

基于遗传算法的生鲜电商平台冷链逆向物流网络优化路径研究

江剑锋

上海工程技术大学管理学院, 上海

收稿日期: 2025年5月13日; 录用日期: 2025年5月28日; 发布日期: 2025年6月30日

摘要

冷链物流的发展背景源于全球食品、医药等行业对温控需求的不断提升, 随着经济全球化及消费升级, 生鲜农产品、冷冻食品、生物制剂等对温度敏感的货物运输量显著增长。冷链逆向物流网络中心选址优化是提升逆向物流效率、降低运营成本的关键问题。本文针对冷链产品在逆向物流过程中的温控需求、运输成本及设施选址约束, 构建了一个以总成本最小化为目标的混合整数规划(MIP)模型, 并结合某生鲜电商平台的案例数据设计了一种改进的遗传算法(GA)进行高效求解。该模型综合考虑了退货地址、区域逆向物流中心和再发货地址的多级网络结构, 优化了设施选址、运输路径及冷链资源分配。实验结果表明, 所提出的遗传算法在求解质量和计算效率上均表现出显著优势, 能够有效降低系统总成本并提高逆向物流网络的稳定性。本研究不仅优化了冷链逆向物流的配送效率和网络结构, 还为未来动态环境下的智能决策、低碳物流及多目标协同优化提供了研究基础。

关键词

冷链, 逆向物流网络, 混合整数规划模型, 遗传算法

Optimization Path Research of Fresh E-Commerce Platform's Cold Chain Reverse Logistics Network Based on Genetic Algorithm

Jianfeng Jiang

School of Management, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai

Received: May 13th, 2025; accepted: May 28th, 2025; published: Jun. 30th, 2025

文章引用: 江剑锋. 基于遗传算法的生鲜电商平台冷链逆向物流网络优化路径研究[J]. 电子商务评论, 2025, 14(6): 3212-3219. DOI: 10.12677/ecl.2025.1462105

Abstract

The development of cold chain logistics stems from the growing global demand for temperature control in industries such as food and pharmaceuticals. With economic globalization and consumption upgrading, the transportation volume of temperature-sensitive goods, including fresh agricultural products, frozen foods, and biologics, has increased significantly. The optimization of cold chain reverse logistics network center location selection is a critical issue for improving reverse logistics efficiency and reducing operational costs. This study addresses the temperature control requirements, transportation costs, and facility location constraints in the reverse logistics process of cold chain products by constructing a Mixed-Integer Programming (MIP) model aimed at minimizing total costs. An improved Genetic Algorithm (GA) is designed for efficient solution, incorporating case data from a fresh e-commerce platform. The model comprehensively considers a multi-level network structure comprising return points, regional reverse logistics centers, and redistribution locations, optimizing facility location, transportation routes, and cold chain resource allocation. Experimental results demonstrate that the proposed genetic algorithm exhibits significant advantages in both solution quality and computational efficiency, effectively reducing total system costs and enhancing the stability of the reverse logistics network. This research not only optimizes the distribution efficiency and network structure of cold chain reverse logistics, but also provides a foundation for future studies on intelligent decision-making, low-carbon logistics, and multi-objective collaborative optimization in dynamic environments.

Keywords

Cold Chain, Reverse Logistics Network, Mixed-Integer Programming Model, Genetic Algorithm

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 研究背景

新零售、区块链等背景下物流产业迎来了飞速发展，随着政策支持力度持续加大，冷链物流这一物流产业细分的市场规模迅速增长。在新发展时期，电子商务的爆发式增长推动了生鲜电商市场的扩张，网经社发布的《2024 中国生鲜电商市场数据报告》指出，2024 年生鲜电商交易规模达到 7367.9 亿元，同比增长 14.67%，进一步刺激了冷链需求。京东生鲜、美团优选、叮咚买菜、盒马等生鲜电商巨头平台近几年强势扩张，中研普华研究院《2024-2029 年中国生鲜电商行业市场竞争分析与发展前景预测报告》显示，2024 年生鲜电商行业用户规模已经突破 5.77 亿。然而在产业扩张的过程中，企业往往只注重在正向物流中产品的经营与发展等问题，忽略了可回收产品、可再生资源的经营，在某种程度上既造成生产资源的堆叠浪费，也造成了生态环境的恶化，不利于碳达峰目标的实现。因此，在绿色减排的政策导向下，冷链逆向物流这一冷链物流的特殊形式，其流程管理和服务体系亟待优化。因逆向物流系统中回收的产品、资源多数需要经过检测、分级、维修、报废等流程，需要确认相关处理设备的配置和安装等问题。随着逆向物流网络的逐渐拓展，需要逆向回收产品配备专业化的处理设施，以最大限度提高资源的利用效率。因此，逆向物流中心的选址优化问题成为冷链逆向物流网络优化的关键问题。

冷链逆向物流中心选址的重要性不言而喻，一方面，选址结果直接影响到逆向物流网络运作中产生的物流费用高低及客户满意度水平；另一方面，其位置直接影响到企业的运营成本和成本，关系到

整个回收网络的周转效率和效果。此外，逆向物流中心的选址是一个复杂的过程，其往往与企业正向的物流配送中心有密切联系。因此，本文聚焦逆向物流网络优化问题，力图通过建立模型，利用算法求出最优解，进而得出冷链逆向物流中心选址的最优方案。

2. 文献回顾

一方面，目前国内学者对于冷链物流的研究多针对发展障碍提出路径优化[1][2]和策略建议[3]，或结合数字化技术讨论冷链物流平台搭建方案[4]。部分学者利用实证分析讨论冷链物流发展对区域产品价格稳定性的影响[5]、研究冷链物流运营效率与顾客满意度的作用效应[6]。相关领域研究大部分集中在正向物流网络的优化路径上，对于逆向冷链产品的回收、处理及再利用的探讨尚少；另一方面，对于物流逆向网络的研究部分集中在结合互联网技术构建网络体系[7]，部分集中针对整体逆向物流网络利用算法优化商品回收网络[8]，缺乏对于细分类别产品逆向物流网络优化的研究。此外，由于遗传算法具有独特的仿生学优化机制和多维度搜索能力，适应大规模、多目标、动态变化的现代物流场景，很多学者利用遗传算法来优化物流网络结构，如结合聚类 and Floyd 方法利用遗传算法优化无人机 + 车辆的双层物流网络[9]，结合 Selenium 工具利用遗传算法优化物流企业配送路径[10]等。因此，本文聚焦冷链尤其是生鲜品逆向物流网络的优化方案，讨论冷链回收中心的选址问题具备一定的前瞻性，期望以本文研究为解决目前冷链物流平台回收乱象问题提供路径参考。

3. 模型构建

3.1. 冷链逆向物流中心选址模型构建思想

在研究冷链逆向物流中心选址问题时，本文聚焦可再生资源 and 产品的回收过程，并结合其可能产生的经济效益、社会效益及环境效益，以最大限度提高资源利用率及客户满意度为目标，考虑其网络结构的复杂性，基于一定假设构建冷链逆向物流的网络模型。

3.2. 冷链逆向物流网络优化问题描述

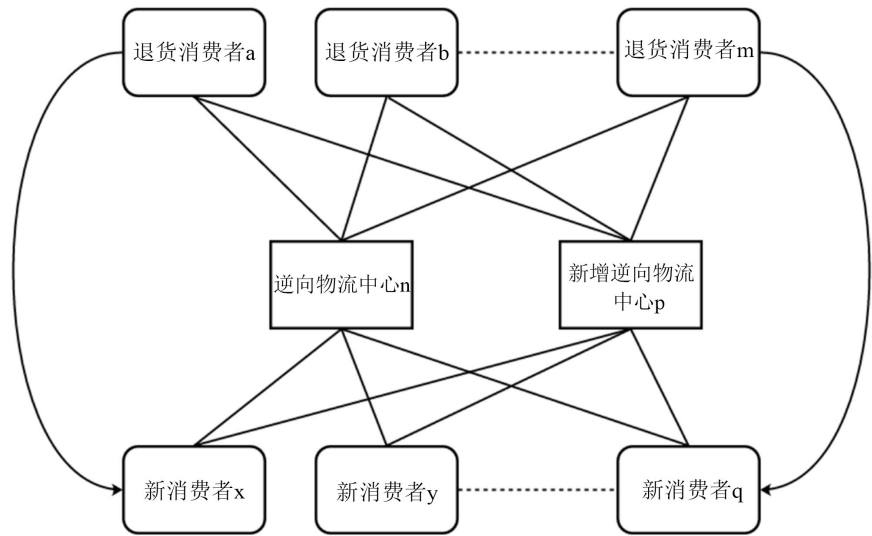


Figure 1. Layout structure diagram of reverse logistics network
图 1. 逆向物流网络布局结构图

以物流网络资源利用率最大化和客户满意度最高为规划目标，问题可具体描述为：

在某一特定区域内,某逆向物流网络体系中共包括 m 个消费者、 n 个逆向物流中心及 q 个新消费者。当相关企业收到消费者退货信息后,将退货产品运回到逆向物流中心,产品经过再处理、再加工,流向新的消费者群体。同时,新产品流入市场带来市场环境和社会环境的变化,催生对于逆向物流中心新的需求,因此,为在客户需求驱动下日益增大的退货要求,需要新增 p 个逆向物流中心,并且需要重新规划逆向物流网络中的配送方案,以满足最初的规划目标。逆向物流网络布局结构具体如图 1 所示。

3.3. 冷链回收中心选址混合整数规划模型构建

混合整数规划(Mixed Integer Programming, MIP)是一类具有重要理论和应用价值的数学优化问题,其核心特征在于同时包含离散型整数变量和连续型实数变量。作为运筹学领域的关键建模工具, MIP 在资源优化配置、生产调度优化、物流网络设计等复杂决策问题中展现出广泛的应用前景。从数学形式化角度而言, MIP 问题的求解目标是在满足给定线性约束条件(包括等式与不等式约束)的前提下,确定决策变量的最优取值组合,以使目标函数达到极值(最大化或最小化)。相较于纯连续或纯整数规划, MIP 的建模优势在于其能够通过引入整数变量精确刻画现实问题中的逻辑关系、离散选择及非凸约束。然而,由于整数变量的离散特性, MIP 问题通常属于 NP 难(NP-hard)问题,其计算复杂度随问题规模呈指数级增长,这对求解算法的效率和可扩展性提出了严峻挑战,也构成了当前研究的重点方向之一。因此,本文结合逆向物流网络高度复杂、多样性的特征,选取混合整数规划模型作为冷链逆向物流中心选址问题的模型基础。

3.4. 混合整数规划模型假设

- ① 逆向物流中心、退货消费者及新消费者的位置已知。
- ② 退货客户必须将产品退回到逆向物流中心才能完成退货。
- ③ 每个逆向物流中心的存储容量是有限的,但在一个逆向物流周期内的容量是充足的。
- ④ 每个逆向物流中心的再处理、再加工能力有限制。
- ⑤ 退货的消费者会选择退货到距离最近的逆向物流中心。
- ⑥ 逆向物流中心车辆严格按照既定的路线将再加工产品配送到新消费者地址处,不存在同级转运。

3.5. 混合整数规划模型参数设置

构建混合整数规划模型不仅需要考虑从多个备选地点中选出最优的逆向物流中心,从而使物流费用降到最低,还需要考虑从工厂到逆向物流中心的最优运输路线,使逆向物流过程总费用最小。

假定选址确定后,物流中心的基建费用固定,且不存在货物的储存费用,只考虑固定建设成本和运输费用,将所有物流中心固定建设费用平均分摊到建成后 t 年的年运营费用,且所有逆向物流中心向各新销售者地址运输的成本保持稳定不变。

- 令 a 为逆向物流中心 i 运往新消费者地址 j 的货物量;
 c 为逆向物流中心 i 运往新消费者地址 j 的总运输成本;
 v 为逆向物流中心 i 运往新消费者地址 j 的单位运输成本;
 l 为逆向物流中心 i 储存量阈值;
 s 为逆向物流中心 i 的固定建设成本;
 d 为新消费者 j 的货物需求量;
 Z 为物流中心建好后 t 年内的总费用;
 S 为所有逆向物流中心的总建设费;

V 为所有物流中心运往消费者地址的运输费用总和;
 n 为购销固定建设费用所需年限;
 x 为 0-1 变量, 当选择 i 处建设物流中心时, $x=1$; 否则 $x=0$ 。
由此, 为达到最大资源利用率(成本最小化)目标, 可构建如下模型:

$$\begin{aligned} \min Z &= \sum_{i=1}^t \left(\sum_{j=1}^{t+1} (c_{ij}/d_j) * a_{ij} \right) x_i + (1/n) * \sum_{i=1}^t s_i * x_i \\ \sum_{j=1}^{t+1} a_{ij} &\leq x_i * s_i \quad (j=1, 2, \dots, t+1) \\ \sum_{i=1}^t a_{ij} &\geq d_j \quad (j=1, 2, \dots, t) \\ a_{ij} &\geq 0 \quad (i=1, 2, \dots, t; j=1, 2, \dots, t+1) \\ x_i &= 0 \text{ 或 } 1 \end{aligned}$$

4. 模型求解

4.1. 遗传算法

遗传算法(Genetic Algorithm, 简称 GA)主要根据生物繁衍过程而发展出的一种解决实际问题的优化方法, 即基于不同生物在自然界的自适应能力, 模拟生物进化的过程对目标规划问题求得最优解。
遗传算法的基本思想为: 将一组初始解视为一个生物界的初始种群, 每一个种群都有各自不同的适应度, 这些适应度的不同决定了种群中选择、交叉、变异等过程。经过反复多次的迭代过程, 将保留种群中适应度较好的个体, 从而为最优解提供选择。

4.2. 遗传算法优化逆向物流中心选址模型的流程

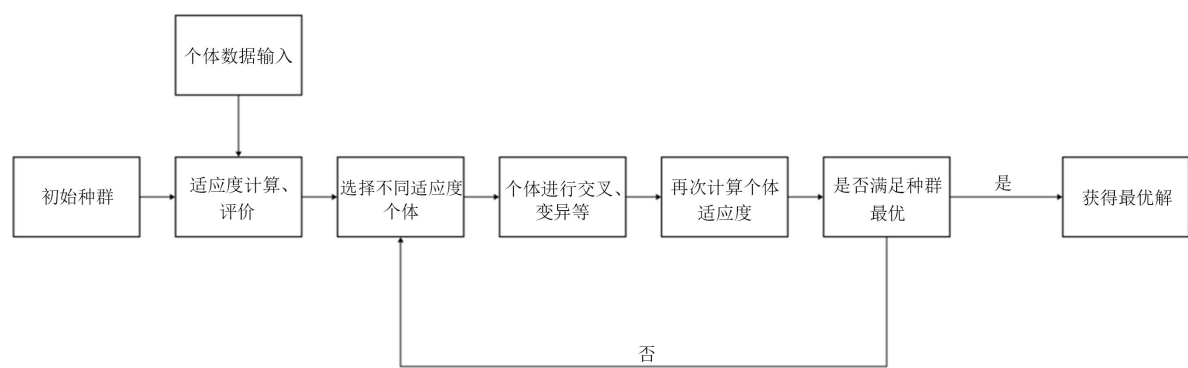


Figure 2. Flowchart of genetic algorithm optimization for cold chain reverse logistics center location selection
图 2. 遗传算法优化冷链逆向物流中心选址流程图

- 基于遗传算法优化逆向物流中心选址模型的步骤具体如下, 流程图见图 2:
- ① 生成逆向物流中心初始种群。通过二进制编码产生收集个体, 网络中所有个体构成初始种群。
 - ② 计算种群中个体的适应度。通过对不同个体的适应度进行比较评价, 判断种群是否处于最优。
 - ③ 以适应度评价为指标筛选个体, 并由此生成下一代个体。
 - ④ 对个体进行交叉、突变等操作, 产生新个体。

- ⑤ 对新产生个体进行适应度计算、评价和筛选。
- ⑥ 重复上述过程。

4.3. 基于遗传算法的逆向物流中心选址模型案例应用

本节选取生鲜平台 Q 为案例对象，Q 企业综合实力雄厚，用户基础庞大，在正向物流市场规模不断扩大的同时，秉承环保理念大力发展逆向物流网络，以提高资源利用效率，减少能源排放。目前，该企业现有 10 个逆向物流中心，期望在 20 个待定选址中选择 4 个地址建立新的逆向物流中心。该企业现有 4 个退货客户及 15 个新消费者，通过在 MATLAB 中输入退货客户、新消费者与各待定逆向物流中心选址的距离及退货量、需求量等数据(表 1~3 仅展示部分数据)，进行 1000 次迭代，最终找出能实现成本最小化目标的四个最优选址。

Table 1. Transportation distance between return customers and reverse logistics center location selection (Unit: km)

表 1. 退货客户与逆向物流中心选址的运输距离(单位: km)

退货客户 X_i / 待定选址 U_i	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5	U_6	.....
X_1	53	79	20	140	12	50	.....
X_2	226	43	52	70	124	72	.....
X_3	102	97	59	51	80	136	.....
X_4	40	117	13	156	109	35	.....

Table 2. Transportation distance between new consumers and reverse logistics center location selection (Unit: km)

表 2. 新消费者与逆向物流中心选址的运输距离(单位: km)

新消费者 X_i^* / 待定选址 U_i	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5	U_6	.....
X_1^*	53	79	20	140	12	50	.....
X_2^*	226	43	52	70	124	72	.....
X_3^*	102	97	59	51	80	136	.....
X_4^*	40	117	13	156	109	35	.....
X_5^*	33	41	277	83	146	18	.....
X_6^*	152	39	55	70	194	22	.....
.....							

Table 3. Cost breakdown of recycling activities

表 3. 回收活动费用明细

回收活动	活动费用(元)
中心建设费用	4×10^4
车辆费用	15.2×10^4
员工工资	11.5×10^4
折旧费用	5.4×10^3
.....	
总计	2.15×10^6

经上述计算可得，各退货客户到逆向物流中心的单位运输成本(元/斤·km)为：

$$C_{ij} = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{110} \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{210} \\ c_{31} & c_{32} & \cdots & c_{310} \\ c_{41} & c_{42} & \cdots & c_{410} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.04 & 0.12 & \cdots & 0.15 \\ 0.04 & 0.12 & \cdots & 0.15 \\ 0.04 & 0.12 & \ddots & \vdots \\ 0.04 & 0.12 & \cdots & 0.15 \end{pmatrix}$$

逆向物流中心到新消费者的单位运输成本(元/斤·km)为:

$$C_{ij}^* = \begin{pmatrix} c_{11}^* & c_{12}^* & \cdots & c_{115}^* \\ c_{21}^* & c_{22}^* & \cdots & c_{215}^* \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{101}^* & c_{102}^* & \cdots & c_{1015}^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.04 & 0.04 & \cdots & 0.04 \\ 0.21 & 0.21 & \cdots & 0.21 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0.18 & 0.18 & \cdots & 0.18 \end{pmatrix}$$

通过在 MATLAB 环境中进行编程, 具体得到如下结果(见图 3、图 4)。

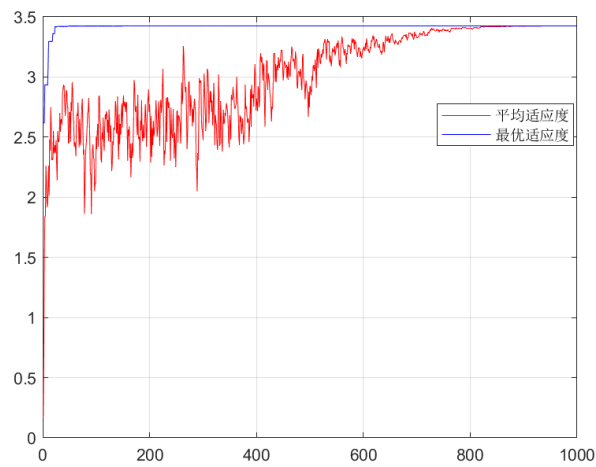


Figure 3. Genetic algorithm average/optimal fitness graph
图 3. 遗传算法平均/最优适应度图

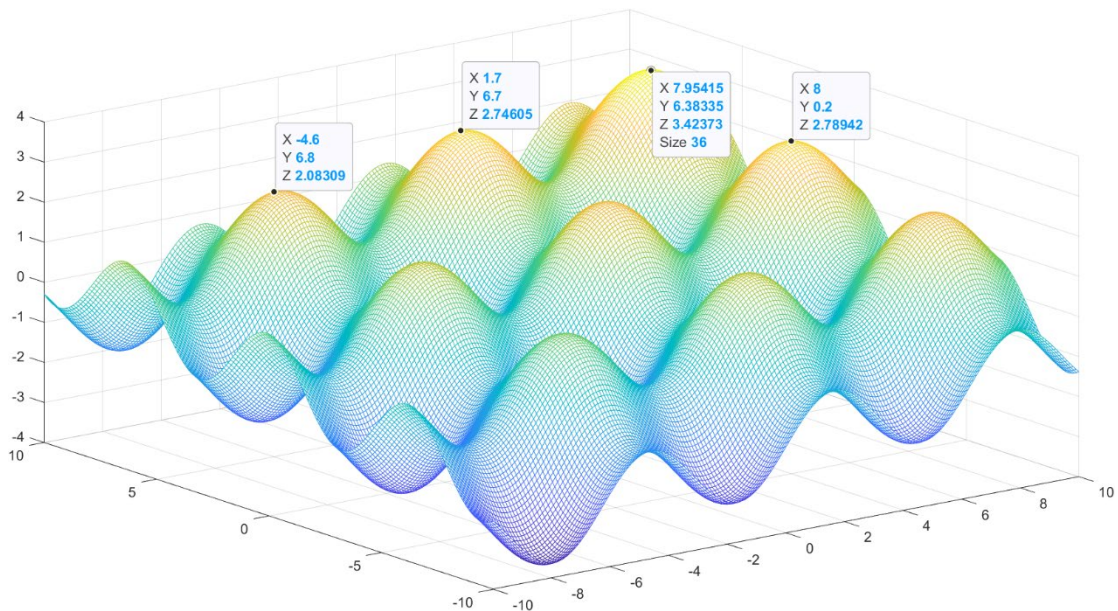


Figure 4. Multimodal function plot of genetic algorithm optimal solution
图 4. 遗传算法最优解多峰函数图像

种群在迭代 100~400 的过程中平均适应度峰值不断增大, 且过程波动较大, 迭代 500 次之后, 平均适应度值逐渐稳定, 且逐渐向最优适应度值靠拢, 此时种群经过交叉、突变和迭代遗传留下大多数精英个体。

如图 4 所示, 经过 1000 次迭代后, 选取最优适应度较高的四个位置作为逆向物流网络的最佳选址, 从而形成医废收集柜的最优选址方案。

5. 结论与展望

本文针对冷链逆向物流网络优化问题, 构建了基于混合整数规划的优化模型, 综合考虑了运输成本、设施固定成本、碳排放约束及客户需求响应能力等因素。结合生鲜电商企业 Q 的现实数据, 利用遗传算法求解最优的逆向物流中心选址, 所提出的优化方法能够有效降低系统总成本, 提高逆向物流网络的运作效率, 同时满足冷链产品的温控要求。在路径优化方面, 研究结果表明, 采用多级逆向网络结构(如“退货点-区域中心-新消费者”)能够显著减少运输距离和冷链损耗, 避免资源的进一步浪费。而智能算法(如遗传算法、多目标蚁群算法)的引入可进一步提升大规模问题的求解效率。未来研究可从以下方向展开: 1) 动态优化方面: 考虑到需求波动、季节性因素及极端天气等突发性事件对逆向物流网络的影响, 可通过鲁棒优化或随机规划方法进一步优化冷链逆向物流网络; 2) 智能决策方面: 融合大数据分析 with 最新机器学习技术, 实现实时动态路径优化与设施自适应调整; 3) 多目标协同方面: 进一步权衡经济性、环境效益与社会责任, 构建多目标决策模型以支持更全面的可持续冷链物流体系建设。本研究为冷链逆向物流网络的优化提供了理论支撑和决策参考, 未来可结合行业实践进一步验证模型的适用性, 推动逆向物流向智能化、绿色化方向发展。

参考文献

- [1] 李义华, 邓梦杰. 数字经济赋能冷链物流绿色化发展机理与路径研究[J]. 财经理论与实践, 2024, 45(6): 131-138.
- [2] 甘俊伟, 马捷, 许丽娟. 预制菜产业冷链物流支撑力影响因素分析与提升路径研究[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(6): 390-397.
- [3] 冯燕芳, 陈永平. 技术赋能下生鲜农产品冷链物流质量提升途径研究[J]. 价格理论与实践, 2024(4): 72-76+224.
- [4] 沈倩. 基于绿色供应链数智化冷链物流平台构建: 框架、机理、路径[J]. 物流科技, 2025, 48(6): 107-110+114.
- [5] 张丽. 冷链物流发展对区域农产品价格稳定性的影响——基于长江经济带沿线省域的实证分析[J]. 商业经济研究, 2025(2): 99-102.
- [6] 吴婷婷. 物流企业冷链物流、运营效率与顾客满意度——兼论物联网战略的调节作用[J]. 商业经济研究, 2025(7): 78-81.
- [7] 陆容. 我国冷链物流网络建设、绿色创新发展与生鲜农产品价格[J]. 商业经济研究, 2024(19): 85-88.
- [8] 褚东亮, 范雪, 豆祥芬, 等. 基于“互联网 + TPR”的逆向物流回收网络体系研究[J]. 包装工程, 2023, 44(11): 166-174.
- [9] 李楠, 辛春阳. 基于聚类-Floyd-遗传算法的“车辆 + 无人机”城市物流配送路径优化[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(21): 9186-9193.
- [10] 李霁晨, 刘超, 秦学. 基于“Selenium + 遗传算法”的皮革企业物流配送路径优化研究[J/OL]. 中国皮革, 2025, 54(5): 50-54.