陈璇, 张惠珍, 鲍秀麟. 考虑公众风险的医疗废物选址-路径双层级优化模型与算法[J]. 智能计算机与应用,2026,16(8):1-9. DOI:10.20169/j.issn.2095-2163.25072601

# 考虑公众风险的医疗废物选址-路径双层级优化模型与算法

陈 璇, 张惠珍, 鲍秀麟
(上海理工大学 管理学院, 上海 200093)

**摘 要**: 针对医疗废物的有害特性,考虑政府部门和处理中心运营商既冲突又合作的运营关系,构建考虑公众风险的医疗废物选址-路径双层级优化模型。模型中,政府部门作为主导层,以追求投资成本和补贴成本以及社会风险和环境风险最小化为目标进行选址决策;从属层为处理中心运营商,参照政府部门的选址决策制定回收路径计划,在制定计划的过程中,仅最小化运输相关总成本。为求解该模型,本文结合模拟退火算法的思想,设计了一种改进的布谷鸟算法,用 2-opt 和 double-bridge 操作代替 Levy 飞行进行更新,并用单点交叉和最佳成本路线交叉操作替代标准布谷鸟算法中的随机游走策略。以成都市医疗废物处理中心的规划项目作为实际案例,验证了本文构建的模型与算法具有科学性和有效性。通过双层级主体间的互动合作,可实现具有更高经济效率的平衡市场,并显著降低风险,改进的算法在有限的运行时间里可求到满意解,且具有一定的竞争性。

**关键词**: 公众风险; 医疗废物; 双层规划; 选址路径; 布谷鸟算法
**中图分类号**: X327 **文献标志码**: A **文章编号**: 2095-2163(2026)08-0001-09

# Bi-level optimization model and algorithm for medical waste location-routing problem considering public risk

CHEN Xuan, ZHANG Huizhen, BAO Xiulin
(Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract**: Considering the hazardous nature of medical waste and the conflicting and cooperative operational relationship between government departments and treatment center operators, a bi-level model is constructed for the medical waste location-routing problem. In this model, the government department, as the upper-level decision-maker, makes site selection decisions with the goal of minimizing investment and subsidy costs, as well as public and environmental risks. The lower-level decision-maker is the treatment center operator, who develops the recycling route plan with reference to the location decision of the government department, and whose goal is to reduce transportation costs. To solve the proposed model, an improved Cuckoo algorithm based on the idea of simulated annealing is designed, which replaces Levy flight with 2-opt and double-bridge, and replaces the random walk strategy of the standard Cuckoo algorithm with single-point crossover and optimal-cost-path crossover operation. Finally, the Chengdu Medical Waste Disposal Center Planning Project is used as a practical application. The results show that it is possible to achieve a balanced market with higher economic efficiency and significantly lower risk through an appropriate principle of interactive cooperation between the bi-level stakeholders. In addition, the improved algorithm can obtain a satisfactory solution with certain competitiveness within limited running time.

**Key words**: public risk; medical waste; bi-level programming; location-routing problem; Cuckoo algorithm

## 0 引 言

随着工业和城市化的发展,全球垃圾产生的数量在迅速增长,医疗废物因成分复杂备受关注,若处置不当将威胁公共卫生[1-2]。优化医疗废物回收网络节点与运输路线设计,是提升处置效率、减少负面影响的关键。学术界针对此问题已提出诸多解决方案,如 Nikzamir[3] 设计了一种多目标仿水流算法,求解最小化总成本和污染物排放的双目标混合整数规划模型,用于解决医疗废物的选址-路径问题。

**基金项目**: 国家自然科学基金(72101149);教育部人文社会科学基金(21YJC630087)。
**作者简介**: 陈 璇(2001—),女,硕士研究生。主要研究方向:智能优化; 鲍秀麟(1996—),女,硕士研究生。主要研究方向:智能优化。
**通信作者**: 张惠珍(1979—),女,博士,教授。主要研究方向:优化算法。Email:zhzzywz@163.com。
**收稿日期**: 2025-07-26

Taslimi[4]综合考虑运输和储存风险,设计了周期性车辆路线规划方案,解决有容量限制的医疗废物定期运输与处理问题。Ghannadpour 等[5]综合考虑社会、环境和经济因素,建立医疗废物选址-路径多目标优化模型,并提出自适应进化算法求解。Yu 等[6]提出一种新的多目标多周期混合整数规划方法,对医疗废物的设施选址、运营时间和交通规划进行优化。Zahra 等[7]构建了用于医疗废物管理决策的双层稳健优化模型,整合网络设计和废物收集问题,以解决上下决策层级的环境-经济交互作用。

医疗废弃物具有高毒性、高致病性等危险特性,如果处置不当,会对生态环境和人类健康造成双重威胁[8~9]。医疗废弃物中的传染性病原体一旦进入水体,会引起传染性疾病的快速传播[10]。另一方面,医疗废物处理不当也会污染空气,甚至释放有害气体[11-12]。因此,在进行此类型的选址-路径问题研究时,需额外考虑其对周围群众和环境的风险因素,统称为公众风险[13-14]。从传统风险模型、感知风险模型和条件风险模型中可以发现,事故发生的概率和导致的后果在风险评估中都起着关键作用[15]。虽然废物泄漏事故的发生概率极低,但其危害极大,会引发社会与环境双重风险[16]。

众多学者对医疗废物的选址-路径问题进行了大量的研究,但综合考虑经济因素、社会因素和环境因素的研究还不足。因此,本文研究考虑公众风险的医疗废物选址路径-优化问题,结合现实情况分析,构建主从双层级优化模型,模型的上层以政府部门为领导者进行选址决策,下层以处理中心的运营商为跟随者进行路径规划。针对所构建的模型,融合模拟退火思想,提出一种改进的布谷鸟算法求解,并以成都的医疗废物中心规划项目为例,对本文构建的模型以及算法进行有效性验证分析。

## 1 问题描述

有 $n$ 个医疗废物处理中心备选点,政府部门承担处理中心选址决策,从备选点中选择一个或多个建设处理中心,以满足 $m$ 个医疗中心的废物处置需求,并将其外包给专业运营商。运营商负责回收车辆路径规划决策,安排若干同一类型的车辆从处理中心出发,按照预设路径对每个医疗中心进行废物回收服务。

## 2 双层级优化模型

为使模型更加合理,考虑如下假设:

1)每个医疗中心只能被分配一次,即只能被一个处理中心、一辆车进行服务;

2)所有车辆同质,且每辆车只服务一条路径,且在服务完成后返回其始发处理中心;

3)各医疗中心的服务需求量不超过车辆的最大载重量;

4)各处理中心的规模相同且已知,并假设建立的处理中心的总服务能力超过各医疗中心的总需求。

### 2.1 参数与决策变量

模型相关参数说明见表 1。

**表 1 参数设置及符号解释**

**Table 1 Parameter setting and symbol interpretation**

| 参数 | 符号解释 |
|---|---|
| $H$ | 医疗中心集合, $H=\{1,2,3,\cdots,m\}$ |
| $C$ | 候选医疗废物处理中心集合, $C=\{1,2,3,\cdots,n\}$ |
| $N$ | 网络节点集合, $N=H\cup C$ |
| $K$ | 车辆集合, $K=\{1,2,3,\cdots,k\}$ |
| $V_j$ | 在候选点 $j$ 建设医疗废物处理中心的投资成本, $j\in C$ |
| $R_j$ | 在处理中心 $j$ 处置单位医疗废物量支付的补贴成本, $j\in C$ |
| $\tilde{\omega}$ | 一个规划周期,取值 365 天 |
| $w_i$ | 医疗中心 $i$ 每日产生的医疗废物量, $i\in H$ |
| $\alpha_I$、$\alpha_F$ | 发生医疗废物泄漏事故时,受感染者和致命伤者的人均经济损失成本 |
| $\beta_j^I$、$\beta_j^F$ | 发生医疗废物泄漏事故时,处理中心 $j$ 扩散区域内单位面积、单位垃圾量导致的感染率和死亡率 |
| $S_j$ | 处理中心 $j$ 发生医疗废物泄漏事故时污染物扩散的区域面积 |
| $S_j^W$、$S_j^S$、$S_j^A$ | 废物处理中心 $j$ 发生医疗废物泄漏事故时,污染物在水、土壤和空气中的扩散区域 |
| $\rho_j^W$、$\rho_j^S$、$\rho_j^A$ | 在处理中心 $j$ 的扩散区域范围内,单位面积、单位医疗废物量对水、土壤和空气造成的污染率 |
| $\varphi_W$、$\varphi_S$、$\varphi_A$ | 发生医疗废物泄漏事故时,污染单位面积的水、土壤和空气导致的经济损失成本 |
| $p_j$ | 处理中心 $j$ 处发生医疗废物泄漏事故的概率 |
| $C_{fix}$ | 车辆的固定启动成本 |
| $C_{trs}$ | 车辆的单位运输成本 |
| $d_{ij}$ | 节点 $i$ 与 $j$ 之间的距离 |
| $Q_j$ | 处理中心 $j$ 最大处理能力, $j\in C$ |
| $W_k$ | 车辆 $k$ 的最大负载量, $k\in K$ |
| $U_{lk}$ | 用于消除子回路的辅助变量, $l$、$k$ 为网络节点索引 |

模型涉及的决策变量及取值、含义说明见表 2。

**表 2　决策变量及解释**

**Table 2　Decision variables and interpretation**

| 决策变量 | 取值范围 | 符号解释 |
|---|---|---|
| $X_j$ | $\{0,1\}$ | 若在候选点 $j$ 修建医疗废物处理中心，则 $X_j = 1$，否则 $X_j = 0$ |
| $Y_{ijk}$ | $\{0,1\}$ | 若车辆 $k$ 从节点 $i$ 驶向节点 $j$，则 $Y_{ijk} = 1$，否则 $Y_{ijk} = 0$ |
| $Z_{ij}$ | $\{0,1\}$ | 若医疗中心 $i$ 由医疗废物处理中心 $j$ 提供服务，则 $Z_{ij} = 1$，否则 $Z_{ij} = 0$ |

## 2.2　主从层次模型

主导层模型：医疗废物处理中心是由政府部门规划建设，并委托第三方运营管理。政府处于上层主导者地位，决策目标是最小化处理中心建设投资成本、向委托方支付的补贴成本，同时降低医疗废物处置带来的社会公众风险与环境风险，模型具体表述如下：

$$\min F_{U1} = \sum_{j\in C} V_j x_j + \sum_{j\in C} R_j \sum_{i\in H} z_{ij} w_i \tilde{\omega} \tag{1}$$

$$\min F_{U2} = \sum_{j\in C} (\alpha_I \beta_j^I + \alpha_F \beta_j^F) S_j \sum_{i\in H} z_{ij} w_i \tilde{\omega} \cdot p_j + \sum_{j\in C} (\varphi_W S_j^W \rho_j^W + \varphi_S S_j^S \rho_j^S + \varphi_A S_j^A \rho_j^A) \sum_{i\in H} z_{ij} w_i \tilde{\omega} \cdot p_j \tag{2}$$

s. t.

$$\sum_{i\in H} z_{ij} w_i \leqslant Q_j x_j, \ \forall j \in C \tag{3}$$

$$x_j \in \{0,1\} \tag{4}$$

目标函数(1)为建设处理中心相关最低成本，包括投资成本和补贴成本；目标函数(2)为相关公众风险最小成本，包括对社会的风险成本和对环境的风险成本；约束(3)表示每个处理中心处理的医疗废物量不能超过其最大处理能力；约束(4)表示决策变量 $x_j$ 为 0~1 变量。

从属层模型：第三方运营商是双层规划中的跟随者，依据政府部门的选址决策进行路径规划，使车辆的启动成本和运输成本最小，模型表述如下：

$$\min F_L = \sum_{i\in H}\sum_{j\in C}\sum_{k\in K} C_{fix} y_{ijk} \tilde{\omega} + \sum_{i\in N}\sum_{j\in N}\sum_{k\in K} C_{trs} d_{ij} y_{ijk} \tilde{\omega} \tag{5}$$

s. t.

$$\sum_{j\in N}\sum_{i\in H} y_{ijk} w_i \leqslant W_k, \ \forall k \in K \tag{6}$$

$$\sum_{j\in N}\sum_{k\in K} y_{ijk} = 1, \forall i \in H \tag{7}$$

$$\sum_{j\in C} z_{ij} = 1, \ \forall i \in H \tag{8}$$

$$\sum_{i\in H}\sum_{j\in C} y_{ijk} \leqslant 1, \ \forall k \in K \tag{9}$$

$$\sum_{j\in N} y_{ijk} = \sum_{j\in N} y_{jik}, \forall i \in N, k \in K \tag{10}$$

$$y_{ijk} = 0, \forall i \in C, j \in C, k \in K \tag{11}$$

$$u_{ik} - u_{jk} + S \cdot y_{ijk} \leqslant S - 1, \forall i \in H, j \in H, k \in K \tag{12}$$

$$\sum_{p\in H} y_{jpk} + \sum_{p\in\{N/i\}} y_{pik} \leqslant 1 + z_{ij}, \forall i \in H, j \in C, k \in K \tag{13}$$

$$z_{ij} \leqslant x_j, \forall i \in H, j \in C \tag{14}$$

$$\sum_{i\in H} y_{ijk} \leqslant x_j, \forall j \in C, k \in K \tag{15}$$

$$y_{ijk} \in \{0,1\} \tag{16}$$

$$z_{ij} \in \{0,1\} \tag{17}$$

其中，目标(5)为最小运输总成本，包括车辆启动成本和运输成本；约束(6)表示车辆装载量不能超过其最大容量；约束(7)表示每个医疗中心有且仅有一辆车对其提供服务；约束(8)表示每个医疗中心仅被分配给一个处理中心；约束(9)和(10)表示每辆车只能从一个处理中心出发，并在服务完成后回到该处理中心；约束(11)表示各处理中心之间互不通联；约束(12)用于消除子回路；约束(13)表示只有医疗中心被分配到处理中心，才有车辆对该医疗中心提供服务；约束(14)表示只有处理中心开放，才会有医疗中心分配到该处理中心；约束(15)表示只有处理中心开放才会有车辆从该处理中心出发；约束(16)和(17)表示决策变量为 0~1 变量。

通过将上下两层模型结合起来，构建主从双层级优化模型。

## 3　求解算法设计

选址路径问题属于 NP-hard 问题，双层级优化的选址路径问题更加复杂，大多学者采用启发式算法求解。马艳芳等[17]将粒子群算法与遗传算法结合，用于求解双层规划问题；杜纲等[18]运用 Frank-Wolfe 算法和改进的禁忌算法，求解基于均衡原理的双层规划选址-路径模型。本文借鉴了优秀算法的思想，设计一种改进的布谷鸟算法求解论文所构建的双层级优化模型。改进点主要包括：

1)采用贪心聚类和随机两种方法结合生成初始种群；

2)对种群进行优劣子种群划分，并对子种群采取不同的更新策略，有利于更好地平衡算法的全局探索和局部开发能力；

3)在算法中融入模拟退火思想，可有效提高算

法的全局开发能力,防止陷入局部最优。

### 3.1 编码方式

本文采用双层整数编码方式,由两条可变长度的染色体表示模型的求解结果[19]。第一条染色体是基于车辆路径的编码,对应下层决策,由医疗中心的编号(正整数)和车辆编号(负整数)共同组成,每个车辆编号后出现的医疗中心即为该车辆服务的对象,直到下一个车辆编号出现为止,医疗中心从左到右出现的顺序即为车辆的服务路径顺序;第二条染色体是基于处理中心的编码,对应上层决策,用于表示处理中心的选址决策。

### 3.2 初始解的生成

本文采用组合方法生成初始解,其中 50%根据医疗中心的总需求、处理中心的总容量和车辆的载重约束随机生成,另外 50%采用聚类的方法生成,具体步骤如下:

1)计算需要开放的处理中心的数量,公式如下:

$$Num = \sum_{i \in H} w_i / Q_j + 1 \tag{18}$$

其中,$w_i$ 表示各医疗中心的医疗废物产生量,$Q_j$ 表示处理中心 $j$ 的最大处理量。

2)随机选择 $Num$ 个处理中心作为聚类中心,将其放入集合 Rcluster 中。

3)对于所有的医疗中心,计算其到每个被选中的处理中心的距离,公式如下:

$$d_{ij} = R\arccos(\sin y_i \sin y_j + \cos y_i \cos y_j \cos(x_i - x_j)) \tag{19}$$

其中,地球半径 $R$ = 6 371 km, $d_{ij}$ 为 $i$ 与 $j$ 之间的实际距离。

4)根据距离最近原则,将每个医疗中心分配给其距离最小的处理中心。

5)按照优先级,更新集合 Rcluster 中元素的顺序。

6)在满足容量约束的情况下,根据距离最近的原则,优先选择为各医疗中心服务的处理中心。

### 3.3 成本节约

1)计算所有医疗中心节点间的距离以及各医疗中心与处理中心的距离。

2)计算成本节约,公式如下:

$$E_{ij} = D_{li} + D_{lj} - D_{ij} \tag{20}$$

其中,$E_{ij}$ 表示节约的成本,$D$ 表示两节点间距离。

3)按照降序对节约的成本进行排序,并将其放在一个列表中。

4)根据列表顺序,检查节点 $i$ 与 $j$ 之间连接的可行性。

### 3.4 适应度函数

本文以上层目标为标准设置适应度函数,考虑到处理中心容量和车辆容量限制,对超出约束的个体增加一个足够大的惩罚函数值。因此,存在两种情况:

1)当处理中心容量和车辆容量都满足约束时,适应度函数为:

$$\min F_{UF} = \lambda \min F_{U1} + (1 - \lambda) \min F_{U2} \tag{21}$$

2)当处理中心容量和车辆容量超过约束时,适应度函数为:

$$\begin{aligned} \min F''_{UF} = {} & \lambda \min F_{U1} + (1 - \lambda) \min F_{U2} + \\ & P_1 \sum_{j \in C} \left( \sum_{i \in H} z_{ij} w_i - Q_j \right) + \\ & P_2 \sum_{k \in K} \left( \sum_{i,\, j \in N} y_{ijk} w_i - W_K \right) \end{aligned} \tag{22}$$

其中,$P_1$、$P_2$ 是惩罚因子,λ 的取值为(0,1)。

### 3.5 离散 Levy 飞行更新策略

本文通过 2-Opt 操作实现 Levy 飞行中的短距离搜索,用 double-bridge 操作实现较长距离的全局探索,将两者结合替代传统布谷鸟算法中的 Levy 飞行策略。

1)2-Opt 操作:随机选择两个不相邻的点 $m_i$ 和 $m_j$,分别断开 $(m_i, m_{i+1})$ 和 $(m_{j-1}, m_j)$ 之间的连接弧,然后连接 $(m_i, m_{j-1})$ 和 $(m_{i+1}, m_j)$,形成两条新的连接弧,得到新的序列。

2)double-bridge 操作:随机选择 4 个不相邻的点 $m_i$、$m_j$、$m_k$、$m_t$,分别断开 $(m_i, m_{i+1})$、$(m_j, m_{j+1})$、$(m_k, m_{k+1})$、$(m_t, m_{t+1})$ 之间的连接弧,然后连接 $(m_i, m_{k+1})$、$(m_{i+1}, m_k)$、$(m_j, m_{t+1})$、$(m_{j+1}, m_t)$,形成 4 条新的连接弧,得到新的序列。

### 3.6 随机游走策略

1)单点交叉操作,对每个个体中第二条染色体进行位置变换,实现局部搜索。

2)最佳成本路线交叉操作,步骤如图 1 所示。

首先,随机选择两条父代染色体 1 和 2,并随机选中父代染色体 1 上的车辆编号“-1”和父代染色体 2 上的车辆编号“-3”。然后,将父代染色体 1 中的编号 2 和 6 剔除掉,父代染色体 2 中的 1 和 3 剔除掉,最后将被删除的编号按成本节约公式 $E_{ij}$=$D_{li}$ + $D_{lj}$ - $D_{ij}$ 计算节约成本,逐个重新插入其父代染色体中的局部最优位置。

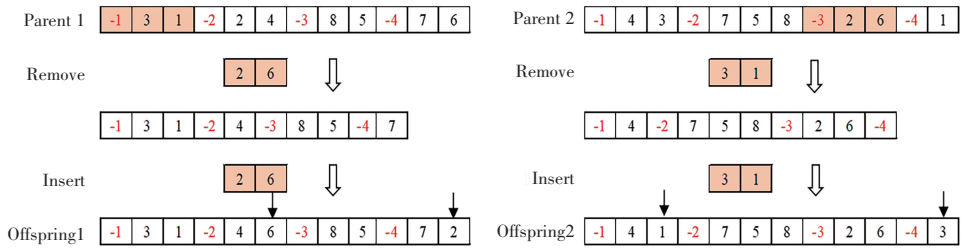



**图 1　最佳成本路线交叉操作**

**Fig. 1　Optimal cost route crossing operation**

### 3.7　模拟退火思想

3.7.1　初始温度与退火速度

本文基于最优适应度值确定初始温度 $T_0$，公式如下：

$$T_0 = \frac{F_{\mathrm{UF}}(p_{\mathrm{best}})}{\ln 5} \tag{23}$$

退火过程采用衰减系数 $T_\alpha$ 控制温度更新，公式如下：

$$T_{t+1} = T_\alpha \times T_t \tag{24}$$

其中，$F_{\mathrm{UF}}(p_{\mathrm{best}})$ 为初始种群中最优个体的适应度值，$T_t$、$T_{t+1}$ 分别为第 $t$ 和 $t+1$ 次迭代时的温度，衰减系数 $T_\alpha$ 一般为大于 0 且接近 1 的常数。

3.7.2　Metropolis 准则

为降低算法陷入局部最优的可能性，提升算法的全局搜索能力，引入模拟退火算法中的 Metropolis 准则，判断是否用更新后的个体替换更新前的个体，判断准则见下式：

$$p=\begin{cases}1, & F_{\mathrm{UF}}^{\mathrm{new}} \leqslant F_{\mathrm{UF}}^{\mathrm{old}} \\ \exp\left(-\dfrac{F_{\mathrm{UF}}^{\mathrm{new}} - F_{\mathrm{UF}}^{\mathrm{old}}}{T_{\mathrm{ap}}}\right), & F_{\mathrm{UF}}^{\mathrm{new}} > F_{\mathrm{UF}}^{\mathrm{old}}\end{cases} \tag{25}$$

式中：$F_{\mathrm{UF}}^{\mathrm{old}}$ 为更新前个体的适应度值，$F_{\mathrm{UF}}^{\mathrm{new}}$ 为更新后个体的适应度值，$T_{\mathrm{ap}}$ 为当前温度。

### 3.8　算法流程

**Step 1**　参数初始化：设置算法参数，包括种群规模、最大迭代次数、模拟退火温度等参数。

**Step 2**　种群初始化，随机生成满足问题约束条件的初始候选解集合。

**Step 3**　适应度计算：求解所有个体适应度数值，并依据适应度完成人体优劣排序。

**Step 4**　执行搜索操作。

**Step 5**　合并父代与子代种群，并更新全局最优位置。

**Step 6**　判断是否达到最大迭代次数。

**Step 7**　判断终止条件。

## 4　算例分析

### 4.1　算例简介

算例分析中相关数据均来源于《成都统计年鉴》和成都卫生信息网站，各医疗中心医疗废物产生量和医疗废物处理中心的相关数据借鉴于文献[20]，并在此基础上结合实际场景进行了适应性改进。其中，医疗中心的日均医疗废物产生量在文献[20]的取值范围内随机生成，医疗废物处理中心的日处理量固定为 100 t。本文选取 2021 年成都卫生信息网站公布的 33 家三级乙等及以上等级的医院作为需求点，相关信息见表 3。

**表 3　医疗中心位置和需求量**

**Table 3　Location and demand of medical centers**

| 序号 $i$ | 经纬度坐标 | 产生量/ t |
|---|---|---|
| 1 | (104.067 527,30.647 220) | 4.72 |
| 2 | (104.046 185,30.669 297) | 4.12 |
| 3 | (104.083 377,30.658 524) | 3.97 |
| 4 | (104.004 489,30.583 495) | 4.56 |
| 5 | (104.167 906,30.835 119) | 3.79 |
| 6 | (104.123 447,30.750 927) | 3.68 |
| 7 | (104.103 103,30.638 814) | 4.16 |
| 8 | (104.093 776,30.666 141) | 3.54 |
| 9 | (104.069 358,30.674 810) | 4.03 |
| 10 | (103.836 862,30.701 907) | 3.58 |
| 11 | (104.114 683,30.672 746) | 4.71 |
| 12 | (104.086 225,30.647 366) | 3.14 |
| 13 | (104.072 965,30.699 072) | 3.79 |
| 14 | (103.969 716,30.699 236) | 3.84 |
| 15 | (104.061 037,30.655 893) | 4.03 |
| 16 | (104.058 161,30.648 331) | 3.29 |
| 17 | (104.182 58,30.695 771) | 3.95 |
| 18 | (104.036 917,30.689 302) | 4.55 |
| 19 | (104.110 149,30.656 834) | 3.68 |
| 20 | (104.062 906,30.513 746) | 3.33 |
| 21 | (104.272 151,30.584 873) | 3.79 |
| 22 | (104.298 634,30.884 221) | 3.87 |
| 23 | (104.169 296,30.831 391) | 4.44 |
| 24 | (103.903 342,30.720 343) | 3.34 |
| 25 | (103.931 914,30.595 640) | 3.79 |
| 26 | (103.874 538,30.801 778) | 3.95 |
| 27 | (104.554 355,30.393 212) | 3.05 |
| 28 | (103.663 045,30.985 196) | 4.72 |
| 29 | (103.950 268,30.942 285) | 3.48 |
| 30 | (103.466 956,30.408 245) | 3.56 |
| 31 | (103.675 474,30.627 249) | 4.19 |
| 32 | (104.424 04,30.882 659) | 4.21 |
| 33 | (103.525 371,30.598 546) | 3.29 |

根据政府部门的医疗废物处理中心规划项目要求,在本市内新建一个或多个医疗废物处理中心,有关处理中心候选点的位置信息以及相关参数分别见表 4 和表 5。

除上述参数外,医疗废物对水、土地、空气造成污染而产生的经济损失分别为 246 346 元/$km^2$、121 256 元/$km^2$、52 467 元/$km^2$;扩散区域内单位面积处理单位医疗废物量导致的感染率和死亡率分别为 0.012 和 0.001,下层规划层面,车辆启动成本为 200 元/辆,运输成本为 2.5 元/(t · km),车辆容量设为 10 t。

**表 4 处理中心候选点位置**

**Table 4 The candidate point location of the processing center**

| 序号 $j$ | 经纬度坐标 |
|---|---|
| 1 | (104.095 742, 30.899 005) |
| 2 | (103.937 752, 30.725 628) |
| 3 | (103.988 405, 30.340 450) |
| 4 | (104.175 068, 30.558 022) |
| 5 | (104.205 357, 30.693 257) |

**表 5 处理中心候选点参数**

**Table 5 The processing center candidate point parameters**

| 参数 | 废物处理中心候选点 | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 新民($j$=1) | 梓潼($j$=2) | 花桥($j$=3) | 打石卤($j$=4) | 高洪($j$=5) |
| $Q_j$ ($10^6$RMB) | 5.52 | 5.83 | 5.27 | 5.65 | 5.43 |
| $B_j$ (RMB/t) | 290 | 275 | 300 | 280 | 295 |
| $S_j$ ($km^2$) | 1 061.85 | 889.76 | 904.77 | 1 029.43 | 935.19 |
| $p_j$ ($10^{-5}$ · $t^{-1}$) | 3.91 | 4.69 | 3.52 | 2.74 | 2.34 |
| $D_j$ ($10^3$ t) | 3.38 | 3.59 | 2.97 | 3.42 | 3.25 |
| $\beta_j^I$ (person · $km^{-2}$) | 0.012 | 0.012 | 0.012 | 0.012 | 0.012 |
| $\beta_j^F$ (person · $km^{-2}$) | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.001 |
| $S_j^W$ ($km^2$) | 14.12 | 17.56 | 15.34 | 12.32 | 11.87 |
| $S_j^S$ ($km^2$) | 320.32 | 291.87 | 313.44 | 316.34 | 308.11 |
| $S_j^A$ ($km^3$) | 1 061.85 | 889.76 | 904.77 | 1 029.43 | 935.19 |
| $\rho_j^W$ | 0.052 | 0.053 | 0.051 | 0.054 | 0.053 |
| $\rho_j^S$ | 0.011 | 0.012 | 0.014 | 0.012 | 0.013 |
| $\rho_j^I$ | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.001 |
| $P_j$ (t · $day^{-1}$) | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |

## 4.2 算例结果分析

本文基于 Python3.7.4 完成算法编程实现,算法运行环境为 Intel(R) Core(TM) i7-6500U 处理器、主频 2.50 GHz、4 GB 内存、64 位 Windows10 操作系统。算法中基本参数设置为种群规模 $N$=50,最大迭代次数 $T_{max}$=100、最低温度 $T_{min}$=1、退火系数 $T_\alpha$=0.85、$\lambda$=0.6。

选取 5 个处理中心候选点和 8 个医疗中心需求点对本文所提模型和算法的准确性进行验证,并将求得的最优结果与文献[20]中的结果进行对比,具体见表 6,BM-ICA 代表本文所设计的模型与算法。文献[20]中将各医疗中心单独作为独立个体,考虑各医疗中心的相对公平性,最终结果中选择了两个地点建设处理中心,而本文将各医疗中心分配给具体的处理中心进行综合考虑,所以选择一个建设点就可满足需求,并且上层的目标成本在政府部门的投资预算范围内。

为验证改进算法中各优化步骤的有效性,分别采用不同改进策略的布谷鸟算法对 $n$=5,$m$=8 的小规模案例进行求解,每种算法均独立运行 30 次,其最优结果见表 7,编号 0~7 代表医疗中心,编号 8~12 代表处理中心,[ ]代表一辆车的回收路线。在其他条件不变的情况下,将未使用聚类方法进行初始化时的算法、未采用 Metropolis 判断准则的算法和未加入退火操作的算法分别记为 ICA-Ⅰ、ICA-Ⅱ、ICA-Ⅲ,本文所提出的完整的改进算法记为 ICA。从表中数据可以看出,虽然不同算法求得的选址决策相同,但 ICA 算法在路径规划层面表现更优,尽管其计算时间相对较长,但获得的解质量更优。

**表 6　求解结果对比($n=5,m=8$)**

**Table 6　Comparison of solution results ($n=5,m=8$)**

| 指标类型 | 文献[20] | BM-ICA | 政府投资预算 |
|---|---|---|---|
| $X_j$ | 新民($j=1$) 花桥($j=3$) | 花桥($j=3$) | |
| $F_U$ | $140.150\times10^5$ | $F_{U1}$:$76.454\times10^5$　$F_{U2}$:$9.480\times10^5$ | $180\times10^5$ |
| $F_L$ | $52.451\times10^5$ | $41.553\times10^5$ | |

**表 7　改进算法对比($n=5,m=8$)**

**Table 7　Algorithm improvement comparison($n=5,m=8$)**

| 求解指标 | 算法 | | | |
|---|---|---|---|---|
| | ICA-Ⅰ | ICA-Ⅱ | ICA-Ⅲ | ICA |
| $X_j$ | $X_3=1$ | $X_3=1$ | $X_3=1$ | $X_3=1$ |
| $Z_{ij}$ | $Z_{13}=3.92$、$Z_{23}=3.24$ | $Z_{13}=3.92$、$Z_{23}=3.24$ | $Z_{13}=3.92$、$Z_{23}=3.24$ | $Z_{13}=3.92$、$Z_{23}=3.24$ |
| | $Z_{33}=3.11$、$Z_{43}=3.74$ | $Z_{33}=3.11$、$Z_{43}=3.74$ | $Z_{33}=3.11$、$Z_{43}=3.74$ | $Z_{33}=3.11$、$Z_{43}=3.74$ |
| | $Z_{53}=2.97$、$Z_{63}=2.89$ | $Z_{53}=2.97$、$Z_{63}=2.89$ | $Z_{53}=2.97$、$Z_{63}=2.89$ | $Z_{53}=2.97$、$Z_{63}=2.89$ |
| | $Z_{73}=3.31$、$Z_{83}=2.81$ | $Z_{73}=3.31$、$Z_{83}=2.81$ | $Z_{73}=3.31$、$Z_{83}=2.81$ | $Z_{73}=3.31$、$Z_{83}=2.81$ |
| 路线 | [10, 5, 0, 10], [10, 7, 3, 10], [10, 2, 1, 10], [10, 6, 4, 10] | [10, 5, 4, 10], [10, 0, 6, 10], [10, 7, 3, 10], [10, 2, 1, 10] | [10, 5, 4, 10], [10, 2, 7, 10], [10, 3, 6, 10], [10, 1, 0, 10] | [10, 5, 4, 7, 10], [10, 3, 1, 10], [10, 2, 6, 10], [10, 0, 10] |
| $F_{U1}$ | $73.344\times10^5$ | $73.344\times10^5$ | $73.344\times10^5$ | $73.344\times10^5$ |
| $F_{U2}$ | $8.239\times10^5$ | $8.239\times10^5$ | $8.239\times10^5$ | $8.239\times10^5$ |
| $F_L$ | $56.742\times10^5$ | $41.032\times10^5$ | $36.066\times10^5$ | $26.535\times10^5$ |
| 时间/s | 6.773 | 6.114 | 5.113 | 8.258 |

验证模型与算法的可行性和有效性后，利用本文设计的算法对 $n=5$，$m=33$ 的案例进行求解，独立运行 30 次。表 8 列出了具有代表性的有效解，Opt1、Opt2、Opt3 分别表示 $F_{U1}$(投资成本和补贴成本)、$F_{U2}$(公众风险和环境风险)、$F_L$(派遣成本和运输成本)个体最优情况下所求得的解，理想解和最劣解分别指适应度值最小和最大时求得的可行解。从表 8 可以看出，理想点求得的上层目标值和下层目标值在一定程度上优于平均值，说明在多次寻优过程中算法能够在不同程度上优化最优解。理想解的具体决策方案见表 9，编号 0~32 代表医疗中心，编号 33~37 代表处理中心。图 2 分别记录了从第一次迭代到最后一次迭代的过程中每代所求得的适应度值和 3 个目标函数的最优值。从图中可以看出，适应度值和 3 个目标值 40 代之前处于下降趋势，而 40 代之后几乎都收敛于最优值，并且经过寻优迭代后求得的最优解明显优于迭代前，由此可以验证本文所设计的算法具有良好的求解性能。

为验证模型的应用性，选取成都市的 126 家医疗中心作为需求点。设置种群规模 $N$=100，最大迭代次数 $T_{max}$=200，其他参数保持不变。独立运行算法 30 次，其最优决策方案见表 10，编号 0~125 代表医疗中心，编号 126~130 代表废物处理中心。投资成本与补贴成本为 $5.494\times10^7$ 元，公众风险和环境风险成本为 $9.333\times10^6$ 元，派遣成本和运输成本为 $2.441\times10^7$ 元。

**表 8　具有代表性的有效解($n=5,m=33$)**

**Table 8　Representative valid solutions($n=5,m=33$)**

| 方案 | 适应度 | 目标函数 | | |
|---|---|---|---|---|
| | | $F_{U1}$ | $F_{U2}$ | $F_L$ |
| Opt1 | $1.264\times10^7$ | $2.103\times10^7$ | $3.450\times10^6$ | $12.063\times10^6$ |
| Opt2 | $1.296\times10^7$ | $2.306\times10^7$ | $2.863\times10^6$ | $10.440\times10^6$ |
| Opt3 | $1.257\times10^7$ | $2.218\times10^7$ | $3.179\times10^6$ | $6.384\times10^6$ |
| 理想解 | $1.250\times10^7$ | $2.123\times10^7$ | $3.960\times10^6$ | $8.771\times10^6$ |
| 最劣解 | $1.689\times10^7$ | $2.435\times10^7$ | $4.694\times10^6$ | $11.773\times10^6$ |
| 平均值 | $1.539\times10^7$ | $2.670\times10^7$ | $3.628\times10^6$ | $13.769\times10^6$ |

表 9 最优决策结果($n=5, m=33$)

Table 9 Optimal decision result($n=5, m=33$)

| 主导层选址决策 | 从属层路径规划决策 |
|---|---|
| $F_{U1}=2.123\times10^7$<br>$F_{U2}=3.960\times10^6$ | $F_L=8.771\times10^6$ |
| 梓潼($j=2$) | [34, 13, 4, 34], [34, 28, 24, 34], [34, 21, 10, 34], [34, 0, 34] |
| 花桥($j=3$) | [35, 12, 3, 35], [35, 29, 8, 35], [35, 5, 1, 35], [35, 26, 11, 9, 35], [35, 7, 30, 35], [35, 31, 27, 35], [35, 25, 22, 35], [35, 14, 17, 35], [35, 19, 32, 15, 35], [35, 16, 2, 35], [35, 20, 18, 35], [35, 6, 23, 35] |

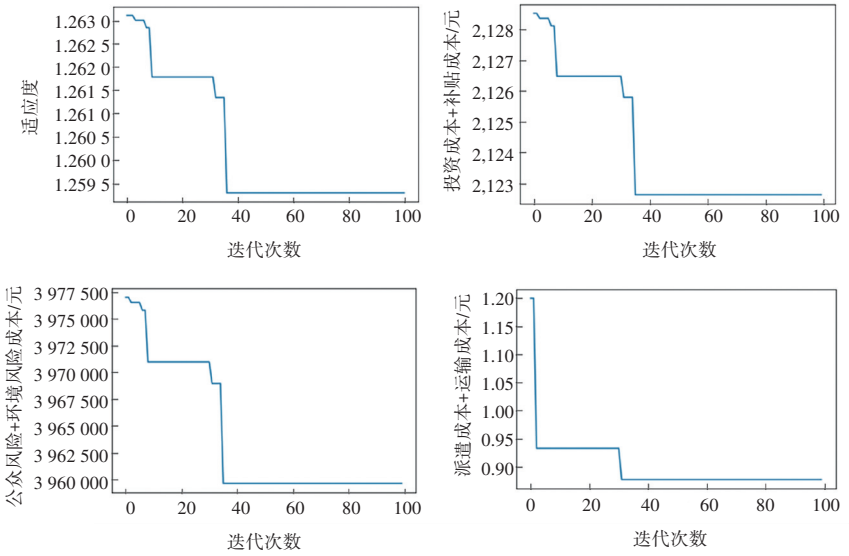



图 2 收敛曲线图($n=5, m=33$)

Fig. 2 Convergence curve($n=5, m=33$)

表 10 最优决策方案($n=5, m=126$)

Table 10 Optimal decision result($n=5, m=126$)

| 主导层选址决策 | 从属层路径规划决策 |
|---|---|
| $F_{U1}=2.123\times10^7$<br>$F_{U2}=3.960\times10^6$ | $F_L=8.771\times10^6$ |
| 新民($j=1$) | [126, 45, 84, 89, 126], [126, 26, 0, 126], [126, 13, 44, 122, 126], [126, 46, 42, 126], [126, 61, 116, 112, 29, 126], [126, 111, 15, 126], [126, 19, 110, 4, 126], [126, 7, 74, 25, 126], [126, 105, 85, 99, 126], [126, 80, 126] |
| 梓潼($j=2$) | [127, 54, 97, 10, 9, 127], [127, 100, 2, 8, 1, 127], [127, 16, 66, 120, 127], [127, 117, 36, 127], [127, 40, 106, 104, 127], [127, 18, 57, 53, 127], [127, 60, 3, 77, 127], [127, 11, 49, 90, 127], [127, 65, 124, 127], [127, 6, 103, 127], [127, 76, 1, 38, 127], [127, 48, 35, 108, 17, 127], |
| 花桥($j=3$) | [128, 12, 88, 107, 128], [128, 87, 98, 56, 96, 128], [128, 64, 73, 50, 115, 128], [128, 92, 51, 113, 21, 128], [128, 83, 69, 59, 32, 79, 128], [128, 37, 24, 34, 82, 128], [128, 93, 109, 119, 128], [128, 91, 52, 41, 43, 128] |
| 打石凼($j=4$) | [129, 94, 47, 72, 129], [129, 71, 39, 78, 129], [129, 5, 75, 114, 121, 129],[129, 28, 58, 123, 129], [129, 20, 22, 118, 129], [129, 33, 101, 81, 129], [129, 62, 68, 129], [129, 27, 55, 30, 129], [129, 70, 67, 129], [129, 95, 31, 102, 129], [129, 14, 86, 129], [129, 23, 63, 129], |

## 5　结束语

本文以医疗废物系统管理问题为背景，研究废物处理中心的选址分配以及车辆路径优化问题。分别从政府部门出发，构建投资成本和补贴成本最小化目标函数；从公众视角出发，构建公众风险最小化目标函数；从处理中心运营商视角出发，构建车辆派遣成本和运输成本最小化目标函数，并将前两个目标设为上层决策目标，车辆相关成本设为下层决策目标，由此构建了双层级优化模型。借鉴模拟退火算法的思想，提出了一种改进的布谷鸟算法，对本文所提出的模型进行求解。最后以成都市的医疗废物处理中心规划项目作为算例进行分析，从分析结果中可验证本文所提出的模型和算法具有一定的可行性与有效性。

## 参考文献


[1] Alogaz A Z, Kocasay G. Improvement and modification of the routing system for the health-care waste collection and transportation in Istanbul[J]. Waste Management, 2008, 28(8): 1461-1471.

[2] 刘宏博, 李春晖, 王健, 等. 我国危险废物污染防治标准体系建设探讨[J/OL]. 环境科学研究, (2025-07-04)[2026-07-07]. https://doi.org/10.13198/j.issn.1001-6929.2025.07.03.

[3] Nikzamir M, Baradaran A V. A healthcare logistic network considering stochastic emission of contamination: Bi-objective model and solution algorithm[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2020, 142: 102060-102095. DOI: 10.1016/j.tre.2020.102060.

[4] Taslimi M, Batta R, Kwon C. Medical waste collection considering transportation and storage risk[J]. Computers and Operations Research, 2020, 120: 104966. DOI: 10.1016/j.cor.2020.104966.

[5] Ghannadpour S F, Zandieh F, Esmaeili F. Optimizing triple bottom-line objectives for sustainable health-care waste collection and routing by a self-adaptive evolutionary algorithm: A case study from tehran province in Iran[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 287: 125010. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.125010.

[6] Yu H, Sun X, Solvong W D, et al. Reverse logistics network design for effective management of medical waste in epidemic outbreaks: Insights from the coronavirus disease 2019 (Covid-19) outbreak in Wuhan (China)[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020, 17(5): 1705-1730.

[7] Zahra S M, Reza T M, Mehrzad N, et al. A bi-level and robust optimization-based framework for a hazardous waste management problem: A real-world application[J]. Journalof Cleaner Production, 2020, 252(10): 119830-119852.

[8] Aung T S, Luan S, Xu Q. Application of multi-criteria-decision approach for the analysis of medical waste management systems in Myanmar[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 222(10): 733-745.

[9] Wang Q, Zhang F. What does the China's economic recovery after COVID-19 pandemic mean for the economic growth and energy consumption of other countries?[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 295: 126265. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.126265.

[10] Sills J, Adyel T M. Accumulation of plastic waste during COVID-19[J]. Science 2020, 369(6509): 1314-1315.

[11] Windfeld E S, Brooks M S L. Medical waste management—A review[J]. Environment Management, 2015, 163: 98-108.

[12] Al-Khatib I A, Kontogianni S, Abu Nabaa H, et al. Public perception of hazardousness caused by current trends of municipal solid waste management[J]. Waste Management, 2015, 36: 323-330.

[13] Erkut E, Verter V. Modeling of transport risk for hazardous materials[J]. Operations Research, 1998, 46(5): 625-642.

[14] 张强, 龙洁, 王春艳, 等. 新冠疫情防控公众风险感知与应对行为动态演化特征[J]. 环境工程技术学报, 2025, 15(4): 1434-1442. https://link.cnki.net/urlid/11.5972.X.20250609.1050.008.

[15] Rajan B, Samuel S. Optimal obnoxious paths on a network: transportation of hazardous materials[J]. Operations Research, 1988, 36(1): 84-92.

[16] Harwood D W, Viner J G, Russell E R, et al. Procedure for developing truck accident and release rates for hazmat routing[J]. Transportation Engineering, 1993, 119(2): 189-199.

[17] 马艳芳, 应斌, 周晓阳, 等. 基于冲突合作关系的生鲜选址-路径多主体优化模型与算法[J]. 系统工程理论与实践, 2020, 40(12): 3194-3209.

[18] 杜纲, 钟石泉. 基于均衡原理的定位-运输路线安排问题模型及求解算法[J]. 系统管理学报, 2009, 18(4): 469-474.

[19] Ma Y F, Zhang W, Feng C Y, et al. A bi-level multi-objective location-routing model for municipal waste management with obnoxious effects[J]. Waste Management, 2021, 135: 109-121.

[20] Yao L M, Xu Z W, Zeng Z. A soft-path solution to risk reduction by modeling medical waste disposal center location-allocation optimization[J]. Risk Analysis: An Official Publication of the Society for Risk Analysis, 2020, 40(9): 1863-1886.