

双碳目标下数据驱动的城市生鲜冷链配送网络协同优化与动态调度研究

唐琼

衡阳师范学院经济与管理学院, 湖南 衡阳 421001

摘要: 考虑“双碳”目标下城市生鲜冷链配送既要减少碳排放, 又要保障生鲜品质, 本文研究碳交易机制下电动与燃油冷藏车并用的选址-库存-路径协同优化问题, 建立两阶段随机混合整数规划模型。第一阶段在需求未实现前确定选址、车队与路径方案, 第二阶段在需求实现后确定各需求点动态配送量。求解方面, 本文设计了加权K-means选址与多算子模拟退火相结合的混合算法。算例计算验证了模型与算法的有效性, 可为城市生鲜冷链配送网络的低碳规划与动态调度决策提供参考。

关键词: 城市生鲜冷链; 选址-库存-路径; 碳交易; 两阶段随机规划; 模拟退火算法

DOI: 10.64649/yh.shygl.issn3105-0085.202609020

0 引言

随着生鲜电商规模的快速扩张, 城市生鲜冷链配送需求也日益提升, 生鲜冷藏车在行驶和制冷过程中产生的碳排放同步增加。生鲜品本身易腐, 货损风险高, 仅靠最小化经济成本已不足以应对现实需求——碳约束逐渐收紧, 需求随机波动难以预判。电动与燃油冷藏车在载重、续航等方面存在效率差异, 而现有的配送网络规划未充分将这种差异纳入模型。

目前生鲜冷链配送网络优化的相关研究, 大致从以下三个维度展开探索。选址-路径方面, 刘万正等^[1]针对多型预冷设施提出了两阶段随机模型, 马艳芳等^[2]针对多主体决策提出双层规划模型, 吴瑶等^[3]将多温共配引入选址-路径决策。低碳配送方面, 周鲜成等^[4]在碳核算模型充分考虑载重、速度、制冷等多因素, 初良勇等^[5]探讨需求不确定的低碳库存-路径问题, 童瑶莹等^[6]优化时变路网背景下低碳路径问题。动态调度方面, 宾厚等^[7]设计两阶段算法针求解多车型动态路径问题, 李二超等^[8]设计改进遗传算法求解动态订单路径。

已有研究为城市冷链配送网络优化提供了较好基础, 但对碳交易下电动与燃油冷藏车的载重-续航差异关注不够、较少利用真实运行数据生成场景处理需求不确定。针对这些不足, 本文在碳交易机制下建立含异构车型的两阶段随机选址-库存-路径模型, 将两类车型的载重-续航差异纳入决策, 并利用历史数据生成需求场景; 设计模拟退火算法求解, 以期为城市生鲜冷链配送的低碳规划与动态调度提供决策参考。

1 问题描述与数学模型

1.1 问题描述

本文研究的生鲜冷链配送网络由城市物流中心、若干备选配送中心与若干生鲜需求点组

成。各备选配送中心配置含电动冷藏车与燃油冷藏车构成的混合车队, 并由城市物流中心统一补货, 库存管理采用连续盘点(Q,r)策略。在载重、续航、配送中心容量与时间窗等约束下, 以经济成本、碳排放成本与生鲜品质损失成本之和最小为优化目标。

1.2 符号说明

后文使用的相关参数说明如下: I 为备选配送中心集合; J 为生鲜需求点集合; K 为冷藏车辆集合; S 为需求场景集合; C_s 为第 s 个簇对应的历史日样本集合, $s \in S$; F_i 为备选配送中心 i 的固定建设成本; Cap_i 为配送中心 i 的最大仓储容量; Q_k 为车辆 k 的最大载重; f_k 为冷藏车 k 的固定启用成本; c_k 为冷藏车 k 的单位里程运输成本; d_{ij} 为节点 i 到节点 j 的实际距离; v 为车辆匀速行驶速度; τ_i 为车辆在节点的卸货服务时长; e_j 、 l_j 分别为需求点 j 允许的最早、最晚收货时间窗; c_t 为单位时间惩罚成本; κ 为早到惩罚系数; μ_i 为配送中心 i 的期望需求率; Ko_i 为配送中心 i 单次补货的固定订货成本; h 为单位库存持有成本; Q_i 、 SS_i 分别为配送中心 i 的最优订货量与安全库存; σ_i 为配送中心 i 的需求标准差; $G(z_\alpha)$ 表示安全系数为 z_α 时的期望缺货量; b 为单位生鲜缺货惩罚成本; p_j 为需求点 j 的生鲜产品单位价值; ε 为生鲜品质衰减系数; η_1 、 η_2 分别为冷藏车行驶单位距离与制冷机组单位时长的碳排放系数; T_k^s 为场景 s 下冷藏车 k 的制冷机组运行时长; c_{CO_2} 为碳交易市场单位碳排放价格; e_0 为免费碳排放配额; T 为历史日总数; π_s 为场景 s 的发生概率; q_j^s 、 $\bar{q}_j$ 分别为场景 s 下需求点 j 的需求量与其期望需求; t_j^s 为场景 s 下车辆到达需求点 j 的时刻; y_i 为备选配送中心 i 是否被启用; x_{ij} 为需求点 j 是否由配送中心 i 供货; z_{ij}^k 为车辆 k 是否由节点 i 驶向节点 j ; a_{jk} 为客户 j 是否由车辆 k 提供服务; u_j^s 为场景 s 下需求点 j 的实际配送量。

1.3 模型假设

(1) 配送中心的建设成本与仓储容量均已知, 补货统一由城市物流中心承担, 库存采用连续盘点(Q,r)策略; (2) 客户需求根据历史运行数据产生, 需求未被满足时计算缺货惩罚; (3) 车辆匀速行驶, 制冷机组在运输途中与装卸货期间持续运行; (4) 碳排放核算模型参考周鲜成等^[4], 将载重、速度与制冷能耗因素都纳入模型, 并划分行驶排放与制冷排放两类, 同时引入碳交易机制: 超出免费配额的碳排放按市场碳价购买, 有盈余则售出获益; (5) 货损成本借鉴初良勇等^[5]提出的指数衰减函数进行描述。

1.4 数学模型构建

本文以经济成本、碳排放成本与生鲜品质损失成本之和最小为优化目标, 构建两阶段随机混合整数规划模型, 目标函数为

$$\min Z = Z_L + Z_T + Z_I + E_s [Z_P + Z_C + Z_Q + Z_S] \quad (1)$$

$$Z_L = \sum_{i \in I} F_i y_i \quad (2)$$

$$Z_I = \sum_{i \in I} \left(\frac{K_{oi} \mu_i}{Q_i} + h \left(\frac{Q_i}{2} + SS_i \right) + b \sigma_i \sqrt{LG}(z_\alpha) \right) \quad (3)$$

$$Z_T = \sum_{k \in K} \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} (f_k + c_k d_{ij}) z_{ij}^k \quad (4)$$

$$Z_P = \sum_{j \in J} \sum_{s \in S} \pi_s c_t \left[\max(0, t_j^s - l_j) + \kappa \max(0, e_j - t_j^s) \right] \quad (5)$$

$$Z_C = c_{CO_2} \left\{ \sum_{k \in K} \sum_{s \in S} \pi_s \left[\eta_{1k} \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} d_{ij} z_{ij}^k + \eta_{2k} T_k^s \right] - e_0 \sum_{j \in J} \sum_{s \in S} \pi_s q_j^s \right\} \quad (6)$$

$$Z_Q = \sum_{j \in J} \sum_{s \in S} \pi_s p_j u_j^s (1 - e^{-\varepsilon t_j^s}) \quad (7)$$

$$Z_S = \sum_{j \in J} \sum_{s \in S} \pi_s b (q_j^s - u_j^s) \quad (8)$$

约束条件为

$$\sum_{i \in I} y_i \geq 1; \sum_{i \in I} x_{ij} = 1, \sum_{k \in K} a_{jk} = 1, \forall j \quad (9)$$

$$\sum_{j \in J} q_j x_{ij} \leq \text{Cap}_i y_i; a_{jk} \leq \sum_{i \in V} z_{ij}^k, \forall i, j, k \quad (10)$$

$$\sum_{i \in V} z_{ij}^k = \sum_{i \in V} z_{ij}^k; \sum_{j \in J} \pi_s q_j^s a_{jk} \leq Q_k, \forall j, k, s \quad (11)$$

$$0 \leq u_j^s \leq q_j^s, \forall j, s; y_i, x_{ij}, z_{ij}^k, a_{jk} \in \{0, 1\} \quad (12)$$

式中 $E[\cdot]$ 为场景期望算子, 第一阶段在需求实现前确定配送中心选址、车队结构与配送路径; 第二阶段在需求场景实现后确定各需求点的动态配送量。式(2)~式(8)依次表示设施选址成本、库存成本、运输成本、时间窗惩罚成本、碳排放成本、生鲜品质损失成本与缺货惩罚成本。式(9)分别表示至少选中一个配送中心, 以及每一个需求点都需要被某一辆冷藏车和某一个配送中心提供服务。式(10)分别表示配送中心容量约束及车辆需经过需求点。式(11)分别表示路线连续性和车辆载重约束。式(12)表示决策变量的取值约束。

2 数据驱动的需求场景生成

需求点 j 在第 t 历史日的需求观测值 $q_{jt}(q_{jt} \geq 0)$ 为:

$$q_{jt} = q_j^0 (1 + \varphi_t) (1 + \xi_{jt}), \varphi_t \sim N(0, \sigma_1^2), \xi_{jt} \sim N(0, \sigma_2^2)$$

(13)

采用 K-means 聚类将 T 个历史日缩减为 $|S|$ 个典型场景, 即:

$$\min \sum_{s \in S} \sum_{t \in C_s} \left\| q_t - \bar{q}_s \right\|^2, \pi_s = \frac{|C_s|}{T} \quad (14)$$

其中式(13)中 q_j^0 为需求点 j 的基准需求; φ_t 为第 t 日的日共同因子; ξ_{jt} 为需求点 j 在第 t 日的个体随机扰动, 且 $\varphi_t \sim N(0, \sigma_1^2)$ 、 $\xi_{jt} \sim N(0, \sigma_2^2)$ 。式(14)中 C_s 为第 s 个簇的样本集合; q_t 为第 t 历史日的全网需求向量; $\bar{q}_s$ 为第 s 个簇的簇心。

3 求解算法与算例分析

3.1 求解算法

考虑该模型的 NP-hard 特征, 本文利用 K-means 和模拟退火算法进行求解。第一步, 以需求点坐标为样本、期望需求为权重开展加权 K-means 聚类, 再将每个簇指派给距离最近的备选配送中心, 在簇内按最近邻规则排序得到初始解; 第二步, 采用多算子模拟退火迭代寻优, 邻域算子由需求点再指派、簇内交换、路径内 2-opt 与选址扰动构成, 算法根据 Metropolis 准则接受劣解, 采用几何方式降温, 当解连续若干次迭代未出现优化时终止。

3.2 算例背景与参数设置

为了验证上文开发的算法的有效性, 设计包含 6 个备选配送中心与 25 个需求点的测试算例。所有节点的空间坐标均在 $[0, 100] \times [0, 100]$ km 的平面内随机设定; F_i 分别依次取值为 1150、980、920、1300、1020、990 (单位: 元), Cap_i 分别依次取值为 380、340、320、400、350、330 (单位: 件), 燃油冷藏车: $Q_k=150$ 、 $f_k=50$ 、 $c_k=1.90$ 元/km, 电动冷藏车: $Q_k=100$ 、 $f_k=72$ 、 $c_k=1.25$ 元/km, $v=30$ km/h, 卸货服务效率取 22 件/h, $c_t=30$ 元/h, $\kappa=0.4$, $K_{oi}=200$ 元/次, $h=1.2$ 元/(件·d), $b=22$ 元/件, $\varepsilon=0.02$, $L=1$, $z_\alpha=1.645$, $c_{CO_2}=0.08$ 元/kg, $e_0=0.055$ kg/件, $\eta_1=0.25$ kg/h, $\eta_2=1.20$ kg/h, $p_j \sim U(30, 55)$, e_j 随机生成于 $[0.5, 3.0]$ h, $l_j=e_j+\Delta t$, 其中 $\Delta t \sim U(3, 5)$ 。需求场景的参数设置如下: $T=150$, $q_j^0 \sim U(16, 40)$, $\varphi_t \sim N(0, 0.16^2)$ 、 $\xi_{jt} \sim N(0, 0.10^2)$ 。算法的参数设置如下: 产生需求场景的 K-means 算法中 $k=3$ 。选址环节的加权 K-means 算法中 $k=3$; 初始温度 $T_0=500$ 、终止温度 $T_{\text{end}}=0.5$, 降温系数 $\alpha=(T_{\text{end}}/T_0)^{(1/N)} \approx 0.9947$, 迭代次数 $N=1300$ 。

3.3 最优方案

算法初始解的目标值为 9652.80 元, 经过模拟退火优化后降到 7454.45 元, 降幅为 22.8%, 算法收敛过程见图 1。最终最优方案开放 3 个

配送中心,产生10条配送路径,投入电动冷藏车8辆、燃油冷藏车2辆。

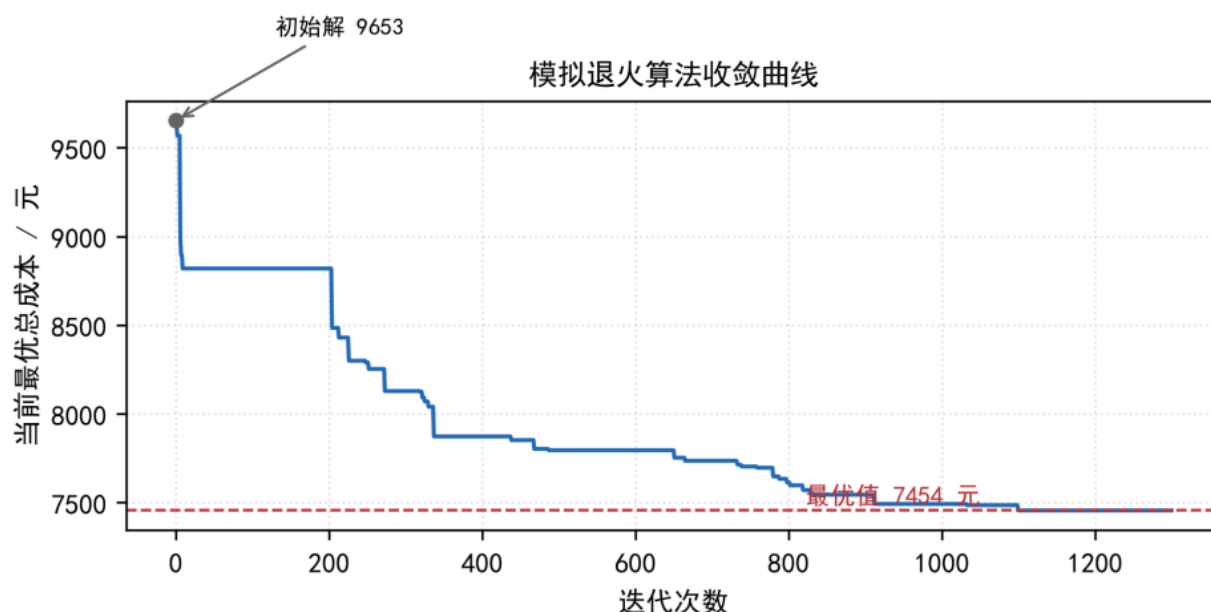


图1 模拟退火算法收敛曲线

4 结论

本文在碳交易机制下,将电动与燃油冷藏车的载重-续航差异纳入选址-库存-路径两阶段随机规划框架,结合数据驱动的需求场景生成与加权K-means定址和多算子模拟退火混

合算法,研究了城市生鲜冷链配送网络的协同优化与动态调度问题。研究表明,将碳交易机制与车型异构特征纳入统一的LIRP框架,可为物流企业的低碳网络规划提供可行的量化依据。

参考文献:

- [1] 刘万正,赵蒙,李士宁.生鲜农产品多型预冷设施选址-路径两阶段随机优化[J/OL].系统管理学报,2026.
- [2] 马艳芳,应斌,周晓阳,等.基于冲突合作关系的生鲜选址-路径多主体优化模型与算法[J].系统工程理论与实践,2020,40(12):3194-3209.
- [3] 吴瑶,周愉峰,李峰.订单可拆分的低碳冷链配送选址与多车舱路径优化[J].计算机工程与应用,2025,61(8):339-350.
- [4] 周鲜成,蒋涛营,贺彩虹,等.冷链物流配送的绿色车辆路径模型及其求解算法[J].中国管理科学,2023,31(12):203-214.
- [5] 初良勇,林明秀.低碳经济背景下考虑需求不确定性的食品冷链物流库存-路径联合优化[J].上海海事大学学报,2025,46(3):85-94.
- [6] 童瑶莹,郑治华,朱恒言,等.基于时变路网的低碳冷链物流配送路径优化研究[J].物流科技,2026,49(8):167-173.
- [7] 宾厚,徐晶晶,王素杰,等.生鲜冷链物流配送多车型动态车辆路径优化[J].管理现代化,2025(1):182-191.
- [8] 李二超,张智钊.改进遗传算法搜索动态订单下车辆路径最优问题[J].计算机工程与应用,2024,60(10):353-364.

作者简介:唐琼(1985—),女,汉族,湖南祁东人,副教授,博士,研究方向:物流与供应链管理。

项目信息:湖南省自然科学基金项目(2024JJ7067);湖南省教育厅科学研究重点项目(25A0481)。