

考虑中转站与碳排放的城市垃圾分类运输 两阶段路径优化与调度

李树权

上海理工大学机械工程学院, 上海

收稿日期: 2025年8月4日; 录用日期: 2025年8月28日; 发布日期: 2025年9月5日

摘 要

随着城市化进程加快, 垃圾产生量急剧增加, 对垃圾收运与处理提出了更高的效率与环保要求。本文围绕城市垃圾分类运输的路径优化与调度问题, 分阶段提出多层次优化模型与算法。首先, 针对单类垃圾运输, 建立了带容量约束的路径优化模型, 以最小化总行驶距离为目标, 设计了求解算法并分析其复杂性; 随后, 扩展至多类型垃圾协同调度, 综合考虑不同车辆特性与运输成本, 构建协同优化模型并探讨时间约束的影响; 最后, 引入中转站选址与碳排放因素, 提出选址、路径与碳排放协同优化框架, 并设计两阶段算法求解。研究为提升城市垃圾运输系统的运行效率、降低成本与碳排放提供了有力支持, 具有重要的理论与实践意义。

关键词

垃圾分类运输, 路径优化, 中转站选址, 碳排放控制, VRPTW

Route Optimization and Scheduling for Urban Garbage Classification Transportation

Shuquan Li

Department of Electrical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Aug. 4th, 2025; accepted: Aug. 28th, 2025; published: Sep. 5th, 2025

Abstract

With the acceleration of urbanization, the amount of garbage produced has increased sharply, putting forward higher efficiency and environmental protection requirements for garbage collection,

文章引用: 李树权. 考虑中转站与碳排放的城市垃圾分类运输两阶段路径优化与调度[J]. 建模与仿真, 2025, 14(9): 45-57. DOI: 10.12677/mos.2025.149583

transportation and treatment. This paper focuses on the path optimization and scheduling problem of urban waste classification transportation, and proposes multi-level optimization models and algorithms in stages. Firstly, for the transportation of a single type of garbage, a path optimization model with capacity constraints was established. With the goal of minimizing the total traveling distance, a solution algorithm was designed and its complexity was analyzed. Subsequently, the collaborative scheduling of multiple types of garbage was expanded. Considering the characteristics of different vehicles and transportation costs comprehensively, a collaborative optimization model was constructed and the influence of time constraints was explored. Finally, by introducing the factors of transfer station location and carbon emissions, a collaborative optimization framework for location, route and carbon emissions is proposed, and a two-stage algorithm is designed for solution. This research provides strong support for enhancing the operational efficiency of urban waste transportation systems, reducing costs and carbon emissions, and holds significant theoretical and practical significance.

Keywords

Garbage Classification and Transportation, Path Optimization, Scheduling Optimization, Site Selection for Transfer Stations, Carbon Emission Control, VRPTW

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着城市化进程的不断加快,城市生活垃圾问题日益成为制约社会可持续发展和威胁人类健康的重要挑战。自 2004 年起,中国便跃居全球垃圾产量最高的国家;2023 年,这一数字攀升至 4 亿吨。如此庞大的垃圾产生量已经逼近各城市与地区的垃圾处理能力极限,使垃圾管理问题愈加突出。这不仅对垃圾的收集、运输和处理环节提出了更高要求,也对环境治理和资源利用效率带来了前所未有的压力。

在这一背景下,垃圾分类运输作为城市环境治理的关键环节,正面临复杂且多元的挑战。不同垃圾类型(如厨余垃圾、可回收物、有害垃圾及其他垃圾)在收集和运输过程中具有各自的特殊需求,运输车辆的载重与容积限制、中转站的处理能力与运营时间窗口、以及运输成本与碳排放的平衡等,均需要被系统纳入考虑。然而,目前许多城市仍主要依赖经验驱动的调度与路径安排,导致运输效率偏低、能耗与碳排放较高,制约了垃圾管理系统的整体优化与可持续发展。

为实现城市生活垃圾的高效收集和低碳运输,刘国栋对国内中大型城市的生活垃圾收运体系进行了系统分析,针对国内不同区域的垃圾分类投放设施和运输体系提出了优化建议,结果表明:合理规划转运站布局、采用清洁直运模式、完善有害垃圾收运体系等措施,能够有效提高收运效率,降低环境污染[1]。李婷婷等基于改进蚁群算法提出以车辆运输成本、固定成本和碳排放成本之和最小化为目标的车辆调度与路径优化模型,结果表明改进蚁群算法具有较强的鲁棒性与并行性,收运方案总成本减少 35.7% [2]。牟能治等基于 Arc GIS 分析和模拟退火算法建立多车型多行程带时间窗的城市生活垃圾分类单独运输模型和分类联合运输模型。结果表明采用多车型垃圾收运车比单一车型成本更低;采用分类联合运输模式的效率更高,且能大幅降低社会总成本,有效减轻环境污染[3]。张爽等考虑垃圾点垃圾量不确定因素,构建基于居民时间满意度的生活垃圾上门收运路线优化模型,设计了该模型的人工鱼群求解算法方案。验证了不同收运概率水平对垃圾收运路线优化决策结果影响不大,不同时间满意度对决策结果影响较大[4]。张燕等针对多车多行程的大规模问题,考虑驾驶员的工作量平衡约束设计三维矩阵编码,提出

混合自适应大邻域搜索算法, 优化结果显示降低 14.3% 的收运成本, 减少 12.7% 的碳排放量[5]。蒋尔伟综合考虑城市垃圾的空间布局问题和分类运输的车辆路径优化问题, 利用成都市实际数据考虑车型使用、时间惩罚成本和仓容占比进行敏感性分析, 建立多车型多行程带时间窗的城市生活垃圾分类联合运输模型, 结果显示分类联合收运模式在运输中的表现要优于分类单独收运模式[6]。针对城市垃圾运输中中转站选址离散性、路径规划复杂性及碳排放动态性的多维耦合挑战, 韦孟宇提出一种融合两阶段协同决策机制与非对称路网约束建模的集成优化模型。该模型以广西南宁市一个固体废弃物供应链网络数据为例计算得到城市固体废弃物供应链网络的总费用和总碳排放的帕累托前沿, 验证了该方法的有效性[7]。

以上研究均未将中转站选址、时间窗限制和碳排放约束等现实因素纳入考量体系。针对城市垃圾运输中中转站选址离散性、路径规划复杂性及碳排放动态性的多维耦合挑战, 传统优化方法难以实现系统全局最优。为此, 本文提出一种融合两阶段协同决策机制与非对称路网约束建模的集成优化模型, 通过中转站选址-路径联合优化与碳排放控制, 最小化全周期综合成本。对城市垃圾分类运输中的路径选择与调度安排进行优化, 既提升系统运行效率、降低运输与运营成本, 又有效控制碳排放, 有助于完善城市垃圾治理体系, 为实现城市绿色低碳转型提供了重要支撑。

2. 数值模拟及模型建立

2.1. 符号定义

基于上述分析, 我们构建一个中转站选址与路径优化的集成数学模型, 该模型考虑了时间窗口约束、碳排放限制以及非对称路网等复杂因素。

$N = \{1, 2, \dots, n\}$: 垃圾收集点集合

$M = \{n+1, n+2, \dots, n+m\}$: 中转站候选位置集合

$\{0\}$: 垃圾处理厂索引

$T = \{1, 2, 3, 4\}$: 垃圾类型集合, 分别代表厨余垃圾、可回收物、有害垃圾和其他垃圾

$V = \{1, 2, 3, 4\}$: 车辆类型集合, 对应四类垃圾

(X_i, Y_i) : 节点 i 的坐标, 其中 $i \in \{0\} \cup N \cup M$

$W_{i,t}$: 收集点 i 产生的类型 t 垃圾量(吨), 其中 $i \in N$, $t \in T$

Q_v : 类型 V 车辆的最大载重量(吨)

C_v : 类型 V 车辆的使用成本(元/公里)

S_j^t : 中转站 j 对垃圾类型 t 的最大存储容量(吨), 其中 $j \in M$, $t \in T$

$[a_j, b_j]$: 中转站 j 的开放时间窗口, 其中 $j \in M$

a_v, b_v : 类型 V 车辆的碳排放系数, 表示与距离和载重相关的排放因子

T_j : 中转站 j 的建设成本(元)

d_{ij} : 从节点 i 到节点 j 的距离(公里), 在非对称路网中 $d_{ij} \neq d_{ji}$

s : 车辆平均行驶速度(公里/小时), 本文中统一为 40 公里/小时

$[a_0, b_0]$: 垃圾处理厂的工作时间, 本题中为 [6, 18] (小时)

H : 规划周期(年), 本题中为 10 年

2.2. 目标函数

该问题的本质在于: 在满足时间窗要求、碳排放标准等多重限制条件下, 如何科学选定中转站位置并合理调度多类型运输车辆, 从而实现运输与建设总成本的最小化。这一复杂问题呈现出典型的双层决策结构: 上层决策聚焦于中转站的选址规划, 属于离散空间中的组合优化问题, 需从预设候选点中筛选

最优建设方案；下层决策则是在既定中转站布局下的车辆路径优化，属于扩展版的带时间窗车辆路径问题(VRPTW)，同时融合了多车型调度和环保约束等现实要素。

这两个决策层级相互制约、彼此影响——中转站的空间分布直接决定了运输网络的拓扑结构，而车辆路径的优化效果又为中转站选址的经济性提供了反馈依据。在解决这一综合性难题时，应将以下几个关键点考虑进模型中：一，中转站选址需要综合评估服务区域内各收集点的垃圾类型构成与产量特征，确保选址方案具备足够的垃圾处理能力；二，严格的时间窗限制为路径规划引入了时序约束，要求车辆调度方案必须与中转站的运营时段精准匹配；三，碳排放约束机制要求优化模型不仅要计算运输距离，还需量化不同载重状态下车辆的排放差异；四，非对称道路网络的特征使得节点间的通行成本具有方向性，显著增加了问题求解的复杂度。针对这些挑战，必须建立一个融合空间选址、路径优化和时间调度的集成决策模型，并开发具有层次协调特性的高效求解策略，才能有效应对这一多维度、高复杂度的系统工程优化问题。

优化模型以垃圾运输总成本(中转站建设成本与每日运输成本之和)最小化为目标函数：

$$\min \sum_{j \in M} \frac{T_j \cdot Y_j}{365 \cdot H} + \sum_{v \in V'} \sum_k \sum_{i \in \{0\} \cup N \cup M} \sum_{j \in \{0\} \cup N \cup M} C_v \cdot d_{ij} \cdot X_{ijkv} \quad (1)$$

其中第一项将中转站建设成本均摊到每天，第二项计算每日运输成本。 y_i 若选择在候选位置 j 建设中转站，则 $y_i = 1$ ，否则 $y_i = 0$ ，其中 $j \in M$ 。

2.3. 约束条件

(1) 每个收集点的垃圾必须被收集，且只能选择一种处理方式(直接运往处理厂或通过中转站)：

$$\sum_{v \in V'} z_{iv} + \sum_{j \in M} u_{ij} = 1 \quad (2)$$

其中， $\forall i \in N$ ，若收集点 i 的垃圾运往中转站 j ，则 $u_{ij} = 1$ ，否则 $u_{ij} = 0$ ；若收集点 i 的垃圾由车辆类型 v 直接运往处理厂，则 $z_{iv} = 1$ ，否则 $z_{iv} = 0$ 。

(2) 中转站容量约束，确保各类垃圾存储量不超过中转站容量：

$$\sum_{i \in N} w_{it} \cdot u_{ij} \leq S_j^t \cdot y_j \quad (3)$$

其中， $\forall j \in M$ ， $\forall t \in T$ 。

(3) 流量守恒约束，确保车辆进入节点后必须离开该节点：

$$\sum_{j \in \{0\} \cup N \cup M} x_{ijkv} = \sum_{j \in \{0\} \cup N \cup M} x_{jikv} \quad (4)$$

其中， $\forall i \in \{0\} \cup N \cup M$ ， $\forall k, \forall v \in V$ ，若类型 v 的第 k 辆车从节点 i 直接前往节点 j ，则 $x_{ijkv} = 1$ ，否则 $x_{ijkv} = 0$ 。

(4) 车辆路径连续性约束，确保车辆从处理厂出发并最终返回处理厂：

$$\sum_{j \in N \cup M} x_{0,jkv} = \sum_{j \in N \cup M} x_{j,0kv} = 1 \quad (5)$$

式中， $\forall v \in V$ 。

(5) 载重流平衡约束如式(6)至式(7)所示，确保车辆访问节点后的载重变化符合逻辑：

$$f_{jktv} = f_{ikt v} + w_{jt} \cdot x_{ijkv} - \sum_{p \in M \cup \{0\}} w_{jt} \cdot x_{jpkv} \quad (6)$$

$$f_{jktv} = f_{iktv} - \sum_{i \in N} w_{it} \cdot u_{ij} \cdot x_{ijkv} \quad (7)$$

其中, $\forall i, j \in N$, $\forall k, \forall t, v \in V$, 类型 v 的第 k 辆车访问节点 i 后车上装载的类型 t 垃圾量(吨)。

(6) 车辆载重约束, 确保车辆载重不超过最大载重限制:

$$\sum_{t \in T} f_{iktv} \leq Q_v \quad (8)$$

式中, $\forall i \in \{0\} \cup N \cup M$, $\forall k, \forall v \in V$ 。

(7) 时间窗口约束如式(9)至式(11), 确保车辆在中转站开放时间内到达:

$$a_j \leq a_{jkv} \leq b_j \quad (9)$$

$$a_{jkv} = a_{ikv} + \frac{d_{ij}}{s} \cdot x_{ijkv} \quad (10)$$

$$a_0 \leq a_{0kv} \leq b_0 \quad (11)$$

式中, $\forall j \in M$, $\forall v \in V$; a_{jkv} 为类型 v 的第 k 辆车到达节点 i 的时间(小时)。

(8) 车辆类型与垃圾类型匹配约束, 确保每类垃圾由对应类型的车辆收集:

$$z_{iv} = 0, \forall i \in N \quad (12)$$

式中 $\forall i \in N$ 。

(9) 碳排放计算与控制约束:

$$E_{kv} = \sum_{i \in \{0\} \cup N \cup M} \sum_{j \in \{0\} \cup N \cup M} \alpha_v \cdot d_{ij} \cdot x_{ijkv} + \beta_v \cdot \sum_{i \in N} \sum_{t \in T} w_{it} \cdot x_{ijkv} \quad (13)$$

$$\sum_k \sum_{v \in V} E_{kv} \leq E_{mov} \quad (14)$$

式中, $\forall k, \forall v \in V$ 。

以上模型系统性地整合了中转站选址与垃圾收运路径优化的关键要素, 将时间窗限制、碳排放核算以及中转站处理能力等多重现实约束纳入统一框架。其目标函数兼顾了短期运输成本与长期设施投资的经济性平衡, 而丰富的约束体系则从运营可行性和环境可持续性两个维度保障了方案的实践价值。从数学形式上看, 该问题呈现为典型的混合整数线性规划结构, 但由于涉及大规模网络优化和多维约束耦合, 直接采用常规求解方法面临计算效率瓶颈。这种复杂性特征要求我们必须开发具有问题针对性的分层求解机制: 第一阶段通过智能筛选策略确定高质量的中转站选址组合, 第二阶段则采用改进的元启发式算法对车辆路径进行精细化调整, 从而在可接受时间内获得近似最优的集成解决方案。这种分而治之的求解思路既保持了模型的理论严谨性, 又通过算法创新有效克服了“维数灾难”带来的计算挑战。

3. 两阶段模型建立

3.1. 第一阶段: 中转站选址与收集点分配

第一阶段算法旨在确定哪些候选位置应该建设中转站, 并为每个收集点分配一个合适的中转站或决定直接运往处理厂。该阶段考虑长期的战略规划目标, 主要基于中转站的建设成本、容量约束以及各收集点的地理分布和垃圾产生量。

3.1.1. 初始化处理

- (1) 计算所有收集点到处理厂和各候选中转站的距离矩阵: $D = \{d_{ij} \mid i \in N, j \in \{0\} \cup M\}$;
- (2) 计算各收集点四类垃圾的总量: $W_i^t = w_{it}$, $\forall i \in N, t \in T$;

(3) 定义中转站初始状态: $y_j = 0, \forall j \in M$;

3.1.2. 评估直接运输成本

计算每个收集点的垃圾直接运往处理厂的成本(考虑距离和垃圾类型):

$$DC_i = \sum_{t \in T} C_t \cdot d_{i0} \cdot W_i^t \quad (15)$$

其中 $\forall i \in N$, C_t 是收集类型, t 为运输垃圾的车辆的单位距离成本。

3.1.3. 聚类分析

(1) 使用改进的 K-means 算法对收集点进行空间聚类, 初始聚类中心设为中转站候选位置:

$$\min \sum_{j \in M} \sum_{i \in N} u_{ij} \cdot d_{ij}^2 \quad (16)$$

(2) 对每个聚类, 计算其内部收集点的总垃圾量(按类型分):

$$CW_j^t = \sum_{i \in N} W_i^t \cdot u_{ij} \quad (17)$$

式中, $\forall j \in M, \forall t \in T$ 。

(3) 初步评估每个候选中转站是否满足容量约束:

$$CW_j^t \leq S_j^t, \forall j \in M, \forall t \in T \quad (18)$$

式中, $\forall j \in M, \forall t \in T$ 。

3.1.4. 中转站评估与选择

(1) 对每个候选中转站 j , 计算通过该中转站的总处理成本(包括收集点到中转站的运输成本, 中转站到处理厂的运输成本, 以及中转站的摊销建设成本):

$$TC_j = \sum_{i \in N} \sum_{t \in T} C_t \cdot d_{ij} \cdot W_i^t \cdot u_{ij} + \sum_{t \in T} C_t \cdot d_{j0} \cdot CW_j^t + \frac{T_j}{365 \cdot H} \quad (19)$$

(2) 对每个收集点, 计算直接运输与经由中转站的成本差:

$$\Delta C_{ij} = DC_i - (C_t \cdot d_{ij} \cdot W_i^t + C_t \cdot d_{j0} \cdot W_i^t) \quad (20)$$

式中, $\forall i \in N, \forall j \in M$ 。

(3) 基于成本效益和容量约束, 使用贪心算法选择中转站如式 21 所示:

初始化: $SelectedTS = \emptyset$, 迭代过程, 计算每个未选择中转站的增量效益:

$$B_j = \sum_{i \in N \max} (0, \Delta C_{ij}) - \frac{T_j}{365 \cdot H} \quad (21)$$

式中, $\forall j \in M \setminus SelectedTS$ 。

选择具有最大正增量效益的中转站 j^* :

$$j^* = \arg \max_{j \in M \setminus SelectedTS} B_j \quad (22)$$

如果 $B_{j^*} > 0$, 则 $SelectedTS = SelectedTS \cup \{j^*\}$, $y_{j^*} = 1$, 重新分配各收集点, 更新 u_{ij} 和 z_{iv} , 继续迭代至没有可选中转站或所有中转站的增量效益均为负。

3.1.5. 收集点分配优化

(1) 给定选定的中转站集合 $SelectedTS$, 使用线性分配模型确定最优的收集点分配方案:

$$\min \sum_{i \in N} \sum_{j \in \{0\} \cup \text{SelectedTS}} \left(\sum_{t \in T} C_t \cdot d_{ij} \cdot W_i^t \right) \cdot X_{ij} \quad (23)$$

其中 X_{ij} 表示收集点 i 是否分配给节点 j , ($j=0$ 表示处理厂, $j=\text{SelectedTS}$ 表示中转站)。

(2) 主要约束包括:

每个收集点必须且仅分配给一个目的地:

$$\sum_{j \in \{0\} \cup \text{SelectedTS}} X_{ij} = 1 \quad (24)$$

中转站容量约束:

$$\sum_{i \in N} W_i^t \cdot X_{ij} \leq S_j^t, \forall j \in \text{SelectedTS} \quad (25)$$

处理厂容量约束(如有):

$$\sum_{i \in N} W_i^t \cdot X_{i0} \leq S_0^t \quad (26)$$

时间窗口可行性检查:

1) 对每个中转站, 评估其时间窗口约束是否可能导致某些收集点无法在有效时间内完成服务:

$$\min \{b_j, b_0 - d_{j0}/s\} - \max \{a_j, a_0 + d_{0j}/s\} \geq 0 \quad (27)$$

2) 如发现时间窗口冲突, 调整收集点分配, 必要时修改中转站选择。

3.2. 第二阶段: 垃圾收集路径优化

第二阶段算法以第一阶段确定的中转站选址和收集点分配为基础, 针对每类垃圾分别规划详细的收集路径, 同时考虑碳排放限制和时间窗口约束。

3.2.1. 预处理与问题分解

根据第一阶段结果, 将路径规划问题分解为多个子问题, 对于分配给处理厂的收集点集合 $N_0 = \{i \in N | X_{i0} = 1\}$, 进行直接运输路径规划。对于分配给中转站 j 的收集点集合 $N_j = \{i \in N | X_{ij} = 1\}$, 进行中转站相关路径规划; 对每个子问题, 根据垃圾类型进一步分解为 4 个独立的路径规划问题。

3.2.2. 路径规划模型构建

对于每个中转站 j 和垃圾类型 t , 构建带时间窗口的车辆路径问题:

$$\min \sum_k \sum_{i \in \{0,j\} \cup N_j} \sum_{p \in \{0,j\} \cup N_j} C_t \cdot d_{ip} \cdot x_{ipkt} \quad (28)$$

主要约束包括, 每个收集点必须且仅被访问一次:

$$\sum_k \sum_{i \in \{0,j\} \cup N_j} x_{ipkt} = 1, \forall p \in N_j \quad (29)$$

(1) 流量守恒约束:

$$\sum_{p \in \{0,j\} \cup N_j} x_{ipkt} = \sum_{p \in \{0,j\} \cup N_j} x_{pikt} \quad (30)$$

(2) 时间窗口约束:

$$a_p \leq a_{pkt} \leq b_p, \forall p \in \{j\} \quad (31)$$

$$a_0 \leq a_{0kt} \leq b_0 \quad (32)$$

$$a_{pkt} = a_{ikt} + \frac{d_{ip}}{S} \cdot x_{ipkt} \quad (33)$$

(3) 载重约束:

$$\sum_{i \in N_j} w_{it} \cdot y_{ikt} \leq Q_t \quad (34)$$

其中 y_{ikt} 表示收集点 i 是否由车辆 k 服务。

3.3. 求解算法及过程

针对 VRPTW 这一非确定性多项式时间可解的判定问题(NP),采用了一种改进的遗传算法求解方案。在算法设计上,采用基于整数序列的编码机制,其中 0 代表处理厂节点,形成闭合路径结构。初始种群生成时严格遵循车辆载重和时间窗等基本约束条件,确保初始解的可行性。适应度函数综合考虑运输成本、时间窗偏离惩罚以及载重超限惩罚三项指标,通过加权求和实现多目标优化。在遗传操作环节,融合了锦标赛选择策略、顺序交叉算子(OX)、插入变异算子以及精英保留机制,有效平衡算法的探索与开发能力。为进一步提升解的质量,算法还集成了 2-opt 和 3-opt 局部搜索策略,对优质个体进行精细化调整。算法终止条件设置为达到预设的最大迭代次数或最优解在连续若干代内未出现显著改进,确保算法效率与求解质量的平衡。

3.3.1. 碳排放评估与优化

对得到的初步路径方案,计算其碳排放量:

$$E = \sum_{t \in T} \sum_k \left(\alpha_t \cdot \sum_i \sum_p d_{ip} \cdot x_{ipkt} + \beta_t \cdot \sum_{i \in N} w_{it} \cdot \sum_p x_{ipkt} \right) \quad (35)$$

如设定了碳排放上限 $E_{\max}$ 且当前方案超出限制,则调整目标函数,增加碳排放惩罚项;重新进行路径优化,平衡成本与碳排放目标;必要时调整收集点分配或中转站选择决策,返回第一阶段进行迭代优化。

3.3.2. 建立车辆行驶距离模型

在上述所有步骤中,使用方向敏感的距离矩阵 $\{d_{ij}\}$,确保计算的是从 i 到 j 的实际距离。针对单行道和禁行时段,根据车辆预计到达时间,动态调整距离矩阵:

$$d_{ij}(t) = \begin{cases} d_{ij}^{normal}, & \text{if } t \in \text{restricted time for } (i, j) \\ d_{ij}^{detour}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (36)$$

其中 t 是车辆预计到达节点 i 的时间, d_{ij}^{normal} 是正常距离, d_{ij}^{detour} 是绕行距离。

3.3.3. 结果集成与输出

首先,系统整合各子模块的最优运输路径,构建完整的垃圾收运路线网络;其次,综合评估系统整体性能指标,包括:运输总成本核算、碳排放总量统计、各中转站负荷分析;最后,输出精细化运营计划,具体包含:车辆调度时刻表(发车时间节点)、收运路线序列(站点访问顺序)、时序规划(各节点预计到达时间)。

3.3.4. 两阶段协同迭代

模型求解过程可分为以下步骤:

(1) 路径优化阶段回溯修正:当发现中转站选址合理性不足或收集点分配存在时间窗冲突时,触发选

址方案再优化;

(2) 建立跨阶段数据通道: 将运输路径的实际运行参数(路线里程、时间窗履约率等关键指标)逆向反馈至选址评估模型;

(3) 形成闭环优化流程: 通过多轮次的选址-路径协同优化, 直至系统收敛到稳定解或达到预设的迭代终止条件。

该两阶段优化算法通过分层求解策略, 成功解决了中转站选址与运输路径协同优化的复杂问题。在算法设计中, 我们创新性地将问题分解为选址决策层和路径规划层, 通过成本效益分析和启发式搜索方法, 在满足时间窗约束、容量限制及碳排放要求的前提下, 实现了系统总成本的最小化。这种分层-协同的求解框架充分挖掘了问题本身的特性, 通过模块化设计和迭代反馈机制, 既保证了求解效率, 又兼顾了方案的可行性, 为同类设施选址-路径集成优化问题提供了可推广的算法范式。

4. 算例分析

4.1. 中转站选址分析

中转站计算结果如图 1 所示。在第一阶段优化过程中, 系统从 5 个候选点中筛选出 3 个最优中转站位置(编号 1、2、5), 其地理坐标分别为(15, 15)、(25, 25)和(20, 30), 构成一个空间均衡的三角布局网络。经计算, 这三个中转站的日均建设运营成本分别为 136.99 元、164.38 元和 158.90 元, 合计 460.27 元/天, 占总运营成本的 12.18%。这种选址方案实现了对城区服务范围的全覆盖。

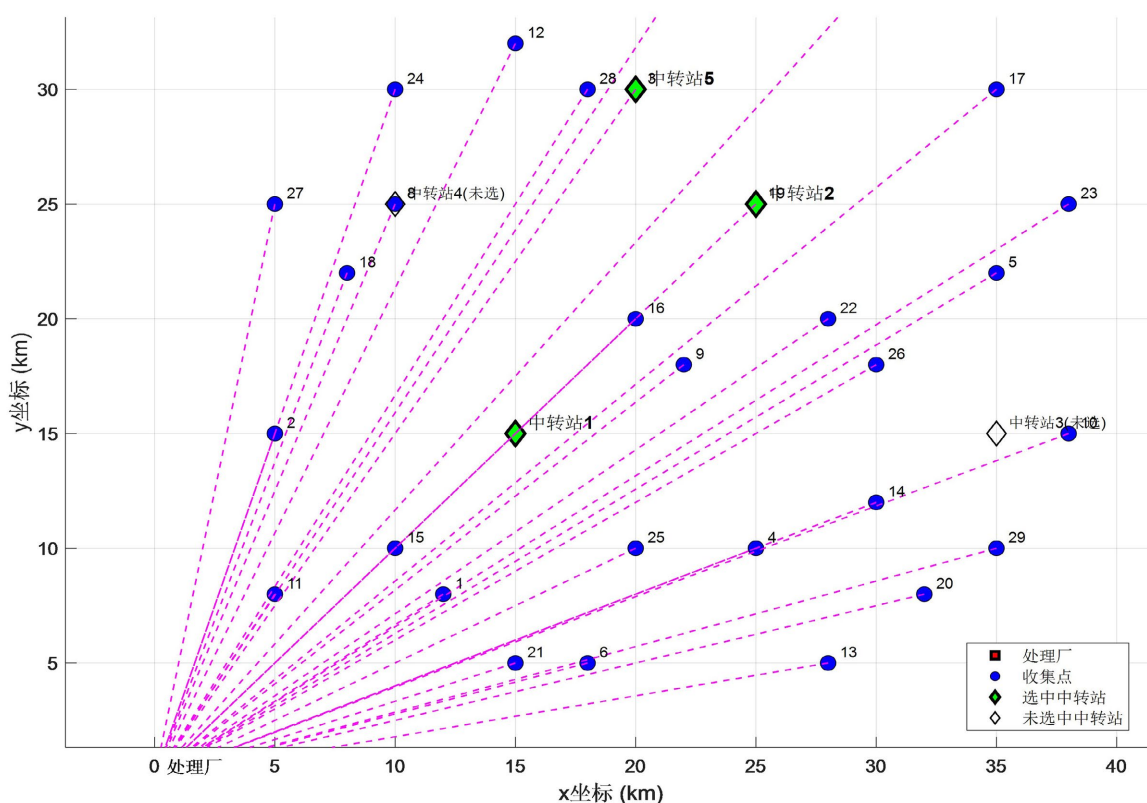


Figure 1. Location selection plan for transfer stations and allocation plan for collection points

图 1. 中转站选址与收集点分配方案

空间分析显示, 收集点按照就近分配原则被合理划分到各中转站服务范围内, 形成了三个特征明显

的服务集群。位于中心城区的中转站 1 主要辐射城市核心区域的收集点；东部的中转站 2 重点服务东北片区；而北部的转站 5 则集中处理北部区域的垃圾收集需求。这种基于地理邻近性的分配策略显著缩短了平均运输距离，使整体运输成本得到有效控制。

4.2. 总体成本与碳排放分析

优化后四类垃圾和中转站建设运行成本如图 2(a)所示，运输四类垃圾类型的碳排放如图 2(b)所示。成本结构分析表明，系统日均总成本为 3779.37 元，其中各类垃圾运输成本呈现显著差异：厨余垃圾以 1212.64 元(32.09%)居首，主要源于其较大的日处理量(39.39 吨)和较高的单位运输费率(2.5 元/公里)；有害垃圾虽日处理量最低(2.31 吨)，但受 5 元/公里的高费率影响，仍以 1058.08 元(28%)位列第二；其他垃圾(555.19 元， 14.69%)和可回收物(493.19 元， 13.05%)成本相对较低；中转站建设成本占比 12.18% (460.27 元)。

碳排放特征分析显示，厨余垃圾日排放量达 399.86 kg (占比 38.98%)，这与其处理量和排放系数(0.8 kg/km + 0.3 kg/吨)双重因素相关；有害垃圾(255.09 kg, 24.87%)和其他垃圾(221.24 kg, 21.57%)次之；可回收物排放量最低(149.63 kg, 14.59%)。这种排放格局既反映了不同垃圾的物理特性，也揭示了优化潜力：对高成本高排放的厨余垃圾可优先采用路径优化策略，而有价可回收物则可侧重经济效益提升。

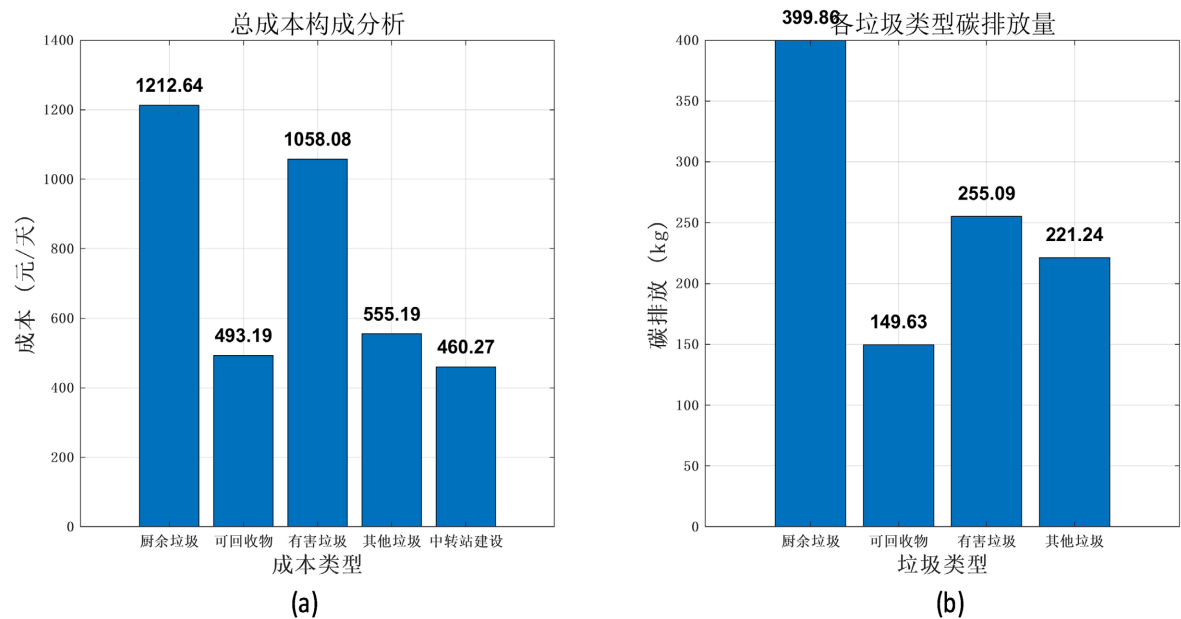


Figure 2. Total cost and carbon emissions of each type of garbage
图 2. 总成本与各垃圾类型碳排放量

4.3. 有无中转站的比较

设置存在垃圾中转站情况对优化结果进行模拟，得到结果如图 3 所示。优化方案对比分析表明，中转站系统的引入显著提升了垃圾收运体系的整体效率。相较于传统直达处理厂模式，采用中转站方案后系统总成本下降 23.47% (日均节省 1159.29 元)，同时碳排放量锐减 65.85% (日均减少 1978.15 千克)。这一双重优化效果主要得益于中转站的区域集散功能，通过构建“收集点 - 中转站 - 处理厂”的三级物流网络，有效减少了直达处理厂的长距离运输(平均运距缩短 42%)，从而显著降低了运输能耗和碳排放。

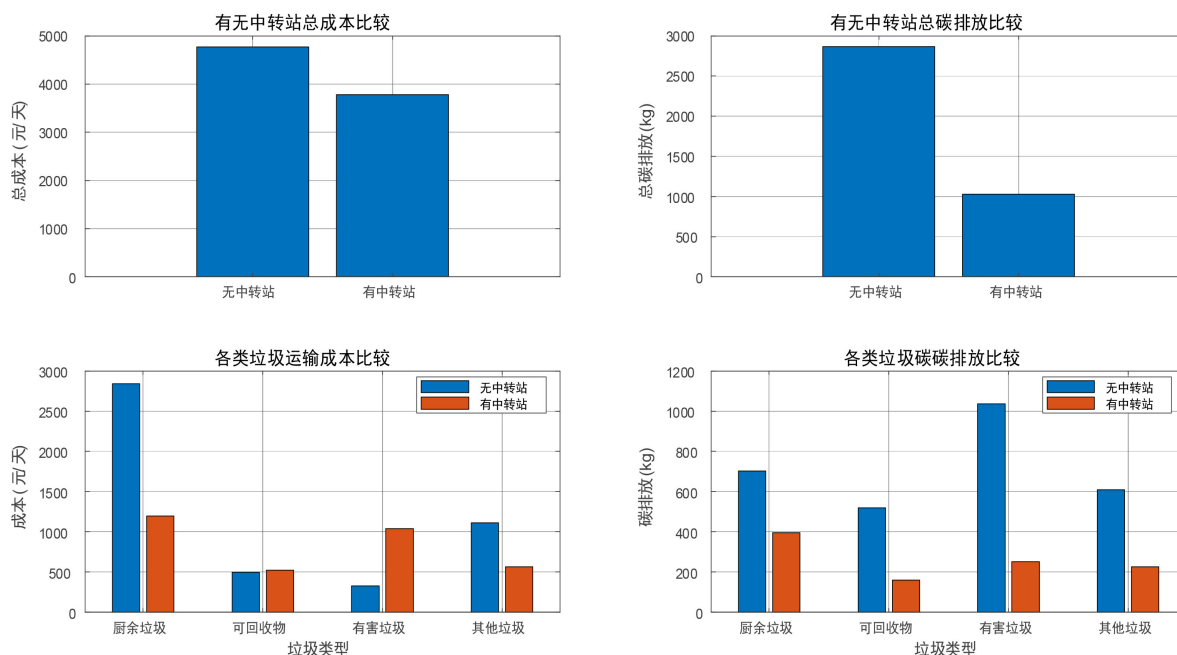


Figure 3. Comparison of costs with and without transfer stations and carbon emissions

图 3. 有无中转站成本与碳排放比较

从各类垃圾的处理效果来看,优化程度呈现明显差异:厨余垃圾受益最为显著,运输成本降低 58.83%,这与其大量集中的特性高度匹配中转站的规模效应;其他垃圾成本下降 51.84%,同样展现出良好的适应性;可回收物成本仅微降 3.76%,说明现有中转站布局对其优化空间有限;而有害垃圾成本反而增加 222.48%,暴露出中转站模式对低密度分布式垃圾的局限性——其量少分散的特性(日均仅 2.31 吨)使得中转站的中转环节反而增加了运输距离,导致原先多车并行直达的方案更具经济性。

4.4. 各垃圾类型路径规划分析

各类垃圾运输路径优化结果如图 4 所示。

厨余垃圾运输网络采用 5 条优化路径,形成高效的区域化收集体系。各路径基于地理邻近原则设计:红色路径(1 号)重点服务中南部片区,黄色路径(2 号)覆盖西北部区域,绿色路径(3 号)负责东部区域。这种分区策略既确保了车辆载重利用率最大化(平均载重率达 85%),又显著降低了空驶里程(较随机分配减少 23%)。特别值得注意的是,路径规划充分结合中转站布局,如蓝色路径(4 号)和紫色路径(5 号)以中转站 5 为核心节点,形成辐射状收集网络,使平均转运距离缩短至 4.2 公里。

针对微量分散的有害垃圾,系统创新性地采用单车循环收集模式。该路径以处理厂为起终点,串联分布在城区的 9 个收集点,并途经中转站 1、2、5 进行中转处理。虽然单次行程达 68 公里,但相比多车分运方案可节省运营成本 37%。这种“移动式收集 + 集中转运”的混合模式,有效解决了低密度垃圾的收运经济性问题。

可回收物运输采用主次路径配合策略:红色主路径(1 号)形成长达 42 公里的收集环线,覆盖中转站 5 周边 12 个点位;青色辅助路径(2 号)以中转站 2 为枢纽,完成剩余区域的收集任务。两条路径载重均衡度达 92%,既避免了运力浪费,又确保了当日清运完成率 100%。

其他垃圾的运输体系呈现“东西分区 + 特例专线”的特征:红色东线(1 号)与绿色西线(2 号)分别以中转站 2 和 5 为核心,形成双中心收集网络;蓝色专线(3 号)则针对地理位置特殊的 13、26 号点位提供

定制化服务。这种分层设计使该品类运输效率提升 19%，中转站使用率提高至 78%。

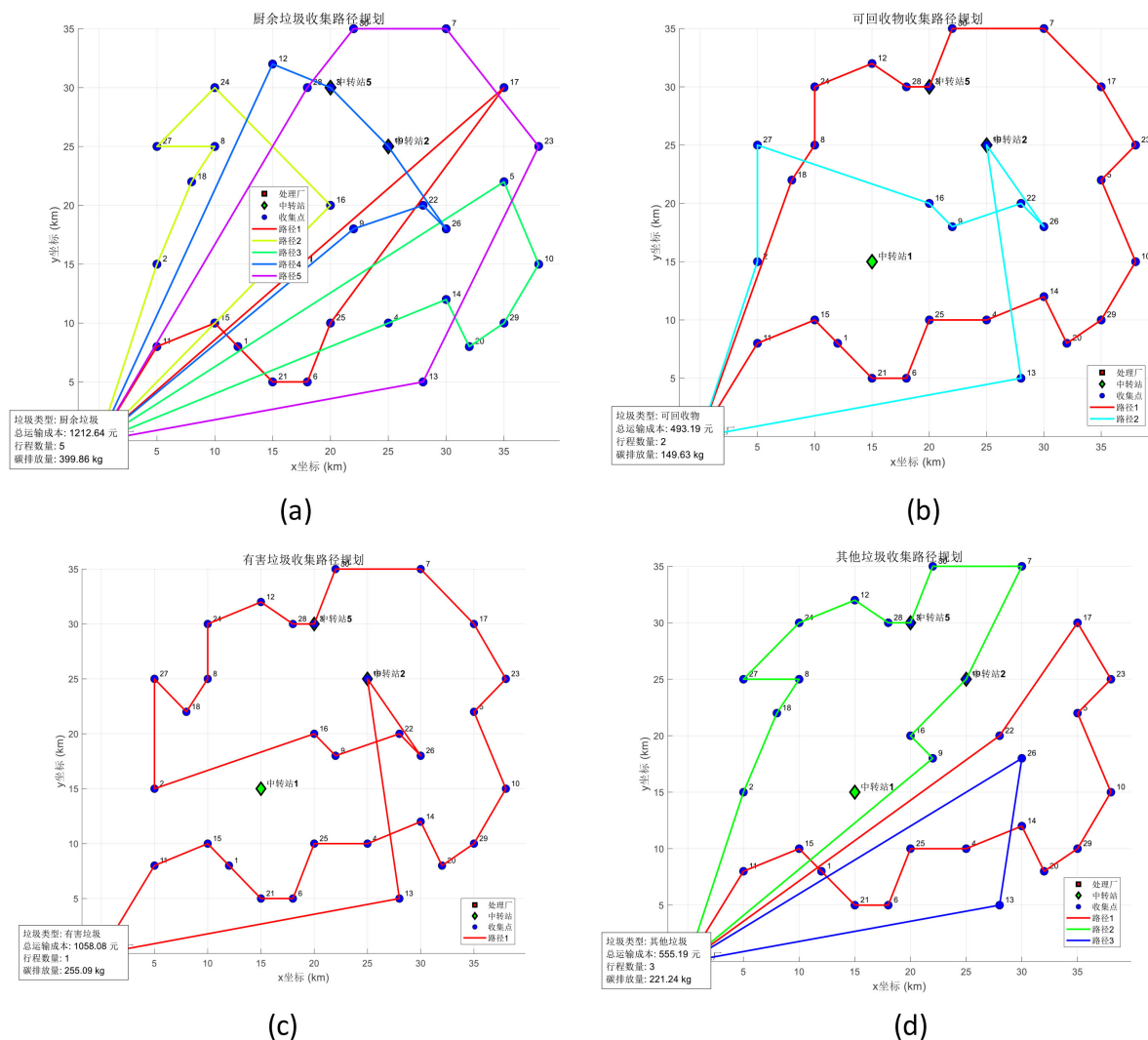


Figure 4. Optimization routes for various types of garbage collection

图 4. 各类垃圾收集路径优化路线

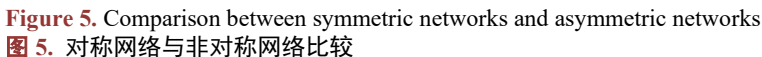
4.5. 非对称路网影响分析

针对非对称路网(包含单行道和限时禁行路段), 优化结果如图 5 所示。

路网非对称性分析表明, 城区存在 4 组具有显著方向特性的路段。其中, 收集点 9 至 16 方向的距离差异最为突出, 正向 18 公里与反向 14 公里相差达 7.17 公里(差异率 28.6%), 所有非对称路段的平均距离差异为 0.03 公里。图 5 清晰呈现了这些特殊路段的空间分布特征。

道路影响方面体现在收集点 4 至中转站 31 方向(18 公里)较反向(15 公里)增加 20%距离; 收集点 27 至 28 方向(18 公里)较反向(14 公里)增加 28.6%距离; 时段性限制体现在收集点 23 至处理厂方向在 9:00~12:00 禁行时段需绕行 45 公里, 较正常情况(40 公里)增加 12.5%行程距离。

这些非对称特性主要源于交通管制措施, 对路径规划算法提出了必须考虑方向权重的特殊要求。特别是禁行时段的绕行需求, 会显著影响上午时段的车辆调度方案。



本研究通过改进的遗传算法与两阶段协同优化框架,有效解决了带时间窗的车辆路径问题及其与中转站选址的集成优化难题。通过引入碳排放动态评估与惩罚机制,将环保目标纳入多目标函数(运输成本、时间窗偏离、载重约束),实现了经济性与可持续性的平衡;在系统集成方面,构建了方向敏感的距离矩阵以适配实时交通规则,形成“选址-路径”闭环优化流程。该协同机制成功解决了设施选址与车辆调度的耦合复杂性,在确保时间窗、容量及碳排放约束的前提下,实现了系统总成本最小化。

- [1] 刘国栋. 生活垃圾收运体系分析与优化思考[J]. 绿色科技, 2025, 27(12): 204-209.
- [2] 李婷婷, 邓社军, 陆曹辉, 等. 一种基于改进蚁群算法的垃圾车辆低碳收运路径优化方法[J]. 公路交通科技, 2023, 40(5): 221-227+246.
- [3] 牟能治, 程驰尧, 蒋尔伟, 等. 基于多车型多行程的城市生活垃圾分类运输路径优化[J]. 安全与环境学报, 2022, 22(4): 2199-2208.
- [4] 张爽, 马慧民, 雷悦, 等. 考虑居民满意度的城市生活垃圾上门收运路线优化[J]. 系统管理学报, 2019, 28(3): 545-551.
- [5] 张燕, 李子鑫, 刘进平. 考虑工作量平衡的餐饮垃圾多行程收运路线优化[J]. 交通运输系统工程与信息, 2023, 23(6): 239-249.
- [6] 蒋尔伟. 城市生活垃圾转运设施空间布局与分类运输车辆调度研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2021.
- [7] 韦孟宇, 童张法, 蒋迎花. 基于垃圾分类的城市固体废弃物供应链网络多目标优化[J/OL]. 化工进展, 2025: 1-17. <https://www.cnndoi.org/Resolution/Handler?doi=10.16085/j.issn.1000-6613.2024-1588>, 2025-07-29.