

考虑交通拥堵的城市医疗废弃物回收路径优化研究

刘 蕾

江南大学商学院, 江苏 无锡

收稿日期: 2024年3月18日; 录用日期: 2024年6月12日; 发布日期: 2024年6月21日

摘 要

日益复杂的城市交通状况和持续增加的医疗废弃物数量, 导致回收工作面临成本上升和疾病传播的问题。本研究考虑了交通拥堵对医疗废弃物回收工作的不利影响, 提出了一个以最小化运输成本为目标的数学模型, 并采用改进的遗传算法求解。数值实验结果表明, 相较于传统遗传算法, 改进的遗传算法通过增加遗传操作多样性、降低过早收敛的风险, 显著提高了全局搜索性能。研究所得的运输方案可为城市医疗废弃物回收工作提供优化建议。

关键词

交通拥堵, 医疗废弃物, 回收网络, 路径规划, 改进的遗传算法

A Study on Optimization of Urban Medical Waste Collection Routing with Consideration of Traffic Congestion

Lei Liu

School of Business, Jiangnan University, Wuxi Jiangsu

Received: Mar. 18th, 2024; accepted: Jun. 12th, 2024; published: Jun. 21st, 2024

Abstract

The increasingly complex urban traffic conditions and the increasing amount of medical waste lead to the problems of rising costs and disease transmission in recycling work. Considering the adverse impact of traffic congestion on medical waste recycling work, this paper proposes a mathematical model with the goal of minimizing transportation cost, and adopts an improved genetic

algorithm to solve it. The numerical experimental results show that compared with the traditional genetic algorithm, the improved genetic algorithm significantly improves the global search performance by increasing the diversity of genetic operations and reducing the risk of premature convergence. The transportation scheme obtained in this study can provide optimization suggestions for the recycling work of medical waste in cities.

Keywords

Traffic Congestion, Medical Waste, Collection Network, Path Planning, Improved Genetic Algorithm

Copyright © 2024 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

随着城市化的进程和医疗技术水平的不断提高,城市医疗废物的产量呈爆发式增长,使得医疗废弃物回收网络不堪重负。医疗废弃物可能携带的病毒存活时间久、传染风险高,运输时稍有不慎就可能传播疾病,对居民的人身健康造成损害,给经济和环境造成损失和破坏。国际上主要的医疗废弃物管理包含三个阶段[1]:从源头分离和收集、储存和运输、处理和处置。回收的三阶段过程涉及到三级节点,分别是医疗机构、处置中心和回收企业,如何在三级节点间设计运输方案亟待解决。

此外,城市交通拥堵更是对医疗废弃物回收工作带来了成本和时效方面的负面影响,一方面,油耗增加导致运输成本上升;另一方面,拥堵的道路人员密度高、废弃物停留时间长,疾病传播的风险也会上升。因此,本研究以最小化运输成本为目标,综合考虑交通拥堵、疾病传播的风险和时效要求,在“医疗机构 + 处置中心 + 回收企业”三级节点内合理规划回收路线,构建成本低、安全性高的运输方案。

与本文研究相关的文献主要包括医疗废弃物管理研究和考虑交通拥堵的车辆路径研究。

医疗废弃物管理领域的研究涉及废物的产生、收集、储存、运输和处置等方面,以及法规和政策对医疗废弃物管理的影响。研究重点不仅限于回收,还包括安全处理和管理实践,以确保医疗废物对环境和公共健康的负面影响最小化。针对医疗废弃物管理问题, Joneghani 等[1]将管理过程划分为四个关键阶段:收集、运输、储存和处置,并建立了多目标混合整数线性规划模型来处理不确定条件。对于医疗废弃物的种类特性, Nikzamir 和 Baradaran [2]将其分为传染性和非传染性两大类,分别运往不同的处理机构,以降低感染风险。另外,新冠肺炎疫情爆发后, Ilyas [3]等回顾了疫情期间的医疗废弃物管理策略,包括收集策略、处理步骤、管理政策和消毒技术,提出了有效的措施和管理建议。

车辆路径问题的相关研究中,交通拥堵成为了一个备受关注的现实因素[4],路径规划问题需要考虑车辆出发时间以及相关道路的拥堵程度,可以采用多种策略和模型来降低运输成本并优化运输方案。Huang 等[5]建立了时间依赖型路径规划模型(TDVRP-PF),该模型做出随机交通条件的假设。对于考虑交通拥堵的车辆路径问题,可以通过改进算法以求解。Chen 等[6]研究了基于交通拥堵和碳排放的前置仓冷链物流路线优化问题,借助交通拥堵指数描述交通拥堵的程度,提出了一种混合模拟退火算法来解决依赖时间的绿色车辆路径问题。

综上,本研究建立以油耗模型测度运输成本的模型,并将风险控制融入模型约束。设立临时中转站,称为处置中心,它们的收集功能可以为城市医疗废弃物回收工作节省不必要的运输成本,预处理功能可以提高医疗废弃物处置的效率。此外,交通拥堵是城市医疗废弃物回收工作可能面临的重要问题,会对

成本控制和风险控制造成不利影响。因此，针对医疗废弃物回收工作规划运输方案，本研究在考虑交通拥堵问题的同时关注疾病传播的风险，旨在降低运输成本、提高运输安全性。

2. 问题描述

本研究设计的医疗废弃物回收网络由“医疗机构 + 处置中心 + 回收企业”三级节点构成，如图 1 所示。三级节点间的两阶段运输考虑交通拥堵的影响，基于拥堵程度和感染概率进行运输过程风险控制和

和时间约束，综合考虑现实因素以制定合理的医疗废弃物回收方案。

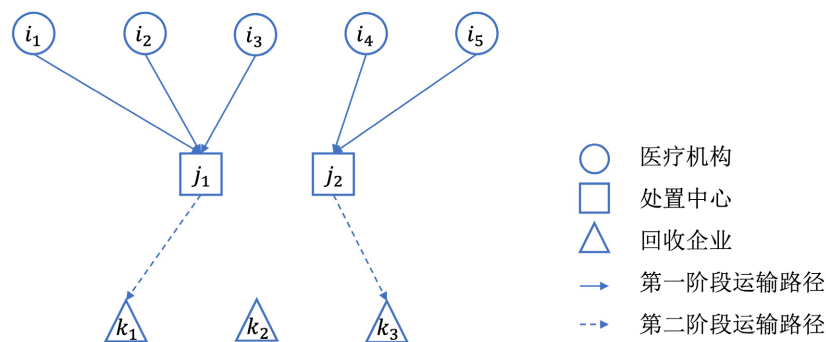


Figure 1. An exemplary diagram of medical waste recycling network
图 1. 医疗废弃物回收网络示例图

第一阶段运输指医疗机构将废弃物运往处置中心的过程，废弃物在处置中心经过初步处理和分类后，经第二阶段运输至回收企业。医疗机构服务于城市的居民，散布在城市的各个区域，该阶段的运输路线大多经过人口密度高的城区，车辆容易遇到交通拥堵的情况。路段越拥堵，通行的车辆平均行驶速度越低、车辆密度越大，若运输传染性医疗废弃物的车辆发生故障，道路周围的人员可能直接接触到泄露的废弃物，面临疾病感染的风险。因此，医疗废弃物回收路径规划需要考虑交通拥堵的影响，即运输成本增加和感染风险上升。符号说明如表 1 所示：

Table 1. Notations explanation
表 1. 符号说明

符号	释义
I	医疗机构集合， $i \in I$
J	处置中心的候选点集合， $j \in J$
K	回收企业集合， $k \in K$
w_1, w_2, w_3	车辆的技术参数
d_{ij}	车辆从医疗机构 <i>i</i> 运输废弃物到处置中心 <i>j</i> 的距离
d_{jk}	车辆从处置中心 <i>j</i> 运输废弃物到回收企业 <i>k</i> 的距离
v_{ij}	车辆在(<i>i, j</i>)路段的行驶速度
v_{jk}	车辆在(<i>j, k</i>)路段的行驶速度
G	车辆自重
q_i	医疗机构 <i>i</i> 产生的废弃物量
q_j	处置中心 <i>j</i> 发出的废弃物量

续表

p	燃料单价
Cap_j	处置中心最大容量
$bigm$	一个很大的正数
t_{ij}, t_{jk}	车辆在节点间行驶的时间
s_i, s_j, s_k	车辆出发或到达的时间点
α_{ij}	医疗废弃物在 (i, j) 间运输每公里的感染概率
α_{jk}	医疗废弃物在 (j, k) 间运输每公里的感染概率
D_{ij}	(i, j) 路段的交通流密度(辆/km)
D_{jk}	(j, k) 路段的交通流密度(辆/km)
η_{ij}	(i, j) 间运输医疗废弃物时, 可接受的感染风险水平
η_{jk}	(j, k) 间运输医疗废弃物时, 可接受的感染风险水平
z_{ij}	决策变量: 1, 医疗机构 i 选择处置中心 j ; 0, 其他
z_{jk}	决策变量: 1, 处置中心 j 选择回收企业 k ; 0, 其他

模型假设如下:

- 1) 医疗机构、处置中心和回收企业, 节点间的道路相互连通;
- 2) 城市中的医疗机构产生的废弃物量庞大, 每辆车仅为一家医疗机构执行一次运输任务。
- 3) 回收企业均可处理口罩、防护服、试管等废弃物, 不存在处理类型的差异性;
- 4) 运输环节不区分废弃物的类型, 各类医疗废弃物(口罩、防护服、药品包装等)可以混装同一辆车进行运输;
- 5) 运输过程所用车辆为同一型号, 与油耗成本有关的车辆技术参数为固定值。

3. 模型构建

$$\min Z = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} z_{ij} \left(w_1 \frac{d_{ij}}{v_{ij}} + w_2 (G + q_i) d_{ij} + w_3 (v_{ij})^2 d_{ij} \right) p \quad (1)$$

$$+ \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} z_{jk} \left(w_1 \frac{d_{jk}}{v_{jk}} + w_2 \left(G + \sum_{i \in I} z_{ij} q_i \right) d_{jk} + w_3 (v_{jk})^2 d_{jk} \right) p$$

s.t.

$$\sum_{j \in J} z_{ij} = 1, \forall i \in I \quad (2)$$

$$\sum_{k \in K} z_{jk} = 1, \forall j \in J \quad (3)$$

$$\sum_{i \in I} z_{ij} q_i \leq Cap_j, \forall j \in J \quad (4)$$

$$\sum_{j \in J} z_{jk} \sum_{i \in I} z_{ij} q_i \leq Cap_k, \forall k \in K \quad (5)$$

$$s_i + t_{ij} - M(1 - z_{ij}) \leq s_j, \forall i \in I, j \in J \quad (6)$$

$$s_j + t_{jk} - M(1 - z_{jk}) \leq s_k, \forall j \in J, k \in K \quad (7)$$

$$\frac{\alpha_{ij}z_{ij}q_i}{D_{ij}} \leq \eta_{ij}, \quad \forall i \in I, j \in J \quad \frac{\alpha_{ij}z_{ij}q_i}{D_{ij}} \leq \eta_{ij}, \quad \forall i \in I, j \in J \quad (8)$$

$$\frac{\alpha_{jk}z_{jk} \sum_{i \in I} z_{ij}q_i}{D_{jk}} \leq \eta_{jk}, \quad \forall j \in J, k \in K \quad (9)$$

$$z_{ij}, z_{jk} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K \quad (10)$$

本研究的目标是将医疗废弃物运输总成本降至最低，如式(1)所示，运输成本由两个阶段的运输油耗成本组成。油耗模型是用于估算车辆燃油消耗的数学模型，通常基于多个因素来进行估算，包括车辆特性、行驶周期载重和附件等，有助于评估车辆的燃油效率，从而降低燃油成本。式(2)表示每家医疗机构 i 只运出一次废弃物，并且只选择一家处置中心 j ；式(3)表示每家处置中心 j 只选择一家回收企业 k ；式(4)和式(5)对处置中心 j 和回收企业 k 的容量进行约束。式(6)和式(7)规定了两个运输阶段中车辆的最晚到达时间。参考 Cao 等[7]建立的感染风险约束，以道路感染概率、运输废弃物量和道路人口密度来计算本模型中两阶段的运输风险，如式(8)和式(9)所示。式(10)定义了决策变量的类型。

4. 改进的遗传算法

针对本文研究的问题，结合模型特点，设计了一种改进的遗传算法(improved genetic algorithm, IGA)。其中，算法借助多点交叉操作和均匀突变策略，以期获得质量更优的初始解。为了解决交通拥堵时的医疗废弃物回收问题，首先，本研究考虑处置中心、回收企业的容量约束、最晚到达时间限制和两阶段感染风险约束，生成可行的运输方案，规划运输路线；然后，以运输总成本最小作为目标进行全局最优解的探寻；最后，设计适合本问题的算法，采用的交叉和突变策略旨在增加种群多样性、防止算法过早收敛，调节后的算法伪代码如表 2 所示：

Table 2. IGA pseudocode

表 2. IGA 伪代码

Algorithm IGA

Input: Location data for nodes, the amount of medical waste, nodes capacity, road speed, vehicle parameters and IGA parameters.

Output: The best solution: (individual with best cost for medical waste collection and delivery)

Begin

population $\leftarrow$ create_initial_population()

For generation = 1 To generations Do

For each individual in population:

fitness $\leftarrow$ calculate_fitness(individual)

End For

Initialize new_population as empty

For i = 1 To population_size Do

parent1, parent2 $\leftarrow$ selection(population, fitnesses)

child $\leftarrow$ crossover(parent1, parent2)

child $\leftarrow$ mutate(child)

Add child to new_population

End For

population $\leftarrow$ new_population

End For

best_individual $\leftarrow$ the individual from the population with the highest fitness

best_cost $\leftarrow$ -calculate_fitness(best_individual)

Return best_individual, best_cost

End

4.1. 种群初始化与选择操作

在构造初始解时，首先初始化参数，设置种群规模、最大迭代次数、交叉概率和变异概率。模型中的决策变量是运输节点选择， z_{ij} 和 z_{jk} 是 0~1 变量。决策过程如图 2 所示，为每家医疗机构选择合适的处置中心和回收企业。本文采用自然数编码方式，记医疗机构集合为 $I = \{1, 2, \dots, i\}$ ，处置中心集合为 $J = \{i+1, i+2, \dots, i+j\}$ ，回收企业集合为 $K = \{i+j+1, i+j+2, \dots, i+j+k\}$ 。例如， $I = \{1, 2, 3\}$ ， $J = \{4, 5\}$ ， $K = \{6, 7, \dots, 10\}$ ，则染色体“1 4 6”代表医疗机构 1 的废弃物由处置中心 4 转运至回收企业 6。初始种群的构造过程如下：对医疗机构集合 I 中的节点按照随机顺序进行分配操作，即从集合 J 和集合 K 中随机选择处置中心和回收企业与其构成运输路线。重复此操作为每家医疗机构选择运输节点，则医疗废弃物回收网络的初始解构造完成，生成初始种群。

医疗机构 <i>i</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	↓ 决策点选择								
处置中心 <i>j</i>	3	2	2	1	3	1	1	2	3
回收企业 <i>k</i>	2	4	1	5	3	5	2	1	4

Figure 2. Population initialization

图 2. 种群初始化

本研究采用基于轮盘赌的选择操作，每个个体被选中的概率与其适应度值成正比，确保了适应性强的个体更有可能为下一代做出贡献。本研究的目标函数是最小化系统总成本，适应度函数取运输总成本的相反数，这样，总成本越小、越符合研究目标的运输方案，其适应度函数值越大，该染色体被保留下来的概率就越高。

4.2. 交叉操作

在进行路径规划时，需要考虑多个决策点，多点交叉可以直观地对应于此多决策点的问题。多点交叉通过在父代染色体上选择多个交叉点来产生子代，通过从不同的父代中选择多个片段进行组合，它可以在单次交叉过程中整合和利用来自多个父代的信息。这种组合可以增加解的多样性，从而提高算法在解空间中的探索能力。多点交叉赋予了算法更多的灵活性，根据本问题同时规划多条路线、以及城市内医疗机构数量有限的特点，选择过少或过多的点来进行交叉操作均会影响解的质量，因此改进的遗传算法选择五点交叉的方式，以适应城市医疗废弃物回收问题。在进行多个位置的基因交换后，较单点交叉而言，多点交叉增加了子代产生的方式，从而增加了种群的多样性，可以防止算法过早收敛到非全局最优解，操作过程如图 3 所示：

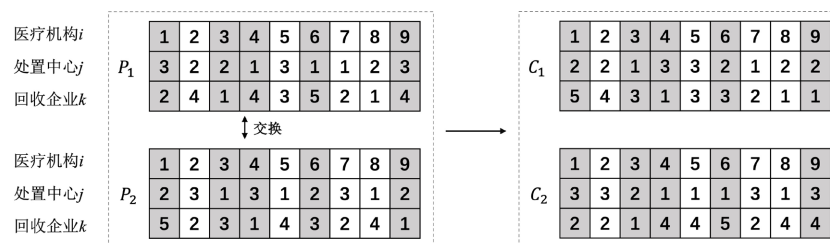


Figure 3. Crossover operation

图 3. 交叉操作

4.3. 突变策略

如图 4 所示，本研究遍历每一个基因位置，然后用一个固定的概率决定是否改变这个位置的值。如果决定对某个基因位置进行突变，那么通常会从一个预定的范围或集合中随机选择一个新值来替换当前的基因值。每一个基因都有同样的机会被突变，而且新值是从均匀分布中随机选择的。这种突变策略保证了每个节点都有同等的机会与其他节点交换位置，从而有助于广泛探索所有可能的路线组合。当种群开始收敛并大部分个体都有相似的路径时，均匀突变可以随机地打破这些相似性，从而避免算法过早地收敛到一个次优解。此外，由于每个基因都有相同的突变机会，算法获得更广泛的空间来搜索最优解。因此，均匀突变提供了一种平衡的方法，既可以确保广泛的搜索，又可以维持种群的多样性，从而增加找到更短路径的机会。

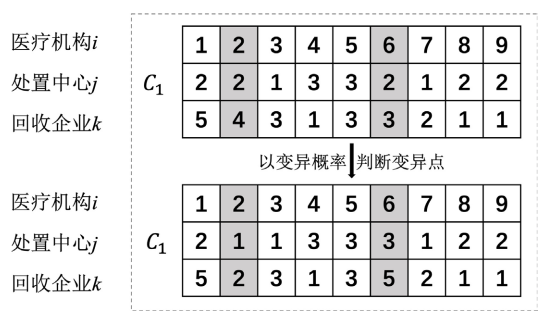


Figure 4. Mutation operation
图 4. 变异操作

5. 数值实验

实验采用 Python 编程，在 Apple M1 的 CPU、内存 16 GB 的 Mac mini 上运行，程序运行软件为 Visual Studio code。由于目前没有针对本问题的标准测试数据，且与运输医疗废弃物有关的真实数据较难获得，故参考 Mehmet 研究中数值试验的设计[8]，随机生成包含 5~10 个医疗机构的小规模数据样本、包含 20~100 个医疗机构的大规模数据样本。数值实验的步骤如下：首先，调用 GUROBI 求解器对小规模算例进行运算，验证模型的科学性和有效性，并对比 GUROBI 求解器和两种遗传算法的实验结果，检验三种方法的求解性能，对比求解能力；其次，改进遗传算法，提升算法的求解性能，并与传统遗传算法就大规模样本进行结果对比和分析。

算例中的废弃物数量参考 Cao 等人的研究[7]，通过医院病床数量和医疗废物的产生系数估计出医疗废弃物数量，大致范围在 0~5000 千克；由于第一阶段的医疗废弃物运输过程通常发生在人口密度相对较高的地区，因此设置感染概率 $\alpha_{ij} = 0.5$ ，感染风险偏好设置为 $n_{ij} = 300$ 。车辆的技术参数[9]分别设置为 $w_1 = 1.004 \times 10^{-3}$ 、 $w_2 = 1.328 \times 10^{-8}$ 、 $w_3 = 3.896 \times 10^{-7}$ 。燃料单价 $p = 6.5$ 元/升，车辆自重 $G = 1930$ 千克[10]。在交通流量分析的相关研究中，速度 - 密度模型是一个重要的研究问题[11]。基于《道路通行能力手册》[12] (Highway Capacity Manual, HCM)，交通拥堵等级的相关参数设定如表 3 所示。假设每家医疗机构的废弃物由一辆车运输，考虑到运输的安全性和《医疗废物管理条例》[13]的规定，在处置中心和回收企业分别设置车辆最晚到达时间的约束。

针对小规模算例，本部分进行 6 组数值试验，每个算例包含数量不等的医疗机构，例如算例“i5”包含 5 家医疗机构。实验设置的处置中心数量均为 3 个，回收企业数量均为 5 家。节点坐标是[0, 100]中随机生成的整数，每次实验新生成随机的医疗机构坐标，处置中心与回收企业保持不变，同一组数据分别运用 GUROBI、遗传算法(GA)和本文改进的遗传算法(IGA)进行运算。表 4 列出了计算结果，其中

Table 3. Parameters related to traffic congestion levels
表 3. 交通拥堵等级的相关参数

参数	拥堵等级					
	非常畅通	畅通	轻度拥堵	中度拥堵	严重拥堵	锁死
	1	2	3	4	5	6
平均速度/km/h	(60, +∞)	(50, 60]	(40, 50]	(30, 40]	(20, 30]	[0, 20]
密度/辆/km	(0, 10]	(10, 20]	(20, 30]	(30, 40]	(40, 50]	(50, +∞)

Gap 1 = (Obj_IGA - Obj_GUROBI)/Obj_IGA*100%，表示 IGA 和 GUROBI 求解能力的差距；Gap 2 = (Obj_GA - Obj_GUROBI)/Obj_GA*100%，表示 GA 和 GUROBI 求解能力的差距。由表 4 可知，当算例规模较小时，IGA 和 GA 的求解结果接近 GUROBI 精确解，相差 0%~7.04%。与此同时，IGA 的求解结果与 GUROBI 精确解的误差在 4.17%之内，而 GA 的求解结果与 GUROBI 精确解的误差在 7.04%之内，可见 IGA 在小规模算例上的求解性能略优于 GA。

Table 4. Computation results of small-scale example problems
表 4. 小规模算例计算结果

Instance	Obj_GUROBI	Obj_IGA	Obj_GA	Gap 1	Gap 2
i5	106.28	106.28	106.28	0.00%	0.00%
i6	119.56	119.56	119.56	0.00%	0.00%
i7	175.60	177.73	179.22	1.20%	2.02%
i8	191.31	198.41	205.80	3.58%	7.04%
i9	203.48	207.18	214.50	1.79%	5.14%
i10	207.67	216.70	220.32	4.17%	5.74%

针对大规模算例，Gurobi 求解器表现不佳，故采用遗传算法进行求解。为进一步评估改进的遗传算法在大规模算例上的性能，本部分构造了 20 组大规模的数据样本[9]，每组算例随机生成节点坐标。算法对比结果展现了 IGA 和 GA 针对大规模算例的运算性能差异，演示了本文算法求解城市交通拥堵时医疗废弃物三级回收网络优化问题的过程和效果。每组数值试验设置的医疗机构数量不同，处置中心数量均为 3 个，回收企业数量均为 5 家，“i20-1”表示 20 个医疗机构时第一组算例对比。每组算例分别用两种算法计算 50 次，结果如表 4 所示，Best 表示最优解，Avg.表示平均结果， $GAP = (Avg.(Obj_GA) - Avg.(Obj_IGA))/Avg.(Obj_GA)*100\%$ 。由表 5 可知 IGA 能得出更高质量的解，系统总成本得到优化。本文设计的 IGA 提升了搜索解空间和寻优的能力，适合应用于求解大规模的医疗废弃物回收问题。

Table 5. Computation results of large-scale example problems
表 5. 大规模算例计算结果

Instance	Obj_IGA		Obj_GA		Gap
	Best	Avg.	Best	Avg.	
i20-1	572.86	669.02	591.93	671.88	0.43%
i20-2	583.46	666.82	599.10	671.75	0.73%

续表

i20-3	579.79	669.11	609.87	671.79	0.40%
i20-4	600.21	670.13	609.87	671.79	0.25%
i40-1	1241.17	1363.06	1291.74	1382.26	1.39%
i40-2	1232.96	1367.35	1288.49	1378.08	0.78%
i40-3	1218.64	1373.57	1285.41	1376.81	0.24%
i40-4	1230.73	1370.48	1245.87	1370.75	0.02%
i60-1	1948.46	2075.91	1973.44	2083.58	0.37%
i60-2	1888.23	2071.44	1970.38	2091.29	0.95%
i60-3	1886.05	2046.02	1928.25	2069.18	1.12%
i60-4	1810.84	2067.93	1955.36	2074.34	0.31%
i80-1	2731.90	2849.43	2724.61	2854.02	0.16%
i80-2	2662.40	2834.96	2701.33	2848.59	0.48%
i80-3	2673.70	2844.93	2651.53	2851.00	0.21%
i80-4	2638.55	2834.74	2654.73	2835.53	0.03%
i100-1	3391.27	3556.35	3402.52	3564.51	0.23%
i100-2	3277.16	3558.53	3396.22	3565.26	0.19%
i100-3	3326.78	3534.92	3413.69	3565.11	0.85%
i100-4	3298.96	3554.89	3396.12	3566.37	0.32%

在医疗废弃物回收工作中，中转站的数量设置是一个重要的讨论议题，因为减少中转站可能导致成本增加[14]。结合现实情况可知，当医疗机构的规模增加时，处置中心可能出现处置能力不足的问题，影响废弃物回收的效率。因此，为了研究处置中心数量对大规模算例结果的影响，本文尝试设置不同数量的处置中心，以改进的遗传算法进行求解，使算例实验的结果分析更具现实意义。

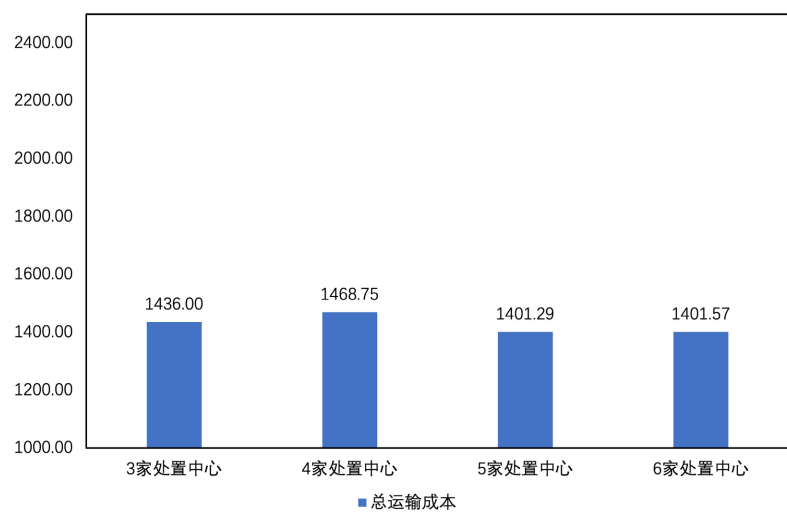


Figure 5. The total transportation cost for 80 medical institutions
图 5. 80 家医疗机构的总运输成本

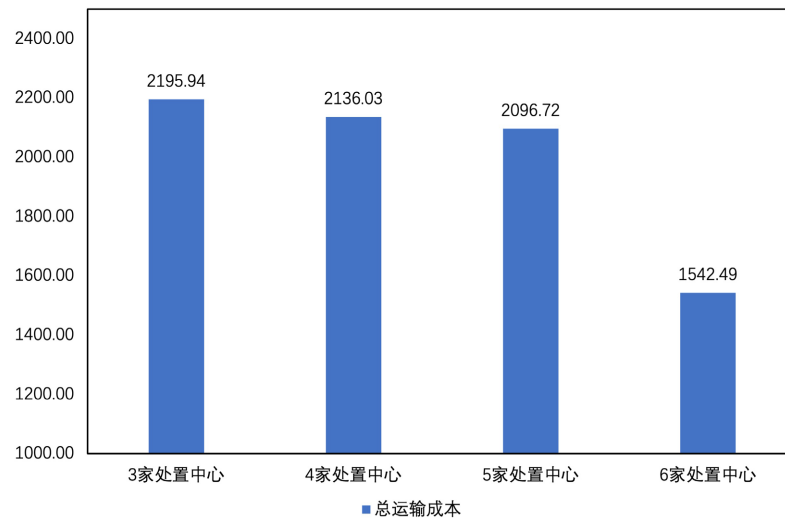


Figure 6. The total transportation cost for 100 medical institutions

图 6. 100 家医疗机构的总运输成本

算例“i80”和算例“i100”的系统总成本与处置中心数量的关系如图 5 和图 6 所示，即对于大规模算例来说，增设处置中心后，系统总成本明显下降。此外，对比两幅图可知，随着处置中心数量增加，算例“i100”总成本下降幅度比算例“i80”更大，意味着面对城市中日渐增加的医疗机构，有必要增设处置中心以降低回收成本。因此，为大规模的医疗机构设计优化回收方案，或突发公共卫生事件时，可以考虑增设临时处置中心的方法，在一定的运输时间限制和疾病感染风险的要求下，降低运输成本，促进医疗废弃物管理的可持续发展。

6. 结论与展望

本文研究了考虑交通拥堵的城市医疗废弃物三级回收网络优化问题，在进行路线规划时根据道路拥堵情况、运输距离、车辆载重计算运输成本，并针对运输时间和相关感染风险做出约束，使得运输方案高效且合理。优化医疗废弃物回收网络设计，需要关注运输时效性和安全性，回收方案应当符合时间约束，并严格控制运输过程中的疾病传播风险。城市中的医疗废弃物回收工作需要考虑现实因素，例如决策路线的交通拥堵状况，这影响到运输成本和运输风险的高低。通过油耗模型将交通拥堵的考量和运输成本的计算融合，并根据与拥堵状况相关的运输风险优化运输方案，有利于回收工作低成本化，为做出合理决策提供依据，同时推动医疗废弃物回收工作的深入研究。

针对医疗废弃物回收网络优化问题，在未来的研究中可以考虑更多现实因素，并将运输时间和感染风险作为优化目标，利用即时数据，掌握交通状况和废弃物数量等信息，规划更有效的收集路线，避免拥堵，减少废弃物的滞留时间，提高回收速度，降低运输成本。还可以根据废弃物种类和特点，分配不同属性的车辆，制定回收路线；在算法设计部分可以进一步研究更高效的算法框架和算法策略，并结合实际数据和路网情况展开数值实验。

参考文献

- [1] Joneghani, N.M., Zarrinpoor, N. and Eghtesadifard, M. (2022) A Mathematical Model for Designing a Network of Sustainable Medical Waste Management under Uncertainty. *Computers & Industrial Engineering*, **171**, Article 108372. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108372>
- [2] Nikzamid, M. and Baradaran, V. (2020) A Healthcare Logistic Network Considering Stochastic Emission of Contami-

- nation: Bi-Objective Model and Solution Algorithm. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, **142**, Article 102060. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2020.102060>
- [3] Ilyas, S., Srivastava, R.R. and Kim, H. (2020) Disinfection Technology and Strategies for COVID-19 Hospital and Bio-Medical Waste Management. *Science of the Total Environment*, **749**, Article 141652. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141652>
 - [4] Braekers, K., Ramaekers, K. and Van Nieuwenhuyse, I. (2016) The Vehicle Routing Problem: State of the Art Classification and Review. *Computers & Industrial Engineering*, **99**, 300-313. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2015.12.007>
 - [5] Huang, Y., Zhao, L., Van Woensel, T., et al. (2017) Time-Dependent Vehicle Routing Problem with Path Flexibility. *Transportation Research Part B: Methodological*, **95**, 169-195. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2016.10.013>
 - [6] Chen, J., Liao, W. and Yu, C. (2021) Route Optimization for Cold Chain Logistics of Front Warehouses Based on Traffic Congestion and Carbon Emission. *Computers & Industrial Engineering*, **161**, Article 107663. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107663>
 - [7] Cao, C., Xie, Y., Liu, Y., et al. (2023) Two-Phase COVID-19 Medical Waste Transport Optimisation Considering Sustainability and Infection Probability. *Journal of Cleaner Production*, **389**, Article 135985. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.135985>
 - [8] Erdem, M. (2022) Designing a Sustainable Logistics Network for Hazardous Medical Waste Collection a Case Study in COVID-19 Pandemic. *Journal of Cleaner Production*, **376**, Article 134192. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134192>
 - [9] 周鲜成, 蒋涛营, 贺彩虹, 等. 冷链物流配送的绿色车辆路径模型及其求解算法[J]. 中国管理科学, 2023, 31(12): 203-214.
 - [10] Guo, X., Zhang, W. and Liu, B. (2022) Low-Carbon Routing for Cold-Chain Logistics Considering the Time-Dependent Effects of Traffic Congestion. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, **113**, Article 103502. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103502>
 - [11] Wang, H., Li, J., Chen, Q.Y., et al. (2011) Logistic Modeling of the Equilibrium Speed-Density Relationship. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, **45**, 554-566. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2011.03.010>
 - [12] 晏雨婵, 白璘, 武奇生, 等. 基于多指标模糊综合评价的交通拥堵预测与评估[J]. 计算机应用研究, 2019, 36(12): 3697-3700+3704.
 - [13] 医疗废物管理条例[J]. 中华人民共和国国务院公报, 2003(21): 5-10.
 - [14] Tolooie, A., Maity, M. and Sinha, A.K. (2020) A Two-Stage Stochastic Mixed-Integer Program for Reliable Supply Chain Network Design under Uncertain Disruptions and Demand. *Computers & Industrial Engineering*, **148**, Article 106722. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106722>