3.2给定的参数值。

表 3.7 采用联合补货与单独补货的总利润比较

s	策略 1	策略 2	$\Pi_{cs}(\%)$
150	31474.92	28072.65	10.81
200	31055.71	26919.66	13.32
250	30663.00	25888.87	15.57
300	30293.31	24932.69	17.70
350	29957.81	24128.89	19.46

在策略2单独补货的实验中,这个问题可以被看作是对单个产品寻找最优的补货策略,最优的总利润是所有单个产品进行单独补货时的总利润之和,即不再考虑所有商品的共同补货周期,研究的是单一商品的补货策略,且每一个产品进行单独补货时都要考虑一次主要订货成本。其中, $\Pi_{cs}(\%)$ 表示采用联合补货策略比

采用单独补货策略所增加的总利润的百分比。以上实验结果表明：相比于单独补货，采用联合补货策略所得的总利润更高，这表明，联合补货策略是有益的。并且随着主要订购成本的增加，采用联合补货策略比采用单独补货策略所增加的利润比也在增加，这是因为，联合补货的策略可以减少产品的补货次数，从而减少企业的主要订购成本，因此，企业所获得的利润会比单独补货时要高，且随着主要订货成本的增加，其结果会更加显著。

3.5.4 敏感性分析

下面对一些重要参数作敏感性分析。保持其他参数不变，分别调整参数比例因子 a_i 、价格弹性指数 b_i 、变质率 θ_i 、变质期 td_i 值、主要订货成本 s 、次要订货成本 s_i 、采购成本 c_i 、库存持有成本 h_i ，变化范围为-40%、-20%、0、20%和40%，讨论各参数变化后最优结果的变动情况，各参数的敏感性分析结果如表3.8~3.15所示。

表 3.8 比例因子 a_i 的敏感性分析

参数	变化率	k	T	p_i	Π
a_i	-Δ 40%	2,1,1,2,1,1	0.1575	13.28,3.69,1.26,12.29,19.53,9.26	17590.58
	-Δ 20%	2,1,1,2,1,1	0.1371	13.20,3.65,1.26,12.14,19.30,9.20	24282.90
	0	2,1,1,2,1,1	0.1234	13.15,3.62,1.26,12.03,19.15,9.17	31055.71
	+Δ 20%	2,1,1,2,1,1	0.1133	13.11,3.60,1.25,11.96,19.05,9.14	37885.46
	+Δ 40%	2,1,1,2,1,1	0.1056	13.08,3.58,1.25,11.90,18.96,9.12	44757.02

表 3.9 价格弹性系数 b_i 的敏感性分析

参数	变化率	k	T	p_i	Π
b_i	-Δ 40%	2,1,1,2,1,1	0.0862	23.42,5.32,1.50,35.26,57.95,16.34	268126.62
	-Δ 20%	2,1,1,2,1,1	0.0993	15.67,4.08,1.34,15.81,25.20,10.93	81752.55
	0	2,1,1,2,1,1	0.1234	13.15,3.62,1.26,12.03,19.15,9.17	31055.71
	+Δ 20%	3,1,1,2,1,1	0.1519	12.21,3.40,1.21,10.50,16.68,8.32	13846.16
	+Δ 40%	4,1,1,2,1,2	0.1774	11.83,3.27,1.18,9.68,15.36,8.32	7193.47

表 3.10 变质期 td_i 的敏感性分析

参数	变化率	k	T	p_i	Π
td_i	- Δ 40%	2,1,1,2,1,1	0.1179	13.19,3.64,1.26,12.03,19.25,9.20	30717.66
	- Δ 20%	2,1,1,2,1,1	0.1204	13.17,3.63,1.26,12.03,19.20,9.18	30906.72
	0	2,1,1,2,1,1	0.1234	13.15,3.62,1.26,12.03,19.15,9.17	31055.71
	+ Δ 20%	2,1,1,2,1,1	0.1262	13.13,3.61,1.26,12.04,19.11,9.15	31176.05
	+ Δ 40%	2,1,1,2,1,1	0.1295	13.11,3.61,1.26,12.05,19.08,9.15	31272.34

表 3.11 变质率 θ_i 的敏感性分析

参数	变化率	k	T	p_i	Π
θ_i	- Δ 40%	2,1,1,2,1,1	0.1329	13.13,3.62,1.26,12.03,18.99,9.18	31245.93
	- Δ 20%	2,1,1,2,1,1	0.1279	13.14,3.62,1.26,12.03,19.08,9.17	31146.32
	0	2,1,1,2,1,1	0.1234	13.15,3.62,1.26,12.03,19.15,9.17	31055.71
	+ Δ 20%	2,1,1,2,1,1	0.1196	13.15,3.62,1.26,12.04,19.22,9.16	30972.70
	+ Δ 40%	2,1,1,2,1,1	0.1162	13.16,3.61,1.25,12.05,19.29,9.15	30896.13

表 3.12 主要订购成本 S 的敏感性分析

参数	变化率	k	T	p_i	Π
S	- Δ 40%	2,1,1,2,1,1	0.1100	13.10,3.59,1.25,11.93,19.01,9.13	31741.40
	- Δ 20%	2,1,1,2,1,1	0.1168	13.12,3.60,1.26,11.98,19.08,9.15	31388.71
	0	2,1,1,2,1,1	0.1234	13.15,3.62,1.26,12.03,19.15,9.17	31055.71
	+ Δ 20%	2,1,1,2,1,1	0.1297	13.17,3.63,1.26,12.08,19.22,9.18	30739.65
	+ Δ 40%	2,1,1,2,1,1	0.1355	13.19,3.64,1.26,12.12,19.29,9.20	30438.00

表 3.13 次要订购成本 s_i 的敏感性分析

参数	变化率	k	T	p_i	Π
s_i	- Δ 40%	2,1,1,1,1,1	0.1180	13.13,3.61,1.26,11.56,19.10,9.15	31637.16
	- Δ 20%	2,1,1,2,1,1	0.1180	13.13,3.61,1.26,11.99,19.10,9.15	31330.80
	0	2,1,1,2,1,1	0.1234	13.15,3.62,1.26,12.03,19.15,9.17	31055.71
	+ Δ 20%	2,1,1,2,1,1	0.1287	13.17,3.63,1.26,12.21,19.15,9.18	30792.28
	+ Δ 40%	2,1,1,2,1,1	0.1335	13.19,3.64,1.26,12.26,19.15,9.19	30539.11

表 3.14 采购成本 c_i 的敏感性分析

参数	变化率	k	T	p_i	Π
c_i	-Δ 40%	3,1,1,2,1,2	0.0559	7.86,2.13,0.75,7.04,11.15,5.55	115889.50
	-Δ 20%	2,1,1,2,1,1	0.0929	10.46,2.87,1.00,9.54,15.12,7.30	52832.04
	0	2,1,1,2,1,1	0.1234	13.15,3.62,1.26,12.03,19.15,9.17	31055.71
	+Δ 20%	2,1,1,2,1,1	0.1523	15.86,4.38,1.51,14.54,23.27,11.04	21006.26
	+Δ 40%	2,1,1,1,1,1	0.1936	18.67,5.19,1.76,16.36,27.66,13.00	15470.71

表 3.15 库存持有成本 h_i 的敏感性分析

参数	变化率	k	T	p_i	Π
h_i	-Δ 40%	2,1,1,1,1,1	0.1383	13.11,3.58,1.25,11.85,19.15,9.11	31857.19
	-Δ 20%	2,1,1,2,1,1	0.1304	13.13,3.60,1.25,11.95,19.15,9.14	31442.36
	0	2,1,1,2,1,1	0.1234	13.15,3.62,1.26,12.03,19.15,9.17	31055.71
	+Δ 20%	2,1,1,2,1,1	0.1175	13.16,3.64,1.26,12.12,19.16,9.19	30693.18
	+Δ 40%	2,1,1,2,1,1	0.1125	13.18,3.65,1.26,12.19,19.18,9.21	30351.08

(1) 随着比例因子 a_i 的增加或价格弹性系数 b_i 的减少, T 将减少, Π 将增加, 这是因为比例因子的增加或价格弹性系数的减少意味着产品的需求增加, 零售商将通过缩短补货周期, 增加补货量来满足更多的需求。

(2) 随着变质期 td_i 的增加或变质率 θ_i 的下降, T 、 Π 将增加, p_i 将减少, 产品的变质期增加或变质率下降, 意味着商品因变质造成的经济损失也会降低。这表明产品的保鲜期越长, 系统的整体利润也将增加, 因此, 零售商们可以采用相应的保存技术, 以延长产品的保鲜期或降低产品的变质率, 从而降低因变质造成的经济损失。

(3) 随着主要订购成本 s 、次要订购成本 s_i 以及采购成本 c_i 的增加, p_i 、 T 将增加, Π 将减少。主要订购成本、次要订购成本以及采购成本都是在采购过程中发生的一些成本, 当采购过程中的成本增加时, 企业应延长补货周期, 增加补货频率, 减少因采购过程带来的成本损失, 在定价方面, 由于采购过程中的成本增加, 企业为了保证自己的利润, 应提升价格。

(4) 随着库存持有成本 h_i 的增加, T 、 Π 将减少, p_i 将增加。当库存持有成本增加时, 零售商可通过增加补货频率和减少每次的补货量以避免库存过多, 也可稍微提高商品的价格以此减少因库存成本带来的损失。

(5) 补货周期乘子 k_i 对参数值的变化表现出较强的鲁棒性, 而补货周期 T 对

参数值的变化则很敏感,这有利于企业在产品补货方面做出决策。如可以保持补货周期乘子的值不变,只对补货周期做决策。

(6) 在所有参数中,产品价格弹性系数 b_i 与采购成本 c_i 对价格 p_i 的敏感性最大,对企业的总利润 Π 影响也最大,价格弹性系数的减少意味着商品需求的增加,而采购成本的变化则决定商品的售价。说明当企业进行联合补货与定价决策时,需要实时关注产品的需求以及采购成本的变化,及时调整补货计划。

3.6 本章小节

本章通过生鲜品的特点和库存背景,研究生鲜品的联合补货与定价问题,建立基于联合补货策略的生鲜品库存与定价协同决策模型,并设计一种新的 ADEA 算法对模型进行求解。最后,对算法以及模型的有效性进行了算法实验与数值实验并对模型的重要参数进行敏感性分析,得到有实践意义的管理启示,主要分为四个部分:

(1) 模型构建。本章节主要以生鲜产品为研究对象,考虑产品的变质率,刻画了市场需求与市场价格成指数递减的函数,并且采用联合补货的策略对多种商品进行补货,构建基于联合补货策略的生鲜品库存与定价协同决策模型,合理地协调商品的补货周期、补货频率以及价格,使得总利润最大,模型构成分为商品销售、库存持有成本、平均购买成本和订货成本。

(2) 模型求解。由于联合补货问题属于 NP-hard 问题,本节通过改进的 DE 算法对模型进行求解。首先,详细介绍 DE 算法的原理和求解流程,DE 算法主要包括染色体编码、种群初始化、交叉、变异、选择等流程。其次,改进传统 DE 算法中变异算子和交叉算子在进化过程中保持不变的形式,使其随着迭代次数的变化进行调整,设计 ADEA 算法对模型进行求解。

(3) 对算法及模型的参数进行相关实验。首先,设置一个 6 种产品的算例,并通过算例测试分析所有参数组合下 ADEA 算法的求解效率和收敛速度,得到最佳参数组合。其次,选择 GA、PSO 和 DE 与 ADEA 算法进行对比,通过对比发现, ADEA 算法能够稳定搜索到最优解并且在收敛速度上也表现出色。最后,基于不同的主要成本做了联合补货策略和单独补货策略所得利润的比较实验,得到“采用联合补货策略比单独补货能获得更高的利润”的结论。

(4) 对模型的重要参数进行敏感性分析。对模型的重要参数比例因子 a_i 、价格弹性指数 b_i 、变质率 θ_i 、变质时间 td_i 值、主要订货成本 S 、次要订货成本 s_i 、采购成本 c_i 、库存持有成本 h_i 进行了敏感性分析,得到以下管理启示:

1) 延长生鲜品的保鲜时间或减少产品的变质率有利于使企业获得更大的利润。

2) 随着补货过程中成本的提高,需增加产品的补货频率,减少每周期的补货

量，以此减少变质所带来的损失，增加企业的利润。

3) 补货周期乘子 k_i 对参数值的变化具有较强的鲁棒性，而补货周期 T 对参数值的变化则很敏感。

4) 当企业进行补货与定价决策时，需要实时关注产品的需求以及采购成本的变化，及时调整补货计划。

第四章 考虑保鲜技术投资的联合补货与定价协同决策

对于生鲜产品库存管理方面的研究,大多数学者假设产品的变质率是一个不可控的外生变量。而在实际生活中,虽然产品的变质是自然现象且不能停止,但是可以通过先进的保鲜技术或设备来控制产品的变质速度,其次,保鲜技术的投入与回报也一直是企业所关注的问题。因此,本章节主要在第三章研究生鲜产品的联合补货与定价协同决策的基础上,构建变质率随保鲜技术投资呈指数递减的函数,系统分析了非立即变质品的最优保存技术投资、定价和补货策略。鉴于本章模型的复杂度,本章继续对目标函数进行化简,去掉目标函数中的指数函数,采用 ADEA 算法对模型进行求解。

本章 4.1 节是对保鲜技术投资下的多品补货与定价联合决策问题的描述。4.2 节是模型假设与符号说明。4.3 节是根据问题描述构建保鲜技术投资下的多品补货与定价联合决策模型。4.4 节是在推导最优解的基本理论上,继续采用自适应差分进化算法对模型进行求解。4.5 进行模型相关的数值实验与分析,并对重要参数进行敏感性分析。

4.1 问题描述

生鲜产品因其特性一直离不开保鲜技术,作为终端节点的零售商,生鲜产品的保质保量时刻影响着消费者购买的满意度与购买决策,然而不管是流通过程中还是储藏过程中生鲜产品都存在着大量的损耗。对冷链企业来说,采用不同保鲜技术会影响库存商品的保鲜周期,而保鲜周期长短与商品定价息息相关,最终反应到企业利润上。然而,对于中小型企业来说,保鲜技术的投入与回报一直是企业所关注的焦点,由于中小型企业的资金规模较小,投入保鲜技术的风险对日常的运作形成较大的压力。因此,如何平衡保鲜技术投入与产品收益之间的关系是冷链企业需要解决的问题。

基于上述问题,本文考虑一个零售商和一个供应商的两级库存系统,在一个订货周期内,零售商向供应商进行多品联合补货,在补货过程中加入保鲜技术投入影响产品的一个变质率,为了使模型更高效,直接计算所有商品的保鲜技术投入,不考虑对商品分开计算保鲜技术投入。由于本章只考虑一个补货周期,因此不考虑产品的补货频率,仅仅决策出多个产品的共同补货周期、定价以及保鲜投入的成本。

4.2 模型假设与符号说明

(1) 考虑同一类型的多个非立即变质品

(2) 不考虑补货的提前期, 且不允许缺货

(3) 市场需求与市场价格成线性相关, 即 $D_i(p) = a_i p_i^{-b_i}$, 其中 a_i 是产品 i 的需求规模, b_i 是产品 i 的价格敏感系数^[21];

(4) 采用周期性查看库存策略, 所有产品的补货都建立在一个确定的基本补货周期 T 之上, 产品 i 的补货周期 T_i 是这个基本补充周期的整数(k_i)倍, 即 $T_i = k_i T$;

(5) 产品 i 进入库存后存在一个固定的保鲜期 t_{di} , 在 $[0, t_{di}]$ 时段内, 产品不发生变质, 经过 t_{di} 后, 产品 i 以固定的变质率 θ_i 发生变质;

(6) 变质率随保鲜技术投资呈指数递减, 因此我们假设 $\lambda_i(\alpha) = \theta_i e^{-\gamma_i \alpha}$ 。其中, $0 \leq \alpha \leq w$ 。 $\lambda_i(\alpha)$ 是投资保鲜技术之后的变质率, θ_i 是投资保鲜技术之前的固定变质率, γ_i 是保鲜技术投资对变质率的敏感系数, α 是单位时间保鲜技术的投资成本, w 是最大资金限制。

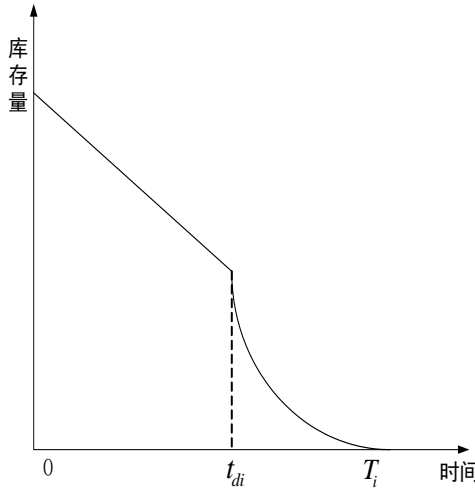
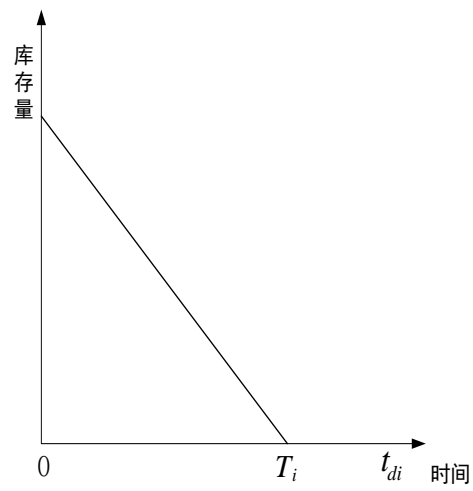
其他符号定义如表 4.1 所示:

表 4.1 模型参数及其含义

符号	含义及描述
n	产品的种类数
h_i	单位产品 i 单位时间的库存持有成本
s_i	产品 i 订货时的次要订货成本
S	每一次补货的主要订货成本
p_i	产品 i 单位时间的销售价格
c_i	产品 i 单位时间的采购价格
$I_{1i}(t)$	产品 i 变质前的库存水平
$I_{2i}(t)$	产品 i 变质后的库存水平

4.3 模型构建

本章模型主要在多品联合补货与定价的研究基础上, 考虑引入保鲜技术投资的参数, 延缓商品的一个变质。在一个订货周期 T 内, 零售商的利润主要来自商品销售, 其成本则包括库存持有成本、平均购买成本、订货成本、保鲜技术投入成本, 模型的目标函数是总利润最大。

图 4-1 情况 1 ($T_i > t_{di}$)图 4-2 情况 2 ($T_i \leq t_{di}$)

由于本章模型考虑的还是多种产品的联合补货策略，对于在补货周期中售不完的商品投入保鲜技术，在补货周期中可以售完的商品则不在投入保鲜技术。因此，对于产品 i ，其库存水平随时间的变化存在如下两种情况 1) $T_i > t_{di}$ 和 2) $T_i \leq t_{di}$ 。如图 4-1 和 4-2 所示。

情况 1: 当 $T_i > t_{di}$ 时，实际生活中零售商在收到产品后会立即进行保鲜处理，而非等到产品开始变质了才保鲜，但由于在 $[0, t_{di}]$ 内产品不会发生变质，因此，保鲜技术只对 $[t_{di}, T_i]$ 内的产品有作用。在产品保鲜期 $[0, t_{di}]$ 内，产品库存水平呈线性下降的原因是由于消费者需求的消耗导致的；在产品变质期 $[t_{di}, T_i]$ 内，产品库存水平呈非线性下降的原因除了消费者需求的消耗还有产品因变质带来的损耗，并在 T_i 时刻下降为 0。则库存随时间的变化情况为

$$\frac{dI_i(t)}{dt} = \begin{cases} -D(P), & 0 < t \leq t_{di} \\ -D(P) - \lambda_i(\alpha)I_{2i}(t), & t_{di} < t \leq T_i \end{cases} \quad (4.1)$$

在 $t = T_i$ 时刻，产品 i 的库存水平下降至 0，因此 $I_{2i}(T_i) = 0$ ，求解式 (4.1)，得到

$$I_i(t) = \begin{cases} \frac{D_i(p)}{\lambda_i(\alpha)} [e^{\lambda_i(\alpha)(T_i - t_{di})} - 1] + D_i(p)(t_{di} - t), & 0 < t \leq t_{di} \\ \frac{D_i(p)}{\lambda_i(\alpha)} [e^{\lambda_i(\alpha)(T_i - t_{di})} - 1], & t_{di} < t \leq T_i \end{cases} \quad (4.2)$$

则产品每周期的补货量为

$$Q_i = \frac{D_i(p)}{\lambda_i(\alpha)} [e^{\lambda_i(\alpha)(T_i - t_{di})} - 1] + D_i(p)t_{di} \quad (4.3)$$

(1) 平均库存持有成本

库存持有成本与单位时间的库存持有成本和库存量有关，从图 4-1 可以看出，库存量包括变质前 $[0, t_{di}]$ 内的库存量和变质期内 $[t_{di}, T_i]$ 的库存量，因此，单位时间内所有产品的平均库存持有成本为

$$\begin{aligned}
HC_1 &= \sum_{i=1}^n \frac{h_i}{T_i} [\int_0^{t_{di}} I_{1i}(t)dt + \int_{t_{di}}^{T_i} I_{2i}(t)dt] \\
&= \sum_{i=1}^n \frac{h_i D_i(p)}{T_i} \left\{ \frac{t_{di}}{\lambda_i(\alpha)} [e^{\lambda_i(\alpha)(T_i-t_{di})} - 1] - \frac{1 + \lambda_i(\alpha)(T_i - t_{di}) - e^{\lambda_i(\alpha)(T_i-t_{di})}}{\lambda_i^2(\alpha)} + \frac{t_{di}^2}{2} \right\}
\end{aligned} \quad (4.4)$$

将式 (4.2) 代入 (4.4)，得到

$$HC_1 = \sum_{i=1}^n \frac{h_i D_i(p)}{T_i} \left\{ \frac{t_{di}}{\lambda_i(\alpha)} [e^{\lambda_i(\alpha)(T_i-t_{di})} - 1] - \frac{1 + \lambda_i(\alpha)(T_i - t_{di}) - e^{\lambda_i(\alpha)(T_i-t_{di})}}{\lambda_i^2(\alpha)} + \frac{t_{di}^2}{2} \right\} \quad (4.5)$$

(2) 平均购买成本

平均购买成本与产品自身的采购成本和采购量相关，因此，单位时间内所有产品的平均购买成本为

$$PC_1 = \sum_{i=1}^n \frac{c_i Q_i}{T_i} = \sum_{i=1}^n \frac{c_i D_i(p)}{k_i T} \left\{ \frac{1}{\lambda_i(\alpha)} [e^{\lambda_i(\alpha)(T_i-t_{di})} - 1] + t_{di} \right\} \quad (4.6)$$

(3) 总订货成本

总订货成本包括主要订货成本和次要订货成本，其中，主要订购成本包括订购所有货物时所产生的一次费用，如油费、过路费等，次要订货费用包括订购每件产品所花费的费用，如装卸费、包装费等。因此，单位时间内所有产品的总订货成本为

$$OC_1 = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^n (S + \frac{s_i}{k_i}) \quad (4.7)$$

(4) 销售收入

零售商的收入来自产品的销售价格，因此所有产品的总收入为

$$SR_1 = \sum_{i=1}^n p_i D_i(p) \quad (4.8)$$

因此，当 $T_i > t_{di}$ 时，则零售商的总利润可表示为：

$$\begin{aligned}
\Pi_1(p_i, T, k_i, \alpha) &= SR_1 - PC_1 - HC_1 - OC_1 \\
&= \sum_{i=1}^n p_i D_i(p) - \sum_{i=1}^n \frac{c_i D_i(p)}{k_i T} \left\{ \frac{1}{\lambda_i(\alpha)} [e^{\lambda_i(\alpha)(T_i-t_{di})} - 1] + t_{di} \right\} - \\
&\quad \sum_{i=1}^n \frac{h_i D_i(p)}{T_i} \left\{ \frac{t_{di}}{\lambda_i(\alpha)} [e^{\lambda_i(\alpha)(T_i-t_{di})} - 1] - \frac{1 + \lambda_i(\alpha)(T_i - t_{di}) - e^{\lambda_i(\alpha)(T_i-t_{di})}}{\lambda_i^2(\alpha)} + \right. \\
&\quad \left. \frac{t_{di}^2}{2} \right\} - \frac{1}{T} \sum_{i=1}^n (S + \frac{s_i}{k_i}) - \alpha
\end{aligned} \quad (4.9)$$

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期，零售商能在产品发生变质前售出所有的产品，故在该情况下，不考虑产品的变质，也不进行保鲜技术投入，则单位时间的总利润为：

$$\Pi_2(p_i, T, k_i) = \sum_{i=1}^n (p_i - c_i) D_i(p) - \sum_{i=1}^n \frac{h_i D_i(p) T_i}{2} - \frac{1}{T} \sum_{i=1}^n (S + \frac{s_i}{k_i}) \quad (4.10)$$

由于本章的目标函数也包含了高维度的指数函数式，因此，本章对情况 1 中的目标函数进行化简，采用泰勒展开的方式去掉目标函数中的指数函数式，继续

采用 ADEA 算法对模型进一步求解。令：

$$e^{\lambda_i(\alpha)(T_i-t_{di})} \approx 1 + \lambda_i(\alpha)(T_i-t_{di}) + \frac{1}{2}\lambda_i^2(\alpha)(T_i-t_{di})^2 \quad (4.11)$$

因此，情况 1 中库存持有成本以及平均采购成本近似为

$$HC_1 = \sum_{i=1}^n \frac{h_i D_i(p)}{2k_i T} [\lambda_i(\alpha) t d_i (k_i T - t d_i)^2 + (k_i T)^2] \quad (4.12)$$

$$PC_1 = \sum_{i=1}^n \frac{c_i D_i(p)}{k_i T} \left[k_i T + \frac{1}{2} \lambda_i(\alpha) (k_i T - t d_i)^2 \right] \quad (4.13)$$

则情况 1 下的总利润化简为

$$\begin{aligned} \Pi_1(p_i, T, k_i, \alpha) = & \sum_{i=1}^n p_i D_i(p) - \sum_{i=1}^n \frac{c_i D_i(p)}{k_i T} \left[k_i T + \frac{1}{2} \lambda_i(\alpha) (k_i T - t d_i)^2 \right] - \\ & \sum_{i=1}^n \frac{h_i D_i(p)}{2k_i T} [\lambda_i(\alpha) t d_i (k_i T - t d_i)^2 + (k_i T)^2] - \frac{1}{T} \sum_{i=1}^n (S + \frac{S_i}{k_i}) - \alpha \end{aligned} \quad (4.14)$$

4.4 模型求解

本章使用的算法求解流程参照第三章 ADEA 算法流程进行求解，并根据不同的研究问题做出必要的改动。求解流程主要分为以下 6 步：

(1) 染色体编码。在对染色体编码时，用 n 表示物品数，产生长度为 $2n+2$ 的个体，例如，如果采购 6 种物品，则染色体长度为 14，染色体第 1 部分的 6 个基因是物品 i 的周期乘子 k_i ；染色体第 2 部分的 1 个基因是物品的补货周期 T ；染色体第 3 部分的 6 个基因是物品 i 的定价 p_i ；染色体第 4 部分的 1 个基因是物品的保鲜技术投资成本 α ，如图 4-3 所示。

1	1	2	1	1	2	0.14	4.36	2.47	2.69	3.46	14.28	16.31	120.43
---	---	---	---	---	---	------	------	------	------	------	-------	-------	--------

图 4-3 染色体 ($n=6$)

(2) 初始化种群，进行相关设置。设置 ADEA 相关参数染色体规模 NP、染色体长度为 D、差分进化算子 CR_{\min} CR_{\max} F_{\min} F_{\max} ，按照参数设置内随机赋值的方式产生初始种群，如下式：

$$k_i = randi([1,5]) \quad (4.15)$$

$$T = rand(0,1) \quad (4.16)$$

$$p_i = 50rand(0,1) \quad (4.17)$$

$$\alpha = 200rand(0,1) \quad (4.18)$$

其中， $randi([1,5])$ 函数表示按照均匀分布的方式产生 1 至 5 的随机整数， $rand(0,1)$ 函数表示生成 (0,1) 之间均匀分布的随机数。

(3) 变异操作。选择种群的第 $(t=G)$ 代染色体作为变异的目标向量, 随机产生三个不同整数的第 r_1 、 r_2 和 r_3 条的染色体, 前六个基因按照式 (4.20) 进行变异操作, 后八个基因按照式 (4.21) 进行变异操作。

$$F = F_{\min} + (F_{\max} - F_{\min}) \times e^{\left(1 - \frac{GenM}{GenM - G + 1}\right)} \quad (4.19)$$

$$V_i(G+1) = round(X_{r1}(G) + F \times (X_{r2}(G) - X_{r3}(G))) \quad (4.20)$$

$$V_i(G+1) = X_{r1}(G) + F \times (X_{r2}(G) - X_{r3}(G)) \quad (4.21)$$

其中, F_{\min} 和 F_{\max} 分别是变异算子的最小值和最大值, $GenM$ 是最大迭代代数, G 是当前迭代的代数, F 为变异算子, 通常取值在 $[0,1]$ 之间, $round()$ 函数表示按照四舍五入的方式进行取整, V_i 是变异后的染色体, X_{r1} 代表第 $r1$ 条染色体上的一个个体。

(4) 交叉操作。对每一个维度随机产生一个长度为 $14=(6+1+6+1)$ 的向量, 通过式 (4.23) 将目标向量 X_{ij}^G 和变异向量 v_{ij}^{G+1} 进行交叉操作, 产生实验向量 u_{ij}^{G+1} 。

$$CR = CR_{\max} - \frac{G(CR_{\max} - CR_{\min})}{GenM} \quad (4.22)$$

$$u_{ij}^{G+1} = \begin{cases} v_{ij}^{G+1}, & rand(j) \leq CR \text{ or } j = r; \\ x_{ij}^G, & \text{Otherwise.} \end{cases} \quad (4.23)$$

其中: $i=1,2,\dots,Np$, $j=1,2,\dots,Nd$, CR_{\min} 是交叉算子的最小值, CR_{\max} 是交叉算子的最大值, CR 为交叉算子通常取值 $[0,1]$ 之间; r 为 $[1,d]$ 之间的一个随机整数, 保证实验向量中至少有一个元素来自变异向量。

(5) 选择及更新操作。根据式 (4.24) 贪婪选择规则, 计算每个染色体的适应度值, 并将目标向量和实验向量的适应度值进行比较, 由于本文的适应度值为利润, 适应值越大代表染色体越好, 选择适应度值较高的染色体进入下一代种群, 重复步骤 (3) ~ (5), 直至达到最大迭代数。

$$X_i^{G+1} = \begin{cases} u_i^{G+1}, & fitness(u_i(G)) > fitness(x_i(G)); \\ x_i^G, & \text{Otherwise.} \end{cases} \quad (4.24)$$

(6) 输出最优结果。当最大的迭代数量达到以后, ADEA 算法即停止运行, 输出最佳适应度、最佳适应度对应染色体以及最优解。当最佳适应度对应的染色体 k_i 、 T 、 p_i 、 α 已知时, 通过公式 (4.3) 可求出产品 i 的补货量 Q_i^* 。

ADEA 算法求解 JRP 问题的流程图如图 4-4 所示

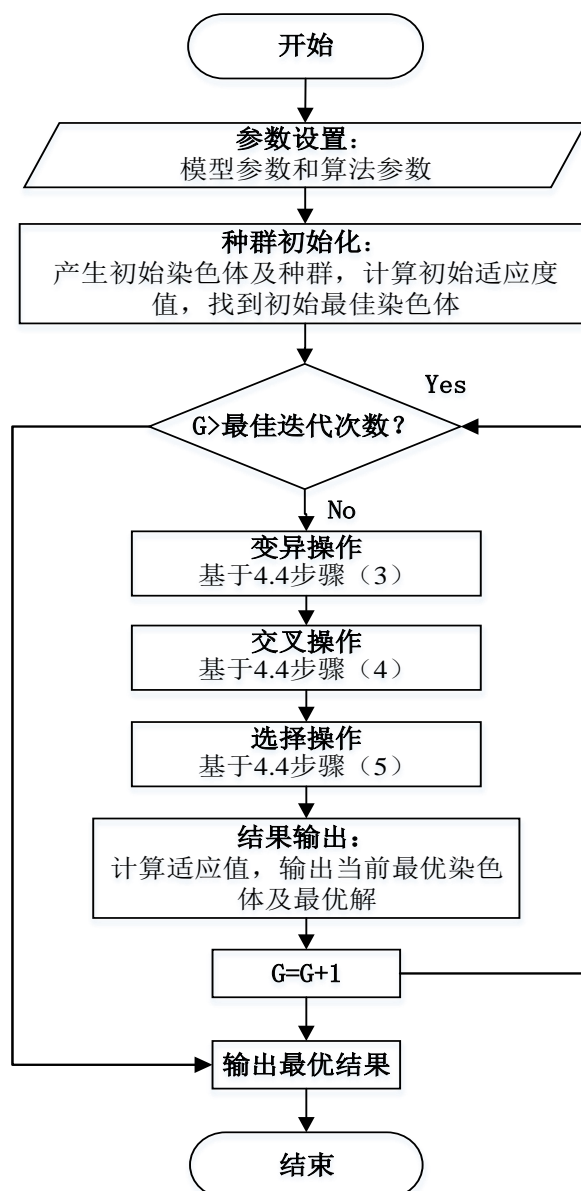


图 4-4 ADEA算法流程图

4.5 数值与算例分析

本文基于第三章生鲜产品联合补货与定价协同决策模型的研究, 引入保鲜技术投资参数, 构建了考虑保鲜技术投资的多品补货与定价模型, 由于 ADEA 算法的高效性与稳定性, 因此本章继续采用 ADEA 算法对模型进行求解。由于第三章已经对算法进行实验验证, 证明了算法的高效性且得到了算法的最佳参数组合, 因此本节不在进行算法的实验, 本节主要对考虑保鲜技术投资的多品补货与定价模型进行有效性分析, 并对模型的重要参数进行敏感性分析, 探究参数变化带来的影响, 得到有意义的管理启示。

故本节主要分为两个研究部分, 第一部分是对模型的有效性分析。第二部分是对模型的重要参数进行敏感性分析。实验环境如下: 算法运行硬件环境为一台

2.70GHz CPU 的个人电脑上, 4GB RAM, 运行的软件环境为 Windows 8 Home Premium, 程序采用 Matlab R2016b 编码。

4.5.1 实验数据

本文参考^[91]给出的数据案例对模型进行求解, 参照第三章算法实验得到的 ADEA 算法最佳参数组合进行算法参数设置。种群规模为 30, 最大的迭代次数设置为 200, 交叉概率和变异概率的取值范围都在[0.2,0.8]。实验数据参数如表 4.2 所示:

表 4.2 实验数据参数

商品	a_i	b_i	h_i	s_i	c_i	θ_i	t_{di}	γ_i	S	w
1	300000	2.5	1.2	1.8	2.4	0.2	0.0822	0.02	250	200
2	400000	2	1	2	6	0.2	0.0822	0.01		
3	300000	2.5	0.8	1.2	4.8	0.2	0.0411	0.01		
4	100000	2.2	0.2	3.2	2.4	0.2	0.0411	0.02		
5	400000	2.5	0.8	3.1	4.8	0.2	0	0.01		
6	100000	2.2	0.2	2.7	3	0.2	0.0411	0.02		

4.5.2 数值实验

为了证明模型的有效性, 本小节基于不同的 s 值, 投入保鲜技术(方案 1)与不投入保鲜技术(方案 2)进行对比分析, 实验结果如表 4.3 所示, 所有的实验数据是根据表 4.2 给定的参数值。

表 4.3 投入保鲜技术和不投入保鲜技术的总利润比较(基于不同 s 值)

s	α	方案 1	方案 2	$\Pi^*(\%)$
150	109.07	54982.43	54877.75	0.19
200	133.24	54622.83	54450.31	0.32
250	145.85	54308.26	54065.79	0.45
300	159.30	54023.57	53713.63	0.57
350	169.68	53763.61	53387.01	0.70

针对方案 2 不投入保鲜技术问题的研究时, 采用的是第三章所研究的问题模型, 本次实验是采用第三章模型的求解结果与第四章模型的求解结果进行比较分析, $\Pi^*(\%)$ 表示投入保鲜技术比不投入保鲜技术所增加的利润的百分比。实验结果表明, s 为 250 时, 当考虑投入保鲜技术时(方案 1)所得的最优总利润 54307.44

大于投入不保鲜技术（方案 2）所得的最优总利润 54065.79。可见加入保鲜技术可以使企业获得更大的利润。并且随着主要订货成本 s 的增加，保鲜技术投入的利润比不投入保鲜技术的利润比也持续增加，这是因为主要订货成本增加时，企业可以投入保鲜技术以此延长产品的补货周期，减少商品的变质损失以及补货的次数，从而减小主要订货成本带来的影响。

为了探索中小企业与大企业在保鲜技术投入时的不同之处，本节考虑中小企业与大企业在资金规模上存在不同，因此给予保鲜技术投资加入了一个最大资金限制的约束，并基于不同的最大资金限制 w 对投入保鲜技术（方案 1）与不投入保鲜技术（方案 2）的结果进行比较。实验结果如表 4.4 所示，所有的实验数据是根据表 4.2 给定的参数值。

表 4.4 投入保鲜技术和不投入保鲜技术的总利润比较（基于不同 w 值）

w	α	方案 1	方案 2	$\Pi^*(\%)$
50	50	54223.75	54065.79	0.29
100	100	54291.91	54065.79	0.42
150	145.85	54308.26	54065.79	0.45
200	145.85	54308.26	54065.79	0.45
250	145.85	54308.26	54065.79	0.45

针对方案 2 不投入保鲜技术问题的研究时，采用的是第三章所研究的问题模型，本次实验是采用第三章模型的求解结果与第四章模型的求解结果进行比较分析，其中， $\Pi^*(\%)$ 表示投入保鲜技术比不投入保鲜技术所增加的利润的百分比。表 4.4 显示，当最大资金限制分别为 150、200、250 时，保鲜技术的投入 α 、投入保鲜技术与不投入保鲜技术所增加的利润比 $\Pi^*(\%)$ 都没有发生变化，结果表明，不管企业的资金规模有多大，当到达最佳的投资金额时，保鲜技术对于延缓产品的变质也到了一定程度，不会因企业自身资金规模过大而获得更高的利润；对于中小企业来说，当资金规模有限时，如最大资金限制为 50 或 100 时，应尽可能的多投入保鲜技术，以此获得更高的利润。

4.5.3 敏感性分析

下面对一些重要参数作敏感性分析，保持其他参数不变，分别改变参数比例因子 a_i 、价格弹性系数 b_i 、变质率 θ_i 、变质期 td_i 、投资敏感系数 γ_i 、主要订购成 s 、次要订货成本 s_i 、采购成本 c_i 、库存持有成本 h_i 的值，变化程度为 -40%、-20%、0、20% 和 40%，讨论各参数变化后最优结果的变动情况，各参数的敏感性分析结果如表 4.5~4.13 所示。

表 4.5 比例因子 a_i 的敏感性分析

	T	Q_i	p_i	α	Π
-Δ 40%	0.2172	1069.64, 348.50, 205.40, 490.17, 273.15, 301.22	4.22, 12.24, 8.17, 4.44, 8.19, 5.54	139.27	31978.52
-Δ 20%	0.1878	1254.99, 403.92, 238.48, 566.66, 317.17, 348.01	4.19, 12.20, 8.15, 4.44, 8.16, 5.54	143.81	43119.86
0	0.1678	1419.05, 452.90, 267.72, 634.27, 356.10, 389.40	4.17, 12.18, 8.13, 4.43, 8.14, 5.53	145.85	54308.26
+Δ 20%	0.1530	1567.00, 496.99, 294.05, 695.22, 391.13, 426.71	4.15, 12.16, 8.12, 4.43, 8.13, 5.53	148.52	65527.64
+Δ 40%	0.1416	1703.73, 537.71, 318.35, 751.43, 423.47, 461.10	4.14, 12.15, 8.11, 4.43, 8.12, 5.53	149.76	76772.42

表 4.6 价格弹性系数 b_i 的敏感性分析

	T	Q_i	p_i	α	Π
-Δ 40%	0.1186	1762.78, 636.02, 641.38, 571.52, 854.72, 426.26	7.41, 36.36, 14.55, 9.95, 14.57, 12.43	184.39	425935.24
-Δ 20%	0.1346	1639.82, 625.95, 427.84, 650.92, 569.68, 440.38	4.96, 16.19, 9.72, 5.59, 9.73, 6.98	163.53	139462.29
0	0.1678	1419.05, 452.90, 267.72, 634.27, 356.10, 389.40	4.17, 12.18, 8.13, 4.43, 8.14, 5.53	145.85	54308.26
+Δ 20%	0.2148	1179.13, 305.40, 162.46, 590.83, 215.77, 329.37	3.80, 10.49, 7.36, 3.90, 7.37, 4.87	132.01	22972.11
+Δ 40%	0.2789	947.34, 199.58, 96.63, 539.65, 128.12, 273.34	3.60, 9.59, 6.92, 3.60, 6.93, 4.49	118.64	10132.66

表 4.7 变质率 θ_i 的敏感性分析

	T	Q_i	p_i	α	Π
-Δ 40%	0.1680	1420.39, 453.47, 268.14, 634.92, 356.73, 389.80	4.17, 12.18, 8.13, 4.43, 8.14, 5.53	107.70	54350.75
-Δ 20%	0.1679	1419.52, 453.06, 267.86, 634.49, 356.31, 389.52	4.17, 12.18, 8.13, 4.43, 8.14, 5.53	129.36	54326.62
0	0.1678	1419.05, 452.90, 267.72, 634.27, 356.10, 389.40	4.17, 12.18, 8.13, 4.43, 8.14, 5.53	145.85	54308.26
+Δ 20%	0.1677	1418.21, 452.55, 267.52, 633.88, 355.76, 389.17	4.17, 12.18, 8.13, 4.43, 8.14, 5.53	161.17	54291.49
+Δ 40%	0.1676	1417.69, 452.36, 267.36, 633.59, 355.55, 389.01	4.17, 12.18, 8.13, 4.43, 8.15, 5.53	173.76	54277.81

表 4.8 变质期 td_i 的敏感性分析

	T	Q_i	p_i	α	Π
-Δ 40%	0.1692	1429.30, 456.22, 269.81, 639.42, 359.31, 392.57	4.17, 12.19, 8.13, 4.43, 8.14, 5.53	169.17	54285.43
-Δ 20%	0.1685	1424.11, 454.54, 268.75, 636.82, 357.71, 390.98	4.17, 12.18, 8.13, 4.43, 8.14, 5.53	157.68	54296.78
0	0.1678	1419.05, 452.90, 267.72, 634.27, 356.10, 389.40	4.17, 12.18, 8.13, 4.43, 8.14, 5.53	145.85	54308.26
+Δ 20%	0.1672	1414.54, 451.43, 266.81, 631.99, 354.62, 388.00	4.17, 12.18, 8.13, 4.43, 8.15, 5.53	133.84	54319.70
+Δ 40%	0.1668	1411.29, 450.39, 266.15, 630.30, 353.44, 386.96	4.17, 12.17, 8.13, 4.43, 8.15, 5.53	122.01	54330.78

表 4.9 投资敏感系数 γ_i 的敏感性分析

	T	Q_i	p_i	α	Π
-Δ 40%	0.1626	1378.84, 439.07, 259.30, 614.45, 344.45, 377.21	4.16, 12.18, 8.13, 4.43, 8.16, 5.54	172.27	54225.36
-Δ 20%	0.1658	1403.59, 447.55, 264.47, 626.67, 351.59, 384.71	4.17, 12.18, 8.13, 4.43, 8.15, 5.53	159.59	54273.24
0	0.1678	1419.05, 452.90, 267.72, 634.27, 356.10, 389.40	4.17, 12.18, 8.13, 4.43, 8.14, 5.53	145.85	54308.26
+Δ 20%	0.1691	1428.88, 456.30, 269.81, 639.14, 358.99, 392.40	4.17, 12.18, 8.13, 4.43, 8.14, 5.53	135.29	54333.15
+Δ 40%	0.1700	1436.30, 458.89, 271.39, 642.81, 361.19, 394.64	4.17, 12.18, 8.13, 4.43, 8.14, 5.53	125.53	54353.25

表 4.10 主要订购成本 S 的敏感性分析

	T	Q_i	p_i	α	Π
-Δ 40%	0.1288	1115.24, 350.04, 207.20, 488.49, 275.34, 299.72	4.13, 12.14, 8.10, 4.43, 8.12, 5.53	109.10	54982.43
-Δ 20%	0.1494	1277.31, 404.45, 239.24, 565.52, 318.09, 347.08	4.15, 12.16, 8.12, 4.43, 8.13, 5.53	130.690	54622.83
0	0.1678	1419.05, 452.90, 267.72, 634.27, 356.10, 389.40	4.17, 12.18, 8.13, 4.43, 8.14, 5.53	145.85	54308.26
+Δ 20%	0.1846	1545.19, 496.69, 293.43, 696.62, 390.39, 427.81	4.19, 12.20, 8.14, 4.44, 8.15, 5.54	159.30	54023.57
+Δ 40%	0.2001	1660.14, 537.16, 317.13, 754.38, 422.03, 463.41	4.20, 12.22, 8.15, 4.44, 8.16, 5.54	169.69	53763.61

表 4.11 次要订购成本 s_i 的敏感性分析

	T	Q_i	p_i	α	Π
-Δ 40%	0.1658	1404.03,447.72,264.69, 626.93,352.05,384.88	4.17,12.18,8.13, 4.43,8.14,5.53	144.26	54341.83
-Δ 20%	0.1668	1411.57,450.31,266.21, 630.61,354.09,387.15	4.17,12.18,8.13, 4.43,8.14,5.53	145.06	54325.00
0	0.1678	1419.05, 452.90, 267.72, 634.27, 356.10, 389.40	4.17, 12.18, 8.13, 4.43, 8.14, 5.53	145.85	54308.26
+Δ 20%	0.1688	1426.50,455.46,269.23, 637.92,358.12,391.65	4.17,12.18,8.13, 4.43,8.14,5.53	146.63	54291.62
+Δ 40%	0.1698	1433.89,458.01,270.73, 641.55,360.12,393.89	4.17,12.18,8.13, 4.43,8.14,5.53	147.39	54275.08

表 4.12 采购成本 c_i 的敏感性分析

	T	Q_i	p_i	α	Π
-Δ 40%	0.0923	2822.76,694.01,530.46, 1074.64,705.17,659.60	2.49,7.29,4.87, 2.66,4.88,3.32	113.37	105834.54
-Δ 20%	0.1292	1916.12,545.68,360.88, 798.38,479.90,490.10	3.33,9.73,6.50, 3.55,6.51,4.43	132.91	72589.02
0	0.1678	1419.05, 452.90, 267.72, 634.27, 356.10, 389.40	4.17, 12.18, 8.13, 4.43, 8.14, 5.53	145.85	54308.26
+Δ 20%	0.2074	1108.50,388.23,209.39, 524.69,278.55,322.16	5.01,14.63,9.77, 5.32,9.78,6.64	153.88	42909.68
+Δ 40%	0.2477	898.12,340.20,169.79, 446.18,225.89,273.97	5.85,17.09,11.40, 6.21,11.42,7.75	159.09	35195.47

表 4.13 库存持有成本 h_i 的敏感性分析

	T	Q_i	p_i	α	Π
-Δ 40%	0.2128	1843.80,578.00,342.30, 807.49,455.57,495.39	4.13,12.14,8.10, 4.43,8.11,5.53	177.51	54952.53
-Δ 20%	0.1862	1592.27,503.93,298.14, 704.92,396.68,432.63	4.15,12.16,8.12, 4.43,8.13,5.53	159.99	54610.06
0	0.1678	1419.05, 452.90, 267.72, 634.27, 356.10, 389.40	4.17, 12.18, 8.13, 4.43, 8.14, 5.53	145.85	54308.26
+Δ 20%	0.1542	1290.42,414.98,245.13, 581.80,325.96,357.30	4.19,12.20,8.14, 4.44,8.16,5.54	133.90	54035.57
+Δ 40%	0.1435	1190.01,385.38,227.48, 540.83,302.42,332.24	4.20,12.21,8.15, 4.44,8.17,5.54	123.51	53785.06

(1) 随着比例因子 a_i 的增加和价格弹性系数 b_i 的减少, T 将减少, Q_i 、 α 、 Π 将增加, 这是因为比例因子的增加和价格弹性系数的减少意味着产品的需求增加,

零售商为了满足更多的需求应缩短补货周期、增加每周期的补货量，并且投入更多的保鲜技术减少因变质带来的损失，实现企业利润的最大化。

(2) 随着变质率 θ_i 的增加和变质期 td_i 的减少， α 将增加， Π 将减少。对于零售商来说，当产品的变质率较高时，可以缩短产品的补货周期或加入保鲜技术投资减少产品的变质，以此减少总利润的下降率。可见，零售商可以通过投入保鲜技术减少高变质率带来的损失，且变质率与变质时间的变化对产品的价格影响较小。

(3) 当投资敏感系数 γ 增加时， α 将减少， T 和 Π 也将增大。当投资敏感系数增大，企业的利润也逐渐增大，且保鲜技术投入却逐渐减少，这说明企业在进行保鲜技术投入时应该选择投资敏感系数较大的保鲜技术，即比较有效的保鲜技术，这样不仅可以有效的延缓商品的变质率，也可以减少这方面的投入，增加企业的市场竞争力。

(4) 随着主要订货成本 s 和次要订货成本 s_i 的增加， T 、 p_i 、 α 都将增加，主要订购成本和次要订购成本都是在补货过程中发生的一些成本，当补货过程中的成本增加时，企业应延长补货周期，增加补货量，减少补货次数，减少因补货过程带来的成本损失；在定价方面，由于补货过程中的成本增加，企业为了保证自己的利润，可以稍微提升商品的价格。

(5) 随着采购成本 c_i 的增加， T 、 p_i 、 α 将增加， Q_i 和 Π 将减少。产品的采购成本决定着产品销售价格，采购成本越高，相应地其销售价格也越高；销售价格的增加将导致产品的需求减少，因此，零售商的补货量也将减少。

(6) 随着库存持有成本 h_i 的增加， T 和 Π 将减少， p_i 将增加。当库存持有成本增加时，零售商可通过增加补货频率和减少每次的补货量以避免库存过多，也可稍微提高商品的价格以此减少因库存成本带来的损失。

(7) 价格弹性系数 b_i 和采购成本 c_i 对产品的价格 p_i 和总利润 Π 影响较大，价格弹性系数的减少意味着商品需求的增加，而采购成本的变化则决定商品的售价，说明当企业进行补货决策时，需要实时关注产品的需求以及采购成本，及时调整补货计划。

4.6 本章小节

本章主要在第三章研究生鲜产品的联合补货与定价协同决策问题的基础上，构建变质率随保鲜技术投资呈指数递减的函数，建立基于保鲜技术投资的联合补货与定价协同决策模型，并继续采用 ADEA 算法对模型进行求解。最后，通过对模型的数值实验以及参数的敏感性分析，得出相关结论，本章主要分为四个部分：

(1) 模型构建。在第三章研究生鲜产品的联合补货与定价协同问题的基础上，假设变质率是随保鲜技术投资呈指数递减的函数，考虑在变质期间未售出的商品

加入保鲜技术，在变质期间售出的商品则不在投入保鲜技术，构建多品联合补货、保鲜技术投资与定价相结合的决策模型，合理地协调商品的补货周期、补货频率、价格和保鲜技术投入值，使得总利润最大，模型构成分为商品销售、库存持有成本、平均购买成本和订货成本。

(2) 模型求解。本节加入了保鲜技术相关参数，求解基于保鲜技术投资的定价与库存决策的模型，由于研究问题的改变，重新设计 ADEA 的算法流程，首先在染色体编码过程中增加一个代表保鲜投入值的染色体长度，从原来的长度 13 更改为现在的 14。其次，在种群初始化过程中增加保鲜投入值的范围进行初始化种群，之后通过交叉、变异、选择及更新的操作输出最优结果。

(3) 对模型的参数进行相关实验。首先基于不同的主要成本进行投入保鲜技术和不投入保鲜技术所得利润的比较实验，得出“投入保鲜技术有利于减少产品变质损失，并使企业获得更大的利润”的结论。其次基于不同资金限制进行投入保鲜技术和不投入保鲜技术所得利润的比较实验，得出“保鲜技术的投入是有限的，并不会随着资金限制的增大而增大。当企业的最大资金限制较小时，企业应尽可能多的投入保鲜技术，使利润达到最大”的结论。

(4) 对模型的重要参数进行敏感性分析。对模型的重要参数比例因子 a_i 、价格弹性系数 b_i 、变质率 θ_i 、变质期 td_i 、投资敏感系数 γ_i 、主要订购成本 s 、次要订货成本 s_i 、采购成本 c_i 、库存持有成本 h_i 进行敏感性分析，得到以下管理启示：

1) 随着补货过程中成本的提高，需延长补货周期，增加补货量，减少因补货过程带来的成本损失，在定价方面，由于采购过程中的成本增加，企业为了保证自己的利润，可以稍微提升商品的价格。

2) 当采购产品的变质率较大或投资敏感系数减小时，企业应减少补货量以及补货周期进行多频次少批量的补货，且加大保鲜技术投入从而减少产品的变质率，降低企业的损失，使企业利润达到最大化。

3) 保鲜技术的投入对于补货周期或补货量的影响最大，对于价格的影响较小，产品的需求量对企业利润的影响最大。

4) 当企业进行补货决策时，需要实时关注产品的需求以及采购成本变化，及时调整补货计划。

第五章 总结与展望

5.1 研究结论

生鲜产品在流通与库存过程中的损耗一直是众多业界人士关注的焦点，生鲜市场多元化的现象也加剧了零售商的运作压力，零售商们迫切需要采用科学有效的管理手段来控制产品的质量，降低运作成本，增加企业的利润。

本文以同种类型的多个非立即变质品为研究对象，总结保鲜技术相关的生鲜品的库存和多品联合补货问题的研究成果，分析现有生鲜品库存与定价研究的不足以及多品联合补货策略的优势，确定基于保鲜技术投资的多品联合补货与定价决策的研究方向。并从非立即变质品的主要特征入手，考虑采用联合补货策略对商品进行补货，研究生鲜品的联合补货与定价决策问题。在此基础上，对生鲜品进行合理的保鲜技术投资，构建基于保鲜技术投资的联合补货与定价决策模型，并结合实际案例，验证模型的正确性及实用性。本文的主要工作及研究结论如下：

（1）本文对生鲜产品的库存管理、考虑保鲜技术的易逝品的库存问题以及多品联合补货问题进行了深入的归纳和总结。在生鲜品的库存管理中，发现大部分研究易腐品的补货与库存问题时重点关注单一品种，多品补货和库存决策尚未引起足够重视；在多品联合补货中，发现大部分文献考虑生鲜产品的联合补货问题时并未考虑到定价的问题；在与保鲜技术相关的易变质品库存研究中，发现投入保鲜技术可以减少因产品变质带来的损失，使零售商获得更高的利润。

（2）建立了生鲜品的联合补货与定价协同决策模型。在模型中，引入与价格相关的需求函数，采用联合补货的策略对多种非立即变质品进行补货，研究生鲜品的联合补货与定价决策问题。考虑到非立即变质品的特性加剧了模型的复杂度，提出一种改进后的差分进化算法求解模型，通过算法实验验证算法的高效性与稳定性。最后，对模型的参数进行数值实验与敏感性分析，研究表明：采用联合补货策略比单独补货能获得更高的利润；采用一些保存技术或防腐策略可以延长产品的变质时间或减少产品的变质率，从而使零售商获得更大的利润。

（3）建立了基于保鲜技术投资的联合补货与定价决策。在模型中，将变质率为常数松弛到变质率随保鲜技术投资呈指数递减的情形，以总利润最大为目标函数，研究了生鲜品的多品补货、定价以及保鲜技术投资之间的决策问题，继续采用改进的差分进化算法对模型进行求解。最后，对模型的参数进行数值实验与敏感性分析研究表明，研究表明：投入保鲜技术有利于减少产品变质损失，并使企业获得更大的利润；保鲜技术的投入是有限的，并不会随着资金限制的增大而增

大。当企业的最大资金限制较小时，企业应尽可能多的投入保鲜技术，使利润达到最大；保鲜技术的投入对于补货周期或补货量的影响最大，对于价格的影响较小，产品的需求量对企业利润的影响最大。

5.2 研究展望

本文的研究更符合企业的实际情况，能为生鲜零售商科学的进行联合补货策略、制定合理的价格、合理地投入保鲜技术提供一定的理论参考。但是，在实际补货与定价问题中，企业在进行决策时，不仅面临不确定的市场环境，通常还会面临受到相关资源约束的限制等其他情况。因此，本文的研究还有一定的不足之处，后续研究可以从以下三个方向进行拓展：

（1）在实际中，消费者的购买行为是随机的，生鲜产品的需求具有不确定性，不仅受到价格因素的影响，还可能受到新鲜度、替代品供给量等因素的影响。因此，后续可研究随机需求下生鲜品的库存与保鲜技术投资决策模型。

（2）本文假设不考虑提前期的情况，但是在实际生活中补货需要一定的时间，且考虑确定提前期对总体决策可能影响不大，针对文中的结论“保鲜技术对补货周期与补货量的影响最大”，考虑提前期更能体现出保鲜技术的作用。因此，后续可研究随机提前期下的生鲜品库存与保鲜技术投资决策模型。

（3）由于生鲜品易变质的特性，其储藏条件的要求也会很高，生鲜品采用多品联合补货策略可能会存在不同产品的变质周期协调问题，文中未考虑这一情况，后续可考虑产品的变质率受其他补货产品的影响。

致 谢

时光荏苒，不知不觉已临近毕业，三年的硕士研究生生涯将要告一段落，回首这三年的点滴，有成长、有收获、也有不足，在这三年的时光中，我很幸运的遇到了我的良师益友，不管是在学业上还是生活中都给了我很多帮助，我也从一个稚嫩的大学生变成了现在成熟稳重的新青年。三年的硕士生涯是我人生中重要的一个里程碑，如果不是这三年的学习，我可能不会深入了解我所研究的专业领域，对于学术方面的知识也仅停留在理论层面。因此，我要向指导我的导师、同学、家人、朋友说一声感谢！

感谢我的导师崔利刚教授在我学业上孜孜不倦的指导与鼓励，带领我走入了科研的大门，让我从科研零基础到可以独立撰写文章，并且崔老师严谨的学术作风以及学术水平都深深令我折服。在论文写作期间，认真帮我把好每一关，不管多忙，都会抽出时间指导我论文的写作问题。在找工作期间，耐心帮我分析就业形势，指导我就业时的准备工作，关心我的就业情况。在日常生活中，总是给予我支持与鼓励，帮助我建立自信，使我变得更加成熟稳重。在此，衷心的感谢崔老师对我的帮助！

感谢我的同门们对我的帮助与陪伴，感谢刘孝林师兄、陶永强师兄和朱康康师兄在我学习过程中遇到困难时给我解疑答惑，教我为人处世的道理，并帮助我尽快融入集体。感谢刘锦杏同学、田瑜同学在学习探讨中给予我灵感，在生活中给予我陪伴与帮助。感谢师弟师妹们在学习之外给我带来了愉快的心情。

感谢我的父母、家人一直在学习上给予我的支持与鼓励，让我专心学习，从来都是以我的学习为主。感谢杨文倩同学对我的聆听与开导，每当我遇到不顺心的事情总是不厌其烦的听我倾诉，给我建议。感谢李漫婷同学在我枯燥的日子里给我带来的一丝色彩！

感谢重庆交通大学经济与管理学院的老师们在学习上的支持与帮助，让我在科研的路上更加顺畅！最后，祝大家前程似锦，未来可期！

参考文献

- [1] 吴勇民, 杜文龙, 樊雪梅. 国内外鲜活农产品物流系统比较及启示[J]. 商业时代, 2008(02):11-13.
- [2] Wang X, Li D. A dynamic product quality evaluation-based pricing model for perishable food supply chains[J]. Omega: The International Journal of Management Science, 2012, 40(6):906-917.
- [3] 郑琪, 范体军. 考虑风险偏好的生鲜农产品供应链激励契约设计[J]. 管理工程学报, 2018, 32(2):171-178.
- [4] 李楼生. 基于混合差分进化算法的联合补货模型研究[J]. 物流技术, 2017, 36(04):90-93.
- [5] Ai X Y, Zhang J L, Wang L. Optimal joint replenishment policy for multiple non-instantaneous deteriorating items[J]. International Journal of Production Research, 2017, 55(16):4625-4642.
- [6] 李业梅, 黄少安. 基于EOQ模型的非瞬时变质食品提前支付订货策略研究[J]. 中国管理科学, 2021:1-13.
- [7] Yang H L. Two-warehouse partial backlogging inventory models for deteriorating items under inflation[J]. International Journal of Production Economics, 2006, 103(1):362-370.
- [8] Jaggi C K, Verma P, Gupta M. Ordering policy for non-instantaneous deteriorating items in two warehouse environment with shortages[J]. International Journal of Logistics Systems and Management, 2015, 22(1):103-124.
- [9] Palanivel M, Uthayakumar R. Two-warehouse inventory model for non-instantaneous deteriorating items with partial backlogging and inflation over a finite time horizon[J]. Opsearch, 2016, 53(2):278-302.
- [10] Tripathi R P, Misra S S. An Optimal Inventory Policy for Items Having Constant Demand and Constant Deterioration Rate with Trade Credit[J]. International Journal of Information Systems and Supply Chain Management, 2012, 5(2):89-95.
- [11] 李贵萍, 段永瑞, 霍佳震, 等. 持有成本和变质率时变的非立即变质品库存策略[J]. 中国管理科学, 2015, 23(08):122-131.
- [12] Bai Q G, Xu X, Yuan C M, et al. A two-echelon supply chain coordination for deteriorating item with a multi-variable continuous demand function[J]. International Journal of Systems Science: Operations & Logistics, 2015, 2(1):49-62.
- [13] Duan Y R, Li G P, Tien J M, et al. Inventory models for perishable items with inventory level dependent demand rate[J]. Applied Mathematical Modelling, 2012, 36(10):5018-5028.
- [14] 段永瑞, 杨瑾, 霍佳震. 需求依赖于展示区库存水平的易腐品订购和转运策略[J]. 运筹与

- 管理, 2014,23(04):51-57.
- [15] Palanivel M, Sundararajan R, Uthayakumar R. Two-warehouse inventory model with non-instantaneously deteriorating items, stock-dependent demand, shortages and inflation[J]. Journal of Management Analytics, 2016,3(2):152-173.
- [16] 王金妹, 陈小琼. 随机需求条件下生鲜农产品库存控制研究[J]. 福州大学学报(哲学社会科学版), 2016,30(06):20-28.
- [17] Dye C Y. Joint pricing and ordering policy for a deteriorating inventory with partial backlogging[J]. Omega, 2007,35(2):184-189.
- [18] Taleizadeh A A, Mahsa N D, Leopoldo E C. Joint optimization of price, replenishment frequency, replenishment cycle and production rate in vendor managed inventory system with deteriorating items[J]. International Journal of Production Economics, 2015,159(1):285-295.
- [19] 魏锋. 需求可变的果蔬品库存策略研究[D]:[硕士学位论文].西安:西安工业大学, 2015.
- [20] Papachristos S, Skouri K. An inventory model with deteriorating items, quantity discount, pricing and time-dependent partial backlogging[J]. International Journal of Production Economics, 2003,83(3):247-256.
- [21] Wu K, Ouyang L, Yang C. Coordinating replenishment and pricing policies for non-instantaneous deteriorating items with price-sensitive demand[J]. International journal of systems science, 2009,40(12):1273-1281.
- [22] Chen X, Pang Z, Pan L. Coordinating Inventory Control and Pricing Strategies for Perishable Products[J]. Operations Research, 2014,62(2):284-300.
- [23] 江文辉, 王亚娜, 李延来, 等. 碳限额与交易政策下变质品的联合定价和库存策略[J]. 计算机集成制造系统, 2020,26(07):1951-1964.
- [24] Chakrabarty R, Roy T, Chaudhuri K S. A Two-Warehouse Inventory Model for Deteriorating Items with Capacity Constraints and Back-Ordering Under Financial Considerations[J]. International Journal of Applied and Computational Mathematics, 2018,4(2):1-16.
- [25] Mandal B. An EOQ Inventory Model for Time-varying Deteriorating Items with Cubic Demand under Salvage Value and Shortages[J]. International Journal of Systems Science and Applied Mathematics, 2020,4(5):36-42.
- [26] Teng J T, Lou K R. Seller' s optimal credit period and replenishment time in a supply chain with up-stream and down-stream trade credits[J]. Journal of Global Optimization, 2012,53(3):417-430.
- [27] Zhou X Y. An Inventory Model for Fresh Agricultural Product with Three-parameter Weibull Distribution Deterioration[J]. International Conference on Software Engineering and Service Sciences, 2010,12(4):231-247.

- [28] 赵忠, 王淑云, 李波. 时变需求下基于两级信用支付的易腐品订货模型[J]. 系统管理学报, 2016,25(01):83-89.
- [29] Kaya O, Polat A L. Coordinated pricing and inventory decisions for perishable products[J]. OR Spectrum, 2017,39(2):589-606.
- [30] Molana S, Davoudpour H, Minner S. An (r, nQ) inventory model for packaged deteriorating products with compound Poisson demand[J]. The Journal of the Operational Research Society, 2012,63(11):1499-1507.
- [31] Liao H, Deng Q. EES-EOQ model with uncertain acquisition quantity and market demand in dedicated or combined remanufacturing systems[J]. Applied Mathematical Modelling, 2018,64:135-167.
- [32] 冯颖, 张炎治. 随机需求下考虑订货提前期的易变质产品 (r,Q) 库存策略研究[J]. 中国管理科学, 2012,20(S2):506-512.
- [33] Heydari J, Rastegar M, Glock C H. A two-level delay in payments contract for supply chain coordination: The case of credit-dependent demand[J]. International Journal of Production Economics, 2017,191(1):26-36.
- [34] Ferguson M, Ketzenberg M E. Information Sharing to Improve Retail Product Freshness of Perishables[J]. Production and Operations Management, 2006,15(1):57-73.
- [35] Chua G A, Mokhlesi R, Sainathan A. Optimal Discounting and Replenishment Policies for Perishable Products[J]. International Journal of Production Economics, 2017,186(1):8-20.
- [36] Ghare P M, Schrader G F. A model for an exponentially decaying inventory[J]. Industrial Engineering, 1963,14(6):238-243.
- [37] Dave U. A probabilistic scheduling period inventory model for deteriorating items with lead time[J]. Mathematical Methods of Operations Research, 1986,30(5):229-237.
- [38] Chang C T. Optimal replenishment policies for non-instantaneous deteriorating items with stock-dependent demand[J]. International journal of production economics, 2010,123(1):62-68.
- [39] Balkhi Z T, Benkherouf L. On an inventory model for deteriorating items with stock dependent and time-varying demand rates[J]. Computers and Operations Research, 2004,31(2):223-240.
- [40] 何燕平. 允许缺货下的多周期生鲜产品库存控制策略研究[D]:[硕士学位论文].重庆:重庆大学, 2016.
- [41] Mukhopadhyay S, Mukherjee R N, Chaudhuri K S. Joint pricing and ordering policy for a deteriorating inventory[J]. Computers & Industrial Engineering, 2004,47(4):339-349.
- [42] Yang H L. An inventory model under inflation for deteriorating items with stock-dependent consumption rate and partial backlogging shortages[J]. International journal of production economics, 2010,123(1):8-19.

- [43] Tripathy, Chaitanya K, Mishra, et al. Ordering Policy for Linear Deteriorating Items for Declining Demand with Permissible Delay in Payments[J]. International Journal of Open Problems in Computer Science and Mathematics, 2012,5(1):85-94.
- [44] Ahmed M A, Al-Khamis A T, Benkherouf L. Inventory models with ramp type demand rate, partial backlogging and general deterioration rate[J]. Applied Mathematics and Computation, 2013,219(9):4288-4307.
- [45] Krishnaraj R B, Ramasamy K. An EOQ model for linear deterioration rate of consumption with permissible delay in payments with special discounts[J]. Journal of Applied Mathematics & Bioinformatics, 2013,3(2).
- [46] 王道平, 陈丽, 杨岑. 基于Weibull函数的易逝品库存优化模型研究[J]. 工业工程与管理, 2014,19(05):1-6.
- [47] Singh, Pattnayak. An EOQ inventory model for deteriorating items with varying trapezoidal type demand rate and Weibull distribution deterioration[J]. Journal of Information and Optimization Sciences, 2013,34(6):341-360.
- [48] Yang H L. Two-warehouse partial backlogging inventory models with three-parameter Weibull distribution deterioration under inflation[J]. International Journal of Production Economics, 2012,138(1):107-116.
- [49] 王宪杰, 黄佳伟, 王淑云. 基于安全库存系数的一体化冷链库存价格协调[J]. 工业工程与管理, 2016,21(04):43-49.
- [50] 张新功, 莫宁. 基于Weibull函数和价格折扣的易腐品库存订货与定价策略[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2020,37(04):1-5.
- [51] 周优军, 曹亮, 潘义前. 一类基于价格折扣的短生命周期易变质物品库存模型[J]. 物流工程与管理, 2009,31(07):35-38.
- [52] Snigdha B, Swati A. Inventory model for deteriorating items with freshness and price dependent demand: Optimal discounting and ordering policies[J]. Applied Mathematical Modelling, 2017,52:53-64.
- [53] 王方杰. 两阶段价格折扣下的生鲜产品库存模型研究[J]. 企业导报, 2016(10):128-132.
- [54] Haley C W, Higgins R C. Inventory Policy and Trade Credit Financing[J]. Management Science, 1973,20(4):464-471.
- [55] Ghosh S K, Khanra S, Chaudhuri K S. Optimal price and lot size determination for a perishable product under conditions of finite production, partial backordering and lost sale.[J]. Applied Mathematics and Computation, 2011,217(13):6047-6053.
- [56] 赵连霞, 张力, 程明宝, 等. 变质性产品库存模型研究:延期支付策略或延期交货策略[J]. 系统工程理论与实践, 2019,39(05):1117-1127.

- [57] 王道平, 王路, 杨岑. 延期支付条件下多产品定价与订货联合策略研究[J]. 工业工程与管理, 2015,20(06):7-13.
- [58] 黄远良, 侯治平, 杨超. 延期支付下产品新鲜度可控的库存管理策略[J]. 工业工程与管理, 2020,25(06):90-99.
- [59] 李贵萍, 张柯檬, 杜碧升. 生鲜产品的订购、定价与保鲜技术投资策略[J]. 工业工程与管理, 2021,26(01):130-138.
- [60] 王磊, 但斌. 基于消费者选择行为的生鲜农产品保鲜和定价策略研究[J]. 管理学报, 2014,11(03):449-454.
- [61] Zhang J, Liu G, Zhang Q, et al. Coordinating a supply chain for deteriorating items with a revenue sharing and cooperative investment contract[J]. Omega: The international journal of management science, 2015,56:37-49.
- [62] 艾学轶, 张金隆, 徐浩轩, 等. 考虑保存技术投资的非立即变质品定价和库存联合决策[J]. 系统管理学报, 2020,29(01):150-158.
- [63] He Y, Huang H F, Wang K. Optimizing Inventory and Pricing Policy for Seasonal Deteriorating Products with Preservation Technology Investment[J]. Journal of Industrial Engineering, 2013,2013:1-7.
- [64] Dye C. The effect of preservation technology investment on a non-instantaneous deteriorating inventory model[J]. Omega: The international journal of management science, 2013,41(5):872-880.
- [65] Tsao Y. Joint location, inventory, and preservation decisions for non-instantaneous deterioration items under delay in payments[J]. International Journal of Systems Science, 2016,47(3):572-585.
- [66] Chen Y R, Dye C Y. Application of particle swarm optimisation for solving deteriorating inventory model with fluctuating demand and controllable deterioration rate[J]. International Journal of Systems Science, 2013,44(6):1026-1039.
- [67] Cui L, Deng J, Zhang Y, et al. The bare-bones differential evolutionary for stochastic joint replenishment with random number of imperfect items[J]. Knowledge-Based Systems, 2020,193:105416.
- [68] Daniel A, Diego K. Computing Near-Optimal Policies in Generalized Joint Replenishment[J]. Inform Journal on Computing, 2012,24(1):148-164.
- [69] Silver E A. A Simple Method of Determining Order Quantities in Joint Replenishments under Deterministic Demand[J]. Management Science, 1976,22(12):1351-1361.
- [70] 文晓巍, 达庆利. 变质产品供应链中多品种的订购策略研究[J]. 系统工程理论与实践, 2006(02):43-48.

- [71] Moutaz K, Suresh G. A review of the joint replenishment problem literature: 1989 – 2005[J]. European Journal of Operational Research, 2008,186(1):1-16.
- [72] Wang L, He J, Wu D, et al. A novel differential evolution algorithm for joint replenishment problem under interdependence and its application[J]. International Journal of Production Economics, 2012,135(1):190-198.
- [73] Chen J M, Chen T H. Effects of Joint Replenishment and Channel Coordination for Managing Multiple Deteriorating Products in a Supply Chain[J]. The Journal of the Operational Research Society, 2005,56(10):1224-1234.
- [74] 张云丰, 王勇, 龚本刚, 等. 非瞬时补货下改良品联合采购决策[J]. 中国管理科学, 2016,24(10):124-132.
- [75] 艾学铁, 张金隆, 徐浩轩, 等. 需求依赖于变质时间的非立即变质品联合补货优化[J]. 控制与决策, 2018,33(04):671-678.
- [76] 崔利刚, 任海利, 邓洁, 等. 基于模糊随机需求的B2C多品采配协同模型及其粒子群算法求解[J]. 管理工程学报, 2020,34(06):183-190.
- [77] 曾宇容, 万建超, 吕盛祥, 等. 联合补货策略下的供应商选择和订货量分配协同优化[J]. 控制与决策, 2019,34(08):1714-1722.
- [78] Ongkunaruk P, Wahab M I, Chen Y. A genetic algorithm for a joint replenishment problem with resource and shipment constraints and defective items[J]. International Journal of Production Economics, 2016,175:142-152.
- [79] Wang M, Zhao L, Herty M. Joint replenishment and carbon trading in fresh food supply chains[J]. European Journal of Operational Research, 2019,277(2):561-573.
- [80] Wee H, Lo C, Hsu P. A multi-objective joint replenishment inventory model of deteriorated items in a fuzzy environment[J]. European Journal of Operational Research, 2009,197(2):620-631.
- [81] 王林, 郑贵莲, 曾宇容. 考虑资源约束和数量折扣的联合补货-选址库存协同优化研究[J]. 运筹与管理, 2019,28(01):17-26.
- [82] 陈昊, 陈园, 黎明, 等. 基于维度缺失检测与恢复的协同进化算法[J]. 系统工程学报, 2021,36(5):590-601.
- [83] 梁正平, 李辉才, 王志强, 等. 自适应变化响应的动态多目标进化算法[J]. 自动化学报, 2021:1001-1018.
- [84] 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, 2007,44(5):720-730.
- [85] Cui L, Deng J, Zhang Y, 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.
- [86] 王林, 冯俊翔, 张金隆. 联合补货策略下基于改进蛙跳算法的选址:库存集成优化研究[J]. 管理工程学报, 2019,33(02):180-187.
- [87] Wang L, He J, Wu D, et al. A novel differential evolution algorithm for joint replenishment problem under interdependence and its application[J]. International Journal of Production Economics, 2011,135(1):190-198.
- [88] Storn R, Price K. Differential Evolution - A Simple and Efficient Heuristic for global Optimization over Continuous Spaces[J]. Journal of Global Optimization, 1997,11(4):341-359.
- [89] Moon I K, Cha B C, Lee C U. The joint replenishment and freight consolidation of a warehouse in a supply chain[J]. International Journal of Production Economics, 2009,133(1):344-350.
- [90] 艾学轶. 基于RFID技术的生鲜产品联合补货及其投资评价模型研究[D]:[博士学位论文]. 武汉:华中科技大学, 2017.
- [91] Amit E, Dean H K. Effective and simple EOQ-like solutions for stochastic demand periodic review systems[J]. European Journal of Operational Research, 2007,180(3):1135-1143.

在学期间发表的论文及学术成果

[1]崔利刚,李亚丽,刘锦杏,田瑜.考虑保鲜技术投资的多品补货与定价联合决策.[J]工业工程与管理, 2022.01. (已录用)