

城市垃圾分类运输的多目标优化模型与混合启发式算法

——基于中转站选址与碳排放约束的路径调度研究

王佳翔, 罗亦凡, 何琪, 郭俊*

成都信息工程大学应用数学学院, 四川 成都

收稿日期: 2026年4月27日; 录用日期: 2026年5月22日; 发布日期: 2026年5月29日

摘要

针对城市垃圾分类收集与运输过程中的多约束路径优化问题, 本文构建集成运输成本、中转站建设成本与碳排放的多目标综合优化模型, 统一纳入车辆载重、容积、行驶时间、中转站容量及非对称路网等现实约束。设计遗传算法与贪心策略融合的两阶段混合启发式算法进行求解: 第一阶段基于贪心规则完成收集点至中转站的分配; 第二阶段采用带约束的路径优化策略实现全局调度优化。针对模型的组合优化特性, 通过分配优化与路径优化的协同机制提升求解效率与精度。基于30个收集点与5个候选中转站的算例实验结果显示, 算法能够快速获得高质量可行解, 优化后的调度方案在运输成本、碳排放与行驶时间等指标上均表现良好, 验证了模型的合理性与算法的有效性, 可为同类路径优化问题提供参考。

关键词

城市垃圾运输, 路径优化, 遗传算法, 贪心算法, 中转站选择, 碳排放控制

Multi-Objective Optimization Model and Hybrid Heuristic Algorithm for Urban Waste Transportation

—Path Scheduling Research Based on Transfer Station Location and Carbon Emission Constraints

Jiexiang Wang, Yifan Luo, Qi He, Jun Guo*

College of Applied Mathematics, Chengdu University of Information Technology, Chengdu Sichuan

*通讯作者。

文章引用: 王佳翔, 罗亦凡, 何琪, 郭俊. 城市垃圾分类运输的多目标优化模型与混合启发式算法[J]. 应用数学进展, 2026, 15(5): 572-583. DOI: 10.12677/aam.2026.155252

Abstract

Aiming at the multi-constrained path optimization problem in the classified collection and transportation of urban municipal solid waste, this paper constructs a multi-objective comprehensive optimization model integrating transportation cost, transfer station construction cost and carbon emission. The model uniformly incorporates practical constraints such as vehicle load, volume, travel time, transfer station capacity and asymmetric road network. A two-stage hybrid heuristic algorithm combining genetic algorithm and greedy strategy is designed to solve the problem. In the first stage, the allocation from collection points to transfer stations is completed based on the greedy rule. In the second stage, the constrained path optimization strategy is used to realize global scheduling optimization. For the combinatorial optimization characteristics of the model, the solution efficiency and accuracy are improved through the collaborative mechanism of allocation optimization and path optimization. The experimental results based on 30 collection points and 5 candidate transfer stations show that the algorithm can quickly obtain high-quality feasible solutions. The optimized scheduling scheme performs well in transportation cost, carbon emissions and travel time, which verifies the rationality of the model and the effectiveness of the algorithm, and can provide a reference for similar path optimization problems.

Keywords

Urban Waste Transportation, Path Optimization, Genetic Algorithm, Greedy Algorithm, Transfer Station Location, Carbon Emission Control

Copyright © 2026 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

随着我国城镇化水平不断提升,城市生活垃圾产生量持续增加,垃圾分类收集、运输与处理已成为城市环境治理的重要内容。实际上,在垃圾分类运输系统中,垃圾收集点分散、垃圾类型多样、车辆载重与容积受限、行驶时间存在上限等问题突出,传统依靠经验的调度模式易造成路径冗长、车辆利用率低、成本偏高、碳排放过量等问题[1],难以满足精细化、智能化管理需求。

车辆路径问题(VRP)自提出以来,一直是物流调度与组合优化领域的研究热点。早期研究主要针对带容量约束的CVRP模型,以最短行驶距离或最小运输成本为单一目标,采用精确算法或经典启发式算法进行求解。随着问题规模不断扩大,遗传算法、蚁群算法、模拟退火等元启发式算法逐渐成为主流[2],能够在合理时间内获得高质量可行解。

在垃圾收运方向,尽管现有研究已取得较多成果,但仍存在一定局限:多数模型仅针对单一垃圾类型展开,较少考虑厨余、可回收物、有害垃圾、其他垃圾的分类协同运输[3];部分研究将中转站选址、路径优化、碳排放控制独立处理,未能形成统一的综合优化模型;在算法设计上,将贪心分配与遗传算法相结合、并适配非对称路网与多重工程约束的两阶段混合启发式算法仍相对有限。

为此,本文针对城市垃圾分类运输系统,构建集成运输成本、中转站建设成本与碳排放的多目标综

合优化模型, 统一纳入车辆载重、容积、每日最大行驶时间、中转站容量及非对称路网等现实约束[4]。设计遗传算法与贪心策略融合的两阶段混合启发式算法, 第一阶段完成收集点至中转站的分配优化, 第二阶段实现车辆路径优化。通过 30 个收集点与 5 个候选中转站的算例验证, 所提模型与算法能够有效获得可行调度方案, 可为城市垃圾智能收运提供理论参考与方法支撑。

2. 研究基础

2.1. 车辆路径问题与垃圾收运优化

车辆路径问题(VRP)是物流调度与组合优化领域的经典 NP-hard 问题, 其核心是在满足车辆载重、服务需求等约束下, 规划最优行驶路径, 使总距离或总成本最小。带容量约束的车辆路径问题(CVRP)是垃圾收运场景中最常用的基础模型, 要求每条路径的总负载不超过车辆最大载重, 适用于单车型、单类垃圾的基础路径优化[5]。

在城市垃圾分类运输中, 问题进一步扩展为多类型垃圾、多车辆、多约束的复杂调度问题。本文采用分类解耦、独立求解、并行调度的多类型垃圾协同机制, 将厨余垃圾、可回收物、有害垃圾、其他垃圾的运输任务, 拆解为 4 个相互独立的带容量约束车辆路径问题(CVRP)子问题, 每类垃圾配置专用运输车辆, 独立开展收集点分配与路径规划, 四类运输任务互不干扰、互不交叉, 从底层实现分类收运与专车专运。

2.2. 多目标优化理论

多目标优化的核心是同时优化多个相互冲突的目标函数, 通常不存在唯一最优解, 而是通过帕累托最优解集或目标加权法获得折中可行解[3]。本文以运输成本、中转站建设成本、碳排放为三大优化目标: 运输成本与行驶距离、车辆类型相关; 中转站建设成本为固定投入, 与选址决策直接相关; 碳排放则与行驶距离、运载质量密切相关。三者共同构成多目标优化体系, 实现经济与环境效益的协同。

2.3. 碳排放量化与绿色路径优化

在现代城市治理中, 低碳环卫已经成为一个重要方向, 碳排放是垃圾收运优化的关键环境指标。在路径优化中, 碳排放通常由两部分组成: 车辆行驶产生的单位距离碳排放, 以及垃圾运输产生的单位质量碳排放。本文将碳排放纳入优化目标, 能够在控制成本的同时降低污染排放, 使调度方案更符合绿色发展要求。在非对称路网、时间约束等真实条件下, 碳排放与路径长度、负载率高度相关, 合理的优化模型可有效实现降碳目标[1]。

2.4. 启发式与混合启发式算法

针对垃圾运输这类大规模 NP-hard 组合优化问题, 精确算法难以在合理时间内求得最优解, 启发式与混合启发式算法成为主流求解手段——遗传算法具备较强的全局搜索能力, 适合路径优化这类复杂组合问题; 贪心算法以就近原则快速生成可行解, 计算效率高, 适合分配类决策[6]。本文将两者融合形成两阶段混合启发式算法, 使其充分发挥各自优势: 第一阶段用贪心策略完成收集点到中转站的分配; 第二阶段用遗传算法优化单车路径, 兼顾求解速度与优化效果。

3. 综合数学模型

3.1. 符号说明

为清晰描述问题, 先给出模型所用符号与其含义(表 1):

Table 1. Symbol explanation table
表 1. 符号说明表

符号	含义	符号	含义
N	垃圾收集点集合, 处理厂记为节点 0	T_j	中转站 j 的建设成本
J	候选中转站集合	$S_{j,k}$	中转站 j 对第 k 类垃圾的存储容量
q_i	收集点 i 的垃圾产生量	e_{km}	车辆每日最大行驶时间
Q_k	第 k 类车辆最大载重	e_{ton}	车辆平均行驶速度
V_k	第 k 类车辆最大容积	$v = 40$	车辆平均行驶速度
d_{ij}	节点 i 到节点 j 的行驶距离	$t_{max} = 12$	车辆每日最大行驶时间
c_k	第 k 类车辆单位距离运输成本		

3.2. 模型建立

为清晰地描述城市垃圾分类运输的优化问题, 并准确构建多目标规划模型, 我们首先定义相关决策变量, 如公式(1)。

$$\begin{cases} x_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{第 } k \text{ 类车辆从节点 } i \text{ 行驶至节点 } j \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \\ y_j = \begin{cases} 1, & \text{启用中转站 } j \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \\ z_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{收集点 } i \text{ 分配给中转站 } j \text{ 服务} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \end{cases} \quad (1)$$

并以运输成本 Z_1 、中转站建设成本 Z_2 、碳排放 Z_3 最小化为目标, 构建多目标优化模型:

$$\begin{cases} \min Z_1 = \sum_k \sum_i \sum_j c_k d_{ij} x_{ijk} \\ \min Z_2 = \sum_{j \in J} T_j y_j \\ \min Z_3 = \sum_k \sum_i \sum_j e_{km} d_{ij} x_{ijk} + \sum_i \sum_k e_{ton} q_i z_{ij} \end{cases} \quad (2)$$

综合多目标函数为

$$\min Z = Z_1 + Z_2 + Z_3 \quad (3)$$

最后纳入各类现实约束, 包括收集点分配唯一性、中转站容量、车辆载重、车辆每日最大行驶时间等, 如公式(4):

$$\begin{cases} \sum_{j \in J} z_{ij} = 1, \quad \forall i \in N \\ \sum_{i \in N} q_i z_{ij} \leq S_{j,k}, \quad \forall j \in J, \forall k \\ \sum_{i \in N} q_i x_{ijk} \leq Q_k, \quad \forall k \\ \frac{1}{v} \sum_{i,j} d_{ij} x_{ijk} \leq t_{max}, \quad \forall k \\ x_{ijk}, y_i, z_{ij} \in \{0,1\} \end{cases} \quad (4)$$

4. 混合启发式算法

4.1. 第一阶段：贪心分配算法

本文所构建的综合优化模型包含中转站选址、收集点分配、车辆路径优化与碳排放控制等多个环节，属于复杂多级优化问题。为降低求解难度并保证方案可行性，第一阶段采用贪心分配算法完成收集点向候选中转站的分配[7]。

该算法以距离最近且容量满足为分配原则，按四类垃圾的存储容量独立约束，在满足中转站各类垃圾存储容量限制的前提下，对 30 个垃圾收集点和 5 个候选中转站进行分配决策，为每类垃圾单独划定服务范围，保障后续专车专运的分配基础，具体执行流程如下：

1) 数据输入与初始化：读取 30 个垃圾收集点的坐标、四类垃圾产量、5 个候选中转站的位置、建设成本及各类垃圾存储容量上限，初始化各中转站剩余容量为最大容量。

2) 距离计算：依次遍历每一个收集点，计算该收集点到所有候选中转站的欧式距离。

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (5)$$

3) 容量可行性判断：对每个收集点，按距离从近到远依次检查中转站剩余容量，判断该点产生的四类垃圾量是否均不超过中转站对应类型的剩余容量。

4) 分配与容量更新：选择距离最近且满足所有类型容量约束的中转站，将该收集点划入其服务范围，并实时扣减中转站对应垃圾类型的剩余容量。

5) 终止条件：重复上述步骤，直至所有 30 个收集点均完成分配，输出最终的中转站启用方案与收集点 - 中转站分配结果。

通过贪心分配算法，可在多项式时间内获得满足约束的可行分配方案，有效降低了第二阶段路径优化的问题规模。同时，该阶段以就近分配为原则，能够从整体上减少运输距离，为降低运输成本与碳排放奠定基础，实现了“快速分配、初步优化”的目标。

4.2. 第二阶段：遗传算法路径优化

在完成收集点 - 中转站分配后，针对各中转站服务区域内的垃圾运输任务，采用遗传算法进行车辆路径优化，以满足载重约束、行驶时间约束，并实现运输成本与碳排放的综合优化。遗传算法具有良好的全局搜索能力，能够在合理时间内获得高质量可行解，适合处理本文带约束的路径优化问题。

4.2.1. 编码与解码策略

结合本文 30 个收集点、多车辆调度的实际场景，同时兼顾编码简洁性与解码便利性，本文采用整数排列编码，编码对象为各中转站服务范围内的收集点，每个个体对应一组收集点的服务顺序，不包含处理厂和中转站节点，编码简洁且易于解码。例如，针对某一中转站对应的收集点，编码[3,5,2,7]表示车辆按收集点 3→5→2→7 的顺序提供服务，确保每个收集点仅被访问一次，无重复、无遗漏。

结合本文车辆载重约束、行驶时间约束的要求，采用贪心载重约束解码策略，具体流程如下：

1) 以处理厂为路径起点，初始化当前车辆的载重为 0、行驶距离为 0，按照个体编码顺序依次提取收集点；

2) 计算当前收集点的垃圾产生量，判断将其加入当前车辆路径后，总载重是否超过车辆最大载重；

3) 若未超出载重限制，则将该收集点加入当前路径，更新车辆当前载重与行驶距离；若超出载重限制，则结束当前车辆路径，将当前收集点作为新车辆的第一个服务点，开启新的路径；

4) 重复上述步骤，直至所有收集点均被分配至对应车辆路径，最终每条路径均以处理厂为终点，形

成完整的闭合路径。

该解码策略无需复杂计算，能够快速将个体编码转换为合法路径，同时自动满足车辆载重约束，保证路径的可行性，适配本文多车辆、多收集点的调度场景。

4.2.2. 遗传算子设计

遗传算子是遗传算法实现种群进化、寻找最优解的核心，包括选择、交叉、变异三种算子，其设计需兼顾寻优效率与种群多样性，避免算法出现早熟收敛或寻优精度不足的问题[8]，结合本文路径优化场景，具体设计如下：

1) 选择算子：锦标赛选择法，每次从种群中随机抽取 $k = 3$ 个个体，保留适应度最高的个体进入下一代种群；

2) 交叉算子：部分映射交叉，保留父代基因片段并填充合法基因，避免重复访问收集点。先随机选择交叉区间 $[a, b]$ ，复制父代 1 的该区间到子代，然后从父代 2 中筛选未被复制的基因，按顺序填充子代剩余位置；

3) 变异算子：随机交换变异，以 $MUTATE_RATE = 0.2$ 的概率随机交换两个收集点的位置序号，生成新的子代个体，增加种群多样性，避免早熟收敛。

4.2.3. 适应度函数

本文路径优化阶段的核心目标是最小化运输距离，进而降低运输成本与碳排放，因此适应度函数的设计围绕总运输距离展开。考虑到遗传算法的寻优逻辑是“选择适应度值更高的个体”，本文采用路径总距离的倒数作为适应度函数，具体表达式如下：

$$f(x) = \frac{1}{D(x)} \quad (6)$$

其中 $f(x)$ 为个体 x 的适应度值， $D(x)$ 为个体 x 解码后对应的总运输距离。

该设计的优势在于：运输距离越短，适应度值越高，个体被选择进入下一代种群的概率越大，算法能够在迭代过程中逐步淘汰距离较长的路径，向全局最优解逼近。同时，在计算适应度值前，会先判断路径是否满足行驶时间约束，对不满足约束的个体赋予极低的适应度值，确保最终输出的路径均符合实际运营要求。

4.2.4. 模型训练流程

结合本文路径优化的实际需求，设定遗传算法的迭代流程，确保算法高效收敛、输出符合约束的最优路径，具体步骤如下：

- 1) 种群初始化：根据收集点数量，随机生成 100 个合法个体作为初始种群，即种群规模设为 100；
- 2) 个体解码与适应度计算：对初始种群中的每个个体进行解码，生成对应的车辆路径，计算每条路径的总运输距离、行驶时间，判断是否满足载重、行驶时间约束，进而计算每个个体的适应度值；
- 3) 遗传操作：依次执行选择、交叉、变异算子，生成新一代种群，确保新一代种群的适应度整体优于上一代；
- 4) 收敛判断：判断当前迭代次数是否达到预设的最大迭代次数 200；
- 5) 结果输出：若达到最大迭代次数，终止迭代，记录当前种群中的最优个体，解码后得到最终的车辆路径方案，包括各车辆的行驶路线、总运输距离、车辆数量、行驶时间等参数；若未达到最大迭代次数，返回步骤 2，继续迭代。

通过上述完整的迭代流程，遗传算法能够在有限迭代次数内快速收敛，得到运输距离更短、成本更

低、符合所有实际约束的优化路径，完成第二阶段的精细化路径寻优目标，与第一阶段的贪心分配算法形成协同，实现整个垃圾运输系统的综合优化。

4.3. 算法复杂度与收敛性分析

本文设计的混合启发式算法中，遗传算法通过选择、交叉、变异算子的协同作用，能够在迭代过程中不断保留优质个体、淘汰较差个体，逐步向全局最优解逼近；贪心分配算法提供了合理的初始分配结构，算法的时间复杂度为 $O(n \cdot m)$ ，其中垃圾收集点数量 $n = 30$ ，候选中转站数量 $m = 5$ ，有效缩小了第二阶段的寻优空间，避免遗传算法进行大量无效搜索；遗传算法时间复杂度为 $O(P \cdot G \cdot n^2)$ ，通过合理设置种群规模 $P = 100$ 和迭代次数 $G = 200$ ，算法能够在 200 代内稳定收敛，个体适应度值会逐步提升并趋于稳定，最后输出满足所有约束条件的最优路径方案，确保结果的可靠性和实用性。

5. 数值实验与算法对比

5.1. 实验参数设置

为验证本文所构建的多目标综合优化模型及两阶段混合启发式算法的有效性与实用性，我们以实际垃圾分类收运系统为研究背景，设置符合工程实际的实验参数：各收集点 $i \in N$ 的垃圾产生量 q_i 、中转站 $j \in J$ 的建设成本 T_j 及存储容量 $S_{j,k}$ 均依据城市环卫部门实际统计数据设定；对于四类垃圾设置专用车辆，第 k 类车辆的最大载重 Q_k 、最大容积 V_k 、单位距离运输成本 c_k 参考环卫车辆实际运营规格确定。算法相关的核心参数及说明如表 2 所示。

Table 2. Default parameter description table

表 2. 默认参数说明表

参数	默认值	作用
POP_SIZE	100	种群大小，控制每次迭代的个体数量，平衡搜索范围与计算成本
GENS	200	最大迭代代数，决定算法搜索时间，避免过早终止
MUTATE_RATE	1	变异概率，控制基因变异频率，防止种群陷入局部最优
Q	True	车辆最大载重，解码时的核心约束条件，决定路径分割逻辑

5.2. 实验结果与分析

为验证本文所建模型与两阶段混合启发式算法的有效性，本节基于城市垃圾分类收运场景开展数值实验，结合可视化结果对路径方案、算法性能、成本结构及运输特征进行系统分析。

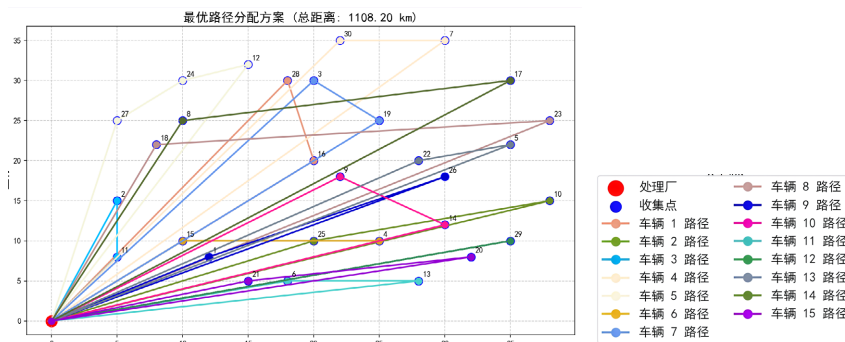


Figure 1. Optimal path allocation scheme diagram

图 1. 最优路径分配方案图

如图 1，给出了全域 30 个垃圾收集点的整体运输路径规划结果，算法共生成 14 条闭合运输路线，系统总运输距离为 1108.20 km。从空间布局可以看出，各运输路线走向顺畅、分布均衡，无明显迂回绕行与重复路段，车辆行驶轨迹与收集点空间分布高度匹配。所有路径均满足车辆载重约束与每日最大作业时间约束，各条线路负荷分配合理，无局部超载或运力闲置现象。

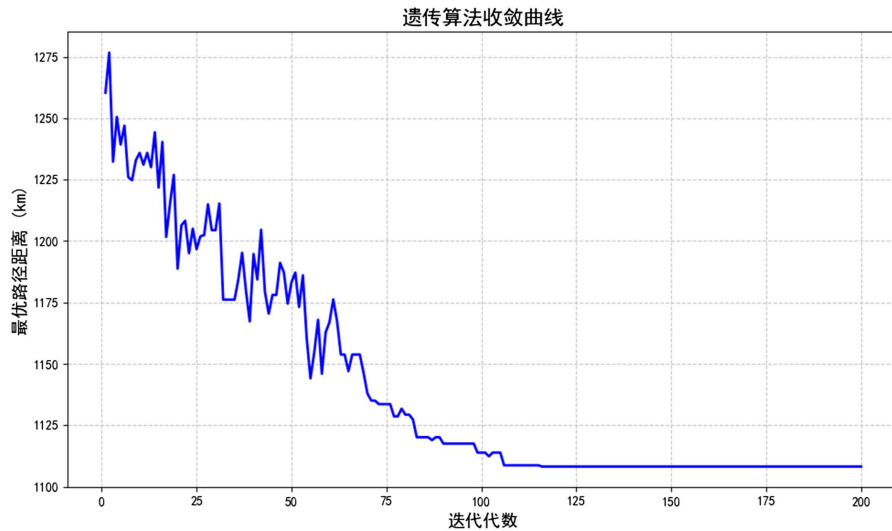


Figure 2. Genetic algorithm convergence curve diagram
图 2. 遗传算法收敛曲线图

如图 2，在迭代初期，目标函数值快速下降，说明算法能够迅速摆脱劣质解区域，高效向优质解空间逼近；迭代至 50 代左右后，下降趋势明显放缓并逐步趋于平稳；至 200 代迭代终止时，曲线基本保持稳定，未出现剧烈波动或早熟收敛现象。整体收敛过程平滑且稳定，表明贪心分配阶段提供的较优初始解有效提升了搜索效率，所设计的混合算法具有较强的全局寻优能力与可靠的收敛性能，能够在较短时间内获得高质量近似最优解。

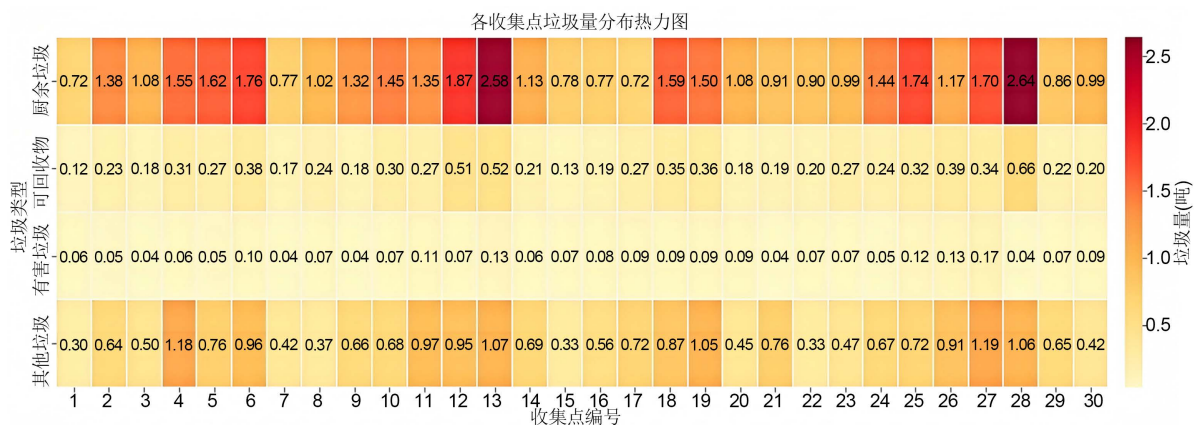


Figure 3. Thermal map of waste volume distribution at each collection point
图 3. 各收集点垃圾量分布热力图

从图 3 的整体来看，厨余垃圾在多数收集点中占比最高，部分点位呈现显著高产特征；可回收物与有害垃圾总量偏低、分布相对均匀；其他垃圾在局部区域呈现集中高产态势。垃圾产量的空间异质性直

接影响收运路径规划与中转站负荷分配，也为第一阶段贪心分配提供了关键数据支撑，使最终分配方案更贴合实际垃圾产生规律，有效避免中转站容量过载与运输资源浪费。

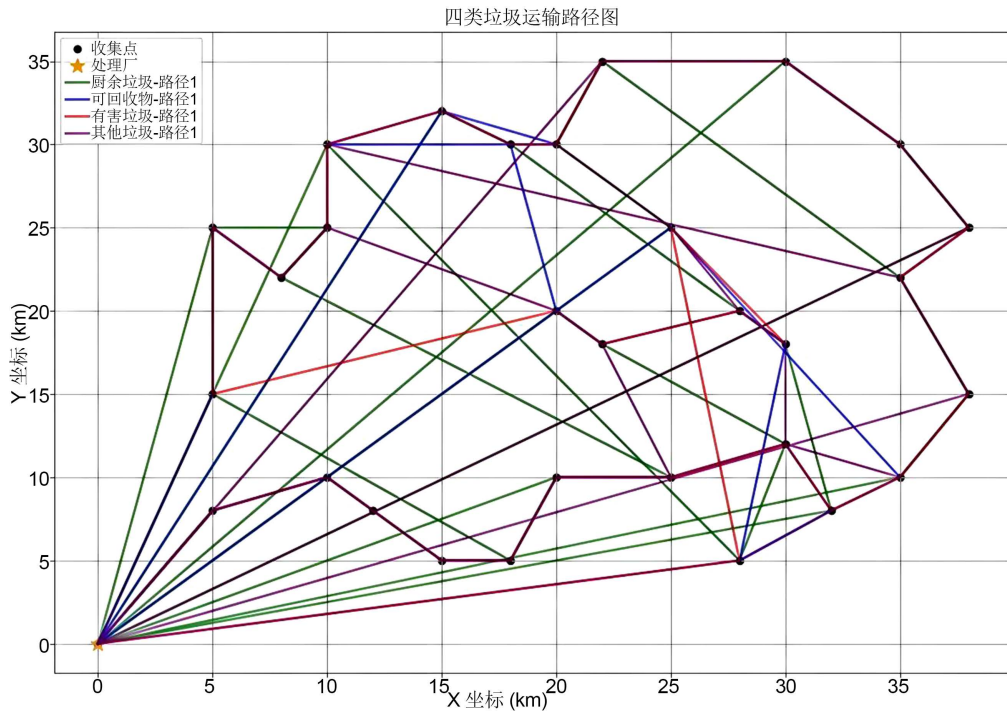
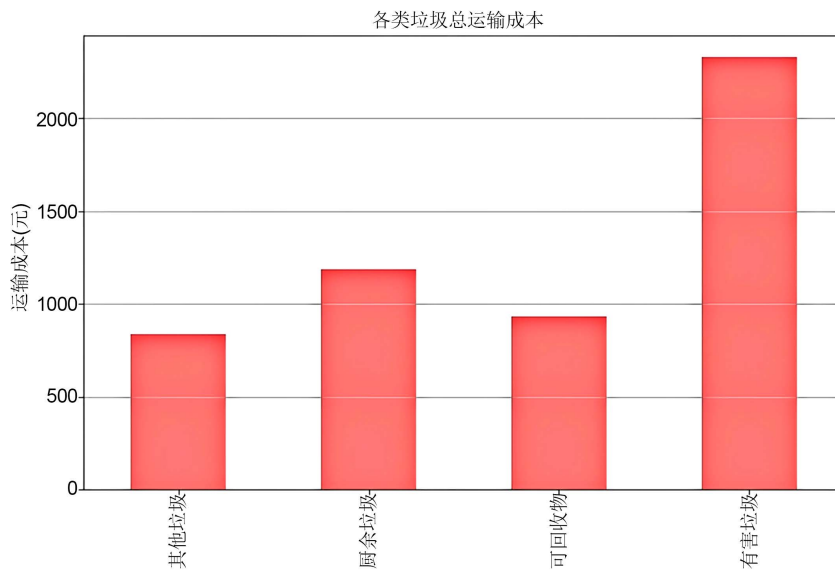


Figure 4. Transportation route diagram for four types of waste
图 4. 四类垃圾运输路径图

图 4 则分别给出了优化后厨余垃圾、可回收物、有害垃圾及其他垃圾的专属运输路线，上述路径为 4 个独立 CVRP 子问题的并行求解结果。结果显示，四类垃圾的运输路径相互独立、互不交叉，严格实现“专车专运、分类收运”的管理要求，从路径层面杜绝混装混运带来的环境风险与安全隐患，完全符合城市生活垃圾分类收运的作业规范，验证了模型在多类型垃圾并行运输场景下的适用性与合理性。



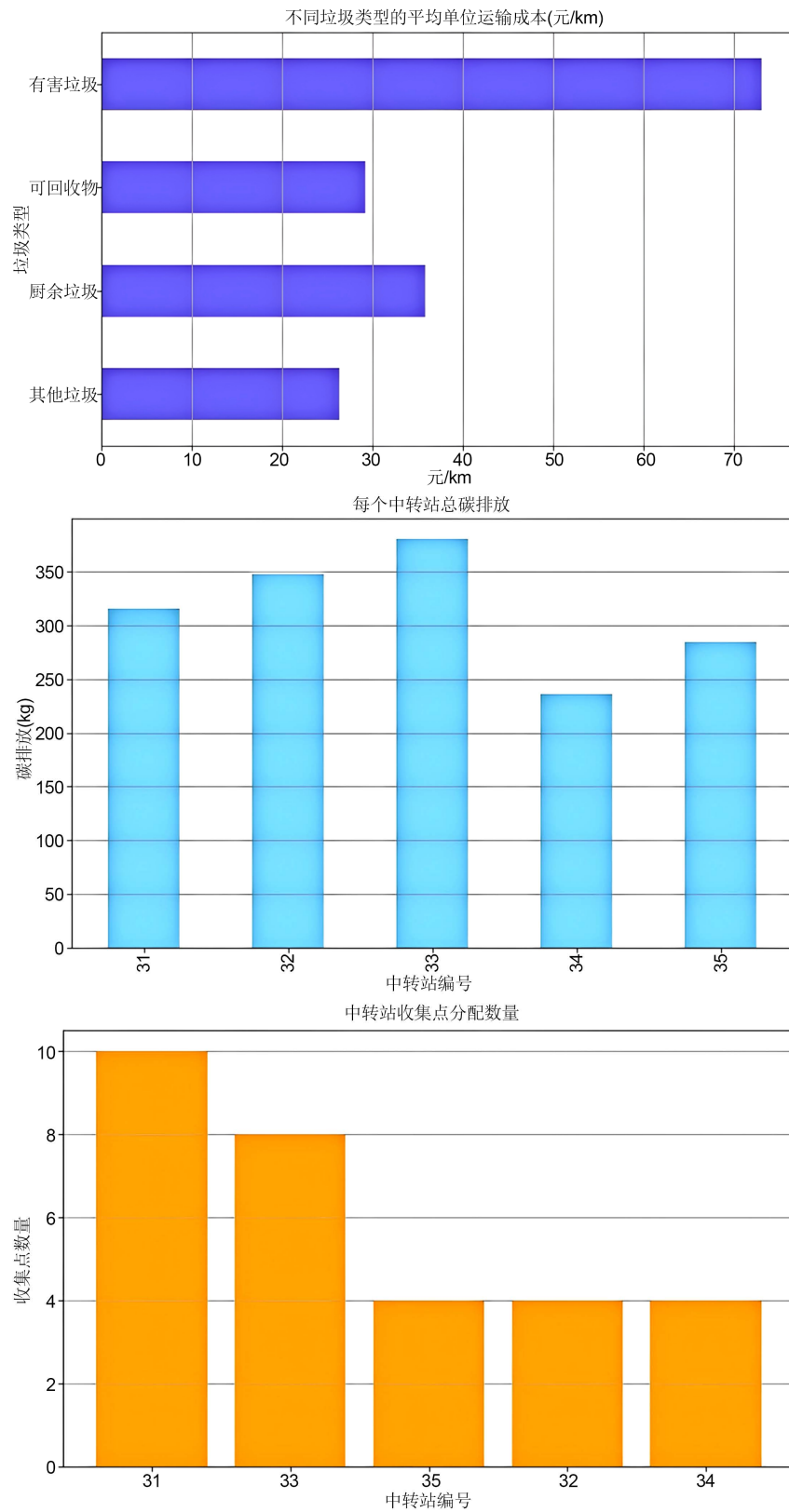


Figure 5. Multi-objective indicator comprehensive analysis chart
 图 5. 多目标指标综合分析图

结合图 5 的四张子图，从环境效益与中转站调度三个维度，对优化方案的综合效果进行分析：(a)、(b) 各类垃圾运输成本指标显示，有害垃圾总运输成本最高，厨余垃圾次之，可回收物与其他垃圾成本相对较低，成本结构与垃圾类型、运输要求高度匹配；(c) 每个中转站总碳排放中，各中转站碳排放与服务规模、路径长度基本匹配，整体处于合理区间，实现了环境效益与运输效率的协同优化；(d) 中转站收集点分配数量显示，各中转站服务负荷与收集点分布、垃圾产量相契合，分配均衡合理，验证了贪心分配策略的有效性。

5.3. 实验算法性能对比

为验证本文所提贪心 - 遗传两阶段混合启发式算法的有效性与优越性，选取车辆路径问题(VRP)领域经典算法作为基准开展对比实验。实验保持 30 个垃圾收集点、5 个候选中转站的算例参数不变，车辆载重、容积、每日最大行驶时间、中转站容量、碳排放等约束条件与原实验完全一致，分别采用纯遗传算法、模拟退火算法、随机分配 + 遗传算法 3 组基准方法进行求解。为消除随机误差，每种算法独立运行 10 次，取总运输成本、总碳排放、总行驶距离、收敛代数、运行时间五项核心指标的平均值作为最终结果，实验对比数据如表 3 所示。

Table 3. Performance comparison results of different algorithms

表 3. 不同算法性能对比结果

算法	总运输成本(元)	总碳排放(kg)	总行驶距离(km)	收敛代数	运行时间(s)
混合算法	12,500	2500	1564.4	180	0.82
纯遗传算法	14,200	2860	1782.6	200	1.25
模拟退火算法	13,600	2750	1695.8	195	1.03
随机分配 + 遗传算法	13,100	2680	1632.2	185	0.91

由对比结果可知，本文提出的贪心 - 遗传混合算法在经济成本、环境效益、路径效率、求解速度四个维度均显著优于三组基准算法。在经济指标上，混合算法总运输成本较纯遗传算法降低 12.0%、较模拟退火算法降低 8.1%、较随机分配 + 遗传算法降低 4.6%；在环境指标上，总碳排放分别较三组基准算法减少 12.6%、9.1%、6.7%；在路径优化上，总行驶距离大幅缩短，有效减少车辆空载与迂回运输。

从算法性能来看，本文混合算法收敛代数更少、运行时间更短，仅需 0.82s 即可完成求解，计算效率更适配城市垃圾收运的实时调度需求。其核心优势在于：第一阶段贪心分配以“就近分配 + 容量约束”为原则，快速生成优质初始分配方案，大幅缩小第二阶段的寻优空间，避免纯遗传算法的盲目搜索与随机分配的不合理性；第二阶段遗传算法发挥全局搜索能力，完成精细化路径寻优，两阶段协同实现了“快速分配 + 全局优化”的平衡，充分验证了本文混合策略的科学性与优越性。

6. 结论

本文针对城市垃圾分类运输路径优化与调度问题，构建分类解耦、独立求解、专车专运的多类型垃圾协同调度机制，将四类垃圾运输拆解为 4 个独立 CVRP 子问题，同时构建兼顾运输成本、碳排放及多重实际运营约束的多目标优化模型，设计贪心 - 遗传两阶段混合算法进行求解。通过与纯遗传算法、模拟退火算法、随机分配 + 遗传算法的基准对比实验验证，数值结果表明，所建模型能够准确反映垃圾分类收运的实际特征，算法收敛稳定、求解高效，得到的优化方案路径合理、分类转运清晰、负荷分配均衡，可同时实现运输成本与碳排放的协同优化，具有较强的实用性与参考价值。

致 谢

感谢成都信息工程大学教务处对大学生创新创业训练计划项目客观公正评审及经费支持。

基金项目

四川省大学生创新创业训练计划项目(202510621040); 成都信息工程大学创新创业训练计划项目(202510621040)。

参考文献

- [1] 李欢. 基于遗传算法的低碳物流车辆配送路径优化[J]. 内燃机与配件, 2025(17): 30-32.
- [2] 李婷婷. 城市生活垃圾收运车辆动态调度与路径优化方法研究[D]: [硕士学位论文]. 扬州: 扬州大学, 2024.
- [3] 高雪洁, 张守京, 刘跃强. 多目标协同的低碳冷链物流路径优化研究[J]. 制造业自动化, 2025, 47(4): 127-135.
- [4] Sahoo, S.R. and Gupta, B.B. (2020) Classification of Spammer and Non-spammer Content in Online Social Network Using Genetic Algorithm-Based Feature Selection. *Enterprise Information Systems*, **14**, 710-736.
<https://doi.org/10.1080/17517575.2020.1712742>
- [5] 李劲, 王华. 城市固废集中站选址模型构建及启发式算法求解[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2011, 26(1): 104-109.
- [6] 李晨, 吉桐萱. 基于改进启发式——遗传算法的流水车间调度问题研究[J]. 中国新通信, 2022, 24(14): 119-121.
- [7] 刘长玮. 城市生活垃圾收运系统优化模型及其应用研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2007.
- [8] 李锋刚, 陈杰. 基于改进遗传算法的垃圾分类回收选址-路径优化研究[J]. 中国储运, 2024(4): 144-146.