区域限制下无人机-地面运输车辆联合配送路径优化

武雪杰，王旻轲，胡浩浩

（中国民用航空飞行学院机场学院，广汉 618307）

摘要：随着中国电子商务的快速发展，快递业务面临运输成本高、区域限制多等挑战。为解决上述问题提出了卡车、无人机和三轮车的协同配送方式，建立了区域限制下无人机-地面运输车辆联合配送路径优化模型，以最小化运输成本为目标，采用改进的自适应大邻域搜索（IALNS）算法进行求解。数值实验结果表明，IALNS算法优于Gurobi和自适应大邻域搜索（ALNS）算法。在相同客户点条件下，与传统卡车配送模式相比，无人机-地面运输车辆联合配送模式可降低34.51%的运输成本；相较于卡车-无人机联合配送模式和卡车-三轮车联合配送模式，分别降低27.47%和18.92%的运输成本。研究结果表明，该联合配送方式能够显著降低运输成本，为城市物流配送网络优化提供了可行的参考方案。

关键词：区域限制；无人机-地面运输车辆联合配送；改进的自适应大邻域搜索算法

中图分类号：U116 **文献标志码：**A **文章编号：**1671－1807(2026)02－0053－08

电子商务的持续增长，提高了城市“最后一公里”物流配送需求，但仍面临配送成本高的问题。目前，卡车和三轮车在“最后一公里”物流中发挥重要作用，但仍受交通拥堵，通行限制等困扰。在此背景下，无人机因其灵活性、经济性等特性，为破解城市“最后一公里”配送难题提供了新的解决思路[1]。受限于有限载荷和飞行距离，采用卡车和无人机联合配送的方式能够在一定程度上规避无人机自身的局限性[2]。Wang等[3]首先研究了无人机的车辆路径问题（vehicle routing problem with drones，VRPD）。马佰钰等[4]以总成本最小为目标函数，用自适应大邻域搜索算法求解出无人机-卡车联合配送的最优路径。镇璐等[5]研究了多卡车多无人机协同配送问题，以系统化总成本最小为优化目标，建立一个混合整数线性规划模型，并设计了基于列生成的求解算法来求解该模型。Huang等[6]针对VRPD，以固定成本和配送成本最小化为目标建立模型，并以改进的蚁群算法进行求解。Cheng等[7]考虑无人机载重及飞行距离对能耗的影响，建立一个线性近似模型模拟无人机能量消耗，设计分支切割算法进行求解。王超峰等和公维鑫[8]为解决农村物流配送成本高、效率低等问题，基于送货车辆与无人机并行配送模式，以配送利润最大化为目标，并设计了改进的蚁群算法来求解该模型。张文鸽等[9]以总运输成本最低为目标，构建考虑碳排放的卡车-无人机联合取送货路径规划模型，并设计了两阶段算法求解该模型。Sacramento等[10]研究了VRPD的运营成本，以总成本最小为目标构建数学模型，并提出了一种自适应大邻域搜索元启发式算法进行求解。Kyriakakis等[11]研究了带无人机的电动汽车路径问题（electric vehicle routing problem with drones，EVRPD），其中每辆电动汽车在预定地点发射无人机，并等待所有无人机返回后再前往下一个目的地。

然而，在城市配送环境中，道路封锁和空域禁飞等区域限制，进一步增加了卡车和无人机联合配送路径规划的复杂性。Jeong等[12]针对一辆车和一架无人机的旅行商问题，考虑包裹重量对电池的影响及禁飞区绕行等因素，以配送时间最小化为目标建立模型。Weng等[13]针对城市交通限制下卡车在特定时间内进入某区域的问题，构建了卡车和无人机协同配送路径优化模型，并用混合元启发式算法求解该模型。Zhou等[14]针对物流配送效率低下及区域限制等问题，构建货车和

收稿日期：2025-07-26

基金项目：中央高校基本科研业务费项目（25CAFUC04040）

作者简介：武雪杰（1999—），女，安徽阜阳人，硕士研究生，研究方向为航空交通运输；通信作者王旻轲（1986—），男，四川成都人，博士，副教授，研究方向为系统工程与决策科学、物流系统优化；胡浩浩（1998—），男，甘肃天水人，硕士研究生，研究方向为航空交通运输。

无人机协同配送路径优化模型，用多阶段启发式优化算法求解该模型，通过不同算例验证模型和算法的有效性。Hu 等[15]为综合解决危险品物流管理中的风险、成本和顾客满意度等重要方面，构建了多目标选址-路径模型，提出了一种单遗传算法和一种自适应权重遗传算法来求解该模型。Wei 等[16]针对限速区和禁飞区内无人机的车辆路径问题，建立以总成本最小化的数学模型，得出时变路网、车辆限行区和禁飞区以及不同的绕行规则都会影响配送成本和配送计划。

尽管现有研究在卡车-无人机协同配送方面取得了一定成果，但在区域限制背景下多种运输工具联合配送方面的研究稍有不足。因此，本文针对区域限制背景下城市“最后一公里”配送问题，构建无人机-地面运输车辆联合配送路径优化模型，充分发挥无人机、卡车和三轮车在可达性、灵活性和成本等方面的互补优势，并提出改进的自适应大邻域搜索算法（improved adaptive large neighborhood search algorithm，IALNS）进行求解该模型，以实现复杂城市配送环境下路径可行性与运输成本的协同优化。如图 1 所示，卡车与无人机协同完成主干道与局部精细投递，三轮车则深入街区深处进行灵活配送，形成无人机-地面运输车辆联合配送体系。



图 1　无人机-地面运输车辆联合配送

1　问题描述

区域限制下无人机-地面运输车辆联合配送路径优化问题可描述为：客户配送区域包括卡车禁行区、三轮车禁行区、无人机禁飞区和普通区四种类型，所有配送车辆均可在普通区域内进行配送。路网中有 1 个配送中心为客户提供配送服务，一辆卡车和一架无人机一对一匹配组成卡车机组，三轮车独立作业。在满足车辆性能约束与区域限制的前提下，三轮车和卡车机组分别从配送中心出发，服务各自可达区域内的客户点。在配送过程中，卡车不仅执行地面运输任务，还作为无人机的移动起降与回收平台。无人机需从所属卡车起飞，并在完成任务后返回原卡车。所有车辆在完成任务后返回配送中心。

为对上述问题进行建模，将问题定义在无向图 $G=(N,A)$ 上，$N=\{0,1,2,\cdots,n\}$ 为节点集合，包括客户节点 $N_C=\{1,2,\cdots,n\}$ 和配送中心 0；$A=\{(i,j)\mid i,j\in N,i\neq j\}$ 为弧集。由于区域限制，其中，N_{PK}为卡车限行区内客户点的集合，N_{PD}为无人机禁飞区内客户点的集合，N_{PF}为电动三轮车限行区内客户点的集合，N_O 为普通区内客户点的集合。

2　模型

2.1　条件假设

本文包含以下假设：

（1）无人机每次飞行只能配送一个需求点。

（2）无人机的发射、回收时间以及运输车辆在客户点的服务时间忽略不计。

（3）无人机单次行程的发射节点和回收节点不同。

（4）每个客户点只能由一种运输车辆进行服务。

（5）运输车辆再两个既定客户点之间匀速行驶。

2.2　符号说明

（1）集合：N_K 为卡车可访问节点集合，$N_K=\{N_{PD}\cup N_{PF}\cup N_O\cup\{0\}\}$；$N_F$ 为三轮车可访问节点集合，$N_F=\{N_{PK}\cup N_{PD}\cup N_O\cup\{0\}\}$；$N_D$ 为无人机可访问节点集合，$N_D=\{N_{PK}\cup N_{PF}\cup N_O\}$；$N_{DT}$为无人机起飞点集合，$N_{DT}=\{N_{PF}\cup N_O\}$；$N_{DL}$为无人机降落点集合，$N_{DL}=\{N_{PF}\cup N_O\}$；$K$ 为卡车集合，$K=\{1,2,\cdots,k\}$；D 为无人机集合，$D=\{1,2,\cdots,d\}$；F 为三轮车集合，$F=\{1,2,\cdots,f\}$。

（2）参数：c_k 为卡车单位距离运输成本；c_d 为无人机单位距离运输成本；c_f 为三轮车单位距离运输成本；Q_k 为卡车最大载重；Q_d 为无人机最大载重；

Q_f 为三轮车最大载重;v_k 为卡车每小时平均行驶速度;v'_d为无人机每小时平均行驶速度;v''_f为三轮车每小时平均行驶速度;B 为无人机单次配送的最大行驶里程;B'_F为三轮车配送的最大行驶里程;q_i 为客户点 i 的需求量;d_{ij} 为运输车辆从客户点 i 到客户点 j 的距离;M 为一个非常大的数。

(3)中间变量:a_{jk} 为卡车 k 到达节点 j 的时刻;A_{jk} 为卡车 k 离开节点 j 的时刻;b_{jdk} 为卡车 k 携带的无人机 d 到达节点 j 的时刻;B_{jdk} 为卡车 k 携带的无人机 d 离开节点 j 的时刻;c_{jf} 为三轮车 f 到达节点 j 的时刻;C_{jf} 为三轮车 f 离开节点 j 的时刻;u_i^k 为客户点 i 在卡车 k 路径中的访问顺序,用于消除子回路约束;n_i^f 为客户点 i 在三轮车 f 路径中的访问顺序,用于消除子回路约束。

(4)决策变量:x_{ij}^k 为 0～1 变量,若卡车 k 从客户点 i 行驶到客户点 j 取 1,否则取 0;y_{ijh}^{dk} 为 0～1 变量,若卡车 k 所携带的无人机 d 从客户点 i 行驶到客户点 j 降落到客户点 h 取 1,否则取 0;z_{ij}^f 为 0～1 变量,若电动三轮车 f 从客户点 i 行驶到客户点 j 取 1,否则取 0;g_j^k 为 0～1 变量,客户点 j 由卡车 k 服务取 1,否则取 0;h_j^{dk} 为 0～1 变量,客户点 j 由无人机 d 服务取 1,否则取 0;l_j^f 为 0～1 变量,客户点 j 由三轮车 f 服务取 1,否则取 0。

2.3 模型建立

$$\min Z = c_k \sum_{i\in N_K}\sum_{j\in N_K}\sum_{k\in K} d_{ij}x_{ij}^k + c_d \sum_{i\in N_{DT}}\sum_{j\in N_D}\sum_{h\in N_{DL}}\sum_{k\in K}\sum_{d\in D}(d_{ij}+d_{jh})y_{ijh}^{dk} + c_f \sum_{i\in N_F}\sum_{j\in N_F}\sum_{f\in F} d_{ij}z_{ij}^f \tag{1}$$

s. t.

$$\sum_{j\in N_K} x_{0j}^k = \sum_{j\in N_k} x_{j0}^k, \forall k \in K \tag{2}$$

$$\sum_{i\in N_K} x_{ij}^k = \sum_{h\in N_K} x_{jh}^k = g_j^k, \quad \forall j \in N_k, i\neq j\neq h, k\in K \tag{3}$$

$$u_i^k - u_j^k + 1 \leqslant (n+2)(1+x_{ij}^k), \quad \forall i,j \in N_K, i\neq j, k\in K \tag{4}$$

$$\sum_{k\in K} x_{ij}^k = 0, \ \forall i,j \in N_{PK}, i\neq j \tag{5}$$

$$\sum_{i\in N_{DT}}\sum_{h\in N_{DL}}\sum_{k\in K}\sum_{d\in D} y_{ijh}^{dk} + \sum_{i\in N_F}\sum_{f\in F} z_{ij}^f = 1, \quad \forall j \in N_{PK} \tag{6}$$

$$\sum_{j\in N_D}\sum_{h\in N_{DL}} y_{ijh}^{dk} = 1, \ \forall i \in N_{DT}, \quad k\in K, d\in D \tag{7}$$

$$\sum_{i\in N_{DT}}\sum_{j\in N_D} y_{ijh}^{dk} = 1, \ \forall h \in N_{DL}, \quad k\in K, d\in D \tag{8}$$

$$\sum_{i\in N_D}\sum_{h\in N_D} y_{ijh}^{dk} = h_j^{dk}, \ \forall j \in N_D, \quad k\in K, d\in D \tag{9}$$

$$\sum_{j\in N_D}\sum_{h\in N_{DL}} y_{ijh}^{dk} \leqslant \sum_{g\in N_K} x_{ig}^k, \quad \forall i \in N_{DT}, k\in K, d\in D \tag{10}$$

$$\sum_{i\in N_{DT}}\sum_{j\in N_D} y_{ijh}^{dk} \leqslant \sum_{g\in N_K} x_{gh}^k, \quad \forall h \in N_{DL}, k\in K, d\in D \tag{11}$$

$$u_h^k - u_i^k \geqslant 1-(n+2)\left(1-\sum_{j\in N_D} y_{ijh}^{dk}\right), \quad \forall i \in N_{DT}, h\in N_{DL}, k\in K, d\in D \tag{12}$$

$$\sum_{k\in K}\sum_{d\in D} y_{ijh}^{dk} = 0, \ \forall i,j,h \in N_{PD}, i\neq j\neq h \tag{13}$$

$$\sum_{i\in N_K}\sum_{k\in K} x_{ij}^k + \sum_{i\in N_F}\sum_{f\in F} z_{ij}^f = 1, \ \forall j \in N_{PD} \tag{14}$$

$$\sum_{j\in N_F} z_{0j}^f = \sum_{j\in N_F} z_{j0}^f, \ \forall f \in F \tag{15}$$

$$\sum_{i\in N_F} z_{ij}^f = \sum_{g\in N_F} z_{jg}^f = l_j^f, \quad \forall j \in N_F, i\neq j\neq g, f\in F \tag{16}$$

$$n_i^f - n_j^f + 1 \leqslant (n+2)(1+z_{ij}^f), \quad \forall i,j \in N_F, i\neq j, f\in F \tag{17}$$

$$\sum_{i\neq j} z_{ij}^f = 0, \ \forall i,j \in N_{PF}, f\in F \tag{18}$$

$$\sum_{i\in N_{DT}}\sum_{h\in N_{DL}}\sum_{k\in K}\sum_{d\in D} y_{ijh}^{dk} + \sum_{i\in N_K}\sum_{k\in K} x_{ij}^k = 1, \quad \forall j \in N_{PF} \tag{19}$$

$$\sum_{i\in N_K}\sum_{k\in K} x_{ij}^k + \sum_{i\in N_D}\sum_{h\in N_D}\sum_{k\in K}\sum_{d\in D} y_{ijh}^{dk} + \sum_{i\in N_F}\sum_{f\in F} z_{ij}^f = 1, \ \forall j \in N_D \tag{20}$$

$$\sum_{j\in N_C} q_j g_j^k + \sum_{j\in N_C} q_j h_j^d \leqslant Q_k \tag{21}$$

$$\sum_{i\in N_D}\sum_{j\in N_D}\sum_{h\in N_D} q_j h_j^d y_{ijh}^{dk} \leqslant Q_d, \quad \forall k \in K, d\in D \tag{22}$$

$$\sum_{j\in N_f} q_j l_j^f \leqslant Q_f \tag{23}$$

$$\sum_{i\in N_D}\sum_{j\in N_D}\sum_{h\in N_D} d_{ij} y_{ijh}^{dk} \leqslant B \tag{24}$$

$$\sum_{i\in N_F}\sum_{j\in N_F} d_{ij} z_{ij}^f \leqslant B'_F \tag{25}$$

$$a_{jk} \geqslant A_{ik} + \frac{d_{ij}}{v_k} - M(1-x_{ij}^k), \quad \forall i,j \in N_K, i\neq j, k\in K \tag{26}$$

$$A_{jk} \geqslant a_{jk} - M(1-g_j^k),$$
$$\forall j \in N_K, i \neq j, k \in K \quad (27)$$

$$b_{jdk} \geqslant B_{idk} + \frac{d_{ij}}{v'_d} - M(1-y_{ijh}^{dk}),$$
$$\forall i \in N_{DT}, j \in N_D, h \in N_{DL}, k \in K, d \in D \quad (28)$$

$$B_{jdk} \geqslant b_{jdk} - M(1-h_j^{dk}),$$
$$\forall j \in N_D, k \in K, d \in D \quad (29)$$

$$c_{jf} \geqslant C_{if} + \frac{d_{ij}}{v''_f} - M(1-z_{ij}^f),$$
$$\forall i, j \in N_F, i \neq j, f \in F \quad (30)$$

$$C_{jf} \geqslant c_{jf} - M(1-l_j^f), \ \forall j \in N_F, f \in F \quad (31)$$

$$a_{ik} + \frac{d_{ij}}{v'_d} - M(1-y_{ijh}^{dk}) \leqslant b_{jdk},$$
$$\forall i \in N_{DT}, j \in N_D, h \in N_{DL}, k \in K, d \in D \quad (32)$$

式(1)为最小化运输成本;式(2)为卡车在配送中心的流量守恒平衡;式(3)为卡车在客户点的流量守恒平衡;式(4)为卡车的子回路消除;式(5)和式(6)为卡车禁行区内的客户点由三轮车或无人机进行配送;式(7)~式(9)表示无人机在起降节点及服务节点的流量守恒平衡;式(10)~式(12)为卡车 k 和无人机 d 之间的路径协调约束;式(13)和式(14)为无人机禁飞区内的客户只能由三轮车或卡车进行配送;式(15)为三轮车在配送中心的流量守恒平衡;式(16)为三轮车在客户点的流量守恒平衡;式(17)为三轮车的子回路消除;式(18)和式(19)为三轮车禁行区内的客户点由卡车或无人机进行配送;式(20)为普通区内的客户点可由卡车、无人机或三轮车进行配送,但每个客户只能被服务一次;式(21)~式(23)分别为卡车、无人机和三轮车的载重约束;式(24)为无人机行驶里程的约束;式(25)为三轮车行驶里程的约束;式(26)和式(27)为卡车 k 的时间约束;式(28)和式(29)为无人机 d 的时间约束;式(30)和式(31)为三轮车的时间约束;式(32)为卡车和无人机相互配合的时间关系。

3 改进的自适应大邻域搜索算法

本文提出的IALNS与传统的自适应大邻域搜索算法(adaptive large neighborhood search algorithm,ALNS)相比,IALNS算法在初始解生成阶段,充分考虑区域禁行约束、运输车辆差异,实现卡车-无人机联合运输路线与三轮车独立运输路线的合理分配,从而提升初始解的质量;在邻域操作阶段,引入更具多样性的邻域搜索策略,如运输成本均衡、更换客户属性和贪婪插入操作,不仅丰富了邻域结构形式,还增强了搜索空间的能力;在自适应调整机制阶段,用模拟退火和动态调整策略,有效提升了算法的全局搜索能力与收敛性能。

3.1 初始解的生成

为考虑各种运输车辆的区域限制与载重约束,采用以下步骤生成地面运输车辆(卡车与三轮车)和无人机的配送路径。

(1)采用以下步骤生成卡车和三轮车的配送路线。

步骤一:对于所有路线,将第一个位置编码为0,表示所有运输车辆从配送中心出发。

步骤二:根据区域限制,从第一个位置开始插入符合区域限制要求的车辆。卡车禁止服务卡车禁行区内的节点,三轮车禁止服务三轮车禁行区内的节点。

步骤三:随机选择一辆车,如果是卡车,则进入步骤四;如果是三轮车则进入步骤五。

步骤四:计算所选卡车的剩余容量,如果超出其容量则转到步骤三,否则,将此需求点插入该卡车的路线。

步骤五:计算所选三轮车剩余容量,如果超出其容量则转到步骤三,否则将此需求点插入该电动三轮车的路线。

步骤六:重复步骤四和步骤五,直到所有需求点都分配完毕,再生成的卡车路线和电动三轮车路线后插入点0。

(2)采用以下步骤生成无人机的配送路线。

步骤一:令 I_{id} 表示卡车 k 路线上所有未超过无人机最大载重并且未处于无人机禁飞区的客户点,为无人机 d 可能服务的客户点。

步骤二:$j \in I_{id}$,无人机 d 的潜在飞行距离为 DIS_d。如果 $DIS_d < d_{ij}$ 则表明无人机无法从节点 i 出发,服务节点 j,并且将节点 j 从集合 I_{id} 内移除。如果 $DIS_d > d_{ij}$ 则转到步骤三。

步骤三:令 H_d 表示无人机 d 服务节点 j 之后到下一个无人机服务点的所有后续点的集合

步骤四:计算无人机 d 从服务节点 j 到降落点 h 的距离 $d_{jh}(h \in H_d)$。若 $d_{jh} \leqslant DIS_d - d_{ij}$,则节点 h 可作为无人机的降落点,卡车 k 将在客户点 h 处接走无人机 d。若 $d_{jh} > DIS_d - d_{ij}$,则节点 h 不能作为无人机的降落点。

步骤五:重复步骤二到步骤四,直到卡车路线上所有客户点被成功分配。

3.2 邻域操作

在完成初始解构造后,为增强搜索过程的多样性,本文在邻域操作阶段引入以下三种策略。

(1)运输成本均衡。对卡车和无人机联合配送路径进行运输成本计算,删除最高运输成本路径中的单个运输成本最高的客户点,然后将该客户点放入运输成本最低的卡车和无人机联合配送路径中,并且用同样的方式调整三轮车路径的运输成本。

(2)更换客户属性。在无人机禁飞区内的客户点,如果该客户点由卡车服务则更改为三轮车服务;在卡车禁行区内的客户点,如果该客户点由三轮车服务则改为由无人机服务;在三轮车禁行区内的客户点,如果该客户点由卡车服务则改为由无人机服务;在普通区内的客户点,在不违反约束条件的前提下,可以随意改变客户属性。

(3)贪婪插入。在卡车和无人机联合配送路径中,将客户数量最多的路径中的一些客户由客户数量最少路径中的无人机、卡车服务,并将这些客户从原有路径中删除,就近加入新路径中。

3.3 自适应调整机制

选择轮盘赌的方式选择算子,算子权重调整式为

$$w_n=\begin{cases}w_n, u_n=0\\(1-\rho)w_n+\rho\dfrac{s_n}{u_n}, u_n>0\end{cases}\tag{33}$$

式中:w_n 为算子的权重;u_n 为算子的使用次数;$\rho\in(0,1)$ 为权重的更新系数;s_n 为通过 $s_n=s'_n+s''_n+s'''_n$ 计算出来的算子得分,s'_n、s''_n、s'''_n 分别为更新解优于全局最优解,不优于全局最优解但优于当前解和不优于当前解但以模拟退火概率接受当前解的得分。

4 数值实验

4.1 参数设置

为验证模型和算法在不同规模下的普适性和性能,选择了广泛使用的 Solomon 标准数据库中的 C101、R101、RC101 系列实例,考虑到无人机的载重在 1~10 kg,对算例进行相应调整,其中客户需求货物重量小于 10 kg 的货物占配送货物的 60%。IALNS 算法相关参数为:$s'_n=20$,$s''_n=12$,$s'''_n=8$,$\rho=0.7$,最大迭代次数为 400。其余参数设置如表 1 所示。

表 1 参数设置

参数	取值	参数	取值	参数	取值
c_k/(元·km^{-1})	5	c_d/(元·km^{-1})	1	c_f/(元·km^{-1})	2
Q_k/kg	720	Q_d/kg	10	Q_f/kg	100
v_k/(km·h^{-1})	40	v'_d/(km·h^{-1})	60	v''_f/(km·h^{-1})	20
B/km	20	B'_F/km	70		

4.2 算例分析

为验证模型与算法的有效性,在 Solomon 算例的基础上构建了一个测试算例。其中在客户点数量不超过 10 个的算例中,有 2 个客户点位于卡车禁行区内、1 个客户点位于无人机禁飞区内、1 个客户点位于三轮车禁行区内。客户点数量在 25 个的算例中,有 3 个客户点位于卡车禁行区内、2 个客户点位于无人机禁飞区内、2 个客户点位于三轮车禁行区内。基于该算例,将 IALNS 算法与 ALNS 算法、数学规划求解器 Gurobi 的求解结果进行对比分析。求解结果如表 2 所示,在多数算例中,IALNS 和商业优化求解器 Gurobi 都可以得出最优解。但在客户点数为 25 的算例中,IALNS 获得的目标函数值优于 Gurobi,且在求解效率方面优于后者,说明所提

表 2 算法求解结果对比

实例编号	Gurobi		ALNS		IALNS		GAP_G/%	GAP_A/%
	目标函数/元	运行时间/s	目标函数/元	运行时间/s	目标函数/元	运行时间/s		
C101-6	236.12	0.10	259.83	0.78	236.12	0.24	0	9.13
R101-6	513.20	0.19	513.20	1.17	513.20	0.23	0	0
RC101-6	509.34	0.12	542.57	1.31	509.34	0.59	0	6.12
C101-8	282.90	0.13	283.57	3.38	282.90	0.26	0	0.24
R101-8	532.12	0.24	581.49	7.62	532.12	0.61	0	8.49
RC101-8	525.83	0.17	579.05	5.17	525.83	0.78	0	9.19
C101-10	281.38	0.25	296.68	5.10	281.38	1.78	0	5.16
R101-10	581.07	0.32	632.11	6.88	581.07	2.15	0	8.07
RC101-10	542.21	0.27	598.05	6.12	542.21	2.59	0	9.34
C101-25	569.75	2 054.92	579.62	189.20	568.47	95.63	0.22	1.92
R101-25	1 378.55	2 219.58	1 469.80	176.45	1 371.24	116.74	0.53	6.71
RC101-25	1 128.97	2 691.72	1 216.71	188.43	1 125.15	112.09	0.34	7.53

出的算法不仅在求解精度方面具备良好表现，还在求解速度上具有优势。在与 ALNS 算法的对比中，IALNS 在总运输成本方面平均减少 5.99%，显示该算法在解的质量方面具有显著优势。在求解效率方面，IALNS 算法明显优于 ALNS 的求解时间，表明通过算法结构的改进，有效提升收敛速度和求解效率。

4.3　不同配送模式对比

为验证不同配送模式在实际应用中的效果与优越性，设计了基于联合配送的对比实验。在实验设计中，不考虑卡车禁行区、三轮车禁行区以及无人机禁飞区等限制因素，以保证不同模式间的公平对比。数据方面，选取 Solomon 标准数据库中 C101 实例的 25 个客户点作为基础，并通过地理映射的方法，将其映射至成都市高新区的配送区域，客户点的空间分布如图 2 所示。该实例客户分布既体现了典型的城市配送场景特征，又能够反映多点、多需求的复杂性，因而具有较强的代表性和普适性。在此基础上，分别构建无人机-地面运输车辆联合配送模式、卡车-无人机联合配送模式、卡车-三轮车联合配送模式以及传统卡车配送模式，并对各模式的配送路径进行对比分析，如图 3 所示。

为便于比较，将各模式下卡车的服务客户点数、行驶距离及总成本列于表 3。由图 3 和表 3 可知，与传统卡车模式相比，其余三种联合配送模式均减少了卡车服务的客户数量和行驶距离。对比与传统卡车配送模式，在卡车-无人机和卡车-三轮车联合配送模式中，卡车服务客户点分别减少 40% 和 32%，卡车行驶距离分别减少 36.06% 和 31.53%，总运输成本分别减少 27.47%和 18.92%。然而在无人机-地面运输车辆联合配送模式中，卡车服务客户点数较传统模式下降 56%，卡车行驶距离下降 60.84%，总运输成本下降 34.51%，显著优于卡车-无人机和卡车-三轮车联合配送模式。这是因为在无人机-地面运输车辆联合配送模式中，三轮车承担了部分距离配送中心较远但分布较为分散的客户任务，而无人机主要覆盖配送中心周边或相对集中的客户点群体。这一分工不仅利用了无人机在短距离、高密度区域的高响应与低成本优势，也利用了三轮车在中距离配送中的成本优势，从而最大化减少了卡车的行驶距离。

表 3　不同配送模式下运行指标对比

模式编号	配送模式	卡车服务客户点数	卡车行驶距离/km	总运输成本/元
(a)	传统卡车	25	167.38	836.90
(b)	卡车-无人机	15	107.02	607.01
(c)	卡车-三轮车	17	114.61	678.58
(d)	无人机-地面运输车辆	11	65.54	548.08

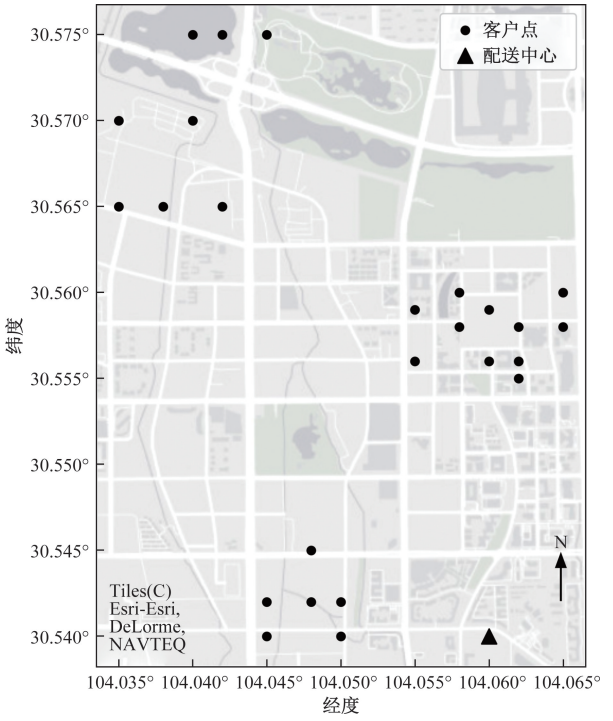
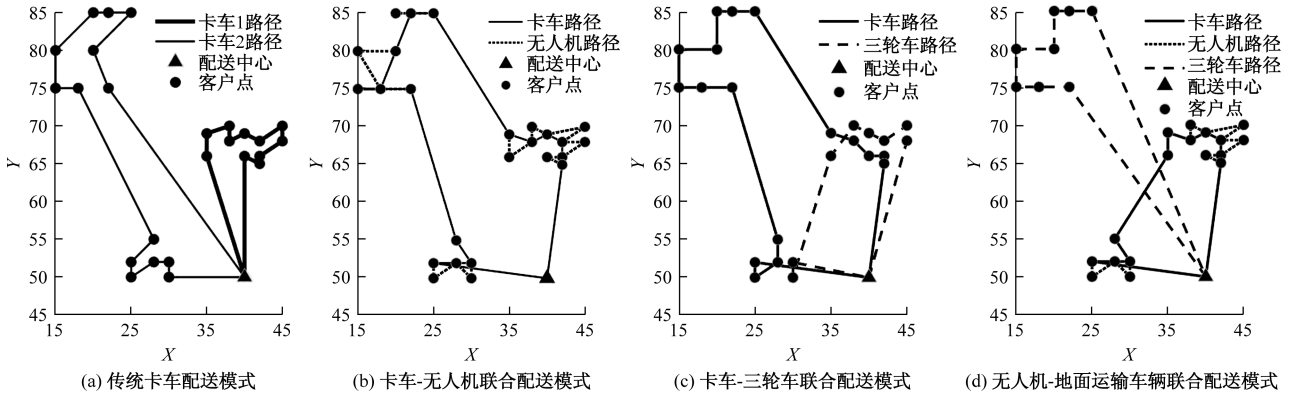


图 2　客户点空间分布



(a) 传统卡车配送模式　(b) 卡车-无人机联合配送模式　(c) 卡车-三轮车联合配送模式　(d) 无人机-地面运输车辆联合配送模式

图 3　不同配送模式对比

4.4 禁行区范围敏感性

区域限制范围不同,影响无人机-地面运输车辆联合配送的路径规划。因此,对卡车禁行区、三轮车禁行区以及无人机禁飞区范围进行敏感性分析,并调整了无人机续航(35 km)和载重(15 kg)以适应不同禁行区范围,求解结果如图 4 所示。在图 4(a)中随着卡车禁行区内客户点数量的增加,总运输成本整体趋势变化不大。这一变化主要是由于卡车禁行区内客户点增加后,由无人机和三轮车的自身限制,使得卡车进行配送的客户点并未发生显著变化,因此整体变化趋势不大。在图 4(b)中随着三轮车禁行区内客户点数量的增加,三轮车禁行区内客户点的配送需求由卡车或无人机进行运输。受限于无人机的载重与配送里程,卡车成为主要替代运力,但其单位运输成本显著高于三轮车,因此在整体物流配送过程中总运输成本不断提高。在图 4(c)中随着无人机禁飞区客户点数量增加,物流配送网络呈现以下演化规律:禁飞区内客户点被迫转由地面运输车辆配送,卡车承担更多配送需求,导致卡车运输成本显著增加,进而提高总运输成本。

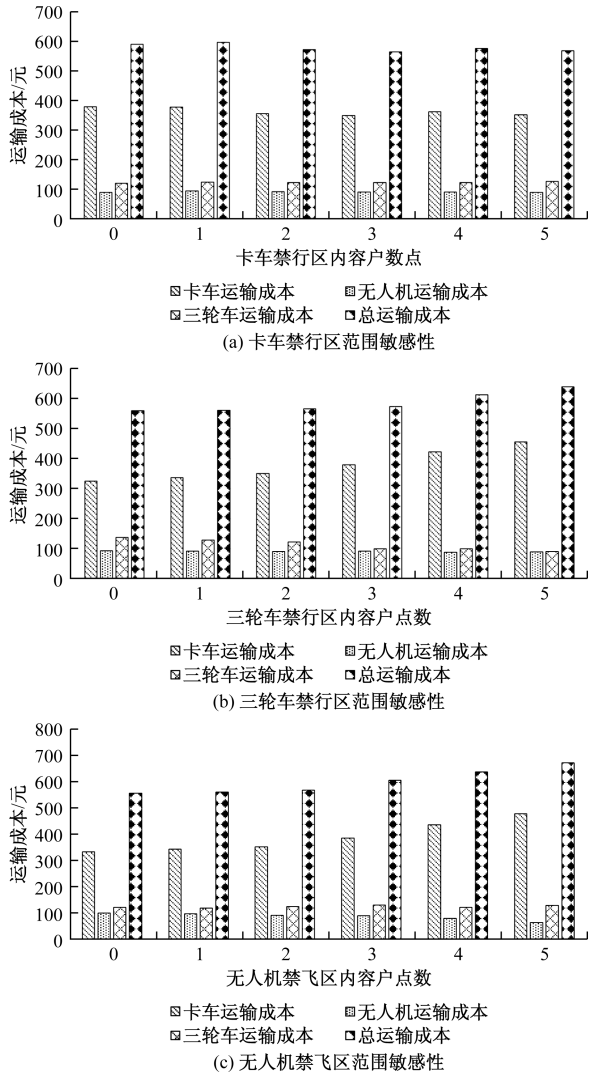


图 4 禁行区范围敏感性

5 结论

本文综合考虑区域限制等因素,以运输成本最低为目标,建立无人机-地面运输车辆联合配送路径优化模型,以 IALNS 算法求解。在算例分析中,通过与 Gurobi 和 ALNS 算法进行对比,得出了 IALNS 算法在求解效率和解的质量方面的优势。在不同配送模式对比中,得出在无人机-地面运输车辆联合配送模式下,由于无人机和三轮车的加入,不仅减少了卡车的配送里程,还降低了运输成本,更符合现代物流业“提质、增效、降本”的发展趋势。

为了简化问题,本文只假设卡车仅搭载一架无人机,且无人机只能服务一个客户点,后续研究可能会考虑卡车搭载多架无人机的问题,并且将进一步考虑动态路网、临时取送货和天气等不确定因素对配送的影响。

参考文献

[1] AGATZ N, BOUMAN P, SCHMIDT M. Optimization approaches for the traveling salesman problem with drone [J]. Transportation Science, 2018, 52(4): 965-981.

[2] SACRAMENTO D, PISINGER D, ROPKE S. An adaptive large neighborhood search metaheuristic for the vehicle routing problem with drones[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2019, 102: 289-315.

[3] WANG X, POIKONEN S, GOLDEN B. The vehicle routing problem with drones: several worst-case results[J]. Optimization Letters, 2017, 11: 679-697.

[4] 马佰钰, 李贺鑫, 马千里, 等. 碳排放约束下无人机-卡车联合配送问题[J]. 系统工程, 2024, 42(2): 60-69.

[5] 镇璐, 高佳静, 谭哲一. 多卡车与多无人机协同配送路径优化问题研究[J]. 管理科学学报, 2024(7): 1-18.

[6] HUANG S H, HUANG Y H, BLAZQUEZ C A, et al. Solving the vehicle routing problem with drone for delivery services using an ant colony optimization algorithm [J]. Advanced Engineering Informatics, 2022, 51: 101536.

[7] CHENG C, YOSSIRI A, LOUIS-MARTIN R. Drone routing with energy function: formulation and exact algorithm[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2020, 139: 364-387.

[8] 王超峰, 公维鑫. 基于农村快递需求分布特征的货运车辆与无人机并行配送优化研究[J]. 科技与产业, 2025, 25(7): 82-87.

[9] 张文鸽，王文，曹士连，等. 考虑碳排放的卡车-无人机联合取送货路径规划[J]. 上海海事大学学报，2025，46(2)：30-39.

[10] SACRAMENTO D，PISINGER D，ROPKE S. An adaptive large neighborhood search metaheuristic for the vehicle routing problem with drones[J]. Transportation Research Part C：Emerging Technologies，2019，102：289-315.

[11] KYRIAKAKIS N A，STAMADIANOS T，MARINAKI M，et al. The electric vehicle routing problem with drones：an energy minimization approach for aerial deliveries[J]. Cleaner Logistics and Supply Chain，2022，4：100041.

[12] JEONG H Y，SONG B D，LEE S. Truck-drone hybrid delivery routing：payload-energy dependency and no-fly zones[J]. International Journal of Production Economics，2019，214：220-233.

[13] WENG Y Y，WU R Y，ZHENG Y J. Cooperative truck-drone delivery path optimization under urban traffic restriction[J]. Drones，2023，7(1)：59-78.

[14] ZHOU J，YU Q，XUE Z，et al. Research on the route planning problem of drone and truck collaborative delivery in restricted areas[J]. IEEE Access，2025，13：33062-33073.

[15] HU H，LI X，ZHANG Y，et al. Multi-objective location-routing model for hazardous material logistics with traffic restriction constraint in inter-city roads[J]. Computers & Industrial Engineering，2019，128：861-876.

[16] WEI S，FAN H，REN X，et al. Time-dependent vehicle routing problem with drones under vehicle restricted zones and No-Fly zones[J]. Applied Sciences，2025，15(4)：2207.

Path Optimization for Drone-ground Vehicle Joint Delivery in Restricted Areas

WU Xuejie，WANG Minke，HU Haohao

(School of Airport Engineering，Civil Aviation Flight University of China，Guanghan 618307，China)

Abstract：With the rapid development of e-commerce in China，the express delivery industry faces challenges such as high transportation costs and numerous restricted areas. To address these issues，a joint delivery method involving trucks，drones and tricycles was proposed. A joint delivery path optimization model for drone-ground vehicles in restricted areas was established to minimize transportation costs. The improved adaptive large neighborhood search (IALNS) algorithm was employed to solve the problem. Experimental results indicate that the IALNS algorithm outperforms the Gurobi and adaptive large neighborhood search (ALNS) algorithms. Under the same customer location conditions，the drone-ground vehicle joint delivery model can reduce transportation costs by approximately 34.51% compared with the traditional truck delivery model. Compared with the truck-drone joint delivery model and the truck-tricycle joint delivery model，it can reduce costs by about 27.47% and 18.92%，respectively. These results indicate that this joint delivery approach can significantly lower transportation costs and provide a feasible reference for optimizing urban logistics distribution networks.

Keywords：area restriction；drone-ground vehicle joint delivery；improved adaptive large neighborhood search