

“日产日清”背景下的医疗废物清运车辆路径优化研究^{*}

李凡立¹, 黄 帅¹, 王 佩², 林尤武³

(1. 广东工业大学 管理学院, 广州 510520; 2. 广东外语外贸大学 商学院, 广州 510006;

3. 桂林电子科技大学 数学与计算科学学院, 广西 桂林 541004)

摘要: 研究“日产日清”背景下的清运车辆调度优化, 以避免医疗废物引发二次污染。综合考虑医疗废物清运工作中面临的各种约束条件, 建立混合整数优化模型。针对模型特点, 设计混合蚁群算法, 通过不断迭代求解整数优化子模型与线性规划子模型来得到合理的清运策略。构建的模型和算法可以有效帮助医疗废物处置企业决策合理的清运车辆访问顺序、访问时间、清运量以及车辆数与工作时间等。与传统模型相比, “日产日清”背景下的清运策略需要更多车辆与更高成本, 但可以有效避免医疗废物的堆积。

关键词: 医疗废物清运; 日产日清; 需求可拆分; 车辆路径规划; 混合蚁群算法

中图分类号: O224; X937

文献标志码: A

文章编号: 1672-6693(2024)02-0088-12

1 研究背景

医疗废物具有感染性, 若收集或处置不当, 极易引起疾病传播和环境污染^[1], 因此国家对医疗废物的管理规定非常严格。2003 年实施的《医疗废物管理条例》规定, 医疗废物集中处置单位应当至少每 2 天到医疗卫生机构收集、运送 1 次医疗废物, 并负责医疗废物的贮存、处置。2020 年新冠病毒肺炎疫情来袭, 定点医疗机构产生大量医疗废物^[2], 能否处理好这些带有强感染性的医疗废物直接关系疫情防控的成败, 因此在疫情防控期间, 安徽、湖北等地进一步要求医疗废物“日产日清”, 即医疗废物基本保持 12 h 清理 1 次, 最长不超过 24 h 就要收集处理^[3], 这给医疗废物处置企业带来了很大的挑战。因此, 为避免医疗废物引发二次污染, 研究“日产日清”背景下的医疗废物清运车辆调度优化具有较强的现实意义。

现有关于医疗废物管理的研究侧重于安全水平方面。例如, Eren 等人^[4]利用层次分析法得到每个医疗机构的安全分数。Hong 等人^[5]采用生命周期评估和生命周期成本方法, 来确定处置医疗废弃物的最有效方式。Ishtiaq 等人^[6]以巴基斯坦最大的城市卡拉奇为例, 使用层次分析法得到医疗废物管理中成本和供应商选择是 2 个最重要的指标, 供应商的能力、废物处理成本和存储成本是选择供应商时最重要的 3 个子指标。

目前关于医疗废物清运的车辆调度研究还不多。2021 年 Eren 等人^[7]最先在新冠病毒肺炎疫情背景下, 以安全分数最大化与总运输距离最小化为目标, 建立线性规划模型为医疗垃圾清运提出建议; Tirkolaee 等人^[8]针对新冠病毒肺炎疫情下考虑时间窗的可持续选址路径问题, 建立一类新的混合整数线性规划模型; Alshraideh 等人^[9]针对约旦北部医疗废物清运问题, 考虑车辆容量、每周的访问次数以及医院要求的访问间隔, 建立以总运输距离最小为目标的车辆调度模型。在中国, 相关研究则侧重于管理平台的设计^[10]与处理处置技术^[11]。由于“日产日清”政策是为了应对新冠病毒肺炎疫情提出的特殊政策, 疫情下医疗废物量增长迅速, 对于医疗垃圾清运的及时性要求很高, 因此, 类似文献^[9]中的医疗废物清运模型无法直接应用于这种情形。

医疗废物清运与车辆路径问题密切相关, 关于车辆路径规划的研究主要考虑不确定需求^[12-14]、时间窗约束^[13, 15]、需求可拆分(split delivery)^[16-17]等。例如, 2021 年韩亚娟等人^[13]针对车辆路径问题中传统软时间窗惩罚函数过于线性的问题, 建立一种带折线型软时间窗的车辆路径问题通用数学模型; 李华峰等人^[16]以配送路径最短和配送车辆最少为优化目标, 建立需求可拆分下的车辆路径规划模型。此外, 将车辆路径规划与城市垃圾

^{*} 收稿日期: 2021-10-18 修回日期: 2023-12-23 网络出版时间: 2023-07-05 T16:36

资助项目: 广州市科技计划项目(No. 202102020600); 国家自然科学基金面上项目(No. 71901074; No. 11801105)

第一作者简介: 李凡立, 男, 研究方向为数值最优化、调度优化, E-mail: 1040080129@qq.com; 通信作者: 黄帅, 讲师, 博士, E-mail: shuai.huang@gdut.edu.cn

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/50.1165.N.20230705.1451.002>

清运优化相结合的研究也较多^[18-21]。例如,2015 年 Huang 等人^[18]首次以台湾省的垃圾清运政策为背景,建立了需求可拆分和多行程策略下的双层车辆路径优化模型;Gambella^[20]考虑垃圾产生率的不确定性,建立了双层多阶段随机规划模型。由于车辆路径规划模型多为 NP-困难问题,因此实际中多采用启发式算法求解,包括遗传算法^[22]、禁忌搜索算法^[17]、蚁群算法^[15,18]、粒子群算法^[23]等。例如,夏扬坤等人^[17]设计了一种带动态禁忌表的自适应 TSA 进行求解软时间窗和需求可拆分的车辆路径规划问题;Huang 等人^[18]将路径改进策略与蚁群算法结合,求解大规模需求可拆分的车辆路径规划模型。但在实际中,医疗废物不断产生,清运与处置方式不同于一般垃圾,清运企业受到车辆、人员等资源的限制,暂存点也受到容量的限制,这些因素导致医疗废物清运模型较为复杂且规模较大,已有的车辆路径规划模型与算法无法直接应用于“日产日清”背景下的医疗废物清运。

因此本文从现有研究出发,建立考虑医疗废物清运工作中的需求可拆分、车辆多旅行以及需求随时间变化等情况的混合整数优化模型,以得到合理的车辆运输方案。在设计算法时,将建立的模型拆分为整数优化子模型与线性规划子模型,设计混合蚁群算法来求解;最后通过数值仿真实验验证了模型和混合蚁群算法的有效性和可行性。

2 医疗废物清运调度优化模型

2.1 问题描述与符号说明

“日产日清”背景下的医疗废物清运车辆调度问题可描述为:垃圾转运车从起点出发,按某条路径访问医疗废物暂存点进行清运,然后返回终点清空医疗垃圾。在清运过程中,只考虑 1 种车型,每辆车可以被多次调度,每个暂存点可以被访问多次,此外还需要考虑医疗废物随时间线性产生、垃圾转运车的容量与工作时间限制、暂存点的开放时间与容量限制,需要决策车辆的旅行次数、访问时间与清运量,使得总运输成本最小。

本文所研究的问题可以用图论语言描述:存在连通图 $G=(N \cup \{o\} \cup \{d\}, A)$, N 为暂存点集合,暂存点 $i \in N$ 的容量为 Q_i ,每天产生的医疗废物总量为 D_i , t 时刻暂存点 i 医疗废物剩余量为 $S_i(t)$,弧 $(i, j) \in A$ 为连接 i, j 点的路径,距离为 d_{ij} ;令 K 为车辆集合, W 为转运车的容量, v 为车辆行驶平均速度, T 为司机每天的最大工作时间, s 为暂存点收集医疗废物所需时间, o 为转运车开始工作的起点, d 为转运车结束工作的终点, C_1, C_2 为单位距离成本与车辆使用成本, $\max K, \max R, \max F$ 分别为最大车辆数、车辆的最大旅行次数和暂存点的最大访问次数,令 $k \in K = \{1, \dots, \max K\}, r \in R = \{1, \dots, \max R\}, f \in F = \{1, \dots, \max F\}$ 。

此外,在本文中定义决策变量如下: $x_{if}^{kr} = \begin{cases} 1, & \text{暂存点 } i \text{ 第 } f \text{ 次收集分配给车辆 } k \text{ 的第 } r \text{ 次旅行} \\ 0, & \text{否则} \end{cases}; y_{ijff'}^{kr} =$

$\begin{cases} 1, & \text{车辆 } k \text{ 第 } r \text{ 次旅行对暂存点 } i \text{ 进行第 } f \text{ 次收集后再访问暂存点 } j \text{ 进行第 } f' \text{ 次收集} \\ 0, & \text{否则} \end{cases}; q_{if}^{kr}$ 为车辆 k 第 r 次旅行

到达暂存点 i 进行第 f 次访问收集的医疗废物量,不访问则为 0; τ_{if}^{kr} 为车辆 k 第 r 次旅行到达暂存点 i 进行第 f 次访问的时间,不访问则为 0。

2.2 模型建立

2.2.1 暂存点的约束条件

若暂存点 i 的第 f 次访问为第 k' 辆车,由定义, $\tau_{if}^{k'} \neq 0$ 表示车辆 k' 第 r 次旅行到达暂存点 i 进行第 f 次访问的时间,对任意 $k = k', \tau_{if}^{kr} = 0$,因此暂存点 i 第 f 次访问的时间 $t_{if} = \sum_{k \in K} \sum_{r \in R} \tau_{if}^{kr}$ 。假设暂存点 i 在 t 时刻产生的医疗废物的总量为线性函数:

$$D_i(t) = a_i \times t + b_i, \forall i \in N, t \in [0, M]. \quad (1)$$

其中: a_i 和 b_i 是与医疗废物产生量相关的常数, $[0, M]$ 为暂存点医疗垃圾产生的时间段。实际中,对医疗废物排放量的研究常采用每日每床(或每 10 人)排放量(单位: kg)^[24],且在工作时间段内,住院人数较为稳定,就诊人数分布较为均匀,因此可以合理假设医疗废物产量为随时间而变化的线性函数。根据该假设易得如下定理 1。

定理 1 在 $[0, M]$ 时间段内,满足暂存点 i 的容量 Q_i 的条件下,暂存点 i 第 $f+1 (f \geq 1)$ 次访问的时间 t_{if+1} 需满足:

$$t_{if+1} \leq \frac{1}{a_i} (Q_i + \sum_{f' \in \{1, 2, \dots, f\}} \sum_{r \in R^+} \sum_{k \in K} q_{if'}^{kr}) - \frac{b_i}{a_i}, \forall i \in N. \quad (2)$$

证明 由式(1)易得,在 $t'_{if} = t_{if} + s$ 时,暂存点 i 的医疗废物剩余量等于该点在时间 t'_{if} 内医疗废物产生总

量减去该点被运走的医疗废物总量之和,即:

$$S_i(t'_{if}) = D_i(t'_{if}) - \sum_{f' \in \{1,2,\dots,f\}} \sum_{r \in R} \sum_{k \in K} q_{if'}^{kr}. \quad (3)$$

则在满足暂存点 i 的容量约束条件下,该点第 f 次访问后还可以存储的医疗废物量为式(3)两边同时乘以 -1 ,再加上 Q_i ,即:

$$Q_i - S_i(t'_{if}) = Q_i - D_i(t'_{if}) + \sum_{f' \in \{1,2,\dots,f\}} \sum_{r \in R} \sum_{k \in K} q_{if'}^{kr}. \quad (4)$$

因此,暂存点 i 下一次医疗废物剩余量到达容量 Q_i 时,该点产生的医疗垃圾总量为式(4)两端同时加上 $D_i(t'_{if})$,即:

$$Q_i - S_i(t'_{if}) + D_i(t'_{if}) = Q_i + \sum_{f' \in \{1,2,\dots,f\}} \sum_{r \in R} \sum_{k \in K} q_{if'}^{kr}. \quad (5)$$

又由式(1)易得医疗废物产生量为 y 时,对应的时间为:

$$t = \frac{y}{a_i} - \frac{b_i}{a_i}, \forall i \in N. \quad (6)$$

因此暂存点 i 下一次医疗废物剩余量到达容量 Q_i 对应的时间为:

$$t = \frac{1}{a_i} (Q_i + \sum_{f' \in \{1,2,\dots,f\}} \sum_{r \in R} \sum_{k \in K} q_{if'}^{kr}) - \frac{b_i}{a_i}. \quad (7)$$

所以车辆下一次访问的时间 t_{if+1} 应该在时间点 t 之前,即为式(7).

证毕

2.2.2 与访问时间相关的约束

$$\tau_{if}^{kr} \leq Mx_{if}^{kr}, \forall i \in N \cup \{o\} \cup \{d\}, \forall k \in K, \forall r \in R, \forall f \in F. \quad (8)$$

式(8)表示当暂存点 i 第 f 次收集分配给车辆 k 第 r 次旅行时,对应的时间大于等于 0;否则为 0。其中 M 是充分大的正数。

在实际中,由于工作时间与车辆数的限制,很有可能无法满足式(2),因此为了保证模型的可行性,引入变量 z_{if} 表示超出的时间,此时式(2)变为:

$$\sum_{k \in K} \sum_{r \in R} \tau_{if+1}^{kr} \leq \frac{1}{a_i} (Q_i + \sum_{f' \in \{1,2,\dots,f\}} \sum_{r \in R} \sum_{k \in K} q_{if'}^{kr}) - \frac{b_i}{a_i} + z_{if}, \forall i \in N, \forall f \in \{f' | 0 \leq \tau_{if'+1}^{kr} \leq M, f' \neq 0\}. \quad (9)$$

对于暂存点第 1 次访问,则考虑如下约束:

$$\sum_{k \in K} \sum_{r \in R} \tau_{i1}^{kr} \leq \frac{1}{a_i} Q_i - \frac{b_i}{a_i} + z_{i1}, \forall i \in N, \text{若 } \sum_{k \in K} \sum_{r \in R} \tau_{i1}^{kr} \leq M. \quad (10)$$

对于超出 $[0, M]$ 时间段访问,暂存点只清运不堆积医疗废物,因此不会新增违反容量约束的暂存点数目;当 M 位于 2 次访问之间时,可建立如下约束减少违反暂存点容量的情况:

$$S_i(M) \leq Q_i + v_i, \forall i \in N, \quad (11)$$

其中: v_i 表示 M 时刻超出暂存点容量的医疗废物量。

对于起点和终点访问时间约束:

$$\sum_{f \in F} \tau_{df}^{kr} + s \leq \sum_{f' \in F} \tau_{of'}^{kr+1}, \forall k \in K, \forall r \in R, \quad (12)$$

$$\sum_{f \in F} \tau_{df}^{kr} + s \leq T, \forall k \in K, \forall r \in R; \quad (13)$$

对于车辆从 i 点到 j 点的时间约束:

$$\tau_{if}^{kr} + \frac{d_{ij}}{v} + s = \tau_{jf'}^{kr} + \bar{M}(1 - y_{ijff'}^{kr}), \forall i \in N \cup \{o\}, \forall j \in N \cup \{d\}, \forall k \in K, \forall r \in R, \forall f, f' \in F. \quad (14)$$

2.2.3 与清运量相关的约束

相应地,暂存点 i 第 $f+1$ ($f \geq 1$) 次访问的清运量不能超过此时暂存点的剩余医疗废物量,即:

$$\sum_{r \in R} \sum_{k \in K} q_{if+1}^{kr} \leq D_i(\sum_{k \in K} \sum_{r \in R} \tau_{if+1}^{kr} + s) - \sum_{f' \in \{1,2,\dots,f\}} \sum_{r \in R} \sum_{k \in K} q_{if'}^{kr}, \forall i \in N, \forall f \in \{f' | 0 \leq \tau_{if'+1}^{kr} + s \leq M, f' \neq 0\}. \quad (15)$$

对于每个暂存点第 1 次访问以及 $[0, M]$ 时间段外的情况,通过如下不等式保证清运的可行性:

$$\sum_{r \in R} \sum_{k \in K} q_{i1}^{kr} \leq D_i(\sum_{k \in K} \sum_{r \in R} \tau_{i1}^{kr} + s), \forall i \in N, \text{若 } \sum_{k \in K} \sum_{r \in R} \tau_{i1}^{kr} + s \leq M; \quad (16)$$

$$\sum_{r \in R} \sum_{k \in K} q_{if+1}^{kr} \leq D_i(M_i) - \sum_{f' \in \{1,2,\dots,f\}} \sum_{r \in R} \sum_{k \in K} q_{if'}^{kr}, \forall i \in N, \forall f \in \{f' | M \leq \tau_{if'+1}^{kr} + s \leq T\}. \quad (17)$$

2.2.4 优化模型

此外,令 w_i 为清运结束时暂存点剩余的医疗废物量, C_3 、 C_4 、 C_5 分别为违反暂存点时间约束、违反暂存点最大容量以及清运结束时剩余医疗垃圾的惩罚成本,则对于“日产日清”背景下的医疗废物清运车辆调度优化问题,根据定理1可以构造如下模型(P):

$$\min F(z) = C_1 \sum_r \sum_{f \in F} \sum_{f' \in F} \sum_{k \in K} \sum_{i \in N \cup \{o\}} \sum_{j \in N \cup \{d\}} d_{ij} \times y_{ijff'}^{kr} + C_2 |K| + C_3 \sum_{f \in F} \sum_{i \in N} z_{if} + C_4 \sum_{i \in N} w_i + C_5 \sum_{i \in N} v_i, \quad (18)$$

s. t. 式(8)~(17),

$$\sum_{f \in F} \sum_{i \in N \cup \{o\}} y_{ijff'}^{kr} = \sum_{f \in F} \sum_{i \in N \cup \{d\}} y_{jiff'}^{kr}, \forall j \in N, \forall k \in K, \forall r \in R, \forall f' \in F, \quad (19)$$

$$\sum_{i \in N \cup \{o\}} \sum_{f \in F} y_{ijff'}^{kr} = x_{jf'}^{kr}, \forall j \in N \cup \{d\}, \forall k \in K, \forall r \in R, \forall f' \in F, \quad (20)$$

$$\sum_{j \in N \cup \{d\}} \sum_{f' \in F} y_{jiff'}^{kr} = x_{if}^{kr}, \forall i \in N \cup \{o\}, \forall k \in K, \forall r \in R, \forall f \in F, \quad (21)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{r \in R} x_{if}^{kr} \leq 1, \forall i \in N, \forall f \in F, \quad (22)$$

$$\sum_{f \in F} x_{if}^{kr} \leq 1, \forall i \in \{o\} \cup \{d\}, \forall k \in K, \forall r \in R, \quad (23)$$

$$\sum_{f \in F} \sum_{f' \in F} \sum_{i \in N \cup \{o\}} y_{idff'}^{kr} = 1, \forall k \in K, \forall r \in R, \quad (24)$$

$$\sum_{f \in F} \sum_{f' \in F} \sum_{j \in N \cup \{d\}} y_{ojff'}^{kr} = 1, \forall k \in K, \forall r \in R, \quad (25)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{f \in F} q_{if}^{kr} \leq W, \forall k \in K, \forall r \in R, \quad (26)$$

$$Sx_{if}^{kr} \leq q_{if}^{kr} \leq Mx_{if}^{kr}, \forall i \in N, \forall k \in K, \forall r \in R, \forall f \in F, \quad (27)$$

$$S_i(T) \leq s_i + w_i, \forall i \in N, \quad (28)$$

$$q_{if}^{kr} \geq 0, z_{if}^{kr} \geq 0, w_i \geq 0, v_i \geq 0, x_{if}^{kr} \in \{0, 1\}, y_{ijff'}^{kr} \in \{0, 1\}, \quad (29)$$

$$\forall i, j \in N \cup \{o, d\}, \forall k \in K, \forall r \in R, \forall f \in F.$$

其中:式(18)为表示最小化总成本,包括车辆运输成本和违反暂存点时间约束、违反暂存点最大容量以及清运结束时剩余医疗垃圾的惩罚成本;式(19)~(21)为车辆的平衡约束,车辆到达与离开暂存点 i, j 的车辆相同;式(22)表示暂存点 i 的第 f 次访问最多只能由1辆车来完成;式(23)表示起点和终点的任意一次旅行最多只能有1次访问;式(24)~(25)表示每辆车的任意一次旅行都是从点 o 出发,终止于点 d ;式(26)为车辆容量限制;式(27)为暂存点清运量限制,其中 M 是充分大的正数;式(28)表示司机工作时间结束时,剩余的医疗废物量尽可能不超过规定结点的最小剩余量;式(29)为非负和整数约束。

3 算法设计

本文所构造的医疗废物清运调度优化模型为混合整数规划模型, $y_{ijff'}^{kr}$ 等决策变量导致该问题的规模很大,传统精确算法以及商业优化软件无法有效求解该问题。由于蚁群算法具有正反馈、并行计算、较强的鲁棒性等特点,十分适合求解复杂、大型组合优化问题,因此本文将之与线性规划结合,构造求解该问题的混合蚁群算法。

3.1 模型分解

将模型(P)中的整数部分进行单独优化,可得到如下模型(P1):

$$\min F_1(z_1) = C_1 \sum_r \sum_{f \in F} \sum_{f' \in F} \sum_{k \in K} \sum_{i \in N \cup \{o\}} \sum_{j \in N \cup \{d\}} d_{ij} \times y_{ijff'}^{kr} + C_2 |K|, \quad (30)$$

s. t. 式(19)~(25),

$$x_{if}^{kr} \in \{0, 1\}, y_{ijff'}^{kr} \in \{0, 1\}, \forall i, j \in N \cup \{o, d\}, \forall k \in K, \forall r \in R, \forall f \in F. \quad (31)$$

通过蚁群算法求解模型(P1),可以得到车辆访问每个暂存点的顺序、访问次数与时间,即模型(P)的整数部分。将整数变量带入模型(P)中,可以得到只针对访问序列的线性规划模型(P2):

$$\min F_2(z_2) = C_3 \sum_{f \in F} \sum_{k \in K} \sum_{i \in N \cup \{o\}} \sum_r z_{if}^{kr} + C_4 \sum_i w_i + C_5 \sum_i v_i + C_6 \bar{s}, \quad (32)$$

s. t. 式(8)~(17), (28),

$$Sx_{if}^{kr} - \bar{s} \leq q_{if}^{kr}, \forall i \in N, \quad (33)$$

$$q_{if}^{kr} \geq 0, z_{if}^{kr} \geq 0, w_i \geq 0, v_i \geq 0, \forall i, j \in N \cup \{o, d\}, \forall k \in K, \forall r \in R, \forall f \in F。$$

由于模型(P2)中的变量只涉及模型(P1)得到的访问序列,该问题的规模较模型(P)大大减小,因此可利用现有线性规划求解器高效求解该模型。

3.2 混合蚁群算法

蚁群算法的基本原理是指蚁群在寻找食物过程中,每个蚂蚁依靠释放的信息素,最终搜寻到一条从巢穴到食物源的最短路径。蚁群算法的核心是状态转移概率的设置和信息素更新策略,具体设置如下。

1) 状态转移概率的设置。状态转移概率是指蚂蚁在搜索路径时从一个暂存点到另外一个暂存点的转移概率。蚂蚁从客暂存点 i 按式(34)定义的状态转移概率来选择下一个暂存点:

$$p_{ij}^q(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{s \in A_q} [\tau_{is}(t)]^\alpha [\eta_{is}]^\beta}, & j \in A_q(t); \\ 0, & \text{其他。} \end{cases} \quad (34)$$

其中: $A_q(t)$ 表示 t 时刻第 q 只蚂蚁下一步允许选择的暂存点集合; $\tau_{ij}(t)$ 表示 t 时刻路段 (i, j) 上的信息素浓度; 启发式因子 η_{ij} 为路段 (i, j) 长度的倒数, 即 $\eta_{ij} = 1/d_{ij}$, 表示蚂蚁从暂存点 i 到 j 的期望; α 表示信息素浓度的重要程度, β 表示启发式因子的重要程度。

2) 信息素更新策略。当所有蚂蚁完成了路径搜索后,需要对路径的信息素进行全局更新,更新公式如下:

$$\tau_{ij}(t+1) = (1-\rho) \times \tau_{ij}(t) + \sum_{q=1}^m \Delta \tau_{ij}^q, \quad (35)$$

$$\Delta \tau_{ij}^q = \frac{1}{1 + F^q(z) - F_{\text{best}}(z)} \quad (36)$$

其中: τ_{ij} 表示 (i, j) 路段上的信息素浓度; ρ 为信息素的挥发率; $\Delta \tau_{ij}^q$ 表示第 q 只蚂蚁在路段 (i, j) 上的信息素增量; $F^q(z)$ 表示当前蚂蚁所代表可行解的目标函数值, $F_{\text{best}}(z)$ 表示当前迭代的最优解。

算法的设计思路为:首先,通过蚁群算法求解整数优化子模型,得到访问次数、旅行次数、车辆的访问序列以及访问时间;然后,通过求解线性规划子模型得到每个点的医疗废物清运量;利用这 2 个子问题的结果,更新信息素矩阵,通过反复迭代,最终实现对问题的求解,流程如图 1 所示,具体步骤如下。

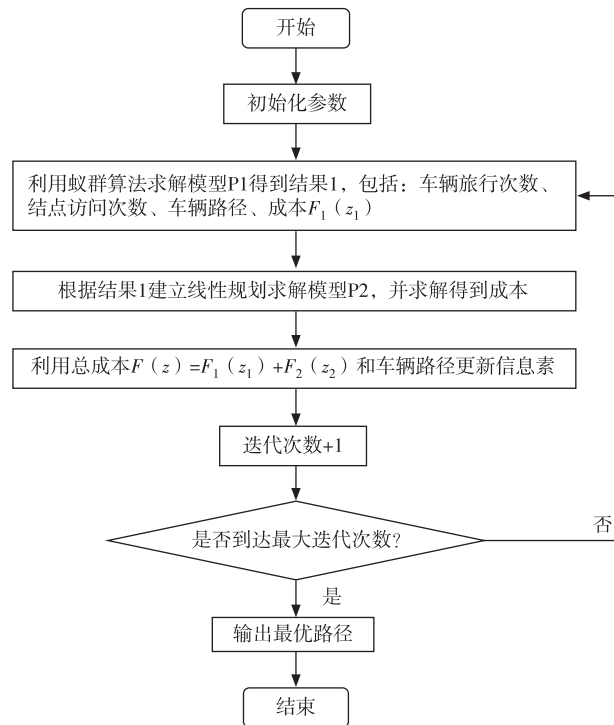


图 1 混合蚁群算法流程

Fig. 1 The process of hybrid ant colony algorithm

步骤 1,初始化参数,设置蚁群算法中的启发因子、期望因子、蚁群数量、信息素挥发因子、最大迭代次数、车辆数、暂存点最大访问次数、车辆最大旅行次数,等。

步骤 2,让每只蚂蚁按式(34)状态转移概率选择移动目标,把访问的暂存点记录在禁忌表中,重复该步骤,直到所有蚂蚁访问完所有暂存点,从而随机得到模型(P1)的可行解,即暂存点访问序列、访问次数、车辆旅行次数和目标 $F_1(z_1)$ 。

步骤 3,根据模型(P1)的可行解,构造线性规划模型(P2),通过线性规划求解器可得每个暂存点的医疗废物清运量和目标 $F_2(z_2)$ 。

步骤 4,计算当前迭代的总成本 $F(z)$,与前一步得到的总成本进行比较,若当前总成本更小,则记录该结果;否则保持不变。然后按式(35)、(36)更新信息素。

步骤 5,清空禁忌表,更新迭代次数,若未到达最大迭代次数,则转至步骤 2;否则,循环结束,输出结果。

4 算例分析

本文通过实例来验证所构造的模型与算法的正确性与有效性。所有代码采用 Matlab 编程,程序运行环境为:4.01 GHz 主频,16 GB 内存,蚁群算法相关参数设置如下: $\alpha=1, \beta=1, \rho=0.05$,蚁群数量为 32,最大迭代次数为 100。

4.1 日常情况下的垃圾清运

考虑由 1 个处置中心和 10 个医疗机构暂存点组成的医疗废物清运系统,处置中心编号为 0,坐标为(15, 15),暂存点编号分别为 1,2,...,10,具体信息如表 1 所示。

表 1 暂存点信息

Tab. 1 Information of temporary storage point

编号	坐标	医疗废物产生函数	暂存点容量/t	编号	坐标	医疗废物产生函数	暂存点容量/t
1	(25.92, 24.92)	$0.08t + 0.19$	0.62	6	(28.50, 13.32)	$0.10t + 0.32$	0.78
2	(19.36, 3.70)	$0.10t + 0.31$	0.76	7	(4.03, 28.92)	$0.09t + 0.19$	0.71
3	(9.23, 15.98)	$0.11t + 0.28$	0.84	8	(11.47, 20.25)	$0.10t + 0.27$	0.75
4	(25.18, 19.84)	$0.07t + 0.20$	0.56	9	(11.94, 7.01)	$0.16t + 0.50$	1.20
5	(8.34, 8.57)	$0.09t + 0.28$	0.67	10	(20.45, 20.77)	$0.16t + 0.50$	1.23

在日常情况下,处置中心使用车辆的最大载量为 1.5 t,车辆的平均行驶速度为 $50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,单位行驶成本为 $1.80 \text{ 元} \cdot \text{km}^{-1}$,固定成本为 $600 \text{ 元} \cdot \text{辆}^{-1}$ [15];医院暂存点收集医疗垃圾的时间为 7:00—12:00、14:00—18:00;暂存点的最大访问次数为 20,车辆最大旅行次数为 6;由于“日产日清”政策的要求,暂存点每日医疗垃圾剩余量要求为 0 t;不考虑线性需求的总产量为 0.92、1.21、1.26、0.86、1.07、1.24、1.02、1.16、1.91、1.95 t;违反暂存点时间约束、违反暂存点最大容量、清运结束时的剩余医疗垃圾的惩罚成本都设为 10^6 。记 $Z = \sum_{f \in F} \sum_{i \in N} z_{if}^{kr}$ 为违反暂存点时间约束的总时间, $W = \sum_{i \in N} w_i$ 为违反暂存点最大容量的医疗垃圾总质量, $V = \sum_{i \in N} v_i$ 为清运结束时的剩余医疗垃圾的总质量。

在日常情况的设置下,通过利用混合蚁群算法,设置不同的司机工作时间和车辆数来求解模型(P1)、(P2),得到线性需求下司机的工作时间为 8:00—12:00、14:00—21:00,需使用的车辆数为 4,车辆的调度方案与暂存点的运输方案如表 2、表 3 所示,其中总运输成本为 946.57 元,且该运输方案没有违反任何约束。由结果可知,为了使总成本最低,暂存点需要被多次访问,车辆需要多次旅行,例如暂存点 3 被访问了 8 次,车辆 1 的旅行次数为 3 次,这与实际情况相符合[25],为了达到“日产日清”的目的,医疗垃圾的清运确实由原来的固定时间清运变为多次清运。此外,与实际清运策略不同,当考虑医疗垃圾产生量随时间线性增加和“日产日清”的情况之后,为了使得总成本最小,车辆在清运时可以不达到最大车载量就返回处置中心,例如第 1 辆车访问了 6 个暂存点运输 1.43 t 的医疗垃圾后返回处置中心。

表 2 日常情况下车辆的调度方案
Tab.2 Vehide scheduling plan in daily situations

车辆编号	路径	时间	运输距离/km
1	0-8-9-2-6-4-10-0-6-4-1-0-9-5-2-0	8:00-8:08-8:53-9:33-10:19-10:58-14:00-14:40-15:26-16:05-16:41-17:28-18:09-18:43-19:28-20:12	138.48
2	0-3-7-8-10-4-1-9-5-2-0-3-0-8-3-0	8:00-8:07-8:54-9:37-10:18-10:54-14:00-14:57-15:32-16:16-17:01-17:38-18:15-18:53-19:28-20:05	129.67
3	0-3-0-3-5-9-0-3-0-8-5-9-2-6-4-1-0	8:00-8:07-8:44-9:21-10:00-10:35-11:15-14:00-14:37-15:15-15:59-16:34-17:14-17:59-18:38-19:14-20:02	120.14
4	0-10-4-1-9-5-3-0-10-4-6-0-3-7-10-0	8:00-8:10-8:45-9:21-10:19-10:53-14:00-14:37-15:17-15:52-16:31-17:17-17:54-18:41-19:33-20:13	137.59

表 3 日常情况下暂存点的运输方案
Tab.3 Transportation plan for temporary storage points in daily situations

暂存点编号	变量	1	2	4	5	6	7	8	9	10
1	t	9:21	14:00	19:14						
	q/t	0.23	0.14	0.21						
2	t	9:33	16:16	19:28						
	q/t	0.40	0.17	0.42						
3	t	8:07	8:07	14:00	14:00	17:38	17:54	19:28		
	q/t	0.11	0.14	0.14	0.16	0.17	0.16	0.24		
4	t	8:45	10:54	15:52	16:05	18:38				
	q/t	0.13	0.11	0.15	0.16	0.17				
5	t	10:00	10:53	15:59	18:43					
	q/t	0.26	0.19	0.17	0.30					
6	t	10:19	15:26	17:59						
	q/t	0.29	0.39	0.24						
7	t	8:54	18:41							
	q/t	0.34	0.68							
8	t	8:08	9:37	18:53						
	q/t	0.19	0.15	0.61						
9	t	8:53	10:19	14:57	16:34	18:09				
	q/t	0.20	0.27	0.15	0.24	0.61				
10	t	8:10	10:18	15:17	19:33					
	q/t	0.37	0.15	0.64	0.56					

4.2 与传统垃圾清运模型的对比

为了进一步验证本文模型的有效性,在文献[9,18]的基础上建立不考虑医疗垃圾产量线性增加的模型,即固定垃圾产量下的多周期模型(G):

$$\min F_3(z) = C_1 \sum_{t \in T} \sum_{r \in R} \sum_{f \in F} \sum_{f' \in F} \sum_{k \in K} \sum_{i \in N \cup \{o\}} \sum_{j \in N \cup \{d\}} d_{ij} \times y_{ijff'}^{krt} + C_2 |K| + C_4 \sum_{i \in N} w_i, \quad (37)$$

$$\text{s. t. } \sum_{f \in F} \sum_{i \in N \cup \{o\}} y_{ijff'}^{krt} = \sum_{f \in F} \sum_{i \in N \cup \{d\}} y_{ijff'}^{krt}, \forall j \in N, \forall k \in K, \forall r \in R, \forall f' \in F, \forall t \in T, \quad (38)$$

$$\sum_{i \in N \cup \{o\}} \sum_{f \in F} y_{ijff'}^{krt} = x_{jff'}^{krt}, \forall j \in N \cup \{d\}, \forall k \in K, \forall r \in R, \forall f' \in F, \forall t \in T, \quad (39)$$

$$\sum_{j \in N \cup \{d\}} \sum_{f' \in F} y_{ijff'}^{krt} = x_{iff'}^{krt}, \forall i \in N \cup \{o\}, \forall k \in K, \forall r \in R, \forall f \in F, \forall t \in T, \quad (40)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{r \in R} x_{iff'}^{krt} \leq 1, \forall i \in N, \forall f \in F, \forall t \in T, \quad (41)$$

$$\sum_{f \in F} x_{iff'}^{krt} \leq 1, \forall i \in \{o\} \cup \{d\}, \forall k \in K, \forall r \in R, \forall t \in T, \quad (42)$$

$$\sum_{f \in F} \sum_{f' \in F} \sum_{i \in N \cup \{o\}} y_{idff'}^{krt} = 1, \forall k \in K, \forall r \in R, \forall t \in T, \quad (43)$$

$$\sum_{f \in F} \sum_{f' \in F} \sum_{j \in N \cup \{d\}} y_{ojff'}^{krt} = 1, \forall k \in K, \forall r \in R, \forall t \in T, \quad (44)$$

$$q_{if}^{krt} \leq D_{it} - \sum_{f \in F} \sum_{r \in R} \sum_{k \in K} q_{if-1}^{krt}, \forall i \in N, \forall k \in K, \forall r \in R, \forall f \in \{2, \dots, \max F\}, \forall t \in T, \quad (45)$$

$$D_{iT} - \sum_{t \in T} \sum_{f' \in \{1, 2, \dots, f\}} \sum_{r \in R} \sum_{k \in K} q_{if'}^{krt} \leq s_i + w_i, \forall i \in N, \quad (46)$$

$$D_{it} = a_i * \Delta t + D_{it-1} - \sum_{t \in T} \sum_{f' \in \{1, 2, \dots, f\}} \sum_{r \in R} \sum_{k \in K} q_{if'}^{krt}, \forall i \in N, \forall k \in K, \forall r \in R, \forall f \in \{2, \dots, \max F\}, \forall t \in T, \quad (47)$$

$$q_{if}^{krt} \geq 0, w_i \geq 0, x_{if}^{krt} \in \{0, 1\}, y_{ijff'}^{krt} \in \{0, 1\}, \forall i, j \in N \cup \{o, d\}, \forall k \in K, \forall r \in R, \forall f \in F, \forall t \in T. \quad (48)$$

其中:式(37)为优化目标;式(38)~(40)表示周期 t 下的车辆平衡约束,车辆到达与离开暂存点 i, j 的车辆相同;式(41)表示周期 t 下暂存点 i 的第 f 次访问最多只能由 1 辆车来完成;式(42)表示周期 t 下起点和终点的任意一次旅行最多只能有 1 次访问;式(43)~(44)表示周期 t 下每辆车的任意一次旅行都是从点 o 出发,终止于点 d ;式(45)表示周期 t 下暂存点 i 多次访问时,车辆收集量不能超过对应结点的医疗垃圾堆积量;式(46)表示司机工作时间结束时,剩余的医疗废物量尽可能不超过规定结点的最小剩余量;式(47)表示结点 i 周期为 t 的医疗垃圾堆积量与周期为 $t-1$ 的医疗废物堆积量的关系;式(48)为非负和整数约束。当 $T=1$ 时即为文献[18]的固定垃圾产量模型;当 $T>1$ 时即为文献[9]的固定垃圾产量多周期模型。通过设置不同的司机工作时间和车辆数来求解模型(G),可得固定需求下司机的工作时间为 8:00—12:00、14:00—18:00,需要的车辆数为 3,具体调度方案如表 4 所示。

表 4 固定垃圾产量下车辆的调度方案

Tab. 4 Vehide scheduling scheme under fixed garbage production

	车辆	路径	时间	运输距离/km	运输总成本/元
单周期	1	0-10-4-0-10-1-	8:00-8:10-8:45-9:29-10:08-10:47-	86.99	471.37
		0-2-9-5-0	14:00-14:45-15:24-15:59-16:40		
	2	0-8-3-0-8-7-3-	8:00-8:08-8:43-9:20-9:58-10:42-	88.21	
		0-10-4-6-0	11:28-14:00-14:40-15:15-15:54-16:40		
	3	0-5-9-3-0-10-	8:00-8:11-8:46-9:27-10:04-10:44-	86.67	
		4-0-9-0-9-0	11:19-14:00-14:40-15:21-16:01-16:41		
多周期	1	0-1-10-0-10-0-	8:00-8:18-8:56-9:35-10:15-10:55-	101.05	475.90
		10-4-8-7-0	14:10-14:45-15:32-16:15-17:07		
	2	0-8-0-9-2-0-3-	8:00-8:08-8:45-9:25-10:05-10:50-	86.74	
		8-4-6-0	14:07-14:43-15:29-16:08-16:54		
	3	0-10-4-6-0-9-	8:00-8:10-8:45-9:24-10:10-14:10-	76.59	
		0-3-5-9-0	14:51-15:28-16:07-16:41-17:22		

由表 4 可得,不考虑医疗垃圾产量线性增加的情况下,通过求解模型(G)发现:此时只需要 3 辆车就可以完成清运任务,运输成本、车辆旅行次数与暂存点访问次数都少于模型(P)的结果,且多周期的运输成本要大于单周期的运输成本。但是在实际中,由于医疗垃圾随时间的增加而不断产生,因此利用模型(G)的结果来进行清运工作时,会发生车辆到达暂存点时清运地医疗废物量大于实际产生的医疗废物量,例如表 5 为固定垃圾产量下多周期暂存点的运输方案,暂存点 1 在 8:18 时被运走 0.92 t 的医疗垃圾,但是此时暂存点 1 只产生了 0.29 t 的医疗垃圾。而且这种不符合实际的情况较多,例如表 5 中的加粗部分。因此相比与传统垃圾清运模型(G),本文所构造的垃圾清运模型(P)更符合实际。

表 5 固定垃圾产量下多周期暂存点的运输方案
Tab. 5 A transportation plan for multi-period temporary storage points under a fixed garbage output

暂存点	变量	1	2	3	4	暂存点	变量	1	2	3	4
1	t	8:18				6	t	9:24	16:08		
	q/t	0.92					q/t	1.02	0.23		
2	t	10:05				7	t	16:15			
	q/t	1.21					q/t	1.02			
3	t	14:07	15:28			8	t	8:08	14:43	15:32	
	q/t	0.96	0.30				q/t	0.96	0.10	0.10	
4	t	8:45	14:45	15:29		9	t	9:25	14:10	16:41	
	q/t	0.38	0.28	0.21			q/t	0.28	1.50	0.13	
5	t	16:07				10	t	8:10	8:56	10:15	14:10
	q/t	1.07					q/t	0.10	0.45	1.29	0.10

4.3 疫情背景下的垃圾清运

在疫情等情况发生时,部分医疗机构的医疗垃圾产量会远大于平时,给医疗垃圾清运工作带来了很大的挑战。因此需要探讨在疫情发生时,医疗垃圾清运公司如何安排车辆与工作时间,才能够完成“日产日清”的要求。假设疫情下医疗垃圾的产生速率 a_i 为平时的 1 倍,设置不同车辆数、不同工作时间,通过求解模型(G)可以得到对应的运输成本和 3 个约束违反量(Z 、 W 、 V)。见表 6。

由表 6 可知,日常情况下 4 辆车与 t_1 工作时间无法满足疫情下的医疗垃圾清运工作,此时 3 个约束违反量 Z 、 W 、 V 分别为 0.84、0.92 和 1.52,即使增加工作时间到 t_5 时,3 个约束违反量分别为 1.50、0.06 和 0.67,也无法达到“日产日清”的条件,因此需要额外调度车辆来进行清运工作。当车辆数增加较小,即车辆数为 5 辆时,增加工作时间到 t_5 仍然会使得约束违反;当车辆数增加到 6 辆时,工作时间增加到 t_3 即可满足清运要求;当车辆数增加到 7 辆车时,在正常工作时间 t_1 内即可满足清运要求。因此在发生疫情等特殊情况时,决策者可以利用模型(P)合理安排车辆数与工作时间,以满足“日产日清”的要求。

4.4 与遗传算法的对比

为了验证所设计的算法的有效性,本节将本文的混合蚁群算法与文献[9]中的遗传算法进行比较。遗传算法中的种群规模为 80,交叉概率为 0.3,变异概率为 0.09,最大迭代次数为 1 000。

类似文献[23]中的对比方法,本文针对所构造的模型,利用混合蚁群算法与遗传算法,分别计算不同暂存点数与车辆数($N \times K$)下的算例 10 次。表 7 为 10 次运算结果车辆运输成本、违反暂存点时间约束的总时间 Z 、违反暂存点最大容量的医疗垃圾总重量 W 、清运结束时剩余医疗垃圾总重量 V 的均值。

从表 7 可以看出,对于不同算例,混合蚁群算法求解得到的运输成本均值都小于文献[9]中遗传算法的结果。而对于 3 个约束违反量,仅有 20×6 算例中 W 的结果较差;对于其余约束违反量,混合蚁群算法的结果均不比遗传算法的结果差。因此,本文提出的混合蚁群算法对于所构造的模型具有较强的求解能力。

表 6 不同车辆数与工作时间下的结果

Tab. 6 Results under different numbers of vehicle and working hours

时间段	变量	车辆数			
		4	5	6	7
t_1	运输成本/元	1 054.42	1 321.42	1 627.02	1 813.43
	Z	0.84	0.24	0.05	0
	W	0.92	0.46	0	0
	V	1.52	0	0	0
t_2	运输成本/元	1 134.04	1 327.71	1 718.23	1 836.22
	Z	0.62	0	0	0
	W	0.39	0	0.01	0
	V	0.63	0.01	0	0
t_3	运输成本/元	1 092.22	1 508.4	1 722.81	1 890.88
	Z	2.48	0.22	0	0
	W	0.09	0.03	0	0
	V	0.11	0.62	0	0
t_4	运输成本/元	1 177	1 565.53	1 759.52	1 969.62
	Z	0.49	0.15	0	0
	W	0.16	0	0	0
	V	1.01	0	0	0
t_5	运输成本/元	1 316.4	1 545.79	1 888.3	2 116.28
	Z	1.50	0.1	0	0
	W	0.06	0	0	0
	V	0.67	0.13	0	0

注: t_1 表示的时间段为 8:00—12:00,14:00—21:00; t_2 表示的时间段为 8:00—12:00,14:00—21:30; t_3 表示的时间段为 8:00—12:00,14:00—22:00; t_4 表示的时间段为 8:00—12:00,14:00—22:30; t_5 表示的时间段为 8:00—12:00,14:00—23:00。

表 7 不同规模下混合蚁群算法与遗传算法的对比结果

Tab. 7 Comparison of results between hybrid ant colony algorithm and genetic algorithm at different scales

算例 ($N \times K$)	本文的混合蚁群算法				遗传算法 ^[9]			
	运输成本/元	Z	W	V	运输成本/元	Z	W	V
10×2	540.06	0.10	1.27	0.06	617.65	0.02	1.65	0.17
10×4	1 018.67	0.00	0.00	0.00	1 169.80	0.00	0.02	0.00
15×4	984.76	0.00	0.74	0.01	1 287.37	0.00	1.10	0.08
15×6	1 377.24	0.00	0.00	0.00	1 639.86	0.00	0.60	0.02
20×6	1 268.07	0.00	1.79	0.00	1 744.55	0.00	0.52	0.52
20×11	2 224.75	0.00	0.02	0.00	3 379.45	0.00	0.03	0.00

5 结论

本文研究了“日产日清”背景下的医疗废物清运调度优化,综合考虑医疗废物清运工作中面临的各种约束条件,以及需求可拆分、车辆多旅行和医疗废物产量随时间线性增加等情况,建立了混合整数优化模型。根据模型特点,将模型分解为整数优化子模型与线性规划子模型,设计了有效的混合蚁群算法进行求解,可以有效帮助医

疗废物处置企业决策的清运车辆访问顺序、访问时间、清运量以及合理车辆数与工作时间等。与传统固定需求下的垃圾清运模型相比,本文所构造的模型虽然需要的车辆数更多、运输成本更高,但不会违反实际中的医疗垃圾产量约束,因此更符合“日产日清”的要求,可以有效避免医疗废物在医疗机构堆积,引发“二次污染”。与相关文献中的遗传算法进行对比,验证了本文所构造混合蚁群算法的有效性。进一步的研究可以考虑更一般的医疗废物产生与时间的关系,以及医疗废物清运调度优化中的不确定性因素。

参考文献:

- [1] QI Y Y, HE J H, LI Y F, et al. A novel treatment method of PVC-medical waste by near-critical methanol; dechlorination and additives recovery[J]. *Waste Management*, 2018, 80: 1-9.
- [2] YU H, SUN X, SOLVANG 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): 1770.
- [3] 黄辉. 医疗废物日产日清是这样实现的[N]. *中国纪检监察报*, 2020-3-15(4).
HUANG H. The daily production and cleaning of medical waste are achieved in this way[N]. *China Discipline Inspection and Supervision Report*, 2020-3-15(4).
- [4] EREN E, TUZKAYA U R. Occupational health and safety-oriented medical waste management: a case study of istanbul[J]. *Waste Management & Research*, 2019, 37(9): 876-884.
- [5] HONG J M, ZHAN S, YU Z H, et al. Life-cycle environmental and economic assessment of medical waste treatment[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 174: 65-73.
- [6] ISHTIAQ P, KHAN S A, HAQ M. A multi-criteria decision-making approach to rank supplier selection criteria for hospital waste management: a case from Pakistan[J]. *Waste Management & Research*, 2018, 36(4): 386-394.
- [7] EREN E, TUZKAYA U R. Safe distance-based vehicle routing problem; medical waste collection case study in COVID-19 pandemic[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2021, 157: 107328.
- [8] TIRKOLAE E B, ABBASIAN P, WEBER G W. Sustainable fuzzy multi-trip location-routing problem for medical waste management during the COVID-19 outbreak[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 756: 143607.
- [9] ALSHRAIDEH H, QDAIS H A. 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] 王艳, 张俊林, 周丽. 新冠肺炎疫情环境下医疗废物的信息化储运策略[J]. *环境工程*, 2021, 39(4): 134-139.
WANG Y, ZHANG J L, ZHOU L. Strategy of information storage and transportation of medical waste in epidemic situation[J]. *Environmental Engineering*, 2021, 39(4): 134-139.
- [11] 陈扬, 冯钦忠, 刘俐媛, 等. 新时期医疗废物处置技术体系的变革及发展[J]. *环境工程学报*, 2021, 15(2): 383-388.
CHEN Y, FENG Q Z, LIU L Y, et al. Reform and development of medical waste disposal technology system in the new era[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2021, 15(2): 383-388.
- [12] ZHONG S P, CHENG R, JIANG Y, et al. Risk-averse optimization of disaster relief facility location and vehicle routing under stochastic demand[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2020, 141: 102015.
- [13] 韩亚娟, 彭运芳, 魏航, 等. 超启发式遗传算法求解带软时间窗的车辆路径问题[J]. *计算机集成制造系统*, 2019, 25(10): 2571-2579.
HAN Y J, PENG Y F, WEI H, et al. Hyper-heuristic genetic algorithm for vehicle routing problem with soft windows[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2019, 25(10): 2571-2579.
- [14] 范厚明, 刘鹏程, 吴嘉鑫, 等. 集货需求随机的同时配集货 VRP 及混合变邻域搜索算法[J]. *系统工程理论与实践*, 2019, 39(10): 2646-2659.
FAN H M, LIU P C, WU J X, et al. Hybrid genetic algorithm with variable neighborhood descent for the vehicle routing problem with simultaneous stochastic pickup and deterministic delivery[J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2019, 39(10): 2646-2659.
- [15] 牟能治, 程驰尧, 蒋尔伟, 等. 基于多车型多行程的城市生活垃圾分类运输路径优化[J]. *安全与环境学报*, 2022, 22(4): 2199-2208.
MU N Y, CHENG C Y, JIANG E W, et al. Urban solid waste classification and transportation path optimization based on multi-vehicle and multi-journey[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2022, 22(4): 2199-2208.
- [16] 李华峰, 黄樟灿, 张蕾, 等. 求解需求可拆分车辆路径问题的改进的金字塔演化策略[J]. *计算机应用*, 2021, 41(1): 300-306.
LI H F, HUANG Z C, ZHANG Q, et al. Improved pyramid evolution strategy for solving split delivery vehicle routing problem

- [J]. Journal of Computer Applications, 2021, 41(1): 300-306.
- [17] 夏扬坤, 邓永东, 庞燕, 等. 带客户分级和需求可拆分的生鲜车辆路径问题[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(4): 1238-1248.
XIA Y K, DENG Y D, PANG Y, et al. Fresh food vehicle routing problem with split deliveries and customer classification[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2021, 27(4): 1238-1248.
- [18] HUANG S H, LIN P C. Vehicle routing-scheduling for municipal waste collection system under the “Keep Trash off the Ground” policy[J]. Omega, 2015, 55: 24-37.
- [19] 徐东洋, 李航, 王利娟. 城市地下垃圾中转站选址及两级转运联合最优方案研究[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2021, 38(1): 96-104.
XU D Y, LI H, WANG L J. The research on the joint optimal of the urban underground waste transfer station location and two-echelon transshipment[J]. Journal of Chongqing Normal University (Natural Science), 2021, 38(1): 96-104.
- [20] GAMBELLA C, MAGGIONI F, VIGO D. A stochastic programming model for a tactical solid waste management problem[J]. European Journal of Operational Research, 2019, 273(2): 684-694.
- [21] TIRKOLAE E B, MAHDAVI I, ESFAHANI M M S, et al. A robust green location-allocation-inventory problem to design an urban waste management system under uncertainty[J]. Waste Management, 2020, 102: 340-350.
- [22] 罗梓瑄, 杨杰庆, 刘学文. 基于 NSGA-II 的考虑客户满意度的多目标车辆路径问题研究[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2020, 37(6): 13-17.
LUO Z X, YANG J Q, LIU X W. Research on multi-objective vehicle routing problem considering customer satisfaction based on NSGA-II[J]. Journal of Chongqing Normal University (Natural Science), 2020, 37(6): 13-17.
- [23] 卿东升, 邓巧玲, 李建军, 等. 基于粒子群算法的满载需求可拆分车辆路径规划[J]. 控制与决策, 2021, 36(6): 1397-1406.
QING D S, DENG Q L, LI J J, et al. Split vehicle route planning with full load demand based on particle swarm optimization[J]. Control and Decision, 2021, 36(6): 1397-1406.
- [24] 倪晓平, 邢华, 俞中, 等. 医疗卫生机构医疗废物排放量调查[J]. 中国公共卫生, 2008, 24(10): 1277-1278.
NI X P, XING H, YU Z, et al. Study on coefficient of medical waste for healthcare facilities[J]. Chinese Journal of Public Health, 2008, 24(10): 1277-1278.
- [25] 王春艳. 疫情期间, 深圳医疗废物去哪儿? 日产日清, 随到随烧[EB/OL]. (2020-03-02)[2021-10-18]. <https://static.nfapp.southcn.com/content/202003/02/c3199314.html>.
WANG C Y. Where did medical waste go in Shenzhen during the COVID-19? The daily production and cleaning, burn the garbage when it arrives[EB/OL]. (2020-03-02)[2021-10-18]. <https://static.nfapp.southcn.com/content/202003/02/c3199314.html>.

Special Topics on Operations Research and Modern Intelligent Transportation

Vehicle Routing Optimization of Medical Waste Collection under “Daily Generation and Daily Clearing”

LI Fanli¹, HUANG Shuai¹, WANG Pei², LIN Youwu³

(1. School of Management, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510520;

2. School of Business, Guangdong University of Foreign Studies, Guangzhou 510006;

3. School of Mathematics and Computing Science, Guilin University of Electronic Technology, Guilin Guangxi 541004, China)

Abstract: Vehicle routing optimization under “Daily Generation and Daily Clearing” is studied to avoid secondary pollution caused by medical waste. Considering the various constraints faced in the medical waste collection, a mixed integer optimization model is established. A hybrid ant colony algorithm is proposed according to the characteristics of the model. The reasonable strategy is obtained by continuously iteratively solving the integer optimization sub-model and the linear programming sub-model. The constructed model and algorithm can effectively help medical waste disposal companies to make reasonable decisions about the order, time, volume, number of vehicles and working hours for cleaning vehicles. Compared with the traditional model, the medical waste collection under the background of “Daily Generation and Daily Clearing” may require more vehicles and costs, but it can effectively avoid the accumulation of medical waste.

Keywords: medical waste collection; daily generation and daily clearing; split delivery; vehicle routing problem; hybrid ant colony

(责任编辑 黄颖)