

基于双层规划的快递包装回收中心选址与路径优化研究

doi:10.20269/j.cnki.1674-7100.2025.6013

郑湘明 罗晓迪

湖南工业大学

经济与管理学院

湖南 株洲 412007

摘要: 为提高快递包装回收率和快递包装逆向物流系统效率,采用双层规划模型,优化快递包装回收中心选址及路径。首先采用无监督、易操作的 K-Means 聚类算法确定回收中心的数量和备选点;然后采用传统遗传算法求解上层模型,确定回收中心的最终位置;再用改进遗传算法求解下层模型,优化回收路径以实现成本最小化;最后以成都市青白江区 X 企业为例进行仿真分析,验证了双层规划模型在优化快递包装回收中心选址及路径的有效性。

关键词: 快递包装回收; 双层规划模型; 回收中心选址; 路径优化

中图分类号: F542; TP301.6

文献标志码: A

文章编号: 1674-7100(2025)06-0100-11

引文格式: 郑湘明, 罗晓迪. 基于双层规划的快递包装回收中心选址与路径优化研究 [J]. 包装学报, 2025, 17(6): 100-110.

近年来,随着电子商务和网络购物的迅猛发展,快递包装需求量逐年攀升^[1],随之而来产生的快递包装废弃物数量也持续增加。据统计,2024 年我国快递包装废弃物总量已将近 2000 万 t,其中大量快递包装物未被有效回收处理,这造成严重的环境污染与资源浪费问题^[2]。快递包装的回收与循环再利用是解决该问题最为有效的办法。2025 年 6 月正式实施的《国务院关于修改〈快递暂行条例〉的决定》,通过完善综合性支持政策,积极推动快递包装的绿色化、减量化与可循环利用进程^[3]。

快递包装回收中心作为逆向物流系统的核心枢纽,前端对接各类回收站点,后端对接处理工厂,合理的回收中心选址和路径能显著缩短运输距离和时间,从而降低回收车辆运输成本、碳排放成本和交通拥堵导致的能源损耗。因此,如何科学确定回收中心的位置及其对应的回收路径,已成为当前物流管理领域关注的热点问题,具有重要的理论意义和实际价值^[4]。

尽管国内外已有学者对快递包装回收系统进行

了广泛研究,但多数集中于包装形式改进、回收模式构建等方面^[5-7],而针对回收中心选址和路径优化的系统性研究仍相对不足。双层规划模型作为一种有效的建模手段,在无人机配送、电网规划等领域得到了广泛的应用^[8-11],将该模型应用于快递包装回收领域仍处于初步探索阶段。回收中心选址及路径的求解属于 NP-Hard 问题,而传统求解算法在应对该问题时,极易陷入局部最优的困境,难以找到全局最优解。基于这一现状,众多学者积极投身于启发式算法的设计与优化^[12-15],期望借此提高问题求解的效率与精度。本文选用双层规划模型来解决快递包装回收中心选址及路径优化问题,将改进的 K-Means 聚类算法和遗传算法相结合求解上层选址模型,再用二元锦标赛选择法、部分匹配交叉算子、倒位变异算子改进传统遗传算法,使其全局搜索能力增强,求解下层回收路径模型。双层规划模型能够很好地考虑到上层选址和下层路径优化之间的关系,从而更全面地兼顾到不同层次的决策要素。此外,在回收路径优化的过程中,

收稿日期: 2025-08-20

基金项目: 国家社会科学基金资助项目(21BGL025)

作者简介: 郑湘明,男,研究员,硕士生导师,主要研究方向为资源环境管理, E-mail: xiangmingz333@163.com

将碳排放成本纳入考量范畴,把绿色物流理念与快递包装回收实践紧密融合,以此有效地响应国家“双碳”战略,为社会可持续发展注入强劲动力。

1 问题描述

快递包装回收中心的选址以及对应回收路径的优化问题,作如下描述:在已知若干快递包装回收站的地理位置与回收量的前提下,确定合适的回收中心数量及其选址,并规划回收中心到回收站的回收路径(回收示意图见图1),最小化整体运营成本。更具体地说,每个回收中心被赋予了收集若干回收站快递包装物的任务。车辆从回收中心出发,按照既定路径完成回收工作后,需返回原回收中心,整个过程的优化目标是实现路径成本的最小化。

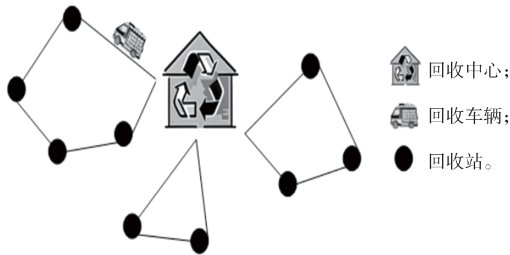


图1 快递包装回收示意图

Fig.1 Schematic diagram of express package recycling

为了便于建模与求解,作出如下基本假设:1)所有回收站的位置和容量是已知且不随时间变化,回收车辆的起点和终点均为回收中心;2)每辆车从某

一回收中心出发,并在执行回收任务过程中,每个回收站只能被访问一次,其包装废弃物也仅由一辆车完成回收;3)每个回收中心的车辆型号一样,且每辆车固定隶属于一个回收中心,回收车辆的固定成本相同;4)车辆的最大载重量已知,回收站的最大快递包装回收量需低于车辆载重量;5)车辆最大行驶距离已知,行驶速度保持40 km/h,忽略天气恶劣、交通堵塞等影响行驶的情况。6)回收车辆到达回收站后,车辆立即装车并返回到回收中心,不考虑装卸耗时。7)采用软时间窗限制车辆在指定时间段内完成回收作业。若超出时间窗,将产生固定的惩罚成本,且惩罚成本已知。

2 模型建立

2.1 主要符号说明

本研究涉及的参数与符号说明详见表1~3。符号定义涵盖了集合、决策变量以及参数等关键要素,为后续模型的构建与求解提供必要支撑。

2.2 双层规划模型

在物流系统中,回收中心依据各个回收站所提出的具体需求,在规定时间内精准无误地完成回收作业,其选址在很大程度上会直接影响到物流系统的运作效率,因此,在构建研究模型时,将快递包装回收中心的选址问题视为上层模型。与此同时,快递包装回收车辆路径也是物流系统中的重要环节,该问题主要聚焦于如何对回收路径进行高效的组织与优化,

表1 集合符号说明

Table 1 Explanation of set symbols

集合	符号解释
O	快递包装回收中心备选点集合, $O=\{1, 2, 3, \dots\}$
I	快递包装回收中心集合, $I=\{1, 2, 3, \dots\}$
J	快递包装回收站集合, $J=\{1, 2, 3, \dots\}$
T	快递包装回收车辆集合, $T=\{1, 2, 3, \dots\}$

表2 决策变量符号说明

Table 2 Symbolic explanations of decision variables

决策变量	符号解释
X_i	逻辑变量,选择在备选点 <i>i</i> 建立回收中心为1,否则为0
X_{ij}^t	逻辑变量,第 <i>t</i> 辆车从回收中心 <i>i</i> 驶向回收站 <i>j</i> 为1,否则为0
X_{ji}^t	逻辑变量,第 <i>t</i> 辆车从回收站 <i>j</i> 到回收中心 <i>i</i> 为1,否则为0
Y_{ij}^t	逻辑变量,回收站 <i>j</i> 的快递包装物由回收中心 <i>i</i> 的第 <i>t</i> 辆车运输为1,否则为0

表 3 非决策变量符号说明

Table 3 Notation of non-decision variables

参数	符号解释
C_i	回收中心 i 的年租赁成本 (元/年)
F_i	回收中心 i 的设备购置成本 (元)
M_i	回收中心 i 的固定成本 (元)
g_i	回收中心 i 的单位处理费用 (元)
q_j	回收站 j 的货物量 (kg)
Q_i	回收中心 i 的快递包装回收物的堆放能力 (kg)
∂	回收车辆的单位固定成本 (元)
β	回收车辆的单位运输成本 (元)
D_{ij}^t	回收中心第 t 辆车从回收中心 i 驶向回收站 j 的运输距离 (km)
θ_0	回收车辆无负载状态下单位距离的燃油消耗 (L/km)
θ_*	回收车辆满载状态下单位距离的燃油消耗 (L/km)
L	回收车辆最大载重量 (kg)
V_t	回收车辆 t 的平均行驶速度 (km/h)
W_{ij}^t	回收中心第 t 辆车从回收中心 i 到回收站 j 的单位距离耗油量 (L/km)
S_t	回收车辆 t 最大行驶距离 (km)
M	单位碳排放价格 (元)
δ	CO ₂ 的排放系数 (kg/L)
η_1	回收车辆提前到达所产生的等待成本 (元)
η_2	回收车辆延迟到达所产生的惩罚成本 (元)
$[EE_u, LL_u]$	回收站的接受时间窗
t_i/et_i	回收车辆到达 / 离开回收站的时间 (h)

确保回收车辆能够在时间窗、车辆行驶距离等限制条件下,尽可能以最少的时间和最低的成本完成快递包装回收任务。基于此,将快递包装回收中心的路径优化问题看作下层模型。

对快递包装回收中心选址和路径优化的相关因素进行分析后,构建了双层规划模型。上层模型目标函数包括快递包装回收中心的建设成本以及运营成本;下层模型目标函数包括回收车辆的固定成本、回收车辆的运输成本、碳排放成本和时间窗惩罚成本。具体如图 2 所示。

1) 上层模型

$$\begin{aligned} \min c_{\text{上}} &= D_1 + D_2 = D_1^1 + D_1^2 + D_2^1 + D_2^2 \\ &= \sum_{i \in I} C_i X_i + \sum_{i \in I} \frac{F_i}{5} X_i + \sum_{i \in I} M_i X_i + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} g_i D_{ij}^t X_{ij}^t, \end{aligned} \quad (1)$$

约束条件:

$$\sum_{i \in I} X_i \geq 1, \quad (2)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} q_j X_{ij}^t \leq Q_i. \quad (3)$$

其中,式(1)为上层模型的目标函数,由

回收中心建设成本 D_1 和运营成本 D_2 构成,其中 D_1 由回收中心建设成本 $D_1^1 = \sum_{i \in I} C_i X_i$ 和回收中心设备购置成本 $D_1^2 = \sum_{i \in I} \frac{F_i}{5} X_i$ 构成, D_2 由回收中心固定成本 $D_2^1 = \sum_{i \in I} M_i X_i$ 和回收中心处理成本 $D_2^2 = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} g_i D_{ij}^t X_{ij}^t$ 构成。式(2)表示回收中心的数量约束,即至少建设 1 个回收中心。式(3)为回收中心的容量约束,它限定了回收中心所能承载的最大回收量。

2) 下层模型

$$\begin{aligned} \min c_{\text{下}} &= D_3 + D_4 + D_5 + D_6 \\ &= \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} \partial X_{ij}^t + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} \beta X_{ij}^t D_{ij}^t + \\ &\quad \mu \delta \left(\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} X_{ij}^t \left(\theta_0 + \frac{\theta_* - \theta_0}{L} W_{ij}^t \right) D_{ij}^t \right) + \\ &\quad \sum_{j \in J} \left[\eta_1 \max(EE_{it} - t_i, 0) + \eta_2 \max(t_i - LL_{it}, 0) \right], \end{aligned} \quad (4)$$

约束条件:

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} X'_{ij} = 1; \quad (5)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} Y'_{ij} q_j \leq L; \quad (6)$$

$$f(t_i) = \begin{cases} \eta_1 (EE_{ti} - t_i), & t_i \leq EE_{ti}, \\ \eta_2 (t_i - LL_{ti}), & t_i \geq LL_{ti}; \end{cases} \quad (7)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} X'_{ij} D'_{ij} \leq V_t; \quad (8)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} X'_{ij} = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} X'_{ji} = 1. \quad (9)$$

其中, 式 (4) 为下层模型的目标函数, 由回收车辆固定成本 D_3 、回收车辆运输成本 D_4 、碳排放成本 D_5 和时间窗惩罚成本 D_6 组成。式 (5) 表示各个回收站能且只能被回收车辆访问一次。式 (6) 表示车辆载重量约束条件, 即当回收车辆途经目标点并执行包装回收任务时, 所回收包装物的总质量不得超出车辆预设的最大载重限值。式 (7) 表示时间窗约束条件。式 (8) 表示车辆行驶距离约束条件。执行回收任务的车辆, 其行驶的起点与终点均为回收中心, 且回收中心的位置保持不变。在此前提下, 回收车辆开展包装回收任务期间, 其累计的总行驶里程必须严格控制在允许行驶的最大限值范围内。式 (9) 表示回收车辆进出平衡约束条件, 即回收车辆到达回收站装箱完毕后必须离开, 不能滞留。

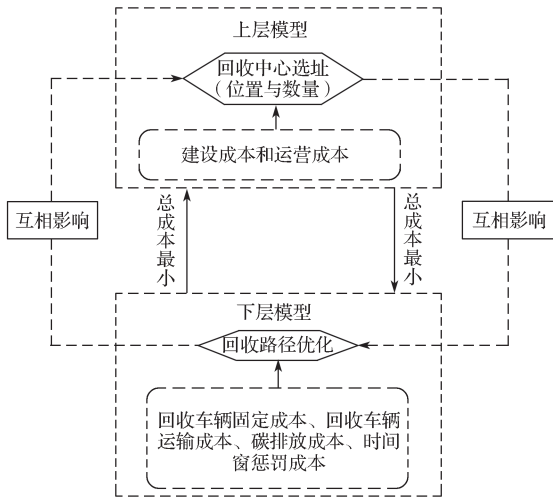


图2 双层规划模型

Fig. 2 Bilayer programming model

3 算法求解

3.1 改进 K-Means 聚类算法与传统遗传算法

为了有效解决快递包装回收中心的上层选址问

题, 本文设计了一种结合改进 K-Means 聚类算法与传统遗传算法的复合型算法。针对回收中心选址问题, 需先对区域内分散的回收站进行空间聚类分析。具体而言, 先基于轮廓系数 S (silhouette coefficient) 确定最优聚类数量对应的簇中心个数; 再采用 K-Means 算法对回收站坐标数据进行迭代, 最终生成空间分布合理的回收站分组结果, 为后续中心点选址提供数据支撑。轮廓系数计算如式 (10)。

$$S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{b(i) - a(i)}{\max\{a(i), b(i)\}}, \quad (10)$$

式中:

$$a(i) = \frac{1}{|C'_i| - 1} \sum_{j \in C'_i} d(i, j), \quad b(i) = \min \left\{ \frac{1}{|C_k|} \sum_{j \in C_k} d(i, j) \right\},$$

其中, $a(i)$ 为回收站点 i 与所在簇 C'_i 中所有回收站点的平均距离, $b(i)$ 为回收站点 i 与其他簇 C_k 所有回收站点的平均距离的最小值。 $a(i)$ 越小, 表示点 i 与簇内其他点越近, 簇越紧凑。 $b(i)$ 越小, 表示点 i 与其他簇内的点越远, 簇间的分离度越好。

在地理空间聚类场景中, 所有回收站及回收中心均采用经纬度坐标进行空间定位。鉴于传统 K-Means 算法一般采用欧氏距离度量样本与质心的距离, 故需引入 Haversine 公式 (见式 (11)) 计算两点间的大圆距离。

$$d = 2R \cdot$$

$$\arcsin \sqrt{\sin^2 \left(\frac{W_m - W_n}{2} \right) \cos(W_m) + \cos(W_n) \sin^2 \left(\frac{J_m - J_n}{2} \right)}, \quad (11)$$

式中: R 表示地球半径; J_m 、 J_n 、 W_m 、 W_n 分别表示两点的经度和纬度。

改进 K-Means 聚类算法与传统遗传算法的集成算法流程如图 3 所示。

步骤 1 计算轮廓系数 S , 确定最佳聚类中心的数量 K ;

步骤 2 根据所有回收站的数据坐标, 结合上一步骤确定的 K 值, 在空间区域内随机选取快递包装回收中心聚类点;

步骤 3 计算各回收站与回收中心的距离, 并将回收站划分到距离它最近的回收中心区域内;

步骤 4 划分好聚类区域后, 重新确定不同区域内快递包装回收中心的位置, 要求快递包装回收中心位置与各回收站间距离相同;

步骤 5 聚类中心的位置发生改变, 则重复步骤 3 和步骤 4;

步骤 6 输出聚类结果, 作为传统遗传算法选址的初始条件。

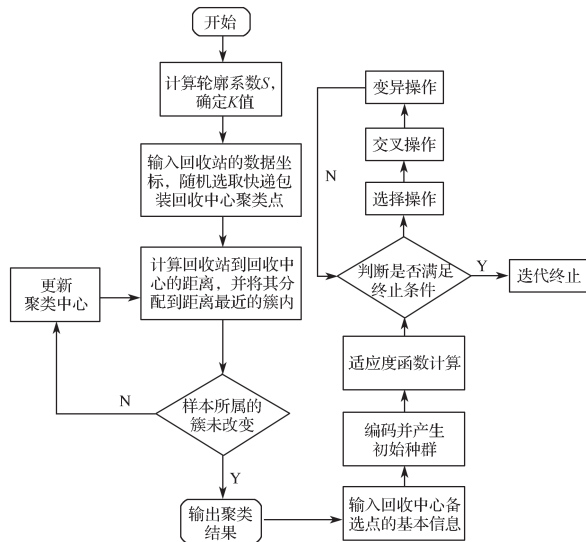


图 3 改进 K-Means 与传统遗传算法流程图

Fig. 3 Improved K-Means and traditional genetic algorithm flow chart

3.2 改进遗传算法

传统遗传算法搜索能力欠佳, 容易出现局部最优解的情况。为了实现全局最优解的精确搜索, 采用改进遗传算法, 增强其全局搜索能力, 使其能够更好地对下层模型进行求解, 具体操作步骤如下。

步骤 1 染色体编码与种群初始化操作。采用编码排列的方式确定回收车辆路径规划方案集。假设每条染色体长度值为 n_2 , 其范围为 $[n_1, n_1+n_2]$, 其中 n_1 为快递包装回收中心的数量, n_2 为快递包装回收站的数量。染色体的排列次序表示回收车辆的访问次序。首先回收车辆从回收中心出发, 按从近到远的顺序依次访问回收站, 直到所有回收站都被访问为止, 每个回收站能且只能被访问一次, 据此产生长度为 n_2 的自然数列, 作为遗传算法的初始群体。本文研究的 X 企业在成都市青白江区共有 76 个快递包装回收站, 故而将最小种群规模设定为 80。

步骤 2 计算适应度函数。依据编码规则拆分种群内个体, 计算回收路径上回收车辆各项成本的加权平均和, 将其定义为 fitness 适应度函数, 见式 (12)。优劣程度由目标函数 $\min c_{\text{下}}$ 体现, 函数值越低 (即其倒数越高), 则个体越优, 回收路径方案越佳。

$$f = \frac{1}{\min c_{\text{下}}} \quad (12)$$

步骤 3 选择操作。采用二元锦标赛法, 每次从种群中随机选择 2 个个体, 将适应度最大的个体加入子代种群, 不断循环此操作, 直到子代种群的数量达到与原来种群规模相同的水平。这种方法能够将父代种群内适应度最高的个体选入子代种群, 同时剔除父代种群中适应度最低的个体, 从而加速算法收敛, 获取全局最优解。

步骤 4 交叉操作。采用部分匹配交叉算子, 对 2 个父代染色体进行随机选择, 对 2 个交叉位置进行随机选择 (在相同的位置上选择 2 个染色体进行基因交换)。如果交叉后的染色体出现冲突基因, 则通过映射使发生冲突的基因发生转化, 以此确保最终所形成的新一代子染色体中的每一个基因都仅出现一次, 保证染色体的合理性与有效性。交叉概率取 0.7。具体操作流程如图 4 所示。



图 4 染色体交叉操作

Fig. 4 Chromosome crossing operation

步骤 5 变异操作。以染色体的编码特性为基础, 运用倒位变异算子, 并且根据青白江区域的回收站数量特点, 将变异操作概率取 0.1, 即将变异区域的基因序列进行逆序排列后, 随机选取 2 个基因作为个体编码序列中的变异点, 得到新的个体, 如图 5 所示。

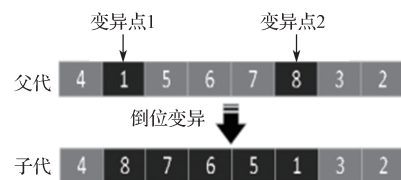


图 5 染色体变异操作

Fig. 5 Manipulation of chromosome variation

步骤6 算法终止。迭代次数 gen 最大为 200。
迭代到 200 次时, 将最优的路径结果输出。

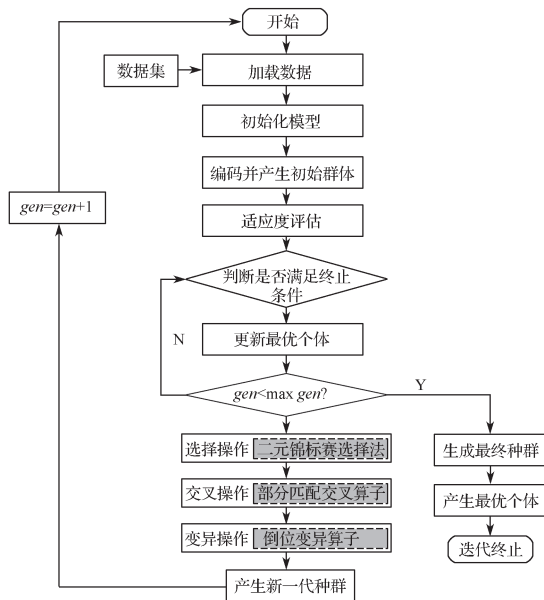


图 6 改进遗传算法流程图

Fig. 6 Flow chart of improved genetic algorithm

4 案例分析

4.1 算例和参数设计

本研究选择四川省成都市青白江区 X 企业的快递包装回收站作为研究对象, 旨在实现回收中心建设成本的最小化和回收路径最优化。通过高德地图得知, 青白江区共分布着 76 个回收站, 各回收站点的地理位置及收集量详见附表 1, 回收站分布散点图如图 7 所示。在上述基础上, 借助 ArcGIS 软件对散点图进行核密度分析, 利用标准差椭圆 (SDE) 进一步探究了青白江区回收站的集聚形态 (见图 8), 并据此设计了快递包装回收流程 (见图 9)。



图 7 青白江区回收站分布散点图

Fig. 7 Scatter diagram of recycling stations in Qingbaijiang district



图 8 青白江区回收站聚集核密度分析图

Fig. 8 Aggregation density analysis diagram of Qingbaijiang recycling station

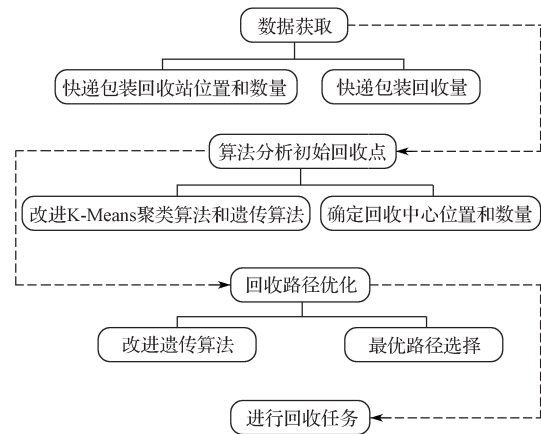


图 9 X 企业快递包装物回收流程图

Fig. 9 X enterprise express packaging recycling flow chart

为了便于模型求解, 需对相关参数进行设定。基于对现有文献的研究和本研究模型的考量, 最终确定的参数如表 4 所示。

表 4 参数设置

Table 4 Other parameter settings

符号	定义	取值	单位
Q_i	回收中心 i 的快递包装回收物的堆放能力	2000	kg
ϕ	回收车辆的单位固定成本	800	元
β	回收车辆的单位运输成本	3	元
θ_0	回收车辆无负载状态下单位距离的耗油量	0.1	L/km
θ_s	回收车辆满载状态下单位距离的耗油量	0.2	L/km
L	回收车辆最大载重量	100	kg
W_{ij}^t	回收中心第 t 辆车从回收中心 i 到回收站 j 单位距离的耗油量	0.15	L/km
S_t	回收车辆 t 最大行驶距离	250	km
u	碳排放价格	2	元
δ	CO ₂ 的排放系数	2.5	kg/L
η_1	回收车辆提前到达所产生的等待成本	15	元
η_2	回收车辆延迟到达所产生的惩罚成本	20	元

4.2 算例求解

根据上文所描述的算法步骤进行求解, 首先计算所有站点的轮廓系数 S , 其均值作为聚类结果的轮廓系数 S , 确定最优聚类中心个数。

如图 10 所示, 当回收中心备选点个数 K 为 8 时, S 最大值为 0.67。将 $K=8$ 代入改进的 K-Means 聚类算法中, 得到 X 企业回收中心备选点的位置信息, 如图 11 所示。另外, 将表 5 回收中心备选点的成本信息作为约束条件引入到传统遗传算法的选址初始条件中。

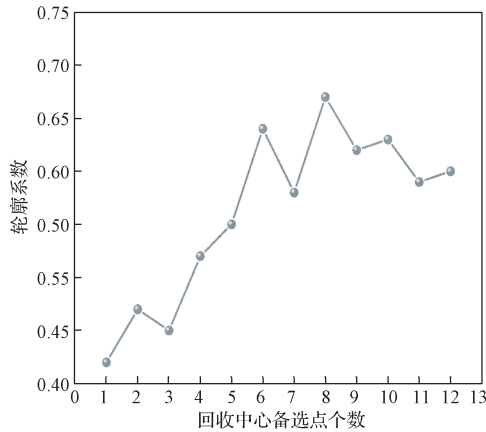


图 10 轮廓系数趋势折线图

Fig. 10 Trend line chart of contour coefficient

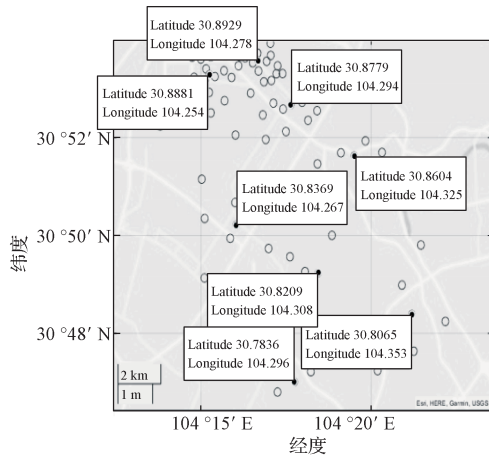


图 11 X 企业回收中心备选点坐标图

Fig. 11 X enterprise recycling center candidate point coordinates

采用传统遗传算法确定回收中心的最终位置, 使得上层模型的总成本最小。通过 MATLAB 对上层模型进行求解, 选出 4 个最终回收中心, 分别为备选回收中心 1、备选回收中心 2、备选回收中心 4、备选回收中心 6, 将其依次对应为回收中心 1、回收中心 2、

回收中心 3、回收中心 4。最终回收中心选址位置结果如图 12 所示, 其建设成本和运营成本如表 6 所示。

表 5 回收中心备选点信息

Table 5 Recycling center alternative site information

序号	经度 / °E	纬度 / °N	面积 / m ²	年租金 / 元	设备 购置费 / 元	回收中心 固定成本 / 元
1	104.254	30.8881	198	72 000	6000	3000
2	104.278	30.8929	239	80 000	8000	5000
3	104.294	30.8779	322	98 000	13 500	7500
4	104.267	30.8369	218	72 000	11 000	6000
5	104.308	30.8209	231	85 000	10 500	6000
6	104.325	30.8604	187	64 400	6500	2500
7	104.296	30.7836	242	72 000	8500	5500
8	104.353	30.8065	278	85 000	14 000	6500

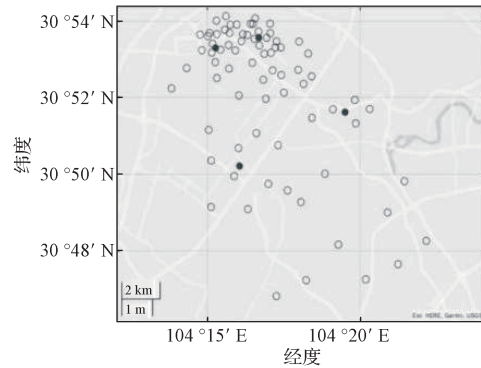


图 12 X 企业回收中心选址方案图

Fig. 12 X enterprise recycling center site selection plan

表 6 上层模型中 4 个回收中心的各项成本信息

Table 6 Cost information for each of the four recycling centers in the upper level model

回收中心名称	成本类别	成本
回收中心 1 (104.254° E, 30.8881° N)	建设成本	78 000
	运营成本	6463
回收中心 2 (104.278° E, 30.8929° N)	建设成本	88 000
	运营成本	8350
回收中心 3 (104.267° E, 30.8369° N)	建设成本	83 000
	运营成本	8490
回收中心 4 (104.325° E, 30.8604° N)	建设成本	70 900
	运营成本	6395

利用上层模型确定回收中心的位置和数量后, 由此可对下层模型进行求解。用改进遗传算法求解快递包装回收中心车辆的最优回收路径。算法参数设置如下: 初始种群大小为 80, 交叉操作概率为 0.7, 变异

操作概率为 0.1，最大迭代次数为 200。回收中心每天会有两次发车时间，即早上 7 时和晚上 8 时。分别在早上 7 时至 10 时、晚上 8 时至 11 时进行回收任务。回收车辆的平均行驶速度为 40 km/h。图 13 为采用传统遗传算法和改进遗传算法求解后得到的路径方案图，具体数据如表 7 所示。两种算法进行对比后发现，改进遗传算法使下层模型回收路径成本降低 19.8%，这证明了改进遗传算法的有效性。

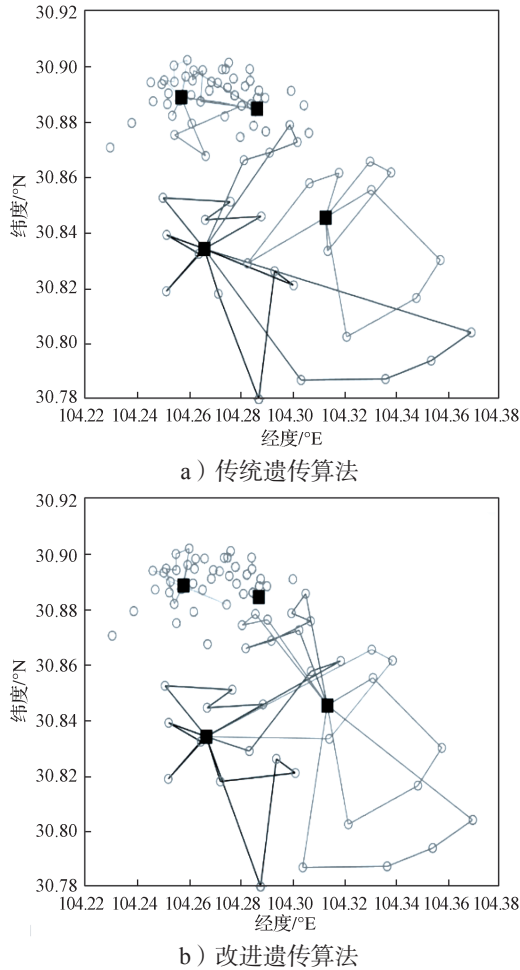


图 13 两种算法求解路径方案对比图

Fig. 13 Comparison chart of path solution schemes from two algorithms

表 7 遗传算法改进前后各项成本对比

Table 7 Comparison of various costs before and after the improvement of genetic algorithm

算法	回收车辆 固定成本 / 元	回收车辆 运输成本 / 元	碳排放 成本 / 元	时间窗 惩罚成 本 / 元	下层模型 总成本 / 元
传统遗传 算法	16 700	7671	5642	1035	31 048
改进遗传 算法	13 600	6891	5204	225	25 920

表 8~11 分别给出了改进遗传算法下的回收中心 1~4 的具体回收路径方案。

表 8 回收中心 1 的回收路径方案

Table 8 Recycle center 1 specific recycling path optimization results

回收车辆序号	路 径
1	回收中心 1—39—18—回收中心 1
2	回收中心 1—21—19—36—32—74—回收中心 1
3	回收中心 1—9—11—76—34—回收中心 1
4	回收中心 1—75—67—49—50—回收中心 1
5	回收中心 1—12—15—14—回收中心 1
6	回收中心 1—20—16—35—8—回收中心 1

表 9 回收中心 2 的回收路径方案

Table 9 Recycle center 2 specific recycling path optimization results

回收车辆序号	路 径
1	回收中心 2—42—66—64—65—10—回收中心 2
2	回收中心 2—22—25—33—24—回收中心 2
3	回收中心 2—28—23—29—回收中心 2
4	回收中心 2—17—38—40—回收中心 2
5	回收中心 2—13—31—30—37—41—回收中心 2

表 10 回收中心 3 的回收路径方案

Table 10 Recycle center 3 specific recycling path optimization results

回收车辆序号	路 径
1	回收中心 3—6—7—54—回收中心 3
2	回收中心 3—26—57—56—回收中心 3
3	回收中心 3—27—55—3—48—回收中心 3
4	回收中心 3—1—2—51—回收中心 3
5	回收中心 3—52—62—63—61—回收中心 3

表 11 回收中心 4 的回收路径方案

Table 11 Recycle center 4 specific recycling path optimization results

回收车辆序号	路 径
1	回收中心 4—60—70—58—59—69—68—回收中心 4
2	回收中心 4—72—71—73—回收中心 4
3	回收中心 4—72—71—73—回收中心 4
4	回收中心 4—43—44—45—46—回收中心 4

由此可以得出下层模型回收中心的各项成本，如表 12 所示。在下层模型中，回收中心 1 的成本总和为 8829 元，回收中心 2 的成本总和为 7024 元，回收中心 3 的成本总和为 4365 元，回收中心 4 的成本总和为 5702 元，4 个回收中心的成本总计为 25 920 元。

结合上层模型的回收成本，可得各回收中心的总成本，如表 13 所示。

表 12 下层模型中 4 个回收中心的各项成本
Table 12 The costs of the five recycling centers in the lower model

回收中心名称	成本类别	成本 / 元
回收中心 1	回收车辆固定成本	5600
	运输成本	1809
	碳排放成本	1280
	时间窗惩罚成本	140
回收中心 2	回收车辆固定成本	4000
	运输成本	1640
	碳排放成本	1344
	时间窗惩罚成本	40
回收中心 3	回收车辆固定成本	1600
	运输成本	1320
	碳排放成本	1400
	时间窗惩罚成本	45
回收中心 4	回收车辆固定成本	2400
	运输成本	2122
	碳排放成本	1180
	时间窗惩罚成本	0

表 13 各回收中心的总成本
Table 13 The total cost of each recycling center

回收中心名称	总成本 / 元
回收中心 1	93 292
回收中心 2	103 374
回收中心 3	95 855
回收中心 4	82 997
合计	375 518

5 结语

快递包装回收中心的选址和回收路径优化共同决定整个快递包装回收系统的运作效率。本文运用双层规划模型将快递包装回收中心的选址和路径优化问题进行了系统性整合，并改进算法求解双层规划模型。通过对成都市青白江区的仿真分析，求得了最优的回收中心位置和回收路径，并验证了双层规划模型和算法的有效性与可行性。研究结果不仅为优化快递包装回收系统提供了理论支持，同时也为类似的资源回收（如废旧电池、工业废料和生活垃圾等）提供了借鉴和参考。

未来，将进一步扩展现有的算法框架，尝试引入更多的优化算法，如布谷鸟算法、灰狼算法以及局部搜索算法等，以提高问题求解的精度与效率。此外，还应考虑多种不同材质的快递包装，进一步完善回收路径，以应对实际物流中可能出现的更复杂的回收场景和挑战。

参考文献:

- [1] 王小月. 2024 年我国快递业务量突破 1700 亿件 [N]. 中国消费者报, 2025-01-13(04)[2025-02-21].
- [2] 成灶平, 丛培栋, 马良. 政府不同奖惩措施下消费者参与快递包装回收行为演化研究 [J]. 运筹与管理, 2024, 33(3): 218-225.
- [3] 国务院. 国务院关于修改《快递暂行条例》的决定 [DB/OL]. (2025-04-18) [2025-05-10]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202504/content_7019787.htm.
- [4] 邹筱, 李丹, 周欢, 等. 碳约束下生鲜平台供应链包装回收决策与协调研究 [J]. 包装学报, 2023, 15(4): 1-12.
- [5] KONG F R, LU H X. Research on Online Shopping Packaging Recycling Strategy under Big Data Environment[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1883(1): 312-317.
- [6] 郑湘明, 陈丽娜. 双碳背景下居民快递包装回收行为研究 [J]. 包装学报, 2024, 16(3): 8-17.
- [7] 褚东亮, 范雪, 豆祥芬, 等. 基于“互联网+TPR”的逆向物流回收网络体系研究 [J]. 包装工程, 2023, 44(11): 166-174.
- [8] 陈丹, 汤程, 谢宇, 等. 面向城市低空物流配送的无人机实时航迹双层规划 [J]. 航空学报, 2025, 46(16): 229-247.
- [9] 吴国栋, 胡殿刚, 张珍珍, 等. 考虑可再生能源接入的主动配电网双层规划消纳优化方法 [J/OL]. 中国测试, 2025: 1-11. (2025-03-20).
- [10] 马艳芳, 贾佳鹏, 李宗敏, 等. 智能垃圾回收下收集中心选址-路径二层优化 [J]. 计算机工程与应用, 2024, 60(3): 309-320.
- [11] 万孟然, 叶春明. 基于双层规划的物流配送中心选址及配送优化 [J/OL]. 复杂系统与复杂性科学, 2024: 1-8. (2024-03-13).
- [12] JIANG Y H. Location and Path Planning of Cross-Border E-Commerce Logistics Distribution Center in Cloud Computing Environment[C]. Advanced Hybrid Information Processing. Cham: Springer, 2021: 30-40.
- [13] 程学庆, 贾江涛, 李月, 等. 干线公路管理站选址

- 双层规划模型与算法 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2016, 16(3): 207-213.
- [14] 叶一芄, 张小宁. 基于随机运输路径选择的物流中心选址模型 [J]. 管理科学学报, 2017, 20(1): 41-52.
- [15] 邢立宁, 吴 健. 考虑废物包装时间的车辆回收路径规划方法 [J]. 包装学报, 2021, 13(5): 42-48.
- (责任编辑: 廖带莲)

Research on Location and Route Optimization of Express Packaging Recycling Center Based on Bilayer Programming

ZHENG Xiangming, LUO Xiaodi

(School of Economics and Management, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: To enhance the recycling rate of express packaging and the efficiency of the reverse logistics system for express packaging, a bilayer programming model is adopted to address the location selection and route optimization of express packaging recycling centers. Firstly, the unsupervised and easy-to-operate K-Means clustering algorithm is used to determine the number and candidate locations of recycling centers. Then, the traditional genetic algorithm is employed to solve the upper-level model and determine the final locations of the recycling centers. Next, the improved genetic algorithm is utilized to solve the lower-level model and optimize the recycling routes to minimize costs. Finally, a simulation analysis is conducted using X enterprise in Qingbaijiang district, Chengdu as an example, which verifies the effectiveness of the bilayer programming model and the designed solution algorithms.

Keywords: express packaging recycling; bilayer programming model; location selection; route optimization

附表 1 回收站的基本数据
Appendix 1 Basic data of the recycling station

序号	经度 /°E	纬度 /°N	货物量 /kg	序号	经度 /°E	纬度 /°N	货物量 /kg
1	104.251 849	30.818 976	16	39	104.256 984	30.887 512	26
2	104.264 441	30.832 471	29	40	104.286 973	30.888 467	19
3	104.300 959	30.821 131	26	41	104.287 601	30.891 136	23
4	104.357 541	30.830 194	17	42	104.261 421	30.889 514	15
5	104.330 953	30.855 435	24	43	104.369 488	30.804 187	23
6	104.330 469	30.865 641	17	44	104.354 028	30.794 059	12
7	104.338 553	30.861 703	28	45	104.336 415	30.787 441	23
8	104.245 884	30.894 107	28	46	104.303 818	30.787 082	24
9	104.250 124	30.893 456	34	47	104.348 307	30.816 567	11
10	104.280 911	30.885 724	17	48	104.271 963	30.818 073	18
11	104.265 091	30.887 208	16	49	104.238 521	30.879 509	16
12	104.268 489	30.891 188	19	50	104.230 205	30.870 679	19
13	104.284 541	30.886 174	17	51	104.251 987	30.839 245	17
14	104.271 692	30.893 891	26	52	104.250 568	30.852 585	26
15	104.269 244	30.894 305	25	53	104.321 424	30.802 618	23
16	104.261 982	30.894 781	17	54	104.314 109	30.833 481	17
17	104.289 976	30.888 525	28	55	104.293 608	30.826 218	21
18	104.259 336	30.896 195	38	56	104.283 193	30.829 029	22
19	104.254 792	30.900 134	28	57	104.307 035	30.857 825	21
20	104.262 408	30.898 419	19	58	104.291 663	30.868 810	11
21	104.259 968	30.902 112	15	59	104.306 856	30.875 907	15
22	104.274 764	30.898 867	14	60	104.302 436	30.872 630	14
23	104.284 231	30.894 702	17	61	104.288 457	30.845 903	14
24	104.275 957	30.901 167	27	62	104.276 597	30.851 175	17
25	104.273 422	30.898 787	16	63	104.266 825	30.844 654	16
26	104.318 474	30.861 569	25	64	104.267 043	30.867 610	15
27	104.287 538	30.780 147	12	65	104.255 014	30.875 176	12
28	104.284 067	30.898 851	34	66	104.261 674	30.879 301	24
29	104.299 993	30.891 044	23	67	104.246 790	30.887 295	22
30	104.278 249	30.889 408	17	68	104.304 953	30.885 830	12
31	104.282 238	30.892 726	12	69	104.299 495	30.878 753	13
32	104.251 027	30.894 802	13	70	104.281 785	30.866 112	14
33	104.275 465	30.892 216	16	71	104.280 371	30.874 461	16
34	104.274 423	30.881 873	14	72	104.290 242	30.876 448	14
35	104.265 894	30.898 481	17	73	104.285 513	30.878 485	17
36	104.254 992	30.894 303	18	74	104.254 172	30.882 095	11
37	104.277 798	30.895 461	14	75	104.252 279	30.886 261	13
38	104.287 579	30.891 155	23	76	104.252 664	30.890 136	11