

中文引用格式:刘长石,刘涛,马敬仪,等. 疫区卡车-无人机协同配送路径规划:风险与效率兼顾[J]. 中国安全科学学报, 2026, 36(5):260-269.

英文引用格式:Liu Changshi, Liu Tao, Ma Jingyi, et al. Routing for truck-drone collaborative distribution in epidemic areas: balancing risk and efficiency[J]. China Safety Science Journal, 2026,36(5):260-269.

疫区卡车-无人机协同配送路径规划: 风险与效率兼顾*

刘长石¹教授, 刘涛², 马敬仪³, 王凤^{**1}副教授, 何鸣⁴, 汤柯¹

(1 湖南工商大学 工商管理学院, 湖南 长沙 410205; 2 中南大学 商学院, 湖南 长沙 410083;

3 湖南工商大学 前沿交叉学院, 湖南 长沙 410205; 4 湖南大学 工商管理学院, 湖南 长沙 410082)

中图分类号:X915.5;X951

文献标志码:A

DOI:10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2026.05.2155

基金项目:国家社会科学基金资助(23BGL011, 21BJY191);湖南省教育厅科学研究重点项目(23A0463);湖南省社科基金资助(23JD037);长沙市自然科学基金资助(kq2502045)。

【摘要】 为有效降低疫区应急物流“最后一公里”的疫情传染风险,首先,设计卡车-无人机协同配送模式,基于传染病的传播动力学模型构建“基本再生数”函数量化各需求点的疫情感染人数;然后,以最小化所有需求点的疫情感染人数、最小化总配送时间为目标,构建卡车-无人机协同配送应急物资的路径规划模型,并结合模型多目标、非线性的特性,设计一种改进的多目标人工蜂群算法(IMOABCA)求解;最后,采用多类型算例开展试验。结果表明:IMOABCA能综合考虑疫区疫情、需求点分布与人口数量等情况,科学规划卡车-无人机协同配送应急物资的路径方案,不但能有效降低疫情传染风险,并能保障应急物资配送的时效性。与基础多目标人工蜂群算法(MOABCA)、非支配排序遗传算法-II(NSGA-II)求得的配送路径方案相比,IMOABCA求得规划方案的总感染人数分别减少922和746人,总配送时间分别节省3.71%和1.41%,任务完成时间分别缩短14.06%和3.6%。

【关键词】 卡车-无人机协同配送; 应急物资配送; 疫情传染风险; 路径规划; 配送效率; 改进的多目标人工蜂群算法(IMOABCA)

Routing for truck-drone collaborative distribution in epidemic areas:
balancing risk and efficiency

Liu Changshi¹, Liu Tao², Ma Jingyi³, Wang Feng¹, He Ming⁴, Tang Ke¹

(1 School of Management, Hunan University of Technology and Business, Changsha Hunan

410205, China; 2 School of Business, Central South University, Changsha Hunan

410083, China; 3 School of Frontier Interdisciplinary, Hunan University of Technology

and Business, Changsha Hunan 410205, China; 4 School of Business, Hunan

University, Changsha Hunan 410082, China)

Abstract: To effectively reduce the contagion risks in the "last-mile" of emergency logistics in

* 文章编号:1003-3033(2026)05-0260-10; 收稿日期:2026-01-10; 修稿日期:2026-03-16

** 通信作者:王凤(1977—),女,湖南攸县人,博士,副教授,主要从事物流与供应链方面的研究。E-mail:wf@hutb.edu.cn。

epidemic-stricken areas, a truck-drone collaborative delivery mode was first designed. A "basic reproduction number" function was constructed based on epidemic transmission dynamics to quantify the number of infections at various demand points. Then, a routing optimization model for truck-drone collaborative emergency supply delivery was established, aiming to minimize both the total number of infections and the total delivery time. In view of the multi-objective and non-linear characteristics of the model, the IMOABCA was developed. Finally, experiments were carried out through multiple types of instances. The results show that the IMOABCA could scientifically optimize delivery routes by integrating epidemic data, demand point distribution, and population size. Compared with the basic multi-objective artificial bee colony algorithm (MOABC) and Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II (NSGA-II), the total number of infections is reduced by 922 and 746, respectively. Additionally, the total delivery time is saved by 3.71% and 1.41%, and the task completion time can be shortened by 14.06% and 3.6%, respectively.

Keywords: truck-drone collaborative delivery; emergency resource distribution; epidemic contagion risk; routes planning; distribution efficiency; improved multi-objective artificial bee colony algorithm (IMOABCA)

0 引言

近年来,高传染性、高致死率疫情的全球大流行,对应急物流体系的安全性与时效性提出严峻挑战^[1]。为保障疫区配送的“最后一公里”,传统车辆“面对面”配送模式极易引发次生感染,难以满足严苛的防疫要求。相比之下,无人机载具凭借“无接触”和高机动的优势,为规避配送环节的感染风险提供新途径。因此,如何在传染性公共卫生事件背景下,设计科学的“无接触”协同配送模式并优化路径方案,以兼顾防疫安全与物资配送效率,已成为当前应急管理领域亟待解决的关键问题。

针对传染性公共卫生事件,学者们从多维视角开展了传染风险量化与防控研究。Kermack 等^[2]提出的 SIR 模型奠定了传染病动力学研究的基础。为进一步刻画病毒的传播特征,于振华^[3]崔景安^[4]等通过引入低风险群体、无症状感染者及暴露者等参数向量,构建更为精准的扩展模型,并利用马尔可夫链蒙特卡罗等算法实现参数辨识与趋势预测^[5],深入分析防控措施对基本再生数及疫情规模的影响。疫情背景下的应急物资配送是运筹优化领域的热点,初期研究主要聚焦于基于车辆路径问题 (Vehicle Routing Problem, VRP)。相关学者通过构建带时间窗的 VRP 模型^[6],或以配送成本最小化^[7]、等待时间最短^[8]为目标,探讨医疗物资的调度方案。进一步将疫情扩散特征与物流决策深度耦合,建立统筹感染人数、车辆规模及物资需求预测的集成优化模型^[9-10];针对生物危险源扩散等特殊场

景,张民波等^[11]探讨了选址-分配协同优化策略。随着新型载具的更新,学界开始关注多式协同配送路径优化。刘长石^[12]、Chang^[13]与杨双鹏^[14]等重点研究了卡车-无人机联合配送模式,以总配送时间或成本最小化为目标,构建疫区应急物资配送模型。综上,既有成果已为疫情风险量化与应急配送优化奠定理论基础,但仍存在以下局限:①现有文献多将疫情风险防控与物流路径规划视为独立系统,缺乏将疫情风险耦合至路径规划的集成优化模型,导致配送方案对疫情风险的真实防控效果难以评估,亟需将传染风险目标内化于应急物流决策模型。②传统研究多依赖车辆配送,其“面对面”接触特征在高风险疫区极易诱发交叉感染。引入无人机等新型载具实现“无接触”配送,是切断病毒传播链、提升应急保障的更优选择。

鉴于此,笔者拟提出一种卡车-无人机协同配送模式,通过引入传染病动力学中的“基本再生数”函数量化需求点感染风险,构建以最小化总感染人数和总配送时间为目标的双目标路径规划模型,并设计改进的多目标人工蜂群算法 (Improved Multi-Objective Artificial Bee Colony Algorithm, IMOABCA) 进行求解。以期在降低疫情传染风险的同时保障应急物资配送效率,为疫区应急物资配送提供决策参考。

1 疫区多式协同配送问题描述

某地突发传染性公共卫生事件,部分需求点出现规模性感染情况,亟需药品等应急物资进行抗疫

救援工作。应急物资在不同时间送达需求点,将影响需求点的疫情感染人数与抗疫效果。根据各区域的疫情严重程度分为高风险疫区和低风险疫区。拟采用卡车-无人机协同模式配送应急物资,在每个高风险疫区构建一个无人机起降点(各高风险疫区序号与无人机起降点序号一一对应),使用无人机配送高风险疫区内的需求点,卡车配送低风险疫区内的需求点。已知卡车与无人机的载重及速度、各疫区内需求点位置与需求量等数据。应急物资配送流程如下:卡车搭载无人机与应急物资从物流中心出发,可前往低风险疫区配送需求点,也可行驶到各高风险疫区附近的无人机起降点开展配送任务。卡车到达某无人机起降点时,停靠在该起降点,根据任务安排派遣无人机配送该高风险疫区内的所有需求点。无人机每次起飞只能配送一个客户,完成本次配送任务后,需要返回位于原起降点的卡车,与卡车汇合或开展下一次配送。卡车完成无人机起降点的配送任务后,驶向下一个节点或返回物流中心,如图1所示。

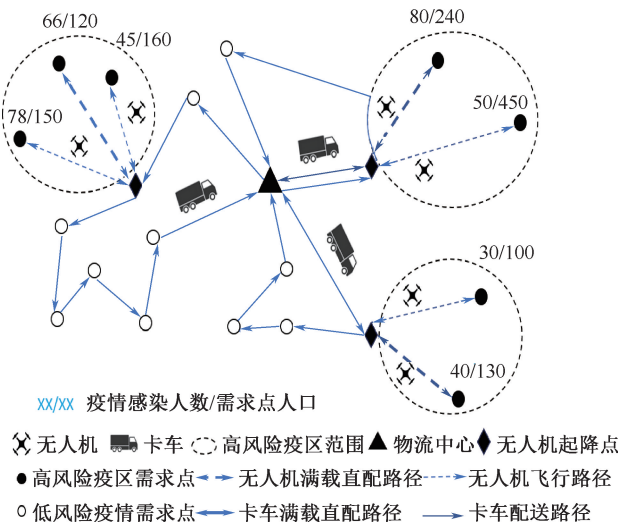


图1 卡车-无人机协同配送应急物资的路径规划

Fig.1 Path planning for truck-drone collaborative delivery of emergency supplies

为明确适用范围,提出如下假设:①卡车数量充足且为同一类型,无人机为同一类型,每辆卡车配备 ψ 台无人机。卡车在经过高风险疫区时绕其边缘行驶。②各需求点的应急物资需求量小于卡车载重,低风险疫区内的各需求点能且仅能由卡车配送一次。③如果高风险疫区内某需求点的需求量小于无人机载货量,能且仅能被一架无人机配送一次;否则采用需求拆分策略将该需求点拆分为坐标相同的若干个大需求点和一个小需求点,被拆分后的各需求

点能且仅能被一架无人机配送一次。④如果某无人机起降点负责配送的高风险疫区内的所有需求点需求量不超过卡车载重,该无人机起降点能且仅能由一辆卡车配送一次;否则采用需求拆分策略将该无人机起降点拆分为坐标相同的若干个大需求点和一个小需求点,被拆分后的各需求点能且仅能由一辆卡车配送一次。⑤参考市面上主流无人机单次飞行距离可达30 km左右,设定位于同一高风险疫区内的需求点只能由同一辆卡车搭载的无人机配送。⑥卡车在应急物资配送过程中产生行驶时间、配送需求点的服务时间、在无人机起降点开展配送服务的停靠时间。无人机在应急物资配送过程中产生飞行时间、配送需求点的服务时间。决策问题:如何综合考虑疫区疫情风险、需求点位置、需求量等情况规划卡车-无人机协同配送路线,满足各需求点的应急物资需要,并最小化疫区总感染人数、最小化应急物资总配送时间。

2 疫区多式协同配送路径规化模型

2.1 疫情传染风险指标

基本再生数 R_0 能直接反映疾病的传播能力,用于衡量在没有外力干预的情况下,一个感染者在完全易感人群中能导致他人感染病情的平均人数。

参照于振华等^[3]提出的疫情传播动力学模型,假设高风险疫区存在大量感染者 I ,容易与 I 密切接触的群体被称为易感染者 S ,被感染后经过治疗已经康复的人群被称为康复者 R 。为简化问题,疫情传播动力学模型只考虑死亡率,不考虑人口流动及出生率。位于低风险疫区的群体因为疫情封控等策略极少与 I 接触,不考虑疫情传染情况。

令 ϕ_i 为需求点 i 需要药品与食物等应急物资送达的最晚时间; $\min$; α^0 为 ϕ_i 时刻后得到应急物资的 S 变成 I 的概率; α^1 为在 ϕ_i 时刻前得到应急物资的 S 变成 I 的概率; β 为 I 的死亡率; γ^0 为在 ϕ_i 时刻之后得到应急物资的 I 被治愈的概率; γ^1 为在 ϕ_i 时刻之前得到应急物资的 I 被治愈概率; ρ 为 S 与 R 的死亡率。

根据Van等^[15]提出的方法,需求点 i 的基本再生数 R_0^i 的量化函数定义如下式:

$$R_0^i = \begin{cases} \frac{\alpha^0 \mu}{(\rho + \beta + \gamma^0)}, & t_i \geq \phi_i \\ \frac{\alpha^1 \mu}{(\rho + \beta + \gamma^1)}, & t_i < \phi_i \end{cases} \quad (1)$$

式中: t_i 为需求点 i 得到应急物资的实际时间, $\min$; μ 为单位区域内感染者承载能力。

2.2 疫情传染风险分析

令 C_2 为所有高风险疫区的需求点集合, τ_i 为需求点 $i (i \in C_2)$ 的人口数量。参考 Randolph^[16] 和郭鑫^[17] 等提出的理论, 将所有高风险疫区的需求点总感染人数 χ 作为疫区疫情传染风险的衡量指标, 即:

$$\chi \approx \sum_{i \in C_2} \tau_i (1 - (1/R_0^i)) \partial \quad (2)$$

式中 ∂ 为时间修正因子, 用来体现应急物资在不同时间送达需求点对疫情感染人数造成的影响。

$$\partial = \begin{cases} \exp\left(\left|\frac{(\Delta_1 t_i - \phi_i)}{\zeta}\right|\right), & \text{if } t_i > \phi_i \\ \exp\left(\left|\frac{(\Delta_2 \phi_i - t_i)}{\zeta}\right|\right), & \text{if } t_i < \phi_i \end{cases} \quad (3)$$

式中: Δ_1 为超时的惩罚系数, Δ_2 为提前的奖励系数; ζ 为消除指数数量纲单位的变量, 且 $\zeta = \min$ 。

2.3 多式协同路径规划模型构建

2.3.1 无人机使用时间分析

高风险疫区内某需求点的需求量可能大于无人机的载重, 需要采用“需求拆分策略”进行配送。令 U_i 为需求点 i 的需求量, E_2 为无人机载重, 卡车 k 携带的无人机 f 配送需求点 i 的次数 z_{if}^k 定义如下式:

$$z_{if}^k = \lceil U_i / E_2 \rceil \quad (4)$$

无人机在应急物资配送过程中产生飞行时间、配送需求点的服务时间。令 B 为无人机起降点的集合; F_k 为卡车 k 携带的所有无人机的集合; t_{ij}^k 为卡车 k 携带的无人机 f 从节点 i 飞行到节点 j 的时间, $\min$; $\bar{\omega}_j$ 为需求点 j 所需的服务时间, $\min$; y_{ij}^k 为 $0 \sim 1$ 变量, 当卡车 k 携带的无人机 f 从节点 i 飞行到节点 j 时值为 1, 否则为 0。 y_{ij}^k 为 $0 \sim 1$ 变量, 当需求点 j 由卡车 k 携带的无人机 f 配送时值为 1, 否则为 0。卡车 k 携带的所有无人机的使用时间 θ_k 定义如下式:

$$\theta_k = 2 \sum_{i \in B} \sum_{j \in C_2} \sum_{f \in F_k} t_{ij}^k y_{ij}^k z_{if}^k + \sum_{j \in C_2} \sum_{f \in F_k} \bar{\omega}_j y_{ij}^k z_{if}^k \quad (5)$$

令 K 为所有卡车的集合。所有卡车携带的无人机的使用时间之和 η 定义如下式:

$$\eta = \sum_{k \in K} \theta_k \quad (6)$$

2.3.2 所有卡车的使用时间分析

卡车在无人机起降点的停靠时间为其所搭载的多架无人机出发配送需求点, 完成任务后最晚回到该起降点的那架无人机的时间。令 C_l 为无人机起降点 $l (l \in B)$ 负责配送的高风险区域的需求点集

合, 卡车 k 在无人机起降点 l 的停靠时间 σ_l^k 定义如下:

$$\sigma_l^k = \max_{f \in F_k} (2 \sum_{j \in C_l} t_{lj}^k y_{lj}^k z_{lf}^k + \sum_{j \in C_l} \bar{\omega}_j y_{lj}^k z_{lf}^k) \quad (7)$$

当无人机起降点 l 负责配送的高风险疫区内所有需求点的总需求量超过卡车载重时, 采用“需求拆分策略”将无人机起降点拆分为坐标相同的若干个大需求点和一个小需求点。被拆分后的每个大需求点采用满载直配方式能且仅能被卡车配送一次, 每个小需求点能且仅能由卡车配送一次。无人机起降点 l 需要 H_l 辆卡车满载直配的数量为:

$$H_l = \left\lceil \frac{\sum_{i \in C_l} U_i}{E_1} \right\rceil \quad (8)$$

卡车的使用时间包括行驶时间、服务时间与在无人机飞行点的停靠时间。所有卡车的使用时间包括满载直配卡车的使用时间、巡回配送卡车的使用时间。令 C_1 为所有低风险疫区的需求点集合; O 为物流中心; T_{ijk} 为卡车 k 从节点 i 行驶到节点 j 的时间, $\min$; X_{ijk} 为 $0 \sim 1$ 变量, 当卡车 k 从节点 i 行驶到节点 j 时取值为 1, 否则为 0; x_{ik} 为 $0 \sim 1$ 变量, 当需求点 i 由卡车 k 配送时取值为 1, 否则为 0; Z_{lk} 为 $0 \sim 1$ 变量, 当卡车 k 行驶到起降点 l 时值为 1, 否则为 0。所有卡车的使用时间定义如下式:

$$\omega = 2 \sum_{j \in B} \sum_{k \in H_l} X_{Ojk} T_{Ojk} + \sum_{i \in C_1 \cup Oj \in O \cup C_1 \cup B, i \neq j, k \in K} \sum_{ijk} X_{ijk} T_{ijk} + \sum_{i \in C_1} \sum_{k \in K} \bar{\omega}_i x_{ik} + \sum_{k \in K} \sum_{l \in B} \sigma_l^k Z_{lk} \quad (9)$$

2.3.3 卡车-无人机协同配送的路径规划模型

以所有需求点的疫情感染人数最小、应急物资的总配送时间最短为目标构建路径规划模型。

1) 目标函数 1 为 $\min \chi$, 表示最小化所有需求点的疫情总感染人数。

目标函数 2 为 $\min(\omega + \eta)$, 表示最小化应急物资的总配送时间, 即所有卡车的使用时间与所有无人机的使用时间之和。

2) 载具配送及容量约束。下式表示位于低风险疫区内的各需求点能且仅能被一辆卡车配送一次。

$$\sum_{k \in K} x_{ik} = 1, \forall i \in C_1 \quad (10)$$

下式表示位于高风险疫区内每个需求点能且只能被一架无人机配送一次。

$$\sum_{f \in F_k} y_{ij}^k = 1, \forall i \in C_2 \quad (11)$$

下式表示各卡车配送的载重限制。

$$\sum_{i \in C_1} U_i x_{ik} + \sum_{j \in C_2} U_j y_{jf}^k \leq E_1, \forall k \in K, f \in F_k \quad (12)$$

式中 E_1 为卡车载重, kg。

下式表示卡车 k 从物流中心出发, 完成配送任务后必须返回物流中心。

$$\sum_{j \in C_1} X_{ojk} = \sum_{i \in C_1} X_{iok}, \forall k \in K \quad (13)$$

下式表示无人机 f 从无人机起降点出发, 完成配送任务后返回原起降点与卡车汇合。

$$\sum_{j \in C_2} Y_{ijf}^k = \sum_{j \in C_2} Y_{jif}^k, \forall i \in B, f \in F_k, k \in K \quad (14)$$

下式表示卡车流量守恒, 即卡车进入某节点后, 必须从该节点离开。

$$\sum_{i \in C_1 \cup O \cup B} X_{ijk} = \sum_{e \in C_1 \cup O \cup B} X_{jek}, \forall k \in K, j \in C_1 \cup B \quad (15)$$

下式表示无人机流量守恒, 即无人机进入某节点后, 必须从该节点离开。

$$\sum_{l \in B} Y_{ljk}^k = \sum_{l \in B} Y_{jlf}^k, \forall j \in C_1, f \in F_k, k \in K \quad (16)$$

下式表示卡车离开某一节点时的载重与卡车到达该节点时的载重计算方式。

$$W_{ik} = \begin{cases} w_{ik} - U_i x_{ik}, & \forall k \in K, i \in C_1 \\ w_{ik} - \sum_{i \in C_2} U_i y_{if}^k, & \forall f \in F_k, k \in K \end{cases} \quad (17)$$

式中: w_{ik} 为卡车 k 到达节点 i 时的载重, kg; W_{ik} 为卡车 k 离开节点 i 时的载重, kg。

3) 载具行驶时间约束。下式表示卡车从节点 i 行驶到节点 j 的时间计算公式。

$$a_{jk} = (A_{ik} + d_{ij}/S_1) X_{ijk}, \forall i, j \in C_1 \cup O \cup B, i \neq j, k \in K \quad (18)$$

式中: a_{jk} 为卡车 k 到达节点 j 的时间, min; A_{ik} 为卡车 k 离开节点 i 的时间, min; d_{ij} 为节点 i 与节点 j 之间的距离, km; S_1 为卡车行驶速度, km/h。

下式表示无人机从上一个节点飞行到下一个节点的时间计算方式。

$$p_{jf} = (P_{if} + d_{ij}/S_2) Y_{ijf}^k, \forall i, j \in C_2 \cup B, i \neq j, f \in F_k, k \in K \quad (19)$$

式中: p_{jf} 为无人机 f 到达节点 i 的时间, min; P_{if} 为无人机 f 离开节点 i 的时间, min; S_2 为无人机飞行速度, km/h。

4) 决策变量约束。下式表示各决策变量的取值限制。

$$x_{ik} \in \{0, 1\}, y_{ijf}^k \in \{0, 1\}, X_{ijk} \in \{0, 1\},$$

$$Y_{ijf}^k \in \{0, 1\}, Z_{lk} \in \{0, 1\} \quad (20)$$

3 IMOABCA 设计

3.1 设计思路

疫区应急物资多方式协同配送的路径规划属于非确定性多项式 (Non-deterministic Polynomial Hard, NP-hard) 问题, 当需求点数量较大时, 解空间呈指数级增长, 精确算法在合理时间内无法获得满意解, 通常采用启发式算法求得满意方案。多目标人工蜂群算法 (Multi-objective Artificial Bee Colony Algorithm, MOABCA) 核心思想是通过蜜蜂个体的协作与信息共享, 在解空间中搜索多个目标函数的最优解, 通过 Pareto 支配关系与拥挤度计算, 优化冲突目标并维持解集多样性。具有全局搜索能力强、易于实现、鲁棒性强等特点, 但存在收敛速度较慢、容易陷入局部最优解等不足。因此, 参考周玉虎^[18]、宋航^[19]等的算法改进方案, 设计一种 IMOABCA 求解模型, 具体改进思路如下: ①采用二元锦标赛选择法替换 MOABCA 中采用的轮盘赌选择法, 提高算法效率。②为平衡算法的局部搜索和全局搜索能力, 采用自适应变异概率策略^[18], 通过解探索次数来控制变异概率。③针对 MOABCA 容易陷入局部最优解的缺点, 引入变邻域搜索算法中的翻转算子、交叉算子、变异算子变异操作, 扩大种群搜索范围, 获取全局最优解。

3.2 构建 IMOABCA 具体步骤

步骤 1: 算法初始化。读入低风险疫区、高风险疫区、物流中心、需求点、载具信息等数据。令 ν 为种群数量, κ 为目标函数个数, M 为需求点个数, ν 为算法最大迭代次数, ε 为当前迭代次数, $\varepsilon = 1$ 。

步骤 2: 种群构建。通过随机编码的方式得到初始种群 π , 计算目标函数值并将解划分为不同的等级, 按等级进行排序得到种群 π_1 。

步骤 3: 雇佣蜂阶段。设 σ 为解探索次数, ξ 为其最大探索次数。 $\sigma = 0$, 使用改进策略得到新解, 并采用 Pareto 支配原则判定新解与旧解。如果新解支配旧解, 则保留新解, 否则放弃新解, $\sigma = \sigma + 1$, 循环 ν 次得到种群 π_2 。

步骤 4: 观察蜂阶段。基于二元锦标赛选择 π_2 中的一个解进行探索, 基于改进策略得到新解, 对新解与旧解进行排序, 保留更优解, 得到种群 π_3 。

步骤 5: 侦查蜂阶段。如果某个解在限定次数的探索后仍然没有找到更优解, 当 $\sigma > \xi$ 时放弃该

解,并随机生成一个新的解来代替。对所有解进行非支配排序,计算每个解的拥挤度并进行排序,循环 ν 次得到种群 $\pi_4, \varepsilon = \varepsilon + 1$ 。

步骤 6:算法终止条件与最优个体选择规则。若 $\varepsilon \leq \nu$,转至步骤 3;否则算法终止。采用加权归一化评分法筛选最优个体^[20],具体步骤如下:步骤①:提取 Pareto 前沿所有解的二维目标值构成目标矩阵。步骤②:目标值归一化处理,对于极小化目标(总配送时间、疫情感染风险),采用反向归一化。步骤③:加权综合评分计算。基于疫情防控的应急决策优先级设定配送时间、疫情感染风险的权重系数,通过线性加权求和计算每个 Pareto 解的综合评分,将综合评分最高的 Pareto 解判定为最优个体,其编码即最优方案。

3.3 IMOABCA 有效性分析

已知 κ 为目标函数个数, M 为需求点个数。

1) 时间复杂度分析。①初始化阶段,生成 ν 个随机解,并进行 ν 次解码,复杂度为 $O(\nu M^2)$;②迭代循环阶段,雇佣蜂阶段变异 ν 个解并重新编码,观察蜂阶段基于概率选择个体进行变异并重新解码,复杂度为 $O(\nu M^2)$ 。侦查蜂阶段处理探索次数过多的解,复杂度为 $O(\nu M)$ 。非支配排序需要比较所有个体间的支配关系,复杂度为 $O(\kappa \nu^2)$ 。拥挤度计算需要对 ν 个个体进行排序,复杂度为 $O(\kappa \nu \log_2(\nu))$ 。总时间复杂度为 $O(\nu(\nu M^2 + \kappa \nu^2))$ 。

2) 空间复杂度分析。算法需要储存所有需求点间的距离矩阵及种群中所有个体的编码路径,总空间复杂度为 $O(M^2 + \nu \kappa)$ 。综上,当 ν 和 M 固定时,复杂度呈多项式增长,证明 IMOABCA 适用于大规模需求点的 NP-hard 问题。

3) 收敛性证明。①IMOABCA 每一代种群状态由上一代通过选择、变异等随机操作生成,满足无后效性,构成齐次马尔可夫链。②设 Pareto 最优解集为 S^* ,若种群中存在个体属于 S^* 且后续迭代中始终保留,则算法达到吸收态。③自适应变异概率 λ 始终大于 0,确保算法持续探索解空间,非支配排序

与拥挤度选择策略保障最优解不被淘汰。由马尔可夫链收敛定理可知:算法将以 100% 概率收敛。

4 应急物资多方式配送效率分析

4.1 多方式配送效率试验设计

目前,没有关于疫情背景下应急物资配送路径规划的标准算例,但已有 VRP 文献大多基于 Solomon 算例^[21]与 Breedam^[22]构建测试算例开展试验。因此,基于 Solomon 算例中客户坐标分布类型 RC (Random and Clustered)、R (Random)、C (Clustered)与 Breedam 算例中的 T1 类型设计试验算例,各算例包含 1 个物流中心与 100 个需求点。

为切合试验需求,补充如下数据:①各算例设置 3 个高风险疫区,以坐标 (11, 46)、(41, 14)、(59, 61) 分别作为 3 个高风险疫区中心,区域半径分别为 16、16、16 km。②各无人机临时起降点的坐标分别为 (24, 48)、(41, 30)、(45, 53)。③参照五菱荣光小卡的数据,设定 $E_1 = 1\,000\text{ kg}$, $S_1 = 80\text{ km/h}$, $\psi = 2$ 。参照大疆 FC100 无人机的参数,设定 $E_2 = 20\text{ kg}$, $S_2 = 70\text{ km/h}$ 。④应急物资配送以 Solomon 及 Breedam 算例中的右时间窗为准,将各需求点的人数数量设为物资需求量的 50 倍。参照 Randolph^[16]和郭鑫^[17]等方法,设定超时惩罚系数 $\Delta_1 = 0.02$,提前奖励系数 $\Delta_2 = 0.01$ 。

参照周玉虎^[18]、宋航^[19]等的参数设置,将 IMOABCA 参数设置为: $\theta = 15$,为解探索最大次数; $\varsigma = 0.1$,用来调整变异概率的变化速度; $\nu = 50$ EMBED Equation.DSMT4。基于疫情防控生命至上的原则及参照刘明等^[11]的权重设定,设定 Pareto 最优个体评分体系中疫情防控和配送时间的权重系数分别为 0.6 和 0.4。参照于振华等^[3]的研究, R_0 相关参数设置为: $\alpha_1 = 0.082$, $\alpha_0 = 0.164$, $\beta = 0.045$, $\rho = 0.037\,5$, $\gamma_1 = 0.064$, $\gamma_0 = 0.032$, $\mu = 15$ 。

4.2 疫区应急物资配送效率算例试验

4.2.1 不同类型算例的试验分析

采用多类型算例开展试验,将 Pareto 前沿中最优个体作为计算结果,见表 1。

表 1 不同类型算例计算结果

Table 1 Results of different types of case studies								
算例	OT/min	TCT/min	VDT/min	DDT/min	IC/人	AP/人	IP/%	RT/s
C102	2 021.89	596.37	600.43	1 421.46	2 664	90 500	2.9	42.76
R108	1 860.96	773.58	614.18	1 246.79	6 363	72 900	8.7	42.36
RC105	2 150.80	806.96	804.68	1 346.12	8 480	86 200	9.8	41.93

续表 1

算例	OT/min	TCT/min	VDT/min	DDT/min	IC/人	AP/人	IP/%	RT/s
27T1	1 798. 70	925. 75	843. 21	955. 49	5 013	50 000	10. 0	42. 22
28T1	1 920. 28	1 100. 99	847. 37	1 072. 91	5 628	50 000	11. 2	42. 96
44T1	1 458. 87	826. 35	686. 01	772. 86	4 840	50 000	9. 6	40. 20
60T1	1 687. 37	987. 80	902. 18	785. 20	4 921	50 000	9. 8	41. 45

注:总配送时间(Overall Time,OT);任务完成时间(Task Completion Time,TCT),即最后一辆卡车回到物流中心的时间;卡车使用时间(Vehicle Duty Time;VDT);无人机使用时间(Drones Duty Time,DDT);疫情总感染人数(Infection Counts,IC);疫区总人数(All Personnel,AP);感染概率(Infection Probability,IP);运行时间(Running Time,RT)。

由表 1 可知:①Solomon 算例中 C 类型算例(C102)的需求点较为集中,任务完成时间较小,对应较低的感染率;R 类型与 RC 类型算例的需求点(R108、RC105)较为分散,任务完成时间较高,疫情感染率相对偏高;Breedam 算例的 T1 类型的总配送时间与任务完成时间最长,疫情感染率最高。说明应急物资配送效率与疫情感染风险之间具有正向耦合关系,高效配送体系能够保障医疗防护物资与生活必需品以更短时间抵达各需求点,可快速满足疫情感染者的医疗救援需求,提升病毒消杀、疾病救治等疫情防控效果。②大部分算例的无人机使用时间显著超过卡车使用时间。因为卡车的载重优势突出,各需求点的应急物资配送仅需单次运输即可完成;而高风险疫区各需求点的应急物资需求量普遍超过无人机载货量(20 kg),需要往返多次配送才能完成任务。因此,应急物流部门应结合高风险疫区各需求点的需求量及地理位置分布等实际情况,一方面启用大载重规格的无人机,提升单机单次配送效率;另一方面增加每辆卡车搭载的无人机数量,强化多无人机的并行配送效率,使得应急物资更快送达高风险疫区内的各需求点,提升疫情防控效果。③IMOABCA 平均运行时间为 41.98 s,能较快求解多目标配送路径问题,展现出较好的时效性。算例 R108 的路径规划如图 2 所示,其中,圆圈代表高风险疫区范围。

由图 2 可知:为有效降低疫情感染风险,IMOABCA 优先调度卡车配送各高风险疫区的无人机起降点。卡车在无人机起降点停靠,派遣无人机配送应急物资到高风险疫区内的各需求点。低风险疫区的需求点由卡车依次配送,每辆卡车配送多个低风险疫区的需求点,遇到高风险疫区绕其边缘行驶,避免疫情传染。存在无人机起降点的应急物资需求量超过卡车载重情况,需采用多辆卡车满载直配。高风险疫区存在多个需求点的需求量超过无人机载重情况,需采用多架无人机满载直配方式

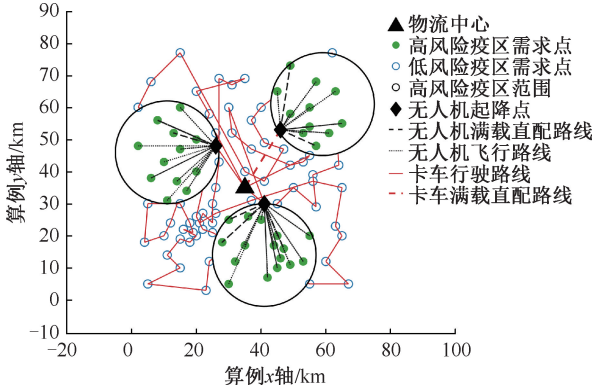


图 2 卡车-无人机协同配送路径规划

Fig.2 Path planning for truck-drone collaborative delivery

配送。综上,IMOABCA 能根据疫区疫情、需求点分布、需求量与人口数量等情况,科学规划应急物资的卡车-无人机协同配送路径,在有效降低疫情感染人数的同时保障应急物流效率。

4. 2. 2 不同算法对比试验

为证实 IMOABCA 的有效性,另编写 MOABC 与非支配排序遗传算法-II(Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II, NSGA-II)求解文中模型。MOABC 基本参数与 IMOABCA 保持一致,NSGA-II 的参数设置参考张民波等^[9]的研究,设定迭代次数为 200 代,变异概率为 0.05,交叉概率为 0.8。以 C105 算例作为对比试验算例,选取 Pareto 前沿中最优个体作为代表进行比较,以超体积(Hyper Volume, HV)作为算法性能的衡量指标,不同算法的运行结果见表 2。

表 2 不同算法的运行结果

Table 2 Results of different algorithms

算法	OT/min	TCT/min	IC/人	HV	RT/s
IMOABCA	2 020. 11	562. 07	3239	0. 51	44. 65
MOABC	2 098. 59	654. 88	4161	0. 34	38. 28
NSGA-II	2 049. 26	583. 38	3985	0. 09	36. 44

由表 2 可知:综合 OT 和 TCT 的值得出,

IMOABCA 的总配送时间比 MOABC 节省 3.71%,任务完成时间减少 14.06%;IMOABCA 比 NSGA-II 总配送时间减少 1.41%,任务完成时间减少 3.6%。说明 IMOABCA 求得的卡车-无人机协同配送路径方案更具科学性与有效性,应急物资能以更短时间送达各需求点,有效提升应急物资配送效率。由 IC 可知:IMOABCA 计算得到的总感染人数比 MOABC 减少 922 人,比 NSGA-II 减少 746 人。说明 IMOABCA 通过优化配送路径,确保药品等物资迅速到达需求点,更能有效控制病毒传播、降低疫情传染风险。由 HV 和 RT 可知:虽然 IMOABC 的运行时间较其他 2 种算法分别增加 6.37 与 8.21 s,但求得的 HV 最大,说明 IMOABC 求得的 Pareto 解集支配的目标空间大,解集质量更好,性能优于其他算法。综上,虽然 IMOABCA 的运行时间略微有所增加,但能求得更科学合理的配送路径规划方案,有效缩短防疫物资配送时间、降低疫区疫情传染风险,可为疫情防控部门提供应急物资配送路径规划的决策参考。不同算法得到的 Pareto 前沿分布如图 3 所示。

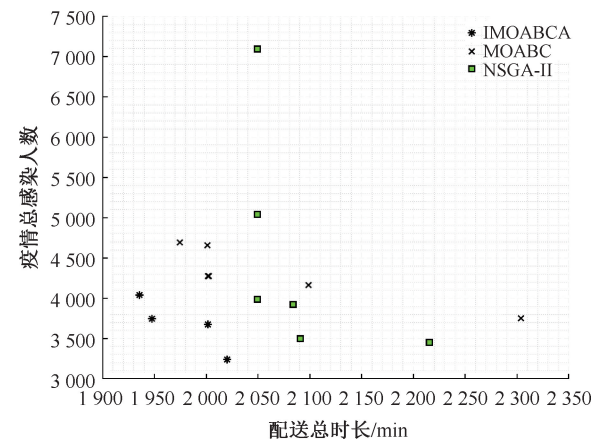


图 3 不同算法得出的 Pareto 前沿

Fig. 3 Pareto front obtained by different algorithms

由图 3 可知:IMOABCA 所求解集的总配送时间主要分布在 1 935~2 020 min 内,IC 的值主要分布在 3 239~4 039 人,处于相对较低的风险水平。MOABC 得到的解集的总配送时间分布在 1 974~2 303 min,IC 的值集中分布在 3 749~4 689 人,在疫情风险控制方面表现欠佳,整体性能不及 IMOABCA。NSGA-II 计算得到的解集的总配送时间分布在 2 049~2 215 min,IC 的值分布在 3 450~7 091 人,在配送效率和疫情防控方面与 IMOABCA 都具有较大差距。由此可知:IMOABCA 在求解多目标优化问题时具有更强的求解能力,规划的卡车

-无人机协同配送应急物资的路径方案不仅有效降低疫情传染风险,还能保证应急物流配送效率。

4.2.3 不同优化目标的对比试验

在其他参数不变的情况下,对比分析多目标规划方案 1(综合考虑疫情传染风险最小及配送总时间最短)、方案 2(只考虑总配送时间最短)、方案 3(只考虑疫情总感染人数最小),采用算例 RC107 开展试验,结果见表 3。

表 3 不同优化策略下的计算结果			
Table 3 Results under different optimization strategies			
方案	OT/min	TCT/min	IC/人
1	2 049.01	738.75	8 425
2	2 015.18	682.04	8 660
3	2 100.41	783.19	8 356

由表 3 可知:方案 1 展现出显著的综合优势,而方案 2、方案 3 分别存在明显短板。由 OT、TCT 可知:方案 1 的总配送时间只比方案 2 增加 1.6%(34 min),比方案 3 减少 2.4%(51 min),任务完成时间比方案 2 增加 8.2%(56 min),比方案 3 减少 5.7%(45 min)。这表明:在配送效率层面,方案 1 和方案 2 的差距非常小,而方案 3 在应急物资配送时效性上存在劣势,可能存在因应急物资延误送达而导致疫情大规模爆发的隐患。由 IC 可知:在疫情防控效果比较上,方案 1 的总感染人数较方案 2 减少 235 人,体现相对较优的疫情防控效果;较方案 3 的感染人数虽略微增加 69 人,但实际上疫情防控效果相差不大,反观方案 3 在应急响应时效性上具有难以弥补的短板。

综上所述,疫情背景下应急物资配送路径规划方案应兼顾配送效率与防疫安全等多目标。单纯追求应急物资配送效率目标可能会加剧疫情传染风险。而过度追求疫情传染风险最小目标可能导致应急物资配送时间过长,引发部分群众的焦虑情绪,不利保障群众生命安全。试验结果表明:综合考虑疫情传染风险和配送总时间的多目标优化策略,既能确保应急物资高效送达,又能有效减少疫情感染人数,保障疫情防控效果。

4.2.4 灵敏性分析

为研究无人机载重对应急物资配送路径规划的影响,将无人机载重以 5 为步长在[15,30]范围内增加。算例 R102 的试验结果见表 4,其中,所有卡车在无人机起降点的停靠时间(Truck Dwell Time, TDT)。

由表 4 可知:在无人机载重由 15 kg 增加到

表 4 无人机载货量灵敏性分析

Table 4 Sensitivity analysis of the capacity of the drones

载货量/kg	OT/min	TCT/min	IC/人	TDT/min
15	2 125.00	855.44	7 422	695
20	1 900.10	801.70	7 270	627
25	1 723.61	729.97	7 133	577
30	1 634.13	646.92	7 096	537

30 kg 的过程中,卡车在无人机起降点停靠时间累计下降 22.73%,疫情总感染人数累计减少 326 人,应急物资的总配送时间累计下降 23.10%,应急物资配送任务的完成时间累计下降 24.37%,说明无人机载重对应急物资配送路径规划具有显著影响。因此,在高风险疫区应急物资配送场景中,应根据需求点需求量实际情况,使用载重大的无人机执行配送任务,或采用多架无人机开展并行配送,缩短卡车在无人机起降点的等待时间,提升应急物资配送效率,降低疫情总感染人数,提升疫情防控效果。但需结合各疫区的实际需求,科学调配合适数量与合适载重的无人机,避免性能冗余导致资源浪费。

5 结 论

1) 由卡车配送低风险疫区需求点与无人机起降点,派遣无人机配送高风险疫区需求点,可有效规避“面对面”接触,进而减少疫情感染人数,降低疫情传染风险。

2) 以疫情总感染人数最少、应急物资配送总时间最短为目标,构建卡车-无人机协同配送的路径优化模型,设计 IMOABCA 求解。试验结果表明:IMOABCA 能有效求解多目标优化问题,控制疫情传染风险的同时保障应急物资配送效率。

3) 通过灵敏性分析可知:在配送高风险疫区需求点时,应考虑各疫区的实际需求,使用合适载重的无人机开展配送,可缩短卡车在无人机起降点的等待时间,提高配送效率,提升疫情防控效果。

4) 未来可聚焦应急物资配送对疫情防控的长期效益、结合传染病动力学模型、预测不同配送方案对疫情峰值和持续时间的影响,量化不同配送方案对降低整体疫情损失的贡献。

参 考 文 献

[1] Harapan H, Itoh N, Yufika A, et al. Coronavirus disease 2019 (COVID-19): a literature review[J]. Journal of Infection and Public Health, 2020, 13(5): 667-673.

[2] Kermack W O, Mckendrick A G. A contribution to the mathematical theory of epidemics[J]. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character, 1927, 115: 700-721.

[3] 于振华,黄山阁,卢思,等. 新冠肺炎传播动力学建模及预测[J]. 控制与决策,2023,38(3):699-705.
Yu Zhenhua, Huang Shan'ge, Lu Si, et al. Nonlinear dynamics modeling and epidemic forecast of COVID-19[J]. Control and Decision, 2023, 38(3): 699-705.

[4] 崔景安,杨慧娇. 基于 SEIADR 模型研究口罩对 COVID-19 传播的影响[J]. 信阳师范学院学报(自然科学版), 2023, 36(1): 10-15.
Cui Jing'an, Yang Huijiao. The impact of face masks on COVID-19 transmission based on SEIADR model[J]. Journal of Xinyang Normal University (Natural Science Edition), 2023, 36(1): 10-15.

[5] 桑茂盛,丁一,包铭磊,等. 基于新冠病毒特征及防控措施的传播动力学模型[J]. 系统工程理论与实践,2021, 41(1): 124-133.
Sang Maosheng, Ding Yi, Bao Minglei, et al. Propagation dynamics model considering the characteristics of 2019-nCoV and prevention-control measurements[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2021, 41(1): 124-133.

[6] Zheng Jianguo, Yang Qing, Chen Shuilin. Research on the distribution of emergency supplies during the COVID-19 Epidemic[J]. Complexity, 2023, 2023(1): DOI: 10.1155/2023/9023040.

[7] 帅春燕,张婷,王文聪,等. 突发公共卫生事件下救援物资配送方案研究[J]. 安全与环境学报, 2025, 25(1): 227-236.
Shuai Chunyan, Zhang Ting, Wang Wencong, et al. Investigation into relief materials distribution schemes during public health emergencies [J]. Journal of Safety and Environment, 2025, 25(1): 227-236.

[8] 赵银婷,徐晓敏,周行. 疫情暴发初期应急医疗物资配送优化研究[J]. 公路交通科技, 2022, 39(12): 231-238.
Zhao Yinting, Xu Xiaoming, Zhou Hang. Study on optimization of distribution of emergency medical supplies in early stage of epidemic[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2022, 39(12): 231-238.

[9] 蒋阳升,韩佳哲,朱娟秀,等. 考虑新冠疫情扩散规律的医疗物资动态配送优化[J]. 安全与环境学报, 2023, 23(5): 1 579-1 587.

- Jiang Yangsheng, Han Jiazhe, Zhu Juanxiu, et al. Optimization of dynamic medical supplies distribution considering COVID-19's diffusion rule[J]. Journal of Safety and Environment, 2023,23(5):1 579-1 587.
- [10] 刘明,李颖祖,曹杰,等.突发疫情环境下基于服务水平的应急物流网络优化设计[J].中国管理科学,2020,28(3):11-20.
- Liu Ming, Li Yingzu, Cao Jie, et al. An optimal design of emergency logistics network for epidemic controlling based on service level[J]. Chinese Journal of Management Science, 2020,28(3):11-20.
- [11] 张民波,钟子逸,闫瑾,等.考虑生物危险源扩散的疫区应急物资调配模型[J].中国安全科学学报,2023,33(11):206-213.
- Zhang Minbo, Zhong Ziyi, Yan Jin, et al. Model of emergency supplies allocation in epidemic areas considering spread of biohazard diffusion[J]. China Safety Science Journal, 2023,33(11):206-213.
- [12] 刘长石,吴张,周愉峰,等.疫区应急物资供应的卡车-无人机动态协同配送路径优化[J].系统科学与数学,2022,42(11):3 027-3 043.
- Liu Changshi, Wu Zhang, Zhou Yufeng, et al. The optimization of dynamic and cooperative truck-drone distribution routes for emergency supplies delivery in pandemic[J]. Systems Science and Mathematics, 2022,42(11):3 027-3 043.
- [13] Chang Yongsik, Lee Hyunjung. Optimal delivery routing with wider drone-delivery areas along a shorter truck-route[J]. Expert Systems with Applications, 2018, 104: 307-317.
- [14] 杨双鹏,郭秀萍,高娇娇.无接触式“卡车+无人机”联合配送问题研究[J].工业工程与管理,2022,27(1):184-194.
- Yang Shuangpeng, Guo Xiuping, Gao Jiaojiao, et al. Research on contactless “truck + drone” joint distribution problem[J]. Industrial Engineering and Management, 2022,27(1):184-194.
- [15] Van Den D P, Watmough J. Reproduction numbers and sub-threshold endemic equilibria for compartmental models of disease transmission[J]. Mathematical Biosciences, 2002,180 (1/2): 29-48.
- [16] Randolph H E, Barreiro L B. Herd immunity: understanding COVID-19[J]. Immunity, 2020, 52(5): 737-741.
- [17] 郭鑫.基于传染病学模型对 COVID-19 预测的分析与研究[D].太原:山西大学,2022.
- Guo Xin. Analysis and research on COVID-19 prediction based on epidemiological model [D]. Taiyuan: Shanxi University, 2022.
- [18] 周玉虎,王桐,陈立伟,等.基于人工蜂群算法的大规模武器目标分配研究[J].哈尔滨工程大学学报,2024,45(6):1 187-1 195.
- Zhou Yuhu, Wang Tong, Chen Liwei, et al. Large-scale weapon-target allocation based on an artificial bee colony algorithm[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2024,45(6):1 187-1 195.
- [19] 宋航,王亚丽,刘国奇,等.基于改进多目标蜂群算法的 Web 服务组合优化方法[J].东北大学学报(自然科学版),2019,40(6):777-782.
- Song Hang, Wang Yali, Liu Guoqi. Web service composition optimization method based on improved multi-objective artificial bee colony algorithm[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2019, 40(6):777-782.
- [20] Kaddani S, Vanderpooten D, Vanpeperstraete J, et al. Weighted sum model with partial preference information: application to multi-objective optimization[J]. European Journal of Operational Research, 2017, 260(2): 665-679.
- [21] Solomon M M. Algorithms for the vehicle routing problem with time windows constraints[J]. Operations Research, 1987, 35(2):254-265.
- [22] Van Breedam A. A parametric analysis of heuristics for the vehicle routing problem with side-constraints[J]. European Journal of Operational Research, 2002, 137(2): 348-370.



作者简介: 刘长石 (1975—),男,湖南邵阳人,博士,教授,博士生导师,主要从事物流管理、数字经济方面的研究。E-mail:liuchangshi964@126.com。