

控制与决策

Control and Decision

动态需求下的基于医药前置仓的选址-路径问题

杨雨蕾, 张锦, 孙文杰, 蒲云

引用本文:

杨雨蕾,张锦,孙文杰,蒲云. 动态需求下的基于医药前置仓的选址-路径问题[J]. *控制与决策*, 2023, 38(6): 1670-1678.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.1639>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[基于配送收益均衡的多目标绿色车辆路径优化算法](#)

A multi-objective green vehicle routing optimization algorithm based on delivery benefit balance

控制与决策. 2023, 38(2): 365-371 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.0669>

[两阶段混合优化算法求解模糊需求下多时间窗车辆路径问题](#)

Two stage hybrid optimization algorithm for vehicle routing problem with multiple time windows under fuzzy demand

控制与决策. 2022, 37(6): 1573-1582 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.0022>

[基于D-NSGA-GKM算法的多阶段武器协同火力分配方法](#)

Optimization method for multi-stage collaborative weapon firepower distribution based on D-NSGA-GKM algorithm

控制与决策. 2022, 37(3): 605-615 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.1236>

[火箭壳体加工的虚拟单元重构方法](#)

Virtual cellular reconstruction method of rocket shell processing

控制与决策. 2022, 37(11): 2818-2826 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.0440>

[基于时空聚类求解带容积约束的选址-路径问题](#)

Time-space cluster based location-routing problem with capacitate constraints

控制与决策. 2021, 36(10): 2504-2510 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0073>

动态需求下的基于医药前置仓的选址-路径问题

杨雨蕾^{1,2}, 张锦^{1†}, 孙文杰¹, 蒲云¹

(1. 西南交通大学 交通运输与物流学院, 成都 610031; 2. 四川城市职业学院 经济管理学院, 成都 610060)

摘要: 随着新冠疫情的发展, 公众逐渐建立起通过互联网购买医药物品的习惯, 发展高效绿色的医药配送模式迫在眉睫. 通过建立考虑动态需求的选址-路径两阶段数学规划模型, 解决医药前置仓的选址规划和配送路径设计问题. 采用第三代非支配排序遗传算法(NSGA-III)对初始优化阶段和动态优化阶段分别求解, 并用模糊聚类法筛选出最优方案作为动态优化阶段的初始状态. 再与NSGA-II算法进行求解时间、Spacing、HRS和PR等指标的对比分析, 结果表明NSGA-III的运行时间更快, 解集分布更均匀, 收敛效果更好. 最后分别计算运输车辆种类和药房合作前置仓的固定成本总预算变化对成本、时间和碳排放3个目标函数的影响, 测试模型和算法的敏感性, 说明第三方药品配送企业更适合使用中小型车辆完成配送任务, 并设置相对充裕的选址预算.

关键词: 医药前置仓; 动态需求; 选址-路径; NSGA-III

中图分类号: F253.4 文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyj.2021.1639

引用格式: 杨雨蕾, 张锦, 孙文杰, 等. 动态需求下的基于医药前置仓的选址-路径问题[J]. 控制与决策, 2023, 38(6): 1670-1678.

Location-routing problem of pharmaceutical pre-warehouse based on dynamic demand

YANG Yu-lei^{1,2}, ZHANG Jin^{1†}, SUN Wen-jie¹, PU Yun¹

(1. School of Transportation and Logistics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. School of Economics and Management, Urban Vocational College of Sichuan, Chengdu 610060, China)

Abstract: As the COVID-19 pandemic evolves, the public has gradually established the habit of buying medical supplies through the Internet. It is urgent to develop an efficient and green medicine distribution mode. A location-routing two-stage mathematical programming model considering dynamic demand is established to solve the problem of location planning and distribution route designing of pharmaceutical pre-warehouse. The NSGA-III algorithm is used to solve the initial optimization stage and dynamic optimization stage respectively. The optimal scheme is selected using the fuzzy clustering method as the initial state of the dynamic optimization stage. Comparing with the NSGA-II algorithm for time, Spacing, HRS and PR, the NSGA-III runs faster, and gets more uniform solution set distribution and better convergence effect. Finally, the influence of the total budget change of fixed cost on the three objective functions of cost, time and carbon emission are calculated to test the sensitivity of the model and algorithm. It indicates that the third-party drug delivery enterprises are more suitable to use small or medium-sized vehicles to complete the delivery task and set relatively abundant location budget.

Keywords: pharmaceutical pre-warehouse; dynamic demand; location-routing; NSGA-III

0 引言

2020年暴发的新冠肺炎疫情培养了公众线上问诊和购药的习惯, 互联网医疗在线问诊量猛增, 医药电商业务也快速增长. 2020年医药电商直报企业销售总额达1778亿元, 占同期全国医药市场总规模的7.4%. 为了提高药品的配送效率和客户满意度, 电商企业纷纷与线下实体药店开展合作, 设立医药

前置仓, 满足客户的动态需求, 加速线上线下融合发展. 同年, 我国医药冷链市场销售额达3903.4亿元, 医药冷链企业自有冷藏车数量达到10671辆, 同比增长31%^[1]. 同时, 高GWP值的非环保制冷剂仍然在冷链装备中大量使用, 也带来了巨大的潜在碳排放. 碳中和和碳达峰目标对我国冷链物流的发展提出了新的要求, 发展合理可行的节能减排技术途径势在必

收稿日期: 2021-09-21; 录用日期: 2022-03-15.

责任编辑: 李勇建.

†通讯作者. E-mail: zhjswjtu@swjtu.edu.cn.

行. 由此催生了同时考虑动态需求和碳排放约束的医药物流选址-路径问题研究.

公路碳排放的研究主要基于载重量^[2-4]和速度^[5-6]. 张金良等^[7]利用负载估计法计算车辆燃油消耗, 结合单位碳排放系数和碳排价格得出碳排放量; 蒋海青等^[8]构建模型时结合实时载重量和需求量计算碳排放量, 并设计仿真实验说明碳排放量与需求正相关; Li等^[9]考虑了非接触配送中碳排放的优化问题, 针对载重能力和出行距离两个关键因素, 提出了配送成本和碳排放最小化的双重目标; Cacchiani等^[10]针对能量最小化旅行商问题, 提出根据车辆荷载和行驶距离建立目标函数; 李进等^[11]引入基于速度的碳排放计算方法, 将速度作为决策变量, 建立了混合整数规划模型; Liu等^[12]通过分析易腐产品的经济成本、碳排放水平和新鲜度, 建立了易腐产品的选址-库存-路径集成模型, 并针对车速作了敏感性分析.

动态需求下的选址-路径问题研究方法主要包括两种: 一是将动态变化过程划分为多个阶段^[13-14]; 二是刻画动态需求, 用智能算法求解^[15-16]. Pillac等^[17]构建了针对多场景的事件驱动框架, 将对象抽离为相互独立的单元, 并用自适应变量邻域搜索法执行场景优化问题; 文献[18]将需求点的动态变化划分为初始静态阶段和动态优化阶段, 采用基于变邻域搜索的元启发式算法实现新请求到达之后的重新优化; Abdallah等^[19]提出利用时间切片评估周期性的再优化动态需求系统, 并用加权适应度评估法作为有偏差的基于时间的方法的替代方案; Liu^[20]提出的时间离散和空间连续的混合整数规划模型, 考虑了几何形状和机动性, 因此允许在任意取货地点动态输入订单信息; Liu等^[21]针对车辆行驶时间和能耗成本构建了车辆动力学模型, 以解决车辆路径与控制的综合优化问题; Ning等^[22]研究了以乘客为中心的一英里范围内的运输车辆路径问题, 并提出基于动态请求驱动的车辆路径构建算法.

现有研究中的碳排放问题一般是基于配送过程中的车辆碳排放量进行计算, 鲜有同时考虑选址和路径问题的碳排放计算. 同时, 对于动态需求的处理, 现有研究并未兼顾计算的效率和需求刻画的准确度, 这对进一步的研究提出了新的方向.

综上所述, 构建动态需求下的基于医药前置仓的选址-路径模型, 主要创新性为: 1) 针对选址-路径问题, 同时考虑备选仓的容量和车辆的载重量及速度进行碳排放计算; 2) 针对顾客的随机动态需求, 建立考虑成本、时间和碳排的两阶段数学规划模型, 并用

NSGA-III算法求解; 3) 针对初始优化阶段产生的多个最优解问题, 提出用模糊聚类法筛选出最优方案, 作为下一阶段的初始状态.

1 问题描述

医药前置仓一般和社区医院或商业药店合作共建, 通过选择合作前置仓, 满足客户医药物品的需求, 为第三方药品配送企业提供复杂情况下的选址配送决策支撑. 由于实时的随机动态需求需要在约定的服务时间窗内完成响应, 如果将问题划分为多个时间段, 处理为静态化问题, 再根据实时的需求变化, 不断更新需求点位置和需求及车辆剩余载重, 重新优化配送路径, 则导致极大的计算量和计算时间, 不能及时做出响应. 因此本文提出两阶段模型, 第一阶段为初始优化阶段, 结合备选仓位置、已知需求点位置及需求量进行预优化建模, 选择合作的医药前置仓, 设计初始配送路径. 设计第一阶段运行一段时间后, 进入第二阶段. 第二阶段为动态优化阶段, 结合已经选定的医药前置仓, 对实时新增的需求点进行优化计算, 调整配送路径. 目标函数包括医药前置仓的选址、运营成本及运输成本等系统总成本, 运输及服务时间和总碳排放量.

2 模型建立

2.1 模型假设

为了方便建模, 对问题做出如下假设: 1) 配送车辆保持匀速行驶; 2) 客户位置和需求已知, 每个客户只能由一辆车完成配送服务; 3) 不考虑装卸搬运产生的碳排, 即只考虑运输过程中产生的碳排放量; 4) 车辆在配送过程中载有的货物总量不得超过车辆荷载; 5) 前置仓容量有限.

2.2 符号说明

1) 集合.

N_1 : 初始顾客集合, $\forall i, j \in N_1$;

N_2 : 新增顾客集合, $\forall g, h \in N_2$;

K : 备选药房集合, $\forall k \in K$;

M : 车辆集合, $\forall m \in M$.

2) 参数.

F_k : 与 k 药房合作作为前置仓的固定成本;

F_b : 合作医药前置仓的固定成本总预算;

F_m : 车辆使用的固定成本;

c_k : k 药房提供的药品平均单价;

c : 单位运费;

$\{P, \alpha, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon, \zeta\}$: 车辆碳排的影响因子;

Q_1 : 药房服务能力;

Q_2 : 冷链配送车辆荷载能力;
 v : 配送车辆平均运行速度;
 β_1 : 配送车辆早到的单位惩罚费用;
 β_2 : 配送车辆迟到的单位惩罚费用;
 d_{ij} : 从 i 到 j 的距离;
 d_{gh} : 从 g 到 h 的距离;
 q_i : 初始顾客 i 的需求量;
 q_j : 新增顾客 g 的需求量;
 t_i^a : 订单最早送达初始顾客 i 的时间;
 t_g^a : 订单最早送达新增顾客 g 的时间;
 t_i^b : 订单最晚送达初始顾客 i 的时间;
 t_g^b : 订单最晚送达新增顾客 g 的时间.
 3) 变量.
 f_{ij} : 从 i 运往 j 的运量;
 f_{gh} : 从 g 运往 h 的运量;
 t_i : 配送车辆到达初始顾客 i 的时间;
 t_i^s : 在新增顾客 i 处的服务时间;
 t_g : 配送车辆到达新增顾客 g 的时间;
 t_g^s : 在新增顾客 g 处的服务时间;
 X^k : 0-1 决策, 药房 k 是否被选中作为医药前置仓;
 Y_i^k : 0-1 决策, 初始顾客 i 的药品是否由药房 k 提供;
 Y_g^k : 0-1 决策, 新增顾客 g 的药品是否由药房 k 提供;
 Z_{ij}^m : 0-1 决策, i 到 j 的运输任务由车辆 m 完成;
 Z_{gh}^m : 0-1 决策, g 到 h 的运输任务由车辆 m 完成.

2.3 模型构建

1) 初始优化阶段.

$$\begin{aligned} \min C = & \sum_{k \in K} \frac{F_k X_k}{60} + \sum_{i \in N_1} \sum_{k \in K} c_k X_k Y_i^k + \\ & \sum_{m \in M} \sum_{i \in N_1} \sum_{j \in N_1} c_{ij} f_{ij} Z_{ij}^m + \\ & \sum_{m \in M} \sum_{i \in N_1} \sum_{j \in N_1} F_m Z_{ij}^m + \\ & \beta_1 \sum_{i \in N_1} \max[(t_i^a - t_i), 0] + \\ & \beta_2 \sum_{i \in N_1} \max[(t_i - t_i^b), 0], \end{aligned} \quad (1)$$

$$\min T = \sum_{m \in M} \sum_{i \in N_1} \sum_{j \in N_1} \left(t_i^s + \frac{d_{ij}}{v} \right) Z_{ij}^m, \quad (2)$$

$\min CE =$

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in N_1} \sum_{j \in N_1} [P + \alpha v + \beta(v)^2 +$$

$$\gamma(v)^3 + \delta/v + \varepsilon/(v)^2 + \zeta/(v)^3] \frac{d_{ij} f_{ij}}{1000} Z_{ij}^m. \quad (3)$$

$$\text{s.t. } \sum_{i \in N_1} Y_i^k F_k \leq F_b, \quad (4)$$

$$Z_{ii}^m = 0, \quad (5)$$

$$\sum_{j \in N_1} \sum_{k \in K} \sum_{m \in M} (Z_{ij}^m + Z_{ik}^m) = 1, \quad (6)$$

$$\sum_{i \in N_1} \sum_{k \in K} \sum_{m \in M} (Z_{ij}^m + Z_{ik}^m) = 1, \quad (7)$$

$$\sum_{i \in N_1} \sum_{m \in M} Z_{ij}^m = \sum_{j \in N_1} \sum_{m \in M} Z_{ji}^m, \quad (8)$$

$$\sum_{i \in N_1} \sum_{m \in M} Z_{ik}^m = \sum_{k \in K} \sum_{m \in M} Z_{ki}^m, \quad (9)$$

$$\sum_{i \in N_1} \sum_{k \in K} q_i Y_i^k \leq Q_1, \quad (10)$$

$$\sum_{i \in N_1} \sum_{m \in M} q_i Z_{ij}^m \leq Q_2, \quad (11)$$

$$t_i^a \leq t_i^s \leq t_i^b, \quad (12)$$

$$t_j = \sum_{i \in N_1} \sum_{k \in K} \left[Z_{ij}^m \left(t_i + t_i^s + \frac{d_{ij}}{v} \right) + Z_{ik}^m \left(t_i + t_i^s + \frac{d_{ik}}{v} \right) \right], \quad (13)$$

$$Z_{ij}^m (t_i - t_j) \leq 0. \quad (14)$$

目标函数(1)表示医药前置仓合作的固定费用、订单分成的变动成本、总配送费用、车辆使用成本和违反时间窗的惩罚成本最小化; 目标函数(2)表示配送和服务时间最小化; 目标函数(3)表示配送车辆行驶过程中的碳排放量最小化; 约束条件(4)表示所有被选中药房合作产生的固定成本之和不能超过固定成本预算; 约束条件(5)表示一辆车在一次配送路径中, 从某一客户的位置出发后, 不能再返回到该顾客的位置; 约束条件(6)表示车辆在服务顾客 i 之后, 要从该点离开, 且只能去往一个位置; 约束条件(7)表示车辆在服务顾客 i 之前, 是从另外一个顾客或者药房出发的; 约束条件(8)和(9)表示配送网络图中间节点进入弧与出去弧相同; 约束条件(10)表示药房的服务能力; 约束条件(11)表示车辆的荷载能力; 约束条件(12)表示对客户的配送要发生在时间窗之内; 约束条件(13)表示车辆到达顾客 j 的时间, 取决于该车到达上一个顾客 i 的时间、在顾客 i 处的服务时间和顾客 i 与顾客 j 或前置仓 k 之间的行驶时间; 约束条件(14)表示按顺序进行配送, 先配送顾客 i , 再配送顾客 j .

2) 动态优化阶段.

$\min C =$

$$\sum_{i \in N_1} \sum_{g \in N_2} \sum_{k \in K} c_k X_k (Y_i^k + Y_g^k) +$$

$$\begin{aligned} & \sum_{m \in M} \sum_{i, j \in N_1} \sum_{g, h \in N_2} (c_{ij} f_{ij} Z_{ij}^m + c_{gh} f_{gh} Z_{gh}^m) + \\ & \sum_{m \in M} \sum_{i, j \in N_1} \sum_{g, h \in N_2} (F_m Z_{ij}^m + F_m Z_{gh}^m) + \\ & \beta_1 \sum_{i \in N_1} \max[(t_i^a - t_i), 0] + \\ & \beta_2 \sum_{i \in N_1} \max[(t_i - t_i^b), 0] + \\ & \beta_1 \sum_{g \in N_2} \max[(t_g^a - t_g), 0] + \\ & \beta_2 \sum_{g \in N_2} \max[(t_g - t_g^b), 0], \end{aligned} \tag{15}$$

$$\begin{aligned} \min T = & \sum_{m \in M} \sum_{i, j \in N_1} \sum_{g, h \in N_2} \left[\left(t_i^s + \frac{d_{ij}}{v} \right) Z_{ij}^m + \right. \\ & \left. \left(t_g^s + \frac{d_{gh}}{v} \right) Z_{gh}^m \right], \end{aligned} \tag{16}$$

$$\begin{aligned} \min CE = & \sum_{k \in K} \sum_{i, j \in N_1} \sum_{g, h \in N_2} [P + \alpha v_{ij} + \beta (v_{ij})^2 + \\ & \gamma (v_{ij})^3 + \delta / v_{ij} + \varepsilon / (v_{ij})^2 + \zeta / (v_{ij})^3] \frac{d_{ij} f_{ij}}{1000} + \\ & [P + \alpha v_{gh} + \beta (v_{gh})^2 + \gamma (v_{gh})^3 + \delta / v_{gh} + \\ & \varepsilon / (v_{gh})^2 + \zeta / (v_{gh})^3] \frac{d_{gh} f_{gh}}{1000}. \end{aligned} \tag{17}$$

$$\text{s.t. } Z_{gh}^m = 0, \tag{18}$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{h \in N_2} \sum_{j \in N_1} (Z_{gj}^m + Z_{gh}^m + Z_{gk}^m) = 1, \tag{19}$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{g \in N_2} \sum_{j \in M} (Z_{gj}^m + Z_{gh}^m + Z_{gk}^m) = 1, \tag{20}$$

$$\sum_{g \in N_2} \sum_{m \in M} Z_{gh}^m = \sum_{h \in N_2} \sum_{m \in M} Z_{hg}^m, \tag{21}$$

$$\sum_{g \in N_2} \sum_{m \in M} Z_{gk}^m = \sum_{k \in K} \sum_{m \in M} Z_{kg}^m, \tag{22}$$

$$\sum_{g \in N_2} \sum_{k \in K} q_g Y_g^k \leq Q_1, \tag{23}$$

$$\sum_{g \in N_2} \sum_{m \in M} q_g Z_{gh}^m \leq Q_2, \tag{24}$$

$$t_g^a \leq t_g^s \leq t_g^b, \tag{25}$$

$$\begin{aligned} t_h = & \sum_{i \in N_1} \sum_{k \in K} \left[Z_{ij}^m \left(t_g + t_g^s + \frac{d_{gh}}{v} \right) + \right. \\ & \left. Z_{jh}^m \left(t_j + t_j^s + \frac{d_{jh}}{v} \right) + Z_{kh}^m \left(t_k + t_k^s + \frac{d_{kh}}{v} \right) \right], \end{aligned} \tag{26}$$

$$Z_{gh}^m (t_g - t_h) \leq 0. \tag{27}$$

目标函数(15)表示订单分成的变动成本、配送成本、车辆使用成本和违反时间窗的惩罚成本最小

化;目标函数(16)表示服务和配送时间最小化;目标函数(17)表示配送车辆行驶过程中释放的碳排放量最小化. 约束条件除了参考初始优化阶段中的约束条件(5)~(14),还受以下条件约束. 约束条件(18)表示一辆车在一次配送路径中,从某一新客户的位置出发后,不能再返回到该顾客的位置;约束条件(19)表示车辆在服务新客户*g*之后,只能去往下一个位置老顾客*j*、新客户*h*或医药前置仓*k*;约束条件(20)表示车辆在服务新客户*g*之前,是从另外一个老顾客*j*、新客户*h*或医药前置仓*k*出发的;约束条件(21)和(22)表示配送网络图中间节点的进入弧与出去弧相同;约束条件(23)表示医药前置仓的服务能力;约束条件(24)表示车辆的核载能力;约束条件(25)表示要在时间窗之内完成对新客户的配送;约束条件(26)表示车辆到达新客户*h*的时间取决于该车到达上一个顾客的时间、服务时间和行驶时间;约束条件(27)表示按顺序完成配送任务,先配送新客户*g*,再配送新客户*h*.

3 算法设计

3.1 问题求解策略

初始优化阶段,完成选址-路径优化. 结合备选医药前置仓位置、顾客位置及需求、车辆信息完成前置仓选址和配送路径规划,并用NSGA-III算法求解出最优解集. 用模糊聚类法筛选出最优解作为下一阶段的初始状态. 动态优化阶段,完成动态路径调整. 设计当需求点的配送任务完成至一定数量时,结合目前各车辆的剩余载重量、车辆位置和未配送顾客信息,加入新需求点的位置和需求量,调整配送路径,并用NSGA-III算法求解.

3.2 第三代非支配排序遗传算法

第三代非支配排序遗传算法(non-dominated sorting genetic algorithm III, NSGA-III)是由Deb等^[23]在NSGA-II算法基础上提出的一种改进算法. NSGA-III属于基于分解的多目标进化算法,NSGA-II属于基于支配关系的多目标进化算法. 两种算法的计算框架基本相同,都是利用快速非支配排序将种群个体分类进入不同的非支配前沿,区别在于选择机制. NSGA-II利用拥挤距离选择相同非优势等级的个体,即拥挤距离越大越好,而NSGA-III利用分布良好的参考点维持种群的多样性. NSGA-III采用基于参考点的方法解决多目标优化问题中算法的收敛性和多样性问题. 关键步骤包括参考点生成、种群个体的自适应归一化、关联个体和参考点、小生境保持操作、遗传算子处理等.

3.3 基于模糊聚类的筛选

通过NSGA-III算法求解得到的帕累托最优解集,可为前置仓的选址和路径规划提供多种决策方案.但由于高维度的优化目标函数,帕累托最优解集所含信息量更大、复杂度更高,不利于决策人员迅速选择出实施方案.因此,采用模糊聚类筛选法针对初始优化阶段的最优解集筛选出合适的最优方案.首先用隶属度函数^[24]分别计算帕累托解集中的每个目标函数值的隶属度,再用熵权法^[25]计算各优化目标的权重系数,将模糊化处理后的单目标值按照权重系数聚类求和,最后根据归一化隶属度对目标值进行排序,选择最符合优化运行要求的解集,得到初始优化阶段的最优方案.

4 算例分析

4.1 参数设置

由于动态选址路径问题没有标准测试集,在[50, 50]的矩阵范围内随机生成50个初始需求点,10个新增需求点及10个备选仓.设置NSGA-III算法的种群规模为100,交叉率为0.85,变异率为0.15,最大迭

代次数为200.参数设置如表1所示.

表1 参数设置

符号	值	符号	值
P	49.25	$F_b / \text{元}$	6000
α	-0.55	$c / (\text{t} \cdot \text{km})$	0.5
β	0	$e / (\text{次} / \text{月})$	60
γ	3.66e-05	$p_1 / \text{元}$	6
δ	0	$p_2 / \text{元}$	6
ϵ	1 126.16	$v / (\text{km} / \text{h})$	30
ζ	0	Q_2 / t	0.5
t_s / min	5	$F_m / \text{元}$	500

4.2 计算结果

使用 Matlab R2016b 编写算法代码,在 Intel Celeron-N3450 (1.10 GHz)、操作系统为 Windows 10 的环境下运行算法.采用NSGA-III算法在静态优化阶段求得10个帕累托最优解,以第1、5和10个解为例,绘制选址-配送路线如图1所示,其中三角形为医药前置仓,圆形为需求点.

按照上文提出的模糊聚类筛选,确定第1个解为第二阶段的初始状态,再用NSGA-III进行动态优化阶段求解,以第1、5和10个解为例,绘制配送路径如图2所示,其中实线为初始路径,虚线为动态调整后的路径.

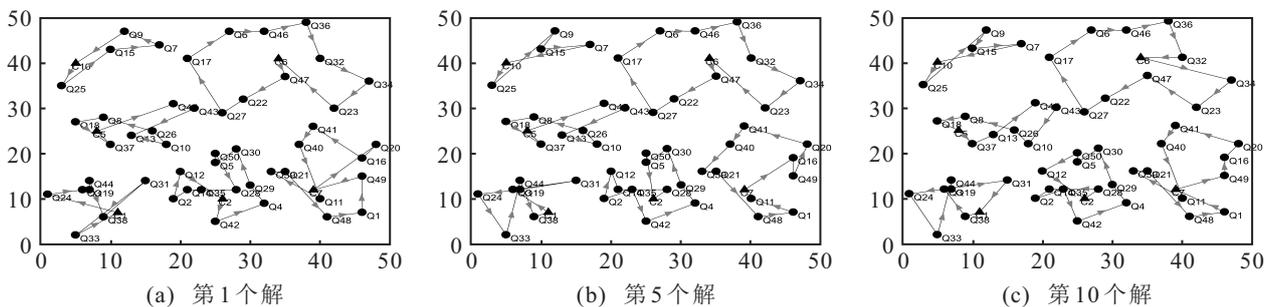


图1 初始优化阶段的选址-路径优化结果

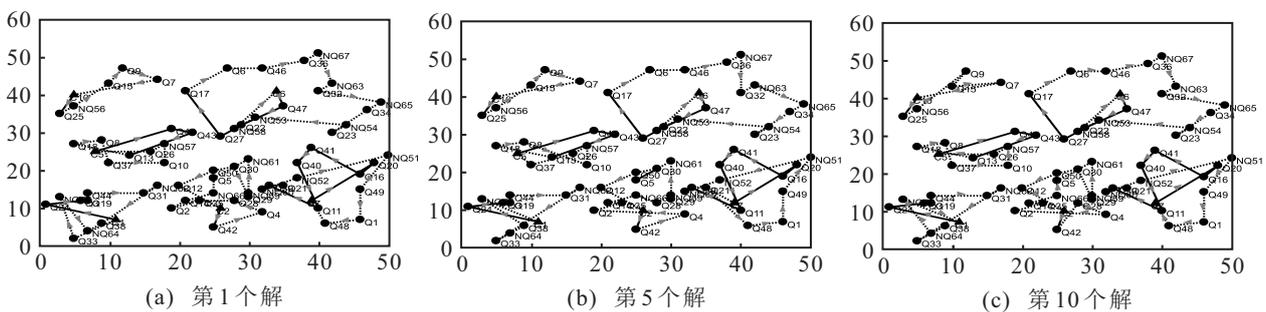


图2 动态优化阶段的配送路径优化结果

从计算结果可以看出,在初始优化阶段,从10个备选医药前置仓中选择了第1、2、5、6、7和10号作为合作的医药前置仓,并基于50个初始需求点规划配送路径.当配送任务进行到第19个需求点时,进入第二阶段,加入10个新增的需求点,调整配送路径.

4.3 算法性能分析

为了对比算法性能,用NSGA-II求解,用 Spacing、HRS 和 PR 指标衡量算法的性能. Spacing 指标表示解集分布的均匀性,它只与算法求得解集的分布有关,指标值越小,得到的解集分布越均匀,越有利于给决策者提供决策支持;HRS 指标表示解空间分布里最

大的“洞”的尺寸,也是说明均匀分布程度的指标;PR指标表示算法产生帕累托最优解的效率,值越高,表示算法效率越高.两种算法的性能比较如表2所示.

表2 NSGA-III与NSGA-II的算法性能比较

算法	时间段	运行时间	帕累托解数量	Spacing	HRS	PR
NSGA-III	初始	110.12	10	54.31	3.47	0.18
	动态	11.86	10	27.28	2.24	0.07
NSGA-II	初始	115.78	14	141.2	13.79	0.5
	动态	24.9	7	42.25	2.83	0.07

研究表明,NSGA-III和NSGA-II都能有效解决医药物流系统中的选址-路径问题,两种算法得出的帕累托解的数量相近.初始阶段中,NSGA-II产生帕累托最优解的效率更高,但是NSGA-III的运行时间更快,解集分布更均匀,收敛效果更好.进入动态优化阶段,两者产生最优解的效率一样,但NSGA-III运行时间进一步加快,解集分布更均匀,收敛效果也更好.

为进一步分析算法性能,更加清晰地描述解空间分布的多样性,基于两种算法的帕累托最优解数据绘制初始优化阶段的箱线图,如图3所示,动态优化阶段的箱线图如图4所示.

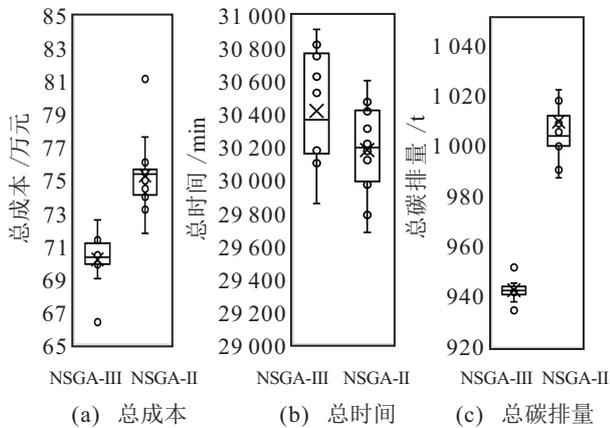


图3 初始优化阶段

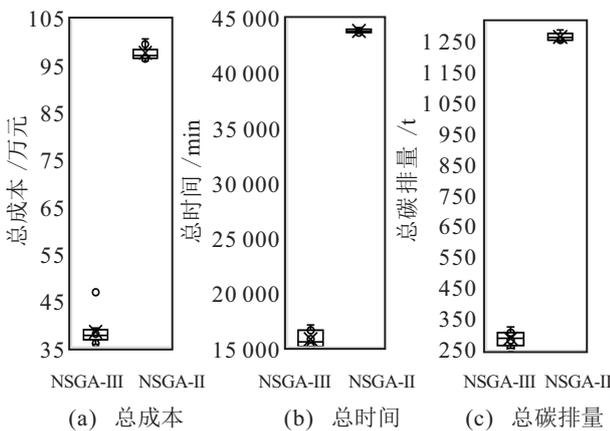


图4 动态优化阶段

通过箱线图分析可见,异常值较少,结合平均进化率和非劣解分布离散度收敛性较好的前提,验证了两种算法参数设置的合理性和生成的非劣解集的有效性.在初始优化阶段,NSGA-III解的中值与均值相似,说明各目标函数值相似,分布偏态性较小,而NSGA-II求解的总碳排放量呈现出正偏态性.进入动态优化阶段后,NSGA-III的箱体更大,说明数据越分散,解的多样性越好,不易陷入局部最优,可见用NSGA-III求解此类多目标问题更有效.

4.4 敏感性分析

为了测试模型和算法的敏感性,分别计算运输车辆种类和药房合作前置仓的固定成本总预算变化对3个目标函数的影响,以支撑第三方药品配送企业选址配送决策.

1) 运输车辆种类.

市区范围内的医药物品运输一般采用核载1t以内冷链运输车辆,目前常用的有3种:容积5.8立方大型面包式冷藏车,厢长2.7m中型箱式冷藏车,容积1.8立方的小型面包式冷藏车,具体参数如表3所示.

表3 参数设置

参数	大型车	中型车	小型车
Q_2	1	0.5	0.3
F_m	800	500	400
P	98.5	49.25	29.55
α	-1.1	-0.55	-0.33
β	0	0	0
γ	7.31e-05	3.66e-05	2.19e-05
δ	0	0	0
ϵ	2252.31	1126.16	675.69
ζ	0	0	0
v	25	30	35

针对3种车型,进行敏感性分析测试,成本、时间和碳排测试结果如图5~图7所示.

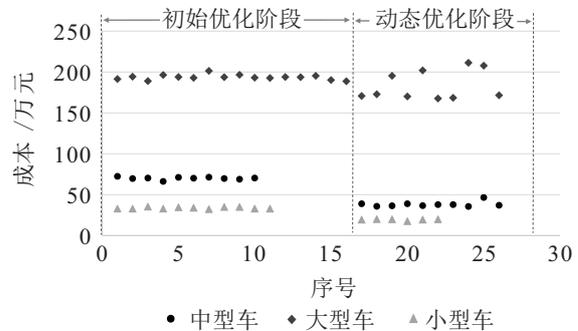


图5 不同车型对成本的影响

由图5可知,虽然大型车拥有更大的核载能力,但是受需求点时间窗限制,在选择合作前置仓时并未体现优势,同时由于大型车的使用成本更高,总成本也更高.小型车由于使用成本更低,总成本更低,略低

于中型车. 从节约成本的角度出发, 小型车或中型车更适合.

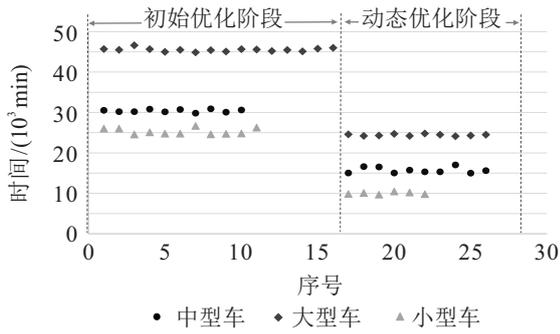


图6 不同车型对时间的影响

由图6可知, 大型车由于车速较慢, 总时间显著大于中型车, 小型车用时最短. 从及时满足用户需求的角度出发, 小型车更适合.

由图7可知, 大型车由于核载更大、车速较慢, 初始优化阶段的碳排稍大于中小型车. 进入到动态优化阶段, 大中型车辆碳排差距不明显, 均略高于小型

车. 从环保的角度考虑, 中小型车更适合.

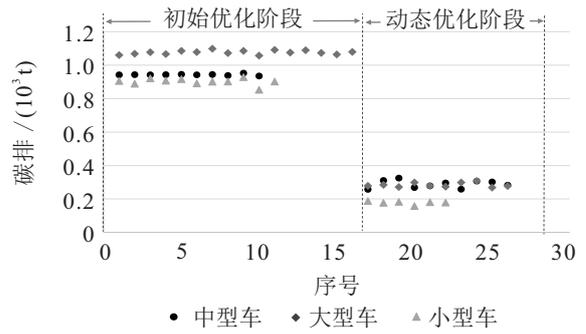


图7 不同车型对碳排的影响

综上所述, 中型或小型冷链运输车辆, 在节约成本、缩短时间和降低碳排方面具有较为明显的优势.

2) 药房合作前置仓的固定成本总预算.

为了对比医药前置仓选址的固定成本总预算对总成本、总时间和总碳排量的影响, 设计预算以10%为步长, 在[-50%, +50%]范围内变化, 绘制图8~图10.

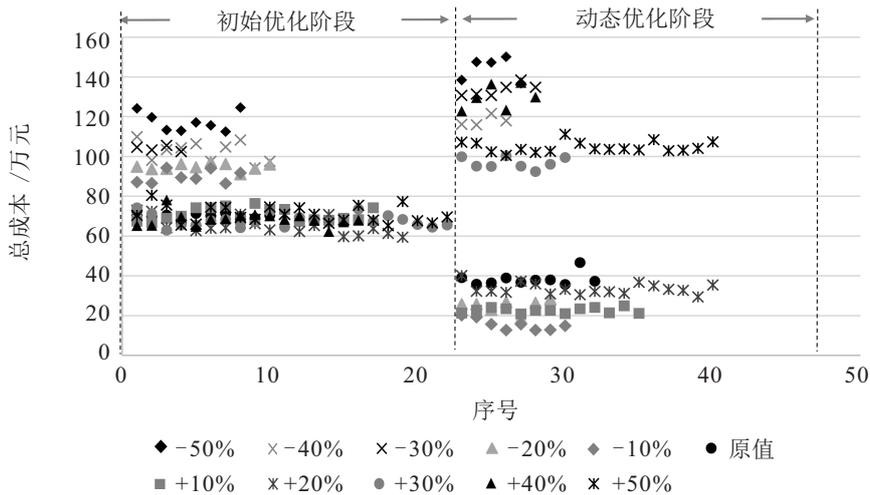


图8 选址预算对总成本的影响

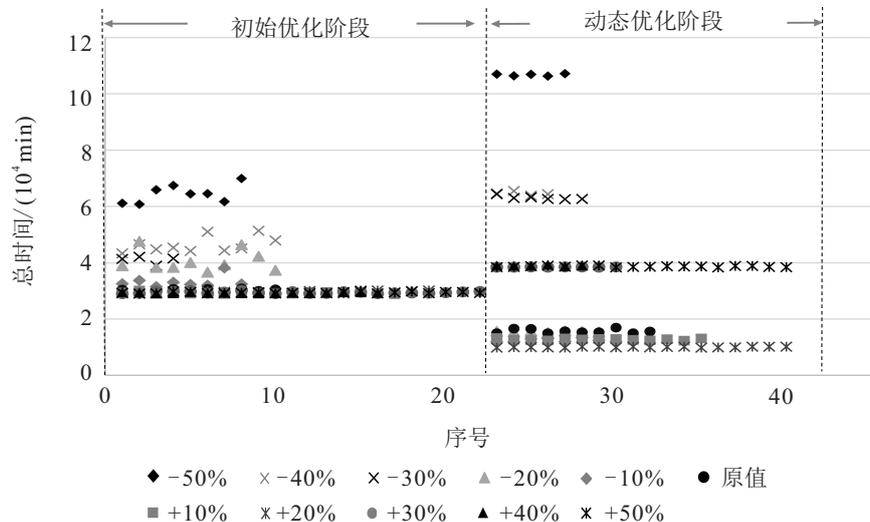


图9 选址预算对总时间的影响

由图8可知,初始优化阶段时,随着医药前置仓选址成本预算的增加,合作的前置仓增多,运输成本得到大幅度降低,总成本降低. 进入动态优化阶段后,总成本在选址预算降低10%、增加10%和增加20%时表现较优. 综合两个阶段的表现,当决策考虑总成本最优时,可设置选址预算增加10%或增加20%.

由图9可知,初始优化阶段时,随着医药前置仓选址成本预算的增加,合作的前置仓增多,每辆车的运输时间降低,因此总时间降低. 进入动态优化阶段后,总时间在选址预算增加10%和增加20%时表现较优. 因此,综合两个阶段的表现,当决策考虑总时间最优时,可设置选址预算增加10%或增加20%.

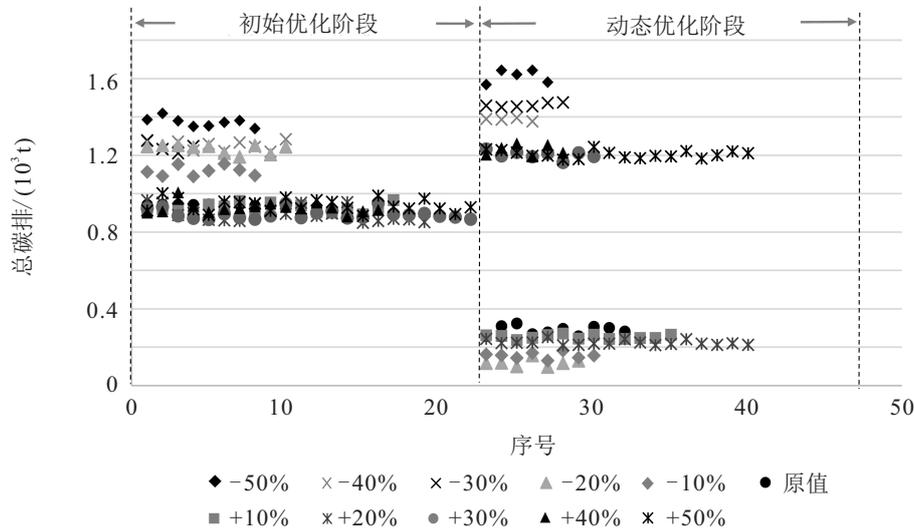


图10 选址预算对总碳排放量的影响

由图10可知,初始优化阶段时,随着医药前置仓选址成本预算的增加,合作的前置仓增多,每辆车需要配送的需求点减少,因此降低了碳排. 进入动态优化阶段后,总碳排量在选址预算降低20%、降低10%、增加10%和增加20%时表现较优. 因此,综合两个阶段的表现,当决策考虑总碳排量最优时,可设置选址预算增加10%或增加20%.

综上所述,为了降低总成本,缩短服务时间,同时降低碳排放量,可以考虑将医药前置仓选址预算增加10%或增加20%.

5 结论

本文针对医药前置仓的选址规划和配送路径设计问题,建立了考虑动态需求的选址-路径问题两阶段数学规划模型. 设计NSGA-III算法对初始优化阶段求解出最优解集,并用模糊聚类法筛选出最优方案作为动态优化阶段的初始状态,再用NSGA-III算法求解. 通过与NSGA-II算法进行求解时间、Spacing、HRS和PR等指标的对比分析可见,NSGA-III的运行时间更快,解集分布更均匀,收敛效果更好,并绘制箱线图进一步验证. 最后分别计算运输车辆种类和药房合作前置仓的固定成本总预算变化对3个目标函数的影响,测试模型和算法的敏感性,说明第三方药品配送企业更适合使用中小型车辆完成配送任务,并

设置相对充裕的选址预算. 由于本文中考虑的是车速恒定且已知的情况,未来将进一步刻画路网的动态变化特征,以更加符合配送路径中的实际情况.

参考文献(References)

- [1] 国家商务部. 2020年药品流通行业运行统计分析报告[EB/OL]. (2021-07-30)[2021-09-12]. <http://www.mof.com.gov.cn/aarticle/jiguanzx/202107/20210703182006.html>. (Ministry of Commerce. Statistical analysis report on operation of pharmaceutical circulation Industry in 2020[EB/OL]. (2021-7-30)[2021-09-12]. <http://www.mofcom.gov.cn/aarticle/jiguanzx/202107/20210703182006.html>.)
- [2] Yu V F, Jodiawan P, Gunawan A. An adaptive large neighborhood search for the green mixed fleet vehicle routing problem with realistic energy consumption and partial recharges[J]. *Applied Soft Computing*, 2021, 105(5): 107251.
- [3] Ganji M, Rabet R, Sajadi S M. A new coordinating model for green supply chain and batch delivery scheduling with satisfaction customers[J]. *Environment, Development and Sustainability*, 2022, 24(4): 4566-4601.
- [4] Wang W, Yu H, Gao Q, et al. Energy conversion path and optimization model in COVID-19 under low carbon constraints based on statistical learning theory[J]. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 2020, 39(6): 9053-9061.
- [5] Han Y Q, Li J Q, Liu Z M, et al. Metaheuristic

- algorithm for solving the multi-objective vehicle routing problem with time window and drones[J]. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2020, 17(2): 172988142092003.
- [6] Aktar M S, De M, Mazumder S K, et al. Multi-objective green 4-dimensional transportation problems for breakable incompatible items with different fixed charge payment policies[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2021, 156: 107184.
- [7] 张金良, 李超. 碳排放影响下的动态配送车辆路径优化研究[J]. *中国管理科学*, 2020: 1-13.
(Zhang J L, Li C. Research on dynamic distribution vehicle route optimization under the influence of carbon emission[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2020: 1-13.)
- [8] 蒋海青, 赵燕伟, 徐兆军, 等. 动态需求低碳开放式选址-路径问题[J]. *计算机集成制造系统*, 2020, 26(1): 202-212.
(Jiang H Q, Zhao Y W, Xu Z J, et al. Dynamic demand open location-routing problem considering carbon emissions[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2020, 26(1): 202-212.)
- [9] Li H L, Xiong K, Xie X M. Multiobjective contactless delivery on medical supplies under open-loop distribution[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2021, 2021: 1-7.
- [10] Cacchiani V, Contreras-Bolton C, Escobar-Falcón L M, et al. A matheuristic algorithm for the pollution and energy minimization traveling salesman problems[J]. *International Transactions in Operational Research*, 2021(2021): 1-33.
- [11] 李进, 张江华. 基于碳排放与速度优化的带时间窗车辆路径问题[J]. *系统工程理论与实践*, 2014, 34(12): 3063-3072.
(Li J, Zhang J H. Vehicle routing problem with time windows based on carbon emissions and speed optimization[J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2014, 34(12): 3063-3072.)
- [12] Liu A J, Zhu Q Y, Xu L, et al. Sustainable supply chain management for perishable products in emerging markets: An integrated location-inventory-routing model[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2021, 150: 102319.
- [13] Ng K K H, Lee C K M, Chan F T S, et al. A two-stage robust optimisation for terminal traffic flow problem[J]. *Applied Soft Computing*, 2020, 89: 106048.
- [14] Chakraborty S, Darbhe K, Sarmah S. Attended home delivery in Indian public distribution system: An iterated local search approach[J]. *Journal of Modelling in Management*, 2021, 16(4): 1116-1137.
- [15] Zhan S L, Liu S, Ignatius J, et al. Disaster relief logistics under demand-supply incongruence environment: A sequential approach[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2021, 89(1): 592-609.
- [16] Yao B, McLean C, Yang H. Robust optimization of dynamic route planning in same-day delivery networks with one-time observation of new demand[J]. *Networks*, 2019, 73(4): 434-452.
- [17] Pillac V, Guéret C, Medaglia A L. An event-driven optimization framework for dynamic vehicle routing[J]. *Decision Support Systems*, 2012, 54(1): 414-423.
- [18] de Armas J, Melián-Batista B. Variable neighborhood search for a dynamic rich vehicle routing problem with time windows[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2015, 85: 120-131.
- [19] AbdAllah A M F M, Essam D L, Sarker R A. On solving periodic re-optimization dynamic vehicle routing problems[J]. *Applied Soft Computing*, 2017, 55: 1-12.
- [20] Liu Y C. An optimization-driven dynamic vehicle routing algorithm for on-demand meal delivery using drones[J]. *Computers & Operations Research*, 2019, 111: 1-20.
- [21] Liu T, Azarm S, Chopra N. Integrating optimal vehicle routing and control with load-dependent vehicle dynamics using a confidence bounds for trees-based approach[J]. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 2020, 142(4): 041006.
- [22] Ning F X, Jiang G Y, Lam S K, et al. Passenger-centric vehicle routing for first-mile transportation considering request uncertainty[J]. *Information Sciences*, 2021, 570: 241-261.
- [23] Deb K, Jain H. An evolutionary many-objective optimization algorithm using reference-point-based nondominated sorting approach, part I: Solving problems with box constraints[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2014, 18(4): 577-601.
- [24] Spolaor S, Fuchs C, Kaymak U, et al. A novel multi-objective approach to fuzzy clustering[J]. 2019 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence: SSCI, Xiamen, 2019: 850-857.
- [25] Xie X, Li Z L, Zhu B S, et al. Multi-objective optimization design of a centrifugal impeller by positioning splitters using GMDH, NSGA-III and entropy weight-TOPSIS[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2021, 35(5): 2021-2034.

作者简介

杨雨蕾 (1988—), 女, 硕士生, 从事物流系统优化的研究, E-mail: yylsnoopy77@126.com;

张锦 (1962—), 男, 教授, 博士生导师, 从事物流系统优化与规划设计、物流组织优化和交通系统优化与规划等研究, E-mail: zhjswjtu@swjtu.edu.cn;

孙文杰 (1995—) 男, 硕士生, 从事物流系统优化与规划设计的研究, E-mail: sunwenjie@my.swjtu.edu.cn;

蒲云 (1962—), 男, 教授, 博士, 从事物流系统优化、智能化决策系统和系统科学理论与方法等研究, E-mail: ypu@home.swjtu.edu.cn.