考虑模糊排放量的包装废弃物收运路径优化

朱玥琪^{1,2}, 邢志凯^{1,2}, 潘帅³, 朱玉洁^{1,2}, 徐爱琴^{1,2}

(1.郑州大学 信息管理学院,郑州 450001; 2.郑州市数据科学研究中心,郑州 450001;

3.北京交通大学 交通运输学院,北京 100044)

摘要:目的 为探索包装废弃物排放量不确定性对收运路径的影响,提高收运作业质量,本文研究了考 虑模糊排放量的包装废弃物多转运中心收运路径问题。方法 首先,基于模糊可信性理论,引入三角模 糊数刻画收集点废弃物排放量,构建以最小收运里程为目标函数、含决策者主观偏好约束的废弃物多转 运中心收运路径优化模型。其次,设计了包含 12 种邻域准则的自适应大邻域搜索 (Adaptive Large Neighborhood Search, ALNS)算法。最后,算例部分比较了确定排放量与模糊排放量下的不同废弃物收 运方案,并利用多种智能优化算法求解,同时对决策者主观偏好值进行了灵敏度分析。结果 考虑模糊 排放量的废弃物收运里程比确定排放量收运里程多 262.34 km, ALNS 算法求解性能优于蚁群优化算法 (Ant Colony Optimization, ACO)等 3 种算法,决策者最佳主观偏好值是 0.6。结论 本研究能有效应 对不确定排放量的挑战,为相关领域提供理论支持和参考依据。

关键词:废弃物收运;模糊排放量;模糊可信性理论;自适应大邻域搜索算法;路径优化 中图分类号:TB11;F252 文献标志码:A 文章编号:1001-3563(2025)03-0221-08 DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2025.03.026

Optimization of Packaging Waste Collection Routes Considering Fuzzy Emission

ZHU Yueqi^{1,2}, XING Zhikai^{1,2}, PAN Shuai³, ZHU Yujie^{1,2}, XU Aiqin^{1,2}

(1. School of Information Management, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;
 2. Zhengzhou Data Science Research Center, Zhengzhou 450001, China;
 3. School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

ABSTRACT: The work aims to investigate the multi-depot packaging waste vehicle routing problem considering fuzzy emission to study the impact of uncertain packaging waste generation on collection routes and improve the quality of collection operations. First, based on the fuzzy credibility theory, triangular fuzzy numbers were introduced to represent waste generation at collection points, and an optimization model was constructed with the objective of minimizing collection mileage while incorporating the decision maker's subjective preference constraints. Secondly, an Adaptive Large Neighborhood Search (ALNS) algorithm with 12 neighborhood criteria was designed. Finally, in the case study, different waste collection schemes under both deterministic and fuzzy emission conditions were compared, employing various intelligent optimization algorithms and conducting sensitivity analysis on the decision maker's subjective preference values. The collection mileage considering fuzzy emission was 262.34 km longer than that under deterministic demand. The ALNS algorithm outperformed Ant Colony Optimization (ACO) and three other algorithms in terms of solution performance, with the optimal subjective preference value for the decision maker being 0.6. This study

effectively addresses the challenges posed by uncertain emissions, providing theoretical support and reference for related fields.

KEY WORDS: packaging waste collection; fuzzy emission; fuzzy credibility theory; adaptive large neighborhood search algorithm; route optimization

包装废弃物收运工作直接关系到居民生活质量、 居住环境和城市健康发展^[1]。然而,受公共活动、节 假日、突发事件、天气等因素影响,每日废弃物产生 量往往存在不确定性,导致收运车辆空载或超载,甚 至部分收集点的废弃物无法及时清运,影响居民生活 质量。因此,研究考虑模糊排放量的废弃物收运路径 问题具有重要的理论意义和实际应用价值。

关于包装废弃物收运路径问题,国内外学者开展 了大量的研究。杨粟涵等[2]研究了单个废弃物转运站 辖区收集点废弃物收运路径规划问题,构建了以废弃 物收运车行驶距离最短为目标的混合整数规划模型。 Buhrcal 等^[3]考虑司机工作时长和客户时间窗,建立 了以收运成本最小为目标的废弃物收运路径模型。肖 文玉^[4]研究了考虑多车型的废弃物收运路径规划问 题,建立了城市废弃物收运模型,并以成都抚琴街道 数据验证求解。郭政杰^[5]研究了 COVID-19 疫情背景 下的医疗废弃物收运路径问题,根据节点距离和感染 风险指标,构建了以病毒传播风险最小和运输成本最 低为目标的医疗废弃物收运路径优化模型。张家祥^[6] 研究了集群性废弃物回收需求分配问题,建立了以最 小运营成本为目标函数的废弃物收运中转设施布局 与车辆路径优化模型。上述研究均是将废弃物排放量 设为定值。然而,实际环境中,受公共活动、节假日、 突发事件、天气、季节等因素影响,每日废弃物产生 量往往存在不确定性,这导致废弃物收运路径问题是 含有模糊参数的不确定规划问题,因此上述研究难以 反映实际废弃物收运工作。

关于模糊参数的处理,最常见的方法如随机规 划、模糊规划等^[7]。随机规划常依赖于历史数据进行 概率分布拟合。例如,Gruler等^[8]、Alshraideh等^[9] 分别以各收集点历史数据均值、概率分布函数等方法 将不确定排放量转化为确定问题,但需要大量数据, 因此实用性不强。模糊规划可通过模糊集理论处理不 确定性,能更好地处理那些无法精确定义的不确定信 息,同样可提供有效的解决方案^[7]。值得注意的是, Liu等^[10]提出的模糊可信性理论,可将不确定性规划 问题转化为等价的确定数学规划,凭借简单、实用等特 点在多式联运、货物配装等领域得到广泛应用^[11-12]。然 而,基于模糊规划和模糊可信性理论的参数处理方法在 废弃物收运路径领域尚未见报道。

近年来,随着启发式算法的不断发展,在组合优 化问题领域得到越来越广泛的应用。例如,遗传算法 (Genetic Algorithm, GA)^[13]、蚁群算法(Ant Colony Optimization, ACO)^[14]、差分进化算法(Differential Evolution, DE)^[15]等。这些算法在求解多约束、复杂组合优化问题时,往往存在局部搜索能力弱、解空间探索效率低、邻域探索能力差等不足。值得注意的是, Pisinger 等^[16]提出的 ALNS 算法可动态调整搜索策略、扩展解空间,通过适应性地选择和调整不同的邻域操作,逐步改进解的质量,具有较强的全局搜索能力和高效的局部优化能力,尤其适用于解决复杂、非线性的大规模复杂组合优化问题^[17]。

基于上述分析,本研究率先提出基于模糊可信性 理论的废弃物多转运中心收运路径优化模型。研究工 作要点如下:考虑到三角模糊数灵活高效、适应性强 等特点,引入三角模糊数刻画收集点废弃物排放量; 为避免废弃物收运作业影响居民日常生活,引入收运 时长约束,以最小收运里程为目标函数,建立含决策 者主观偏好约束的废弃物多转运中心收运路径优化 数学模型;考虑到该问题是 NP-Hard 难题,设计包含 12 种邻域准则的自适应大邻域搜索算法(Adaptive Large Neighborhood Search, ALNS)求解;算例部分, 比较废弃物排放量确定状态与模糊状态下的不同收 运方案,利用多种智能优化算法求解算例,同时对决 策者主观偏好值进行灵敏度分析,以验证模型与算法 的有效性,具有重要的理论意义和实际应用价值。

考虑模糊排放量的包装废弃物多 转运中心收运路径问题

1.1 问题描述

本研究考虑模糊排放量的包装废弃物多转运中 心收运路径问题,收运网络如图1所示。市区有多个 转运中心,每个转运中心仅负责辖区内的收集点废弃 物收运工作。收运时,收运车的车厢剩余装载量减少, 同时面临后续收集点废弃物排放量不确定性的挑战。 若车辆到达下一收集点时,发现剩余装载量低于实际 排放量,则该收集点收运失败,车辆直接返回转运中 心;而该收集点等待其他收运车收运,直至完成全部 收集点的废弃物收运工作。此外,为避免收运作业影 响居民日常生活,收集点收运工作时间严格限制在每 日清晨4—6点。优化目标是全部车辆收运里程最短。 为便于建模求解,作出如下假设。

1)每个收运点有且只被收运一次。

2)收运车数量不限,在完成收运作业后,需返 回转运中心。

3)收集点收运作业时长与排放量存在线性关联。

4) 收运车辆速度稳定。



图 1 收运网络 Fig.1 Collection network

1.2 符号说明

相关参数和变量说明见表 1。

表 1 模型符号

		Tubil Symbols for model			
符号		相关说明			
收运 网络	G	废弃物收运网络, G=(N,E,M)			
	М	转运中心集合			
集合	N	废弃物收集点集合			
	K	收运车辆集合			
参数	C_k^m	转运中心 m 派出车辆 k 的额定载质量,			
		单位为 kg, $m \in M$, $k \in K$			
	\tilde{q}_i^m	转运中心 m 辖区内,收集点 i 的废弃物			
		排放量,单位为 kg, $m \in M$, $i \in N$			
	$d_{i,j}^m$	转运中心 m 辖区内,收集点 i 到点 j 的			
		距离,单位为 km, $m \in M$,i、 $j \in N$			
	$d_{0,i}^m$	转运中心 m 到废弃物收集点 i 的距离,			
		单位为 km, $m \in M$, $i \in N$			
	t_i^m	收集点 i 处的废弃物清运时间, 单位为			
		min, $m \in M$, $i \in N$			
	$e^{m,k}$	转运中心 m 派出车辆 k 的清运能力,单			
		位为 kg/min, $m \in M$, $k \in K$			
	v_k^m	转运中心 m 派出车辆 k 的行驶速度,单			
		位为 km/h, $m \in M$, $k \in K$			
	$s_{k,i}^m$	车辆 k 在到达废弃物收集点 i 时,剩余有			
		效装载量,单位为 kg			
	$T_{\rm max}$	废弃物收集点收运时长,为120 min			
	$t_{i,j}^m$	转运中心 m 辖区内,收集点 i 到点 j 的			
		时间, 单位为 min, $m \in M$, $i, j \in N$			
	$x_{i,j}^{m,k}$	转运中心 m 派出车辆 k 是否从废弃物收			
		集点 i 到收集点 j 。当 $x_{i,j}^{m,k} = 1$ 时,则车			
		辆 k 从收集点 i 到收集点 j; 反之为 0			
	$y_i^{m,k}$	转运中心 m 派出车辆 k 是否在废弃物收集			
决策		$_{j}$ 与 $_{i}$ 完成			
变量		$L \pm E = 2 \pm $			
		A 在反开初级来点 i 九成收运工下; 及之外			
	z_k^m	、 转运中心 <i>m</i> 是否派出车辆 k 进行废弃物			
		————————————————————————————————————			
		瓜半洲 K 収払: 以乙万 U			

1.3 模糊排放量处理

考虑到收运车辆在到达收运点前无法确定废弃 物排放量,本研究引入模糊可信性理论和决策者主观 偏好值,利用三角模糊数刻画废弃物排放量,对问题 进行预处理,构建数学模型。

假设收运车辆 k 从转运中心 m 出发, 完成前 l 个 收集点的收运作业, 车辆 k 剩余有效装载量 $s_{k,l}^{m} = C_{k}^{m} - \sum_{i=1}^{l} \tilde{q}_{i}^{m}$, 故 $s_{k,l}^{m}$ 也为模糊变量。令 $s_{k,l}^{m} = (s_{k,l,1}^{m}, s_{k,l,2}^{m}, s_{k,l,3}^{m})$, 则有式 (1)。 $s_{k,l}^{m} = (s_{k,l,1}^{m}, s_{k,l,2}^{m}, s_{k,l,3}^{m}) =$ $(C_{k}^{m} - \sum_{i=1}^{l} q_{i,3}^{m}, C_{k}^{m} - \sum_{i=1}^{l} q_{i,1}^{m})$ (1) 根据模糊可信性理论,下一个收集点 l+1处的废

承据候補可信性理论,下一个收集点t+1处的废 弃物排放量 \tilde{q}_{l+1}^{m} 小于等于车辆剩余装载量 $s_{k,l}^{m}$ 的可信 性Cr,见式(2)~(3)。

$$Cr = Cr \left\{ \widetilde{q}_{l+1}^{m} \leqslant s_{k,l}^{m} \right\} = Cr \left\{ \left(q_{l+1,1}^{m} - s_{k,l,3}^{m}, q_{l+1,2}^{m} - s_{k,l,2}^{m}, q_{l+1,3}^{m} - s_{k,l,1}^{m} \right) \leqslant 0 \right\}^{(2)}$$

$$Cr = \begin{cases} 0 & q_{l+1,1}^{m} \geqslant s_{k,l,3}^{m} \\ \frac{s_{k,l,3}^{m} - q_{l+1,1}^{m} + q_{l+1,2}^{m} - s_{k,l,2}^{m}}{2\left(s_{k,l,2}^{m} - q_{l+1,1}^{m} + q_{l+1,2}^{m} - s_{k,l,2}^{m}\right)} & q_{l+1,1}^{m} \leqslant s_{k,l,3}^{m}, q_{l+1,2}^{l} \ge s_{k,l,2}^{m} \\ \frac{q_{l+1,3}^{m} - s_{k,l,1}^{m} - 2\left(q_{l+1,2}^{m} - s_{k,l,2}^{m}\right)}{2\left(s_{k,l,2}^{m} - q_{l+1,2}^{m} + q_{l+1,3}^{m} - s_{k,l,1}^{m}\right)} & q_{l+1,2}^{m} \leqslant s_{k,l,2}^{m}, q_{l+1,3}^{m} \ge s_{k,l,1}^{m} \\ 1 & q_{l+1,3}^{m} \leqslant s_{k,l,1}^{m} \end{cases}$$

$$(3)$$

式(2)~(3)中: *Cr* 为满足 $\tilde{q}_{l+1}^{m} \leq s_{k,l}^{m}$ 条件的可 信度, *Cr* \in [0,1]。*Cr* 越大,则收运车 *k* 从收集点 *l* 到 收集点 *l*+1的可信度就越大;当*Cr*=1时,收运车 *k* 必执行收集点 *l*+1的收运工作;反之亦然。

主观偏好值 $Cr^*(Cr \in [0,1])$ 表示决策者对收运车 k 是否执行从收集点 l 到收集点 l+1收运工作的态度。 当 $Cr \ge Cr^*$ 时,车辆 k 前往收集点 l+1;反之,车辆 k 回到转运中心,而收集点 l+1的收运工作由其他车 辆完成;重复上述过程,直至清运全部收集点。

1.4 目标函数

为提升收运效率,本研究以多转运中心车辆最小 收运里程为目标函数,基于模糊可信性理论,建立考 虑模糊排放量的废弃物多转运中心收运路径模型,见 式(4)。

$$\min \sum_{m \in M} \sum_{k \in K} \left[\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} d_{i,j}^{m} \cdot x_{i,j}^{m,k} + \sum_{i \in N} d_{0,i}^{m} \cdot x_{0,i}^{m,k} + \sum_{i \in N} d_{i,0}^{m} \cdot (1 - y_{i}^{m,k}) \right] \cdot z_{k}^{m}$$

$$(4)$$

式中:第1部分表示收集点间的距离;第2部分 表示转运中心到收集点的距离;第3部分表示车辆因 剩余有效装载量不足导致收运失败,返回转运中心的 路程。

1.5 约束条件

$$\tilde{T}^{m,k} \leq T_{\max}, \ \forall m \in M, \ k \in K$$
 (5)

$$\widetilde{T}^{m,k} = \sum_{j \in N} \sum_{i \in N} t_{i,j}^{m,k} + \sum_{i \in N} \widetilde{t}_{i}^{m,k} = \widetilde{q}_{i}^{m} / e^{m,k} + \left[\sum_{i \in N} \sum_{i \in N} d_{i,j}^{m} \cdot x_{i,j}^{m,k} + \sum_{i \in N} d_{0,i}^{m} \cdot x_{0,i}^{m,k} \right] / v_{k}^{m}$$
(6)

$$\sum_{k \in K} y_i^{m,k} = 1, \quad \forall i \in N, m \in M$$
(7)

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in N} x_{i,j}^{m,k} \ge 1, \quad \forall j \in N, m \in M$$
(8)

$$\sum_{j \in N \cup \{0\}} x_{j,i}^{m,k} - \sum_{j \in N \cup \{0\}} x_{i,j}^{m,k} = \begin{cases} 1 & \text{if } i = 0 \\ 0 & \text{if } i \in N, \quad \forall m \in M, \ k \in K \end{cases}$$
(9)

$$\begin{bmatrix} -1 & \text{if } i = 0 \end{bmatrix}$$

$$\sum_{i \in N} \tilde{q}_i^m \cdot y_i^{m,k} \leq C_k^m \cdot z_m^k , \quad \forall m \in M, k \in K$$
(10)

$$s_{k,i}^{m} = C_{k}^{m} - \sum_{j \in N} \tilde{q}_{j}^{m} \cdot y_{j}^{m,k}, \quad \forall m \in M, k \in K, i \in N \quad (11)$$

$$Cr\left\{\tilde{q}_{i}^{m}-s_{k,i}^{m}\leqslant0\right\}\geqslant Cr^{*},\quad\forall m\in M,k\in K,i\in N (12)$$

$$y_{i}^{m,k} = \begin{cases} 1 & \text{if } s_{k,i}^{m} \ge \tilde{q}_{i}^{m}, x_{i,j}^{m,k} = 1 \\ 0 & \text{if } s_{k,i}^{m} < \tilde{q}_{i}^{m}, x_{i,j}^{m,k} = 0 \end{cases}, \quad \forall m \in M, k \in K, i, j \in N (13) \end{cases}$$

$$x_{i,i}^{m,k} \in (0,1), \quad \forall m \in M, k \in K, i, j \in N$$

$$(14)$$

 $z_k^m \in (0,1), \quad \forall m \in M, k \in K \tag{15}$

其中,式(5)~(6)为收集点收运时长约束, 避免收运作业影响居民日常生活;式(7)为收集点 完成收运次数约束,即每个收集点有且仅能进行一次 收运;式(8)表示允许多辆收运车前往该收集点; 式(9)为节点流量平衡约束;式(10)为不能超过 车辆额定载质量约束;式(11)为收运车剩余有效装 载量约束;式(12)为收集点排放量小于车辆剩余有 效装载量的可信性大于决策者主观偏好值;式(13) 为车辆是否完成收集点收运工作决策变量。

2 算法设计

MD-PWVRP-FE 是 NP-Hard 难题,求解难度随 问题规模呈指数爆炸增长。根据问题特性,ALNS 算 法通过动态调整权重等自适应机制,从多样化破坏算 子协同集约化修复算子的邻域准则组合中挑选最佳 准则组合,产生解的邻域结构,避免陷入局部最优, 具有收敛性好、搜索效率高等特点^[16-17]。

本研究提出求解 MD-PWVRP-FE 问题的 ALNS 算法,算法框架如图 2 所示。其中,ALNS 主要包括 初始可行解、破坏-修复邻域准则、选择策略和自适 应权重更新机制、接受准则。

2.1 染色体编码

编码方式含义清晰,可省略解码环节,进而影响 算法性能^[18]。MD-PWVRP-FE 问题的解采用直观排 列编码方式。其中,解由收运线路构成,每条线路存 放的数组表示车辆 k 的收运路线。第1位表示转运中 心编号;第2位表示车辆编号;第3~4位表示收集点 编号和收运状态,其中"1"表示收运成功,"0"表示失 败,以此类推;最后1位表示转运中心。



图 2 基于 MD-PWVRP-FE 问题的 ALNS 算法框架 Fig.2 Framework of ALNS algorithm for MD-PWVRP-FE problem

2.2 初始可行解

MD-PWVRP-FE 问题较常规车辆路径问题更加 复杂,因此高质量的初始可行解可提高 ALNS 算法的 收敛速度。考虑到转运中心派出的收运车数是变量, 在符合车辆收运时长限制和额定载质量限制条件下, 可根据三角不等式定理,合并路径减少收运里程,见 式(16)。本研究采用节约里程启发算法 (Clarke-Wright Savings Algorithm, C-W)构造初始 可行解。

S(i, j) = d(center, i) + d(center, j) - d(i, j)(16)

式中: d(center, i) 为中心 center 到收集点 i 的距离; d(i, j) 为收集点 i 到 j 的距离。

2.3 邻域准则

邻域准则是破坏算子协同修复算子的配对组合, 用来优化初始可行解^[17],即以初始可行解为基准,选 择某种破坏算子从路径中移除部分收集点,再选用某 种修复算子插入收集点获得新解。本研究采用4种破 坏算子、3种修复算子共12种邻域准则,用以探索 新解。其中,破坏算子包括随机破坏、最坏破坏、Shaw 破坏、局部最差破坏算子,修复算子包括随机修复、 最优修复、局部最优修复算子。此外,破坏、修复算 子的执行过程均需满足收运时长、车辆额定配载约 束,避免新生成的解不满足模型需求。

1)随机破坏算子。在当前解中随机选取若干收 集点或路径段进行移除,生成新解。其中,随机破坏 数量不超过当前解收集点数量的 30%。

3)最坏破坏算子。计算各收集点被破坏前后目标函数的差值Δf。差值越大,越优先破坏。

3) Shaw 破坏算子。随机在当前解中破坏一个收 集点,计算该收集点与其他节点的相关度 R,见式 (17)。接着,多次移除相关度高的节点,与随机破 坏算子一样,移除节点数量不超过 30%。

$$R = \frac{d_{ij}}{\max_{i,j\in\mathcal{S}} (d_{ij})} \tag{17}$$

4)局部最差破坏算子。在当前解的邻域移除最 差的收集点,调整解的局部范围。

5)随机修复算子。随机将被破坏的收集点插入 当前解的不同位置,构成新解。

6)最优修复算子。将被破坏的收集点插入能带 来最大改善的位置。通过评估所有可能的插入位置, 选择使收集里程最小化的位置。

7)局部最优修复算子。在解的局部邻域选择最 优插入位置,以最小化目标函数的变化。

2.4 邻域组合选择策略和权重更新

邻域组合选择策略决定了在搜索过程中如何选 择破坏算子与修复算子,直接影响解的质量和搜索效 率,因此本研究通过轮盘赌机制选择破坏算子和修复 算子类型。

2.5 模拟退火准则

考虑到 MD-PWVRP-FE 问题复杂度高,本研究 采用对数退火机制,确保算法可以充分探索解空间, 避免过早收敛到局部最优。

3 算例分析

鉴于目前尚无关于模糊废弃物排放量的标准测 试算例,本研究采用 Solomn 测试库 C202 样例。从 样例中随机选择 61 个收集点与 3 个转运中心,收集 点排放量 \tilde{q}_i^m 扩大 50 倍,收运服务时长对应 C202 样 例中 Earliest、Latest 数据分别为 240、360 min,主观 偏好值为 0.6,迭代次数为 1 000,遗忘系数 δ 为 0.15, 温度下降系数 η 为 0.95,赋分 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 分别为 30、 20、10,剩余参数设置见表 2。算法代码基于 Python 3.8、Windows10 系 统运行, Intel(R) Core(TM) i5-5200CPU。

表 2 仿真试验参数 Tab.2 Simulation experiment parameters

转运 中心	坐标/ km	保有车/ 辆	额定 载质量/kg	速度/ (km·h ⁻¹)	清运能力/ (kg·min ⁻¹)
C1	(20,55)	15	5 000	35	100
C2	(86,46)	18	4 200	55	80
C3	(40,50)	20	3 500	55	70

3.1 确定与模糊排放量收运路径对比分析

为检验算法有效性,分别求解确定排放量和模 糊排放量的收运路径问题。首先确定排放量下的算 法有效性。运行算例 10 次,最小里程收运路线如图 3 所示。

接着进行模糊排放量下的算法有效性分析。设 收集点排放量的三角模糊数 $\tilde{q}_i^m = (50 \cdot q_i^m - 300,$ $50 \cdot q_i^m, 50 \cdot q_i^m + 500),$ 其中 q_i^m 仍为原 C202 样例中的 demand 数值。同样,运行算例 10次,最小里程收运路 线如图 4 所示。2 种排放量下,算法迭代如图 5 所示。

由图 3~5 可知,确定排放量的最小收运里程小于 模糊排放量的收运里程。具体来说,确定排放量最小收 运里程为 996.67 km,而模糊排放量的为 1 259.01 km。 这是由于一方面在模糊条件下,收集点排放量属于三角 模糊数,存在不确定波动,导致收运车辆到达下一收 集点后,发现排放量大于车辆剩余有效装载量,进而 返回收运中心导致出现额外收运里程;另一方面,为 保障全部收集点收运作业完成,转运中心需额外派出 收运车辆,这也导致模糊排放量的整体收运里程较确







图 4 模糊排放量收运路线 Fig.4 Collection routes with fuzzy emission





定排放量有所增加。由图 3~5 还可知,模糊排放量的收运方案所需车辆比确定排放量方案多出 5辆。这是由于 模糊排放量条件下,转运中心需额外派出收运车,确保 在规定收运时长完成辖区内收集点全部收运工作。

3.2 算法性能对比

为对比不同算法的寻优能力,以考虑模糊排放量 的算例为基础,分别用 ALNS、GA、ACO、DE 等算 法仿真,运行算例 10 次,获得最优解的迭代过程如 图 6 所示。



图 6 不同算法迭代过程 Fig.6 Iteration process of algorithms

由图 6 可知, ALNS 算法求解效果最优, ACO 算法次之, GA 算法最差。ALNS 算法获得的最小收 运里程为 1 259.01 km, 比 ACO 算法少 46.48 km。这 是由于本研究设计的 ALNS 算法通过自适应机制动 态调整、选择 4 种破坏算子和 3 种修复算子,避免陷 入局部最优解;更重要的是,本研究设计的 ALNS 算 法相比于其他 3 种算法,通过多种邻域准则,可在解 搜索空间大规模跳跃,提高解的质量和多样性。

3.3 主观偏好值灵敏度分析

模型可信性约束中,决策者可设置主观偏好值 *Cr*^{*},并对其进行灵敏度分析,探讨其对最小收运里 程的影响。在其他参数不变的条件下,决策者主观偏 好值为 0.1~0.9,以步长 0.1 逐级递增。不同主观偏好 值对应的最小转运里程如图 7 所示。



Fig.7 Sensitivity analysis of subjective preference values

由图 7 可知,最小收运里程随主观偏好值的增加,整体呈上升趋势。这是由于主观偏好值越高,在规定收运时长完成辖区收运工作的概率就越大,需转运中心派出的收运车数量也就越多,导致整体转运时里程越大。值得注意的是,当主观偏好值为 0.5~0.6 时,收运里程增长平缓。因此,主观偏好值为 0.6 是决策者最佳偏好值,既保证了在规定收运时长完成辖区收运工作概率较大,又保证了整体收运里程增幅较小。

4 结语

鉴于实际环境,每日废弃物产生量存在不确定 性,本研究探讨了考虑模糊排放量的废弃物多转运中 心收运路径问题。基于模糊可信性理论,引入三角模 糊数刻画收集点排放量,构建追求最小收运里程并包 含决策者主观偏好约束的多转运中心收运优化模型。 设计 ALNS 算法求解算例,比较确定排放量与模糊排 放量下的收运方案,并选择多种智能优化算法求解, 同时对决策者主观偏好进行灵敏度分析。本研究能有 效应对实际不确定性挑战,为相关领域提供理论依据 与关键技术参考。

参考文献:

 [1] 张莉彦, 钱育浩, 罗伟, 等. 基于体积扫描容重法的 社区垃圾分类系统研究[J]. 包装工程, 2023, 44(21): 221-228.

ZHANG L Y, QIAN Y H, LUO W, et al. Community Garbage Sorting System Based on Measurement of Volume and Bulk Density[J]. Packaging Engineering, 2023, 44(21): 221-228.

- [2] 杨粟涵,李锐,高淑春.城市生活垃圾回收物流网络 路径优化问题研究[J].中国储运,2024(7):60-61. YANG S H, LI R, GAO S C. Research on the Path Optimization of Municipal Solid Waste Recycling Logistics Network[J].China Storage & Transport, 2024(7): 60-61.
- [3] BUHRKAL K, LARSEN A, ROPKE S. The Waste Collection Vehicle Routing Problem with Time Windows in a City Logistics Context[J]. Procedia - Social and Behavioral Sciences, 2012, 39: 241-254.
- [4] 肖文玉. 城市生活垃圾多车型收运路径优化研究[D].
 重庆: 重庆交通大学, 2024: 23-34.
 XIAO W Y. Study on Optimization of Multi-Vehicle
 Collection and Transportation Path of Municipal Solid
 Waste[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University,

2024: 23-34.

- [5] 郭政杰. COVID-19 疫情背景下医疗垃圾转运资源优 化配置研究[D]. 包头:内蒙古科技大学,2023:18-27.
 GUO Z J. Study on Optimal Allocation of Medical Waste Transfer Resources under the Background of COVID-19 Epidemic Situation[D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science & Technology, 2023: 18-27.
- [6] 张家祥. 面向集群性需求的城市生活垃圾清运设施选 址与路径优化研究[D]. 南昌: 江西财经大学, 2023: 10-19.

ZHANG J X. Study on Location Selection and Path Optimization of Urban Domestic Waste Removal Facilities for Cluster Demand[D]. Nanchang: Jiangxi University of Finance and Economics, 2023: 10-19.

- [7] 张敏, 韩晓龙. 多目标模糊机会约束规划的低碳多式 联运路径优化[J]. 计算机应用, 2023, 43(2): 636-644.
 ZHANG M, HAN X L. Low-Carbon Multimodal Transportation Path Optimization Based on Multi-Objective Fuzzy Chance-Constrained Programming[J]. Journal of Computer Applications, 2023, 43(2): 636-644.
- [8] GRULER A, ARAÚJO C L Q, CALVET L, et al. Waste Collection under Uncertainty: A Simheuristic Based on Variable Neighbourhood Search[J]. European Journal of Industrial Engineering, 2017, 11(2): 228.
- [9] ALSHRAIDEH H, ABU QDAIS H. Stochastic Modeling and Optimization of Medical Waste Collection in Northern Jordan[J]. Journal of Material Cycles and Waste Management, 2017, 19(2): 743-753.
- [10] LIU B D, IWAMURA K. Chance Constrained Programming with Fuzzy Parameters[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1998, 94(2): 227-237.
- [11] 杨喆,邓立宝,狄原竹,等.基于模糊需求和模糊运输时间的多式联运路径优化[J]. 控制理论与应用, 2024, 41(6): 967-976.
 YANG Z, DENG L B, DI Y Z, et al. Multimodal Transportation Route Optimization Based on Fuzzy Demand and Fuzzy Transportation Time[J]. Control Theory & Applications, 2024, 41(6): 967-976.
- [12] 高振迪, 计明军, 孔灵睿, 等. 多商品分批次取送货 的模糊需求车辆路径问题[J]. 运筹与管理, 2022, 31(11): 59-64.

GAO Z D, JI M J, KONG L R, et al. Multi-Commodity Vehicle Routing Problem with Split Pickup and Delivery and Fuzzy Demand[J]. Operations Research and Management Science, 2022, 31(11): 59-64.

[13] 徐江, 王航, 周艳杰, 等. 基于混合遗传算法的可变
 尺寸货物装箱问题研究[J]. 包装工程, 2024, 45(13):
 259-267.

XU J, WANG H, ZHOU Y J, et al. Hybrid Genetic Algorithm for Solving Packing Problem with Variable Size[J]. Packaging Engineering, 2024, 45(13): 259-267.

- [14] TADAROS M, KYRIAKAKIS N A. A Hybrid Clustered Ant Colony Optimization Approach for the Hierarchical Multi-Switch Multi-Echelon Vehicle Routing Problem with Service Times[J]. Computers & Industrial Engineering, 2024, 190: 110040.
- [15] ZHANG X Y, ZHANG X S, MIAO Y. Cooperative Global Path Planning for Multiple Unmanned Aerial

Vehicles Based on Improved Fireworks Algorithm Using Differential Evolution Operation[J]. International Journal of Aeronautical and Space Sciences, 2023, 24(5): 1346-1362.

- [16] PISINGER D, ROPKE S. A General Heuristic for Vehicle Routing Problems[J]. Computers & Operations Research, 2007, 34(8): 2403-2435.
- [17] HSIEH F S. A Self-Adaptive Neighborhood Search Differential Evolution Algorithm for Planning Sustainable Sequential Cyber–Physical Production Systems[J]. Applied Sciences, 2024, 14(17): 8044.
- [18] YAN W Q, YANG Z Y, YU Y Y, et al. A Hybrid Algorithm and Collaborative Optimization Strategy Based on Novel Coding Method for SPRD[J]. Ocean Engineering, 2024, 311: 118911.