

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2024.10.006

冷链物流配送网络选址-路径-库存的优化

陈红丽^{*1}, 潘奕搏¹, 丁丽娟²

(1. 北京物资学院 物流学院, 北京 101149; 2. 北京化工大学 经济管理学院, 北京 100029)

摘要: 为了控制冷链配送成本, 优化3级冷链物流网络节点空间布局, 提出了一种基于需求存在模糊随机性的选址-路径-库存多目标优化模型。以京津冀城市群为例, 提供了优化方案。针对由物流基地、配送中心、末端网点构成的冷链物流3级配送网络, 考虑到冷链产品存在订货提前期及需求具有模糊随机性, 引入模糊随机变量, 建立了CLRIP集成优化模型。首先, 通过穷举法计算出各备选配送中心点的最佳订货周期和最优库存管理方式, 将客户需求点与备选配送中心点进行随机组合, 确定需要开放的备选配送中心点的位置与数量。然后, 基于客户模糊随机需求, 综合考虑土地、库存和配送等成本, 进行选址-路径动态规划; 利用改进禁忌搜索算法修正模型, 直至达到最终要求, 从而确定需要开放的备选配送中心点及其最优巡回路线。最后, 对京津冀城市群多组实例进行分析。结果表明: 使用模糊随机变量的试验数据中, 最优解目标函数值和偏差稳定度均优于使用固定需求量的对照组数据, 验证了CLRIP模型和改进算法的有效性。研究结果可为京津冀城市群冷链物流配送网络构建提供最优选址位置、配送路径和库存管理, 为相关冷链物流配送网络优化提供实用可靠的参考方案。

关键词: 智能交通; 选址-路径-库存; 禁忌搜索算法; 冷链物流; 配送网络; 京津冀城市群

中图分类号: U116

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2024) 10-0047-09

Location-Routing-Inventory Optimization for Cold-chain Logistics Distribution Network

CHEN Hong-li^{*1}, PAN Yi-bo¹, DING Li-juan²

(1. Logistics School, Beijing Wuzi University, Beijing 101149, China;

2. School of Economics and Management, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: To control the cold-chain distribution cost and optimize the spatial layout of three-tier cold-chain logistics distribution network, the multi-objective optimization model of location-routing-inventory based on fuzzy-stochastic demand was proposed. Taking Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration as the study case, the optimal solution was provided. Considering order lead time and the fuzzy-stochastic nature of demand for cold-chain products, due to the three-tier cold-chain logistics distribution network composed of logistics base, distribution centers and terminal nodes, the fuzzy-stochastic variables were introduced to establish the integrated optimization model CLRIP. First, the optimal order cycle time and inventory management strategies for each candidate distribution center were determined by using the exhaustive method. The customers were randomly paired with the candidate distribution centers to determine the locations and quantities of distribution centers needed to open. Subsequently, based on the fuzzy-stochastic demand of customers and taking into account the costs (e.g., land, inventory and distribution), the location-routing dynamic planning was carried out. The model was refined by using the improved Tabu search algorithm till the final requirement was achieved, thereby determining the distribution centers to be open and their optimal transportation routes. Finally, the multiple groups of experiments on Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration were analyzed. The

收稿日期: 2022-12-29 修改日期: 2024-08-08

基金项目: 北京市教育委员会社科计划重点项目 (SZ202010037019)

作者简介 (* 通讯作者): 陈红丽 (1966-), 女, 河北沧州人, 硕士, 副教授. (chl6610@sina.com)

result indicates that the objective function value and deviation stability of the optimal solution were better than those of the control group with fixed demand, verifying the effectiveness of CLRIP model and the improved algorithm. The study findings provide optimal location, distribution routes, and inventory management strategies for constructing and optimizing cold-chain logistics distribution network for Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration.

Key words: intelligent transport; location-routing-inventory; Tabu search algorithm; cold-chain logistics; distribution network; Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration

0 引言

作为中国的首都经济圈,京津冀城市群在经济建设中占据重要地位。随着京津冀城市群人口和经济总量不断提升,该城市群居民对果蔬、鲜肉、奶制品等冷链产品的需求也在日益增长^[1]。为了满足居民日趋旺盛的生活需求,保障冷链产品质量,2021年“十四五”冷链物流发展规划强调,京津冀城市群应当促进冷链物流资源整合,构建协同高效、安全绿色、便捷可靠的冷链物流配送网络。同时,随着北京市非首都功能疏解及末端物流网点兴起,如何构建与京津冀城市群协同发展相匹配的冷链物流配送网络就成为亟待解决的问题。冷链物流3级配送网络是以物流基地、配送中心、末端网点为支撑,利用农产品流通过程中的信息和技术交互,实现物流各环节有效协同,优化配送效率的物流配送体系。由于物流基地外迁和自提点等新兴末端网点涌现,引致3级冷链物流配送网络面临优化改建等问题。因此,如何保证疏解区域性冷链物流基地等非首都功能的同时,科学合理优化3级冷链物流网络节点空间布局,有效控制冷链配送效率,使冷链物流网络整体利益最大化,更具有研究意义。

冷链物流配送网络优化是结合物流节点选址、运输路径调配及库存控制这3个核心环节进行决策,在满足消费需求的前提下实现冷链物流配送网络整体成本最小化。在以往的大多数文献中,这3个环节通常被人为地分割开来进行独立的或两两联合的优化研究。张杰等^[2]针对疫情背景下冷链配送的选址-路径联合优化问题进行研究,通过构建总成本和商品损失最小化的双目标优化模型,使用算例分析得到冷链配送选址-路径联合优化问题的最优方案;李凤月等^[3]在研究选址-库存联合优化问题时,针对选址要素及库存水平提出联合优化模型,并使用启发式算法进行求解得出优化方案,结果表明该优化方案能够有效降低库存运营和选址成本;高鑫宇等^[4]在研究选址-路径联合问题时,基于不确定性需

求建立以效率最大化和总成本最小化为总目标的优化模型,并用实例证明了该模型的有效性。随着研究的深入,许多学者认识到这3个环节是紧密结合、相互影响的。Liu等^[5]首次对选址-路径-库存集成问题(Combined Location Routing and Inventory Problem, CLRIP)进行描述,并对该问题建立数学模型,再采用启发式算法寻求模型最优解,最后对算法有效性进行评测;Shen等^[6]将该问题表述为一个非线性整数规划模型,并使用优化过的多目标离散粒子群算法求解,在保证安全库存的情况下,确定最佳物流节点位置和运输路径;张得志等^[7]考虑到供应商选择和物流配送网络各环节之间的协同作用,利用自适应性遗传算法确定合适的装配提前期,降低物流配送网络总成本;崔广彬等^[8]对客户随机需求条件下的多时期CLRIP问题进行研究,通过建立双层规划模型,在一定范围内选定多个物流节点位置和巡回运输路线,并基于模糊需求存贮策略确定其最佳订货量;杜丽敬等^[9]采用不断审查(Q, r)库存策略、物流基地唯一和配送产品单一的物流配送网络作为研究对象,考虑到消费者需求的不确定性,构建了以客户需求模糊随机性为前提的CLRIP混合整数非线性规划模型,先采用列生成算法求解目标模型获得初始解,再对初始解进行改进,从而实现对物流配送网络的优化;曾宇容等^[10]研究以企业物流配送网络为研究对象,构建了基于联合补货策略的CLRIP模型,并使用果蝇优化算法对模型进行求解,并用实例说明该模型可以有效降低企业配送成本,提高配送效率。

由于CLRIP问题中产品存在生产周期和订货提前期,因此无法确定客户实际需求量,只能通过历史数据进行预估,学者们针对这类问题使用不同的预测方法预估客户需求量。肖赞等^[11]通过分析城市配送需求数据的基本特征,提出了一种基于改进K近邻算法的预测方法;李思聪等^[12]在分析冷链物流市场需求特征的基础上,提出基于灰色回归模型的预测方法;崔利刚等^[13]针对多种产品需求的不确定

性, 将产品需求假设为模糊随机变量, 对产品需求进行预测, 并用实例分析证明了模糊随机变量较其他预测方法更有效; 陈德慧等^[14]将物流配送网络中顾客需求作为模糊随机变量, 把目标物流配送网络问题转化为确定的 CLRIP 模型, 并使用禁忌搜索算法对模型求解, 得到最优方案, 最后验证了方案的有效性。

由于 CLRIP 属于 NP-hard 问题, 采用传统算法求解很容易陷入局部最优解的情况。因此, 许多学者设计并改进了多种现代启发式算法用于求解 CLRIP。其中, 禁忌搜索 (Tabu Search, TS) 作为启发式算法之一, 因其具有避免出现循环搜索、激励对优良状态的局部搜索等优越性, 越来越多的学者开始利用禁忌搜索算法求解 CLRIP^[15]。王运发等^[16]为了避免求解多周期 CLRIP 模型时运算结果陷入局部最优解, 设计并采用自适应的禁忌搜索算法求解, 结果表明禁忌搜索算法在解决 CLRIP 时具有较强的鲁棒性; 尉迟群丽等^[17]研究了允许库存出现缺货情况的闭环物流网络优化问题, 基于此闭环物流网络构建混合非线性规划模型, 使用禁忌搜索算法进行求解, 运算结果显示, 禁忌搜索算法较传统算法准确度更高、运算速度更快; 陈红丽等^[18]对环首都流通圈的 CLRIP 进行研究, 先基于北京市六环内 27 个商圈数据构建 CLRIP 模型, 再利用禁忌搜索算法优化模型并求解, 最后验证了该研究的实用性。

根据以上研究综述可以看出国内外学者专门研究冷链物流配送网络优化的并不多, 相关文献大多是以确定性需求下企业物流网络优化为研究对象, 对城市群冷链物流配送网络优化及模糊随机需求条件下多因素集成问题的研究较少。因此, 本研究以京津冀城市群冷链物流配送网络优化问题为研究对象, 运用具有模糊随机变量的 CLRIP 多目标优化模型和算法, 为完善京津冀城市群冷链物流配送网络提供参考依据。

1 模型构建

1.1 模糊随机需求的数学描述

由于冷链物流配送网络存在冷链产品生产周期和订货提前期问题, 供应商在生产、储存冷链产品时无法确定客户实际需求, 只能通过统计分析历史数据的方式对客户需求量进行预估。但有些历史数据可能存在误差或遗漏, 在实际生产、储存和运输冷链产品期间, 客户需求量可能上升, 可能下降, 也可能与预估需求量相近, 此时通过模糊随机变量

对客户需求作出的说明更贴合实际。例如, 下个周期的客户需求量上升, 超过 7 500 单位的可能性为 0.3; 下个周期的客户需求量与预估需求量接近, 达到 6 000 单位的可能性为 0.5; 下个周期的客户需求量下降, 低于 4 500 单位的可能性为 0.2。此时适合使用模糊随机变量, 即设客户需求量为:

$$\tilde{D} = \begin{cases} \tilde{d}_1, & p_1 = 0.3 \\ \tilde{d}_2, & p_2 = 0.5, \\ \tilde{d}_3, & p_3 = 0.2 \end{cases} \quad (1)$$

式中, $\tilde{D}$ 为模糊随机需求量, “-” 表示随机需求, “~” 表示模糊需求; $\tilde{d}_1$ 为市场需求量增加时的模糊需求; $\tilde{d}_2$ 为市场需求量与预测相近时的模糊需求; $\tilde{d}_3$ 为市场需求量减少时的模糊需求; p_1 为市场需求量增加的概率; p_2 为市场需求量与预测相近的概率; p_3 为市场需求量减少的概率。模糊需求通常采用标准三角模糊数表示, 如 $\tilde{d}_f = (\underline{d}_f, d_f, \bar{d}_f)$, $f=1, 2, 3$, 表示第 f 种市场情形下的客户模糊需求, $\tilde{d}_f$ 的隶属函数为:

$$u(x_f) = \begin{cases} L(x_f) & \underline{d}_f \leq x_f \leq d_f \\ R(x_f) & d_f \leq x_f \leq \bar{d}_f, \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

式中, $\underline{d}_f, d_f, \bar{d}_f$ 均为实数; $L(x_f) = \frac{x_f - \underline{d}_f}{d_f - \underline{d}_f}$ 为向左

函数; $R(x_f) = \frac{\bar{d}_f - x_f}{\bar{d}_f - d_f}$ 为向右函数。三角模糊数 $\tilde{d}_f$ 也可由其 α 水平集 $d_f = [d_{f\alpha}^-, d_{f\alpha}^+]$, $\alpha \in [0, 1]$ 表示, 其中, $d_{f\alpha}^- = \underline{d}_f + \alpha (d_f - \underline{d}_f)$, $d_{f\alpha}^+ = \bar{d}_f - \alpha (\bar{d}_f - d_f)$ 。

模糊数 $\tilde{d}_f$ 的模糊可能均值为:

$$\bar{M}(\tilde{d}_f) = [M_*(\tilde{d}_f) + M^*(\tilde{d}_f)]/2 = \int_0^1 \alpha (d_{f\alpha}^- + d_{f\alpha}^+) d\alpha, \quad (3)$$

式中 $M_*(\tilde{d}_f)$ 和 $M^*(\tilde{d}_f)$ 分别为 $\tilde{d}_f$ 的最小和最大可能均值。

1.2 问题描述

本研究以京津冀城市群冷链物流配送网络的 CLRIP 多目标优化问题为研究对象, 此冷链物流 3 级配送网络由提供冷链产品的物流基地、多个配送中心和多个需求点组成。为了方便对 3 级冷链物流配送网络进行深入研究, 在此对 CLRIP 模型中的空

间布局情况进行抽象处理。其中,物流基地供应的冷链产品种类较多,但因冷链产品的储存和运输存在特殊性,使得质量和体积均在一定范围内,因此可抽象为1种产品。末端网点涉及超市、农贸市场、自提点等多种需求网点,具有分布较零散和单一网点需求量较少的特征,为了便于研究,将空间视域内位置相邻的需求网点看作1个客户需求点,从而确保各需求点的需求时间间隔不超过1 d。备选冷链物流配送中心包括现有的配送中心和规划的配送中心,需要从多个备选冷链物流配送中心中选择开放且能够覆盖并满足各需求点需求,并兼顾选址成本、运输成本和库存成本的配送中心。物流基地到需要开放的冷链物流配送中心的冷链产品运输为1级网络运输;配送中心到各需求点的冷链产品运输为2级网络运输;物流基地、需要开放的配送中心和各需求点共同构成3级冷链物流配送网络。此3级冷链物流配送网络结构如图1所示。

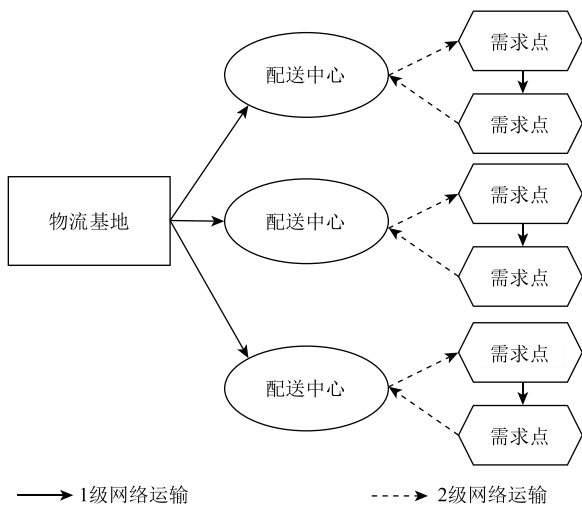


图1 三级冷链物流配送网络抽象化结构

Fig. 1 Abstracted structure of three-tier cold-chain logistics distribution network

本研究问题之一是从多个备选的冷链物流配送中心中选择能够满足各需求点需求且选址成本较低的配送中心。问题之二是根据物流基地位置和客户需求量确定配送中心的最佳订货周期和库存量。由于在冷链物流配送网络中,客户点的需求具有模糊随机性,配送中心为避免缺货或库存能力不足引起库存成本过高的问题,需要制订最优订货周期和库存量。问题之三是在配送中心车辆型号和载重相同的情况下,选择最优巡回路径。因为车辆的载重能力必须满足任一配送路线全部客户需求量,且完成任务后需按巡回路线返回出发点,为减少车辆行驶

时间,降低配送成本,所以需要确定车辆向各需求点配送的顺序,形成最优巡回路径。基于此,研究优化京津冀城市群冷链物流配送网络中需要开放的备选配送中心及其最佳订货周期、目标库存量、最优巡回路线等问题。

1.3 基本假设

(1) 各备选配送中心点所配送的冷链产品为单一类产品。

(2) 各备选配送中心点的位置已确定,即本研究所列出的各备选配送中心点的坐标,并且各备选配送中心点在单位时间内的选址成本已确定。

(3) 各备选配送中心点在每日工作时间内为其客户需求点配送的次数有且仅有1次,且每年工作时间保持为360 d。

(4) 各客户点的需求独立,需求量遵循模糊随机变量特征。

(5) 各备选配送中心点车辆型号和载重相同,每个客户需求点只配备1种车型。

(6) 车辆的载重能力必须满足任一配送路线全部客户需求量,完成配送任务后车辆需按巡回路线返回出发点。

(7) 各备选配送中心点采取 (T, S_j) 周期性检查库存策略。

模型参数和决策变量见表1。

表1 模型参数和决策变量

Tab. 1 Model parameters and decision variables

符号	定义
I	所有客户需求点集合 $I = \{i i = 1, 2, \dots, n\}$
J	所有备选配送中心点集合 $J = \{j j = 1, 2, \dots, m\}$
K	所有冷链运输车辆集合 $K = \{k k = 1, 2, \dots, l\}$
F_j	备选配送中心点 j 的选址成本
C_1	冷链产品物流基地到各备选配送中心点的1级网络的单位量运输成本
C_2	各备选配送中心点到客户需求点的单位距离成本
C_3	每次的订货成本
T	订货时间周期
L	订货提前期
dis_j	备选配送中心点 j 完成配送任务的行驶距离
C_q	冷链运输车辆的承载能力
$\bar{D}_j$	备选配送中心点 j 的日模糊随机需求量
$\bar{D}_{L+T_j}$	分别代表备选配送中心点 j 提供配送服务的客户需求点
$\bar{D}_{L,j}$	在 $L+T$, L 和 T 时期 (单位: d) 内的模糊随机需求,
$\bar{D}_{T,j}$	其中 $\bar{D}_{L+T_j} = \bar{D}_j (L+T)$, $\bar{D}_{L,j} = \bar{D}_j \times L$, $\bar{D}_{T,j} = \bar{D}_j \times T$;
$\bar{d}_i$	$\bar{d}_i$ 为客户需求点 i 的日模糊随机需求

续表 1

符号	定义
S_j	备选配送中心点 j 的目标库存量
η/d	各备选配送中心点的年工作时间
C_h	单位冷链产品每年的库存持有成本
C_s	单位冷链产品的缺货损失
决策变量	当车辆 k 从节点 g 经过节点 h , $x_{ghk}=1$, 其中 $g \neq h$;
	x_{ghk} $g, h=1, 2, \dots, n+m; k=1, 2, \dots, l$; 否则 $x_{ghk}=0$
	若备选配送中心点 j 开放, $y_j=1$, 其中 $j=1, 2, \dots, m$;
	否则 $y_j=0$
量	若备选配送中心点 j 为客户 i 提供服务, $z_{ij}=1$, 其中 $i=$
	$1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m$; 否则 $z_{ij}=0$

1.4 CLRIP 优化模型的构建

涉及选址、库存、运输成本三者共同组成总成本的计算函数为:

$$\min \bar{C}(S, T, x, y) = \sum_{j=1}^m F_j y_j + \sum_{j=1}^m \{ \eta C_3 / T + C_h (S_j - \bar{D}_{L,j} - 1/2 \bar{D}_{T,j}) + \frac{\eta C_s}{T} \bar{M}(\bar{D}_{L+T,j} - S_j) \} y_j + \sum_{j=1}^m \bar{\eta} \bar{D}_j C_1 y_j + \sum_{j=1}^m \eta dis_j C_2 y_j. \quad (4)$$

限制每个配送中心只配备 1 种车型进行配送, 并保证车辆以备选配送中心为起点, 按照巡回路线为每个客户需求点配送后返回出发点:

$$\text{s. t. } \sum_{g=1}^{n+m} \sum_{k=1}^l x_{ghk} = 1, h = 1, 2, \dots, n. \quad (5)$$

确保车辆的载重量大于或等于任一配送路线的客户需求量之和的约束条件为:

$$\sum_{g=1}^{n+m} \sum_{i=1}^n \bar{d}_i x_{gik} \leq C_q, k = 1, 2, \dots, l. \quad (6)$$

保证每个客户需求点最多由 1 个备选配送中心点提供冷链配送服务:

$$\sum_{g=1}^m \sum_{h=1}^m x_{ghk} \leq 1, k = 1, 2, \dots, l. \quad (7)$$

确保每组车辆能够连续运行, 要求车辆到达客户需求点并完成配送后从到达点驶离:

$$\sum_{g=1}^{n+m} x_{ghk} - \sum_{g=1}^{n+m} x_{hgk} = 0, k = 1, 2, \dots, l. \quad (8)$$

使各客户需求点只接受已开放的备选配送中心进行配送的限制条件为:

$$y_j \geq z_{ij}, i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m. \quad (9)$$

确保各备选配送中心点配送的商品量与所负责的客户点需求量相等:

$$\bar{D}_{L+T,j} - \sum_{i=1}^n \bar{d}_{L+T,i} z_{ij} = 0; j = 1, 2, \dots, m. \quad (10)$$

式 (11)~(13) 为 0-1 决策变量:

$$x_{ghk} = 0 \text{ 或 } 1, g \neq h; g, h = 1, 2, \dots, n+m; k = 1, 2, \dots, l, \quad (11)$$

$$y_j = 0 \text{ 或 } 1, j = 1, 2, \dots, m, \quad (12)$$

$$z_{ij} = 0 \text{ 或 } 1, i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m. \quad (13)$$

1.5 CLRIP 优化模型求解

本研究通过穷举法计算出最佳订货周期和最优库存管理方式, 将各客户需求点随机组合后提供给备选配送中心点, 备选配送中心由单一车型进行配送, 得到初始解。再利用启发算法对模型初始解进行优化, 提高初始解准确性, 最后使用禁忌搜索算法持续改进初始解, 直到获得模型最优解。

CLRIP 模型求解主要有 3 个步骤: 步骤 1 为得到初始解, 在满足各约束条件的情况下, 根据优化方法将客户需求点与备选配送中心点进行随机组合, 确定需要开放的备选配送中心点的位置与数量, 每条配送线路由单一车型完成配送任务, 得到初始解; 步骤 2 为优化初始解, 在确定需要开放的备选配送中心点位置与数量的基础上对初始解进行了优化, 将这些优化结果视为选址-路径优化模型的原始结果, 利用禁忌搜索算法进行继续修正, 直至达到最终要求; 步骤 3 为比较最优解, 在步骤 1 和步骤 2 分别求出最优解后, 将二者结果进行比较并确定该模型最优解。

2 验证模型

本研究将北京市 39 个大型商圈作为京津冀城市群的客户需求点代表, 将现有的冷链配送中心与规划的冷链配送中心作为备选配送中心点。在满足约束条件的情况下, 以各类参数为基础, 以成本可控为条件, 以优化布局为目标, 为京津冀城市群冷链物流配送网络选址-路径-库存问题提供实用可靠的优化方案。在构建冷链物流 3 级配送网络模型时, 为满足冷链产品供应过程中存在的时间和产量不确定性, 本研究在京津冀城市群范围内选取了天津市武清区北部的某蔬菜批发市场作为冷链物流配送网络中的物流基地。

2.1 确定相关节点

(1) 确定客户需求点

为研究京津冀城市群中居民对冷链产品的消费需求, 本研究对赢商大数据城市商业地图的城市商圈数据进行了初步审查、综合考核、筛选对比、整理归纳, 选取北京市王府井、西单、崇文门等 39 个大型商圈作为需求点代表。为了有效求解目标模型,

此研究依据商圈常住人口数量和地理条件对 39 个商圈进行聚类分析,通过整理归纳将这些商圈重新划分为 15 个新商圈,并将其标记为此冷链物流配送网络的客户需求点,最后利用重心法求出确定客户需求点坐标。结果坐标点分别是: (9, 31), (16, 26), (12, 24), (11, 38), (5, 6), (13, 28), (13, 23), (8, 24), (14, 24), (10, 9), (13, 42), (19, 25), (11, 20), (12, 13), (13, 33)。这些客户需求点坐标及每日需求量见表 2。

表 2 客户需求点坐标及每日需求量 (单位: t)

Tab. 2 Customer points coordinates and daily demands (unit: t)				
客户 需求点	坐标	市场需求量增加 市场需求量与预测 市场需求量减少		
		时的模糊需求	相近时的模糊需求	时的模糊需求
1	(9, 31)	369	386	381
2	(16, 26)	234	247	229
3	(12, 24)	355	368	349
4	(11, 38)	213	221	208
5	(5, 6)	201	216	211
6	(13, 28)	440	449	445
7	(13, 23)	239	249	244
8	(8, 24)	297	301	300
9	(14, 24)	228	236	235
10	(10, 9)	202	219	209
11	(13, 42)	321	324	323
12	(19, 25)	228	237	226
13	(11, 20)	344	349	340
14	(12, 13)	318	324	314
15	(13, 33)	403	413	406

(2) 确定备选配送中心点

本研究在对备选配送中心点的选取过程中,将北京市现有的冷链配送中心作为一类备选配送中心点,包括:朝阳区 1 个、通州区 2 个、海淀区 2 个、丰台区 1 个,共 6 个。结合《北京市物流专项规划》中提到的规划冷链配送中心区域并充分考虑选址成本因素,在房山区、丰台区、昌平区、朝阳区这 4 个地区分别选出支持冷链配送中心建设的位置,并将其作为另一类备选配送中心点。因为规划的冷链配送中心在选址和建设过程中存在一定模糊性,但在一定区域内的选址成本和具体位置差异较小,所以假定这 4 个规划的配送中心位置固定。综上,这 10 个备选配送中心点的坐标和选址成本见表 3。

2.2 采集并分析原始数据

已知下列参数:冷链产品物流基地到各备选配送中心点的单位运输成本为 3 元/t/km;各备选配送中心点到客户需求点的单位距离成本为 4 元/km;

表 3 备选配送中心的坐标和选址成本

Tab. 3 Coordinates and construction costs of alternative distribution centers		
备选配送中心点	坐标	选址成本/元
1	(18, 17)	44 790 000
2	(17, 6)	20 760 000
3	(21, 19)	15 400 000
4	(10, 29)	62 940 000
5	(9, 28)	53 260 000
6	(10, 12)	19 810 000
7	(4, 5)	959 000
8	(9, 9)	16 720 000
9	(8, 47)	4 700 000
10	(14, 40)	1 532 000

每次的订货成本为 800 元/次;订货提前期为 10 d;冷链运输车辆的承载能力为 600 t/辆;单位冷链产品每年的库存持有成本为 360 元/t;单位冷链产品的缺货损失为 4 元/t;各备选配送中心点的年工作时间为 360 d。其中备选配送中心 1~6 分别代表北京市六环内现有的冷链配送中心;备选配送中心 7~10 代表规划的冷链配送中心,客户需求点共 15 个,市场需求量增加、与预测相近、减少的概率分别为 0.3, 0.5, 0.2。为便于模型求解和空间观察,将京津冀城市群客户需求点和备选配送中心点的位置按照坐标进行编辑及绘图,其空间布局如图 2 所示。

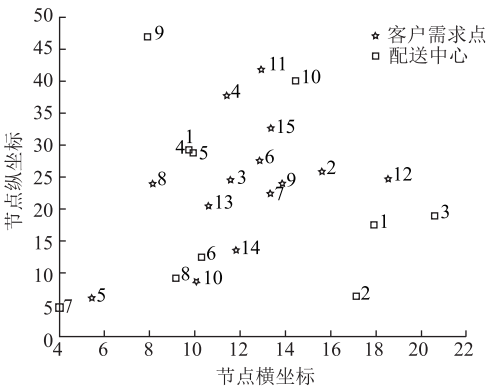


图 2 客户需求点和备选配送中心点空间布局

Fig. 2 Spatial layout of customer points and alternative
distribution centers

2.3 验证算法有效性

本研究使用改进的禁忌搜索算法,运用 Matlab 2016a 对其初始解进行修正,直到获得最优解。禁忌搜索算法的初始解函数值对最优解函数值影响较显著,因此首先生成 8 个存在差异的初始解,再利用禁忌搜索算法对优化后的数据进行处理后得到最优解,这 8 组数据函数值和偏差见表 4。

表 4 使用模糊随机变量的目标函数值及偏差

Tab. 4 Objective function values and deviations with fuzzy-stochastic variables

序号	初始解目标函数值/元	最优解目标函数值/元	偏差/%
1	110 278 924	85 262 874	22.68
2	108 300 664	85 272 019	21.26
3	107 429 473	85 273 688	20.62
4	108 656 406	85 262 190	21.53
5	107 639 499	85 265 966	20.79
6	107 957 605	85 269 985	21.02
7	106 677 441	85 731 932	19.63
8	107 847 850	85 268 431	20.94

为验证使用模糊随机变量描述客户需求的有效性, 建立对照组进行对照试验, 将表 4 中的客户模糊随机需求量调整为固定值, 使用表 2 中各需求点市场需求量与预测相近时的模糊需求量的数据, 其他相关参数和运算步骤均保持不变, 生成的 8 组数据函数值和偏差见表 5。

表 5 对照组的目标函数值及偏差

Tab. 5 Objective function values and deviations of control group

序号	初始解目标函数值/元	最优解目标函数值/元	偏差/%
1	119 875 844	89 576 723	25.28
2	117 794 143	90 723 813	18.11
3	104 542 785	89 295 841	14.58
4	115 716 861	90 257 190	21.32
5	121 381 617	87 791 225	18.24
6	116 531 519	94 416 576	12.20
7	111 297 472	89 612 264	15.70
8	108 276 937	85 871 739	19.95

由表 4 可知, 使用模糊随机变量的 8 组最优解数据中最大值为 85 731 932, 最小值为 85 262 190, 且 8 组数据中最优解与初始解的偏差范围为 19.63%~22.68%, 范围两端的相对偏差为 3.05%。而由表 5 可知, 使用固定需求量的最优解中, 最大值为 94 416 576, 最小值为 85 871 739, 而对照组中最优解与初始解的偏差范围为 12.20%~25.28%, 范围两端的相对偏差为 13.08%。由此可得, 使用模糊随机变量的试验数据中, 最优解目标函数值和偏差稳定度均优于使用固定需求量的对照组数据, 证明了本研究利用具有模糊随机变量的 CLRIP 模型和禁忌搜索算法对京津冀城市群冷链物流配送网络选址-路径-库存问题的优化是有效且准确的。

2.4 确定最优配送方案

由表 4 可知, 在 8 组优化方案数据中, 各方案的配送成本和路径均存在差异。这是因为由于客户需求量存在模糊随机性, 这对各配送中心的库存能力有较强的考验, 一旦客户需求量超过配送中心所能容纳的库存量, 将会造成较严重的客户损失并影响配送中心的正常运营。当客户需求量长期且远低于配送中心的库存量时, 配送中心的建设投入和人力成本均会影响总成本。因此, 冷链物流配送网络在构建时需要将选址、路径规划、库存水平联合在一起, 寻求选址-路径-库存问题最优解。因此, 该优化问题最佳方案的成本函数值为 85 262 190。在最优方案中, 需要开放的备选配送中心点位置、配送路径及各项成本见表 6。

表 6 CLRIP 模型最优解方案

Tab. 6 Optimal solutions with CLRIP model

	最优成本/元	开放配送中心	路径	订货时间周期/d	目标库存量/t
选址成本	39 871 000	2	9→3	7	250
		3	12→2	7	199
库存成本	31 272 337	6	13→7	7	248
		7	5→10→14	7	314
运输成本	14 118 853	8	8→6	7	312
		9	15→1	7	331
		10	4→11	7	226
总成本	85 262 190	—	—	—	—

由表 6 可知, 在最优解的各成本组成中, 选址成本对总成本影响最大, 这是因为北京市常住人口和流动人口基数较大且地理位置具有特殊性, 选址成本受大趋势影响较稳定, 因此当备选配送中心位置固定时, 无法对其成本进行进一步缩减。库存成本次之, 这是因为在冷链物流配送网络中, 涉及的产品通常具有易腐、保质期短等特点, 对库存条件要求更加严格, 且存在生产周期性和订货周期性。为保证产品的新鲜度和企业的正常运转, 需要保证库存成本投入。运输成本占比最低, 这是因为在选址过程中, 已经考虑到了大多数备选配送中心的交通条件, 所以备选配送中心的位置一般都靠近多条交通要道且距离北京市区较近, 引致运输成本占总成本比例最小。综上, 需要开放的备选配送中心点为 2, 3, 6, 7, 8, 9, 10, 其最优选址-路径方案如图 3 所示。以配送中心 2 为例进行解释说明: 车辆从备选配送中心点 2 出发, 将产品送至客户需求点 9, 再送至客户需求点 3, 最后返回出发点完成整轮配送。

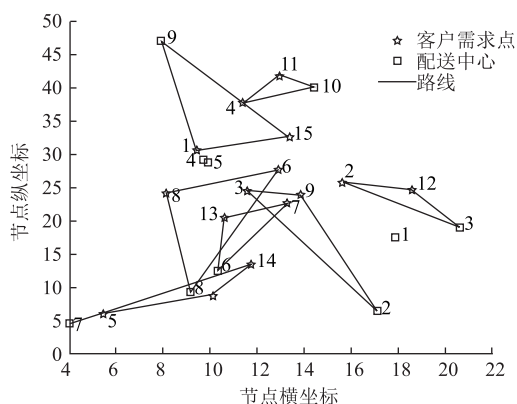


图3 配送中心最优选址-路径方案

Fig.3 Optimal location-routing scheme for distribution centers

为了更深层次研究此冷链物流配送网络的现实意义,将对相关数据和结果做出进一步分析。由表3和表6可知,选址成本作为3项成本中所占比例最大的一项,直接影响总成本的大小。由于不同的备选配送中心点在选址成本上相差较大,以备选配送中心点4和备选配送中心点3为例,前者选址成本为62 940 000元,而后者仅为15 400 000元,前者是后者的4.1倍。造成这种情况的原因是所处地理位置不同,土地征用费用也会有一定的差异,土地成本成为选址的制约因素。由于北京市交通的便利性,配送中心运输成本占总成本的比例最小,基于此,在配送中心选址时,不仅需要考虑交通条件,更需要对土地价格进行深入的分析。在交通条件、设施设备良好的情况下,将选址成本作为冷链物流配送网络规划的重要考量标准。

3 结论

本研究在2021年“十四五”冷链物流发展规划的基础上,将北京市39个大型商圈作为京津冀城市群的客户需求点,将现有的配送中心和规划的配送中心作为备选配送中心点,将天津市武清区北部的某蔬菜批发市场作为物流基地,使用Matlab 2016a软件并运用重心法、禁忌搜索等相关算法对京津冀城市群冷链物流配送网络选址-路径-库存问题进行优化。通过对8组优化方案的归纳比较,最终确定了成本最小化的解决方案,为相关冷链物流配送网络优化提供了实用可靠的参考方案。根据相关数据和结果,本研究提出以下结论。

因地域条件限制选址成本无法被进一步压缩,使得选址成本一直是构建冷链物流配送网络成本的主要部分。但是,在对冷链物流节点进行选址时,

除了对选址地点的地理条件、土地价格和客户需求应当进行深入考察外,还应考虑因非首都功能外迁而带来的城区配送压力增长及客户需求升级,应尽量减少选址支出,将更多的资金投放在产业转型和服务质量提升上。因此,政府可以对相关企业进行税收减免、土地价格优惠等政策扶持,助力京津冀城市群冷链物流配送网络的建设与升级。

为验证使用模糊随机变量描述客户需求量的有效性,进行了对照试验,将原方案中客户模糊随机需求量调整为固定值。结果显示,使用模糊随机需求量的最优解目标函数值和偏差稳定度均优于使用固定需求量的对照组数据,这表明所构建的模型及算法符合京津冀城市群冷链物流配送网络的现实情况,对促进中国冷链物流产业转型升级及保障生鲜农产品质量安全等方面具有重要的参考意义。

本研究的不足在于京津冀城市群所涉及的范围较大,但本研究所选取的研究范围相对较小,具有典型性但是代表性不足,因此本研究所构建的冷链物流配送网络优化模型具有一定的局限性。根据目前的研究趋势,之后的研究方向将依据区域居民数量和商圈人口需求特点,进一步完善对客户需求量的描述。另外,本研究假设各备选配送中心点车辆型号和载重相同,即配送中心只配备1种车型不符合现实情景,因此在后续的研究中需要根据配送中心的配送任务深入研究车辆选型问题。

参考文献:

References:

- [1] 尹丽. 京津冀区域农产品冷链智慧物流体系关键技术研究 [J]. 山西农经, 2021 (23): 167-168, 171.
YIN Li. Research on Key Technologies of Cold Chain Intelligent Logistics System for Agricultural Products in Beijing-Tianjin-Hebei Region [J]. Shanxi Agricultural Economy, 2021 (23): 167-168, 171.
- [2] 张杰, 李妍峰. 疫情环境下生鲜配送的选址-路径问题 [J/OL]. 中国管理科学 (2022-08-31) [2024-08-08].
<https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2022.0575>.
ZHANG Jie, LI Yan-feng. Location-routing Problem of Fresh Product Distribution in Epidemic Environment [J/OL]. Chinese Journal of Management Science (2022-08-31) [2024-08-08]. <https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2022.0575>.
- [3] 李凤月, 齐小刚, 宋卫星, 等. 基于混合果蝇优化算法的选址-库存联合优化策略 [J]. 控制与决策, 2022, 37 (9): 2343-2352.

- LI Feng-yue, QI Xiao-gang, SONG Wei-xing, et al. Location-inventory Joint Optimization Strategy Based on Hybrid Fruit Fly Optimization Algorithm [J]. Control and Decision, 2022, 37 (9): 2343-2352.
- [4] 高鑫宇, 倪静. 带模糊需求的多阶段双目标应急选址-路径优化 [J]. 计算机应用研究, 2022, 39 (2): 391-397.
- GAO Xin-yu, NI Jing. Multi-stage Bi-objective Emergency Location-routing Optimization with Fuzzy Requirement [J]. Application Research of Computers, 2022, 39 (2): 391-397.
- [5] LIU S C, LEE S. A Two-phase Heuristic Method for the Multi-depot Location Routing Problem Taking Inventory Control Decisions into Consideration [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2003, 22 (11): 941-950.
- [6] SHEN Z J, QI L. Incorporating Inventory and Routing Costs in Strategic Location Models [J]. European Journal of Operational Research, 2007, 179 (2): 372-389.
- [7] 张得志, 潘立红, 李双艳. 考虑供应商选择的选址-库存-路径的联合优化 [J]. 计算机应用研究, 2019, 36 (8): 2338-2341.
- ZHANG De-zhi, PAN Li-hong, LI Shuang-yan. Research on Joint Optimization for Location-inventory-routing with Supplier Selection [J]. Application Research of Computers, 2019, 36 (8): 2338-2341.
- [8] 崔广彬, 李一军. 模糊需求下物流系统 CLRIP 问题研究 [J]. 控制与决策, 2007, 22 (9): 1000 - 1004, 1016.
- CUI Guang-bin, LI Yi-jun. Combined Location Routing and Inventory Problem with Fuzzy Demand in Logistics System [J]. Control and Decision, 2007, 22 (9): 1000 - 1004, 1016.
- [9] 杜丽敬, 李延晖. 选址-库存-路径问题模型及其集成优化算法 [J]. 运筹与管理, 2014, 23 (4): 70-79.
- DU Li-jing, LI Yan-hui. Integrated Models and Approach for Location Inventory and Routing Problem [J]. Operations Research and Management Science, 2014, 23 (4): 70-79.
- [10] 曾宇容, 王林, 王思睿. 基于混合果蝇优化算法的选址-库存-配送集成优化研究 [J]. 运筹与管理, 2022, 31 (3): 24-30.
- ZENG Yu-rong, WANG Lin, WANG Si-rui. Integrated Optimization of Location-inventory-delivery Problem Using Hybrid Fruit Fly Optimization Algorithm [J]. Operations Research and Management Science, 2022, 31 (3): 24-30.
- [11] 肖赞, 刘洋, 裴爱晖, 等. 城市配送需求预测方法研究 [J]. 公路交通科技, 2023, 40 (3): 254-262.
- XIAO Yun, LIU Yang, PEI Ai-hui, et al. Study on Prediction Method of Urban Distribution Demand [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2023, 40 (3): 254-262.
- [12] 李思聪, 叶静. 基于灰色回归模型的农产品冷链物流需求分析及预测 [J]. 公路交通科技, 2022, 39 (5): 166-174.
- LI Si-cong, YE Jing. Analysis and Forecast on Cold Chain Logistics Demand of Agricultural Products Based on Grey Regression Model [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2022, 39 (5): 166-174.
- [13] 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 (6): 183-190.
- CUI Li-gang, REN Hai-li, DENG Jie, et al. A Fuzzy Stochastic Demand-based Cooperative Model for B2C Multi-product Sourcing and Distribution and Its Particle Swarm Algorithm Solution [J]. Journal of Industrial Engineering and Engineering Management, 2020, 34 (6): 183-190.
- [14] 陈德慧, 陈东彦. 模糊随机环境下 B2C 电子商务配送系统 CLRIP 集成优化模型 [J]. 系统管理学报, 2017, 26 (4): 744-753.
- CHEN De-hui, CHEN Dong-yan. Model for Intergrated Location, Routing and Inventory Optimization in B2C E-commerce Distribution System Under Fuzzy Random Environment [J]. Journal of Systems & Management, 2017, 26 (4): 744-753.
- [15] 张硕, 杨学强. 选址-库存-路径问题研究综述 [J]. 物流技术, 2021, 40 (8): 81-85, 94.
- ZHANG Shuo, YANG Xue-qiang. Review of Researches on Location-inventory-route Problem [J]. Logistics Technology, 2021, 40 (8): 81-85, 94.
- [16] 王运发, 李波. 基于禁忌搜索的生产-库存-配送协同计划问题研究 [J]. 信息与控制, 2012, 41 (3): 391-396, 400.
- WANG Yun-fa, LI Bo. Research on Coordinated Production-inventory-distribution Planning Problem Based on Tabu Search [J]. Information and Control, 2012, 41 (3): 391-396, 400.
- [17] 尉迟群丽, 何正文, 王能民. 考虑缺货的闭环供应链选址-库存-路径集成优化 [J]. 运筹与管理, 2021, 30 (2): 53-60.
- YUCHI Qun-li, HE Zheng-wen, WANG Neng-min. Integration Optimization Research on Location-inventory-routing Problem Considering Out-of-stock Strategy in Closed-loop Supply Chain [J]. Operations Research and Management Science, 2021, 30 (2): 53-60.
- [18] 陈红丽, 赵爽, 杨海波, 等. 环首都流通圈物流供应链节点空间布局优化 [J]. 经济地理, 2020, 40 (7): 115-123.
- CHEN Hong-li, ZHAO Shuang, YANG Hai-bo, et al. Optimization of the Spatial Layout of Logistics Supply Chain Nodes in the Capital Circulation Circle [J]. Economic Geography, 2020, 40 (7): 115-123.