

医疗废弃物多目标多周期可持续回收网络优化

霍晴晴, 郭健全

(1. 上海理工大学 管理学院, 上海 200093; 2. 上海理工大学 中德国际学院, 上海 200093)

摘要: 针对医疗废弃物回收量的不确定性、多周期性, 以及部分有毒有害废弃物处理不当不仅污染环境, 还会危及操作人员健康等问题, 以最小经济成本、最小环境影响、最大社会效益为目标, 构建了不确定条件下医疗废弃物多目标多周期可持续性回收网络模型。为了减少不确定参数的影响, 采用模糊机会约束方法, 将模型中的模糊约束转换为清晰的对应式。以上海市某医疗废弃物回收企业为例, 采用遗传算法 (GA) 对模型进行求解。算例结果表明, 多目标优化总体优于单目标优化, 且多周期回收网络规划比单周期规划更加灵活。

关键词: 医疗废弃物; 不确定性; 多目标; 多周期; 可持续回收网络; 模糊; 遗传算法
中图分类号: F 713.2 **文献标志码:** A

Optimization of a multi-objective and multi-period sustainable recycling network for medical waste

HUO Qingqing, GUO Jianquan

(1. Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
2. Sino-German College, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: With the consideration of the uncertainty of medical waste recovery, and in view of the fact that multi-periodicity and improper treatment of some toxic and hazardous wastes not only pollute the environment, but also endanger the health of operators, a multi-objective multi-period sustainable recycling network model for medical waste under uncertain conditions was established aiming at minimizing economic cost, and environmental impact and maximizing social benefit. In order to reduce the influence of uncertain parameters, the fuzzy opportunity constraint method was adopted to convert the fuzzy constraints in the model into clear corresponding expressions. Taking a medical waste recycling enterprise in Shanghai as an example, a genetic algorithm (GA) was used to solve the model. The example results show that the multi-objective optimization is better than the single-objective optimization in general, and the multi-period recovery network planning is more flexible than the single-period planning.

收稿日期: 2019-11-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (71071093, 71471110); 上海市科委创新项目 (16DZ1201402, 16040501500); 陕西省社会科学基金资助项目 (2015D060)

第一作者: 霍晴晴 (1996-), 女, 硕士研究生. 研究方向: 物流工程. E-mail: huoqingusst@126.com

通信作者: 郭健全 (1972-), 男, 副教授. 研究方向: 国际贸易、国际商务、国际物流与供应链管理.

E-mail: jasonguusst@126.com

Keywords: *medical waste; uncertainty; multi-objective; multi-period; sustainable recycling network; fuzzy; genetic algorithm*

由于人口增长和医疗技术领域的发展，医疗废弃物的数量和组成在过去 30 年中急剧增加^[1]。快速增长的医疗废弃物如果不能及时回收，将对自然环境和人类健康造成严重影响^[2]。因此，有必要建立可持续性回收网络，科学有效地回收处理医疗废弃物^[3]。Hong 等^[4]运用生命周期法评估了医疗废弃物处理对环境与经济的影响。文献^[5]运用故障树方法分析了传染性医疗废弃物对人类和环境的影响。文献^[6]以波兰为例，研究可持续医疗废弃物管理系统的物流约束因素。当前对医疗废弃物可持续性回收的研究尚未构建其系统性的数学模型，且未考虑回收网络中的社会效益。然而部分医疗废弃物具有高毒性、高传染性，处理及运输过程中可能对工人健康造成危害^[7]，社会效益的研究对相关人口福利的影响是重大的^[8]。因此，本文以医疗废弃物为研究对象，考虑回收网络经济成本与环境影响的同时，统筹社会效益，从整体上构建可持续性回收网络模型。

物流网络的运作是一个周期性的过程^[9]，多周期运作对物流网络系统中设施选址与配送路径规划具有重要影响^[10]。John 等^[11]以利润最大化为目标，构建了废旧冰箱多周期逆向物流网络。Kumar 等^[12]考虑成本和利润构建了多周期逆向物流模型，规划车辆最优路径，并用进化算法求解。周向红等^[13]考虑再制造回收过程的多周期性，以及不同回收成本的构成，研究了回收量和目标调节系数变化对选址规划的影响。医疗废弃物发生传染性的风险会随回收时间的延长而增大^[14]，多周期能提高其回收频率，降低风险。然而，当前文献尚未研究如何将多周期规划运用于医疗废弃物可持续性回收网络的设计，因此，本文构建医疗废弃物多目标可持续网络模型的同时，考虑其多周期规划。

不确定参数是物流网络规划中重要的影响因素^[15]。许闯来等^[16]考虑快递需求的不确定性，构建基于情景集的鲁棒优化模型。李进等^[17]以供应链网络的总成本和碳排放总量最小化为目标，建立了机会约束多目标随机规划模型。杨晓华等^[18]考虑生鲜产品需求与退货的不确定问题，构建了新零售下生鲜闭环物流网络模糊规划模型。鲁棒优化能有效应对模糊参数的变化和扰动，但过于

注重置信水平，求解结果较为保守^[19]。随机规划缺少对历史统计数据精确性的考虑，且多场景求解具有高复杂性^[20]。模糊规划可解决缺少参数真实值的问题，且根据决策者态度限定约束的置信水平，具有一定的灵活性，符合企业决策的实际情况^[21]。基于此，本文采用模糊规划规避回收量不确定性在医疗废弃物回收网络中的影响。

综上，本文以最小经济成本、最小环境影响、最大社会效益为目标，考虑医疗废弃物回收量的不确定性，构建了模糊环境下医疗废弃物多目标多周期可持续性回收网络模型。经济成本包括回收网络中各节点的固定建设成本、运营成本与设施维持成本；环境影响包括各节点间车辆运输中产生的碳排放；社会效益包含为降低处理过程中员工可能受到危害而提供的培训时长。为求解该模型，利用模糊机会约束规划方法等价转换为清晰式，并通过定义目标隶属度对模型中的子优化目标进行模糊化，将原始优化问题转换为基于最大满意度的单目标优化问题。以上海市某医疗废弃物回收企业为例，通过遗传算法(GA)分别对单周期与多周期的单目标与多目标求解，通过对比分析计算结果，验证了模型的有效性。

1 医疗废弃物可持续回收网络模型

1.1 医疗废弃物可持续回收网络结构

医疗废弃物回收网络结构如图 1 所示，主要由医疗机构、暂存处置中心、分类检测中心、处理厂、回收加工厂 5 部分组成。

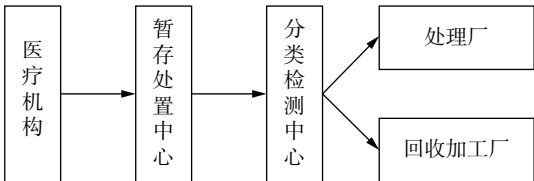


图 1 医疗废弃物回收网络结构图

Fig.1 Structure of the medical waste recycling network

在一个周期内，运输车辆在规定时间内将各医疗机构的医疗废弃物运送至附近的暂存处置中心进行集中；暂存处置中心将一定数量的医疗废弃物集中运送至分类检测中心进行分类处理；分

类检测中心将可循环利用的废弃医疗器械等废弃物消毒处理后运送至回收加工厂进行再循环, 与此同时, 将不可再循环利用的废弃物送至处理厂进行无害化处理。

1.2 模糊多目标模型

1.2.1 模型假设

- 医疗机构、处理厂、回收加工厂的位置和数量已知;
- 暂存处置中心、分类检测中心的候选位置与数量已知;
- 各节点间的运输成本与运输量和运输距离成正比^[22];
- 运营成本包含运输成本;
- 节点间的距离并非两点间的直线距离, 而是货车行驶距离;
- 各节点 CO₂ 排放量与医疗废弃物处理量成正比;
- 运输过程中 CO₂ 排放量与运输量和运输距离成正比;
- 员工经过培训而减少的工伤请假时数由节点历史数据预估得出;
- 各运输车辆与节点设施均符合医疗废弃物运输与处置特殊要求。

1.2.2 符号

c 代表医疗机构, $c \in \{1, 2, \dots, C\}$; s 代表暂存处置中心, $s \in \{1, 2, \dots, S\}$; d 代表分类检测中心, $d \in \{1, 2, \dots, D\}$; p 代表处理厂, $p \in \{1, 2, \dots, P\}$; r 代表回收加工厂, $r \in \{1, 2, \dots, R\}$; v 代表运输车辆, $v \in \{1, 2, \dots, V\}$; k 代表运输路线, $k \in \{1, 2, \dots, K\}$ 。

1.2.3 参数

F_s 代表暂存处置中心的固定建设成本; F_d 代表分类检测中心的固定建设成本; F_p 代表处理厂的固定建设成本; F_r 代表回收加工厂的固定建设成本; O_s 代表暂存处置中心的运营成本; O_d 代表分类检测中心的运营成本; O_p 代表处理厂的运营成本; O_r 代表回收加工厂的运营成本; ma_s 代表暂存处置中心的设备维持成本; ma_d 代表分类检测中心的设备维持成本; ma_p 代表处理厂的设备维持成本; ma_r 代表回收加工厂的设备维持成本; dis_{cs} , dis_{sd} , dis_{dp} , dis_{dr} 分别代表两节点间的距离; Q_{cs} , Q_{sd} , Q_{dp} , Q_{dr} 分别代表两节点间的运输量; q_{CO_2} 代表车辆载重单位重量的医疗废弃物行驶单位距离排放的 CO₂; h_s 代表暂存处置中心为员工提供的培训时数; h_d 代表分类检测中心为员工提供的培

训时数; h_p 代表处理厂为员工提供的培训时数; h_r 代表回收加工厂为员工提供的培训时数; ca_c , ca_s , ca_d , ca_p , ca_r 分别代表各节点的处理能力; re_{rt} 代表 t 时期医疗废弃物回收量的模糊值。

1.2.4 决策变量

X_{st} 为 0-1 变量, 若在 t 时期选择候选暂存处置中心, 则 $X_{st}=1$, 否则为 0; X_{dt} 为 0-1 变量, 若在 t 时期选择候选分类检测中心 d , 则 $X_{dt}=1$, 否则为 0; X_{pt} 为 0-1 变量, 若在 t 时期选择处理厂 p , 则 $X_{pt}=1$, 否则为 0; X_{rt} 为 0-1 变量, 若在 t 时期选择回收加工厂 r , 则 $X_{rt}=1$, 否则为 0; k_{cst} , k_{sdt} , k_{dpt} , k_{drt} 为 0-1 变量, 若 t 时期在两节点间运输时选择路线 k , k_{cst} , k_{sdt} , k_{dpt} , k_{drt} 为 1, 否则为 0。

1.2.5 数学模型的建立

单周期经济成本

$$E_{1(s)} = \sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^S F_s X_{st} + \sum_{t=1}^T \sum_{d=1}^D F_d X_{dt} + \sum_{t=1}^T \sum_{p=1}^P F_p X_{pt} + \sum_{t=1}^T \sum_{r=1}^R F_r X_{rt} + \sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^S O_s X_{st} + \sum_{t=1}^T \sum_{d=1}^D O_d X_{dt} + \sum_{t=1}^T \sum_{p=1}^P O_p X_{pt} + \sum_{t=1}^T \sum_{r=1}^R O_r X_{rt} + \sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^S ma_s X_{st} + \sum_{t=1}^T \sum_{d=1}^D ma_d X_{dt} + \sum_{t=1}^T \sum_{p=1}^P ma_p X_{pt} + \sum_{t=1}^T \sum_{r=1}^R ma_r X_{rt} \quad (1)$$

多周期经济成本

$$E_{1(m)} = \sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^S F_s X_{st} + \sum_{t=1}^T \sum_{d=1}^D F_d X_{dt} + \sum_{t=1}^T \sum_{p=1}^P F_p X_{pt} + \sum_{t=1}^T \sum_{r=1}^R F_r X_{rt} + \sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^S O_s X_{st} + \sum_{t=1}^T \sum_{d=1}^D O_d X_{dt} + \sum_{t=1}^T \sum_{p=1}^P O_p X_{pt} + \sum_{t=1}^T \sum_{r=1}^R O_r X_{rt} + \sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^S ma_s X_{s(t-1)} + \sum_{t=1}^T \sum_{d=1}^D ma_d X_{d(t-1)} + \sum_{t=1}^T \sum_{p=1}^P ma_p X_{p(t-1)} + \sum_{t=1}^T \sum_{r=1}^R ma_r X_{r(t-1)} \quad (2)$$

各个周期的环境影响

$$E_2 = \sum_{t=1}^T \sum_{c=1}^C \sum_{s=1}^S dis_{cs} Q_{cs} q_{CO_2} K_{cst} + \sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^S \sum_{d=1}^D dis_{sd} Q_{sd} q_{CO_2} K_{sdt} + \sum_{t=1}^T \sum_{d=1}^D \sum_{p=1}^P dis_{dp} Q_{dp} q_{CO_2} K_{dpt} + \sum_{t=1}^T \sum_{d=1}^D \sum_{r=1}^R dis_{dr} Q_{dr} q_{CO_2} K_{drt} \quad (3)$$

各个周期的社会效益

$$E_3 = \sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^S h_s X_{st} + \sum_{t=1}^T \sum_{d=1}^D h_d X_{dt} + \sum_{t=1}^T \sum_{p=1}^P h_p X_{pt} + \sum_{t=1}^T \sum_{r=1}^R h_r X_{rt} \quad (4)$$

式(1)，(2)分别表示医疗废弃物回收网络中单周期、多周期的各类经济成本之和。经济成本包括节点固定建设成本、运营成本、维持成本。其中，固定建设成本为建设节点所需的固定成本；运营成本包括节点运营所需的人力、物力成本；维持成本为节点维持运转的设备维护费用。

式(3)表示医疗废弃物回收网络中各个周期的环境影响，由于运输是该系统的主要活动，因此，考虑运输过程中产生的CO₂排放量^[23]。CO₂排放量由各节点间的距离、单位排放量决定。

式(4)表示医疗废弃物回收网络中各个周期的社会效益。在社会效益指标的选取上存在很大差异，Ramos等^[24]指出有关就业和健康影响的指标相对来说较为重要。由于培训可提高员工技能，减少工伤，因此，本文将为员工提供的培训时数作为社会效益的指标。

$$\text{s.t.} \quad \sum_{c=1}^C \sum_{s=1}^S Q_{cs} = \sum_{s=1}^S \sum_{d=1}^D Q_{sd} = re_{rt}, \quad \forall c, s, d \quad (5)$$

$$\sum_{s=1}^S \sum_{d=1}^D Q_{sd} = \sum_{d=1}^D \sum_{p=1}^P Q_{dp} + \sum_{d=1}^D \sum_{r=1}^R Q_{dr}, \quad \forall s, d, p, r \quad (6)$$

$$\sum_{c=1}^C \sum_{s=1}^S Q_{cs} \leq ca_s, \quad \forall c, s \quad (7)$$

$$\sum_{s=1}^S \sum_{d=1}^D Q_{sd} \leq ca_d, \quad \forall s, d \quad (8)$$

$$\sum_{c=1}^C \sum_{s=1}^S Q_{cs} \leq ca_s, \quad \forall c, s \quad (9)$$

$$\sum_{d=1}^D \sum_{r=1}^R Q_{dr} \leq ca_r, \quad \forall d, r \quad (10)$$

$$\sum_{d=1}^D \sum_{p=1}^P Q_{dp} \leq ca_p, \quad \forall d, p \quad (11)$$

$$\sum_{s=1}^S X_{st} \geq 1 \quad (12)$$

$$\sum_{d=1}^D X_{dt} \geq 1 \quad (13)$$

$$\sum_{p=1}^P X_{pt} \geq 1 \quad (14)$$

$$\sum_{r=1}^R X_{rt} \geq 1 \quad (15)$$

$$\sum_{c=1}^C \sum_{s=1}^S \sum_{d=1}^D \sum_{p=1}^P \sum_{r=1}^R K_{cst} K_{sdt} K_{dpt} K_{drt} \geq 0 \quad (16)$$

$$Q_{cs}, Q_{sd}, Q_{dp}, Q_{dr} \geq 0 \quad (17)$$

式(5)、(6)表示流量均衡约束，式(7)~(11)表示容量均衡约束，式(12)~(15)表示至少选择一个暂存处置中心、分类检测中心、处理厂和回收加工厂，式(16)表示至少有一条完整的线路完成整个回收网络的运输，式(17)表示运输量非负。

2 模型求解

2.1 多周期下模糊参数清晰化

医疗废弃物回收量 re_{rt} 为模糊参数，因此，医疗废弃物回收网络模型为约束条件不清晰的规划问题。模糊机会约束规划方法(FCCP)因能规避不确定参数的影响而被广泛应用于此类复杂问题的求解^[25]。通过将回收量看作三角模糊参数 $\tilde{re}_{rt}$ ，即 $\tilde{re}_{rt}=(re_{rt1}, re_{rt2}, re_{rt3})$ ，其中， re_{rt1} 为企业制定的置信水平上界， re_{rt3} 为企业制定的置信水平下界， re_{rt2} 为最可能值。同时控制约束条件成立的概率在企业制定的置信水平之上，使模糊对应式转变为等价的清晰约束。其模糊隶属函数如式(18)所示。

$$U_{\tilde{r}e_{rt_i}} = \begin{cases} \frac{t - re_{rt_1}}{re_{rt_2} - re_{rt_1}}, & t \in [re_{rt_1}, re_{rt_2}] \\ \frac{re_{rt_3} - t}{re_{rt_3} - re_{rt_2}}, & t \in (re_{rt_2}, re_{rt_3}] \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (18)$$

$$\left(\frac{E_{3\max} - E_3}{E_{3\max} - E_{3\min}} \right)^\gamma \geq \xi \quad (24)$$

根据 FCCP 的清晰化定义及引理可知^[26]: 若三角模糊数 r 为 $(\underline{r}, r, \bar{r})$, 则对任意给定的置信水平 α ($0 \leq \alpha \leq 1$), 当且仅当满足特定条件

$$\begin{cases} z(x) \geq (1 - \alpha)\underline{r} + \alpha r \\ z(x) \leq (1 - \alpha)\bar{r} + \alpha \bar{r} \end{cases}$$
时, 有 $\text{Pos}\{\tilde{r} = z\} \geq \alpha$ 成立。

根据引理^[26], 约束(5)可转换为如下清晰等价约束:

$$\begin{cases} Q_{cs} \geq (1 - \alpha^{rt})re_{rt_1} + \alpha^{rt}re_{rt_2} \\ Q_{cs} \leq (1 - \alpha^{rt})re_{rt_3} + \alpha^{rt}re_{rt_2} \end{cases} \quad (19)$$

此时

$$\text{Pos}\{Q_{cs} = re_{rt_i}\} \geq \alpha^{rt} \quad (20)$$

2.2 多周期下多目标模糊化

不同于单目标优化, 多目标的子目标间往往存在冲突, 各子目标优化的同时会引起其他子目标性能的降低, 从而影响多目标的最优解^[27]。模糊多目标规划通过选择合适的隶属度函数, 对多个相互冲突的子目标分别进行组合优化, 从而得到多目标最优解的集合^[28]。参考文献[29], 选择如下隶属度函数:

$$\mu_{g(x)} = \begin{cases} 0, & g_v \leq g_{v\min} \vee g_s \leq g_{s\min} \\ \left(\frac{g_v - g_{v\min}}{g_{v\max} - g_{v\min}} \right)^\lambda, & g_{v\min} \leq g_v \leq g_{v\max} \\ 1, & g_v \geq g_{v\max} \vee g_s \leq g_{s\min} \\ \left(\frac{g_s\max - g_s}{g_s\max - g_{s\min}} \right)^\gamma, & g_{s\min} \leq g_s \leq g_{s\max} \end{cases} \quad (21)$$

式中: g_s 表示越小越优型目标函数; g_v 表示越大越优型目标函数; $\mu_{g(x)}$ 表示 E 的隶属度函数; μ 的大小反映了优化结果的满意度, $0 \leq \mu \leq 1$; λ 和 γ 分别表示形状系数, $\lambda, \gamma > 0$ 且不为 1; $g_{v\min}$, $g_{v\max}$ 和 $g_{s\min}$, $g_{s\max}$ 分别表示 g_v 和 g_s 的最小值、最大值。

引入变量 ζ , 将原目标函数转化为约束条件, 即 $\mu_{g(x)} \geq \xi$ ($0 \leq \zeta \leq 1$), 则此时模型可转化为 $\max \xi$ 的单目标函数。根据上述原理, 本研究所构建的多目标模型可表示为 $\max \xi$, 此时约束条件除包括式(5)~(17), 还包括

$$\left(\frac{E_1 - E_{1\min}}{E_{1\max} - E_{1\min}} \right)^\lambda \geq \xi \quad (22)$$

$$\left(\frac{E_2 - E_{2\min}}{E_{2\max} - E_{2\min}} \right)^\lambda \geq \xi \quad (23)$$

在所有约束条件下先求出各子目标的最优解, 再根据这些最优解确定隶属度函数, 使交集的隶属度函数取最大值, 即为多目标问题的最优解。

2.3 遗传算法编写过程

遗传算法是根据遗传学机理和达尔文自然选择理论而形成的元启发式算法, 具有全局搜索、高效、智能及并行等特点, 被广泛应用于大规模网络构建等问题的求解^[30]。在生物进化过程中, 每个生物体都有自己独一无二的基因序列, 因此, 通过不同的编码序列可以表示各种多目标组合, 具体操作如下:

a. 染色体编码与初始化。根据企业制定的置信水平在所有多目标组合中选择初始种群本体, 计算机中每个种群本体都有与其对应的染色体基因编码。多目标集合由 n 个多目标组合组成, 表示为 $E = \{E^1, E^2, E^3, \dots, E^n\}$, 每个多目标组合又包括 3 个子目标, 子目标矩阵表示为 $E = \{E_1^1, E_2^1, E_3^1, E_1^2, E_2^2, \dots, E_3^n\}$, 每个子目标矩阵对应唯一的二进制编码, 如图 2 所示。

多目标集合	E^1			E^2			...	E^n		
多目标组合	E_1^1	E_2^1	E_3^1	E_1^2	E_2^2	E_3^2	...	E_1^n	E_2^n	E_3^n
编码	000	001	010	100	101	110	...	111	000	001

图 2 染色体组
Fig.2 Genome

b. 适应度评估与选择。对各子目标进行综合评价, 计算初始本体各项性能的适应度值, 然后根据优化准则进一步进行优化, 保留适应度值高于上一代的本体, 并将其作为新一代本体, 同时淘汰适应度值低的个体。本文选取的适应度函数

$$P = \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^3 E_{ni}$$

c. 交叉与变异。按照一定的交叉和变异方法生成新的子代种群, 并作为新一代融入多目标集合。交叉操作决定遗传算法的全局搜索能力, 变异操作增强算法的局部搜索能力。

d. 终止条件。在优化过程中, 种群个体相同且连续 20 代个体都无任何改进或者达到预先设定

的最大迭代次数，即可终止迭代。设置最大迭代次数为 400，交叉概率为 0.9，变异概率为 0.05。

3 算 例

3.1 数据来源

现以上海市某医疗废弃物回收企业为例，该企业服务的医疗机构分布在上海各区，选取各区回收量最大的一家医疗机构为代表，各代表机构位置坐标及各周期废弃物回收模糊量、距候选暂存处置中心的距离如表 1 所示。2 个候选暂存处置中心位置坐标为 $s_1(3.5, 7.0)$ ， $s_2(5.1, 17.3)$ ，2 个候选分类回收中心位置坐标为 $d_1(8.5, 11)$ ， $d_2(0.5, 17.0)$ ，处理厂的位置坐标为 $p(1.1, 3.7)$ ，回收加工厂位置坐标为 $r(1.9, 1.9)$ 。假设回收车辆回收医疗废弃物单周期长度为 2 d(我国医疗废物回收政策规定医疗废物必须在 48 h 内完全回收^[31])，多周期中分为 3 个周期(精确的周期长度划分依照废弃品总量及暂存产生的有害性决定)，其他参数值如表 2 所示。

表 1 各医疗机构相关参数
Tab.1 Related parameters of medical institutions

编号	坐标	回收量模糊数			$dis_{c_i s_1}$	$dis_{c_i s_2}$
		第一周期	第二周期	第三周期		
c_1	(1.5, 14.0)	(0.1/0.4/0.2)	(1.1/0.4/1.2)	(1.5/1.5/1.2)	26	>31
c_2	(3.5, 6.0)	(0.5/0.3/0.7)	(1.0/1.5/0.2)	(1.2/1.4/0.3)	14	43
c_3	(3.7, 20.0)	(0.1/0.5/0.2)	(0.2/1.4/0.3)	(1.3/0.3/1.2)	47	20
c_4	(4.5, 0.6)	(0.2/0.4/0.3)	(0.3/1.3/1.2)	(1.4/1.4/1.2)	61	80
c_5	(4.5, 16.0)	(0.1/0.3/0.2)	(1.4/0.4/1.2)	(1.3/0.4/1.2)	26	10
c_6	(4.7, 8.7)	(0.4/0.4/0.2)	(0.3/0.4/1.2)	(1.4/0.6/1.3)	11	30
c_7	(4.8, 16.8)	(0.3/0.4/0.2)	(0.4/0.6/1.3)	(1.3/1.4/1.1)	37	9
c_8	(6.5, 8.5)	(0.4/0.6/0.3)	(1.3/0.4/1.1)	(1.1/1.4/1.3)	32	63
c_9	(6.0, 15.3)	(0.3/0.4/0.1)	(1.1/0.4/1.3)	(1.4/0.4/1.2)	29	15
c_{10}	(6.6, 17.0)	(0.1/0.4/0.3)	(0.4/1.4/1.2)	(0.6/1.4/1.5)	40	8
c_{11}	(6.8, 19.0)	(0.4/0.4/0.2)	(0.6/1.4/0.5)	(1.5/1.4/0.6)	45	12
c_{12}	(6.3, 16.1)	(0.6/0.4/0.5)	(1.5/0.4/0.6)	(1.3/1.4/0.6)	31	13
c_{13}	(7.2, 17.0)	(0.5/0.4/0.6)	(1.3/0.4/0.6)	(1.5/1.3/0.7)	46	13
c_{14}	(6.2, 16.1)	(0.3/0.4/0.6)	(0.5/1.3/0.7)	(1.1/1.4/1.2)	41	28

3.2 算例结果分析

采用 Matlab2018a 软件编写 GA 代码，首先对医疗废弃物可持续回收网络各周期的 3 个子目标进行寻优，接着对子优化目标进行模糊化，将原

表 2 其他相关参数
Tab.2 Other relevant parameters

参数	取值	参数	取值
F_{s_1}	35 000 元	O_{s_1}	31 000 元
F_{s_2}	29 000 元	O_{s_2}	34 000 元
F_{d_1}	57 000 元	O_{d_1}	29 000 元
F_{d_2}	63 000 元	O_{d_2}	33 000 元
F_p	22 000 元	O_p	20 000 元
F_r	69 000 元	O_r	28 000 元
ma_{s_1}	26 000 元	$dis_{s_1 d_1}$	23 km
ma_{s_2}	20 000 元	$dis_{s_1 d_2}$	40 km
ma_{d_1}	27 000 元	$dis_{s_2 d_1}$	36 km
ma_{d_2}	23 000 元	$dis_{s_2 d_2}$	38 km
ma_p	30 000 元	$dis_{d_1 p}$	47 km
ma_r	40 000 元	$dis_{d_2 p}$	45 km
qCO_2	150 g/km	$dis_{d_1 r}$	65 km
ca_{s_1}	14 t	$dis_{d_2 r}$	67 km
ca_{s_2}	16 t	h_s	180 h
ca_{d_1}	15 t	h_d	200 h
ca_r	20 t	h_p	160 h
ca_{d_2}	18 t	h_r	120 h
ca_p	20 t		

始多目标问题转化为基于最大满意度的单目标优化问题，进而求得多目标问题的最优解。进一步将 CPLEX 算法与 GA 算法迭代曲线对比，验证了算法的有效性。GA 迭代计算后各周期各目标的优化结果如表 3 所示，单周期多目标的最优路径如图 3 所示，多周期各周期多目标的最优路径如图 4~6 所示。CPLEX 与 GA 算法对应的多目标规划方案的满意度分别如图 7 和图 8 所示。

从多周期角度结果分析可得：a. 多周期经济成本低于单周期成本。单周期回收路径与设施选址均固定，不利于企业根据实际回收量与回收需求及时调整路径与开放相应容量的设施点，从而造成资源浪费。b. 多周期环境影响大于单周期影响。多周期回收频率增加，车辆行驶里程增加，二氧化碳排放量也相应上升。c. 多周期社会效益大于单周期效益。多周期中工人处理废弃物的频率上升，熟练度增加，同时单次任务量下降，均有利于减少处理过程中的伤害。

从多目标结果分析可得：a. 多目标最优组合中经济成本均高于经济目标最优时的成本，但低于

表 3 各周期各目标最优 GA 计算结果

Tab.3 Calculation results of the optimal GA for each target in each period

周期	经济成本最大	环境影响最小	社会效益最大	多目标最优
第一周期	(420 000, 53 064, 2.6)	(510 080, 42 139, 2.2)	(600 802, 47 031, 3.1)	(500 100, 45 130, 2.9)
第二周期	(454 370, 57 648, 2.3)	(530 205, 44 531, 2.0)	(610 023, 49 310, 2.7)	(570 301, 47 000, 2.4)
第三周期	(440 500, 54 680, 2.5)	(521 083, 43 030, 2.1)	(581 832, 48 201, 2.9)	(510 302, 47 070, 2.6)
多周期总和	(1 314 870, 165 392, 7.4)	(1 581 368, 129 700, 6.3)	(1 792 657, 144 542, 8.7)	(1 580 703, 139 200, 7.9)
单周期	(1 403 281, 153 026, 6.1)	(1 610 020, 108 900, 6.2)	(1 843 980, 132 000, 7.6)	(1 660 803, 134 071, 7.2)

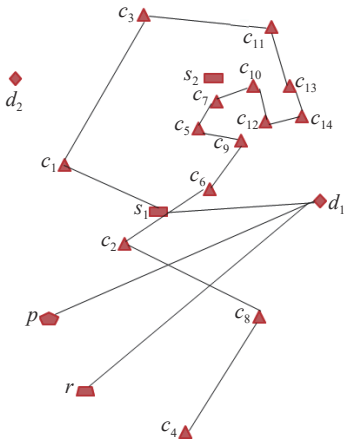


图 3 单周期多目标最优

Fig. 3 Multi-objective optimization in a single period

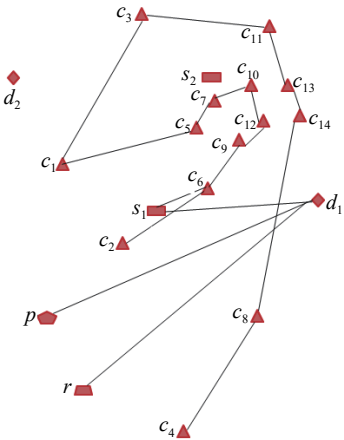


图 4 第一周期多目标最优

Fig. 4 Multi-objective optimization in the first period

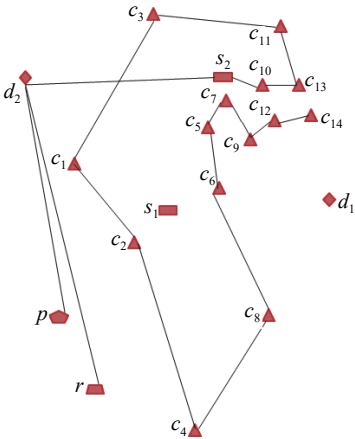


图 5 第二周期多目标最优

Fig. 5 Multi-objective optimization in the second period

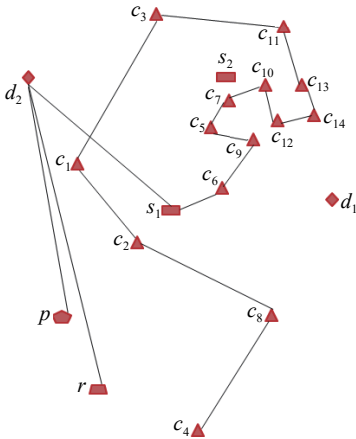


图 6 第三周期多目标最优

Fig. 6 Multi-objective optimization in the third period

环境、社会目标最优时的成本。b. 多目标最优组合中环境影响均大于环境目标最优时的影响，但小于经济、社会目标最优时的影响。c. 多目标最优组合中社会效益均小于社会目标最优时的效益，但高于经济、环境目标最优时的效益。

综上，多周期回收网络路径规划、设施选址更加灵活；多目标组合中各子目标均未达到最优，但总体优化结果优于单目标优化，在优化成

本的同时兼顾了环境影响、社会效益，更加符合企业实际情况。

4 总结与展望

本文以回收量不确定条件下医疗废弃物多周期回收网络可持续性为背景，在考虑经济成本、环境影响的同时，将社会效益纳入可持续回收网

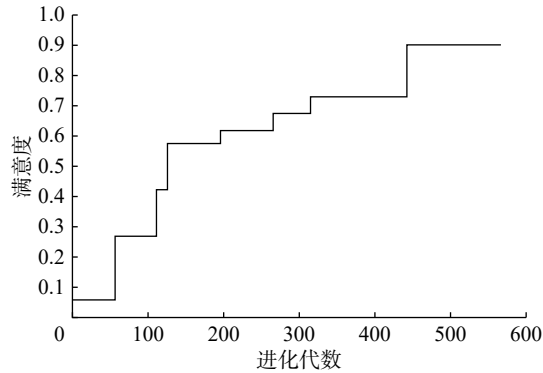


图7 CPLEX收敛性
Fig. 7 CPLEX convergence

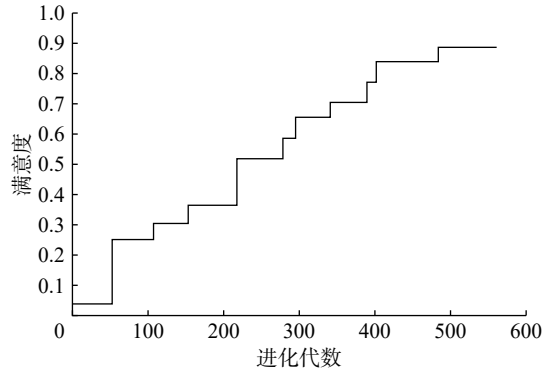


图8 GA收敛性
Fig. 8 GA convergence

络多目标模型，并以上海市某医疗废弃物回收企业为例，通过GA求解各周期各目标最优解组合。将模型运用于实例进行研究，GA寻优结果表明多周期多目标回收网络比单周期单目标更能兼顾系统各目标的平衡，从而验证了模型的有效性。该模型不仅适用于医疗废弃物回收网络，也为其他危险废弃物回收网络构建提供借鉴。

本文在多周期下仅考虑了与单周期的对比，并未考虑不同周期长度下各多周期对比，可进一步探讨多周期下如何选取最佳周期长度；在求解算例时，运用了遗传算法，然而求解复杂物流网络规划的元启发式算法是多样的，下一步可探讨如何将鱼群算法、粒子群算法等应用到模型求解中；在算例部分，仅针对医疗废弃物进行了研究，下一步可考虑模型对于其他危险废弃物回收问题的适用性。

参考文献:

[1] ZAMPARAS M, KAPSALIS V C, KYRIAKOPOULOS G L, et al. Medical waste management and environmental assessment in the Rio University Hospital, Western

Greece[J]. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 2019, 13: 100163.

[2] KORKUT E N. Estimations and analysis of medical waste amounts in the city of Istanbul and proposing a new approach for the estimation of future medical waste amounts[J]. *Waste Management*, 2018, 81: 168–176.

[3] ANSARI M, EHRAMPOUSH M H, FARZADKIA M, et al. Dynamic assessment of economic and environmental performance index and generation, composition, environmental and human health risks of hospital solid waste in developing countries; a state of the art of review[J]. *Environment International*, 2019, 132: 105073.

[4] 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.

[5] MAKAJIC-NIKOLIC D, PETROVIC N, BELIC A, et al. The fault tree analysis of infectious medical waste management[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 113: 365–373.

[6] ROLEWICZ-KALIŃSKA A. Logistic constraints as a part of a sustainable medical waste management system[J]. *Transportation Research Procedia*, 2016, 16: 473–482.

[7] GRAIKOS A, VOUDRIAS E, PAPAACHARIOU A, et al. Composition and production rate of medical waste from a small producer in Greece[J]. *Waste Management*, 2010, 30(8/9): 1683–1689.

[8] MEYER R, CAMPANELLA S, CORSANO G, et al. Optimal design of a forest supply chain in Argentina considering economic and social aspects[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 231: 224–239.

[9] 曹锋, 郭健全, 刘欣欣. 考虑碳排放的多周期医药逆向物流网络联建研究[J]. *华东师范大学学报(自然科学版)*, 2017(2): 52–60.

[10] GUO J Q, FANG J, GEN M. Dynamic joint construction and optimal strategy of multi-objective multi-period multi-stage reverse logistics network: a case study of lead battery in Shanghai[J]. *Procedia Manufacturing*, 2018, 17: 1171–1178.

[11] JOHN S T, SRIDHARAN R, KUMAR P N R, et al. Multi-period reverse logistics network design for used refrigerators[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2018, 54: 311–331.

[12] KUMAR V N S A, KUMAR V, BRADY M, et al. Resolving forward-reverse logistics multi-period model using evolutionary algorithms[J]. *International Journal of Production Economics*, 2017, 183: 458–469.

[13] 周向红, 成思婕, 成鹏飞. 自营回收模式下再制造逆向物流网络多周期多目标选址规划[J]. *系统工程*, 2018,

- 36(9): 146–153.
- [14] MANTZARAS G, VOUDRIAS E A. An optimization model for collection, haul, transfer, treatment and disposal of infectious medical waste: application to a Greek region[J]. *Waste Management*, 2017, 69(9): 518–534.
- [15] CUI Y Y, GUAN Z L, SAIF U, et al. Close loop supply chain network problem with uncertainty in demand and returned products: genetic artificial bee colony algorithm approach[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 162: 717–742.
- [16] 许闯来, 胡坚堃, 黄有方. 不确定需求下快递配送网络鲁棒优化 [J]. *计算机工程与应用*, 2020, 56(3): 272–278.
- [17] 李进, 朱道立. 模糊环境下低碳闭环供应链网络设计多目标规划模型与算法 [J]. *计算机集成制造系统*, 2018, 24(2): 494–504.
- [18] 杨晓华, 郭健全. 新零售下生鲜产品闭环物流网络模糊规划 [J]. *计算机工程与应用*, 2019, 55(2): 198–205.
- [19] 张鑫, 赵刚, 李伯棠. 可持续闭环供应链网络设计的多目标模糊规划问题 [J]. *控制理论与应用*, 2020, 37(3): 513–527.
- [20] 李进. 低碳环境下闭环供应链网络设计多目标鲁棒模糊优化问题 [J]. *控制与决策*, 2018, 33(2): 293–300.
- [21] 李伯棠, 赵刚, 张鑫. 低碳闭环物流网络模糊目标规划模型及算法 [J]. *计算机集成制造系统*, 2019, 25(8): 2087–2100.
- [22] 姜芳, 郭健全. 多目标多周期多阶段逆向物流网络动态联建 [J]. *上海理工大学学报*, 2018, 40(3): 274–281.
- [23] GUO J Q, HE L, GEN M. Optimal strategies for the closed-loop supply chain with the consideration of supply disruption and subsidy policy[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2019, 128: 886–893.
- [24] RAMOS T R P, GOMES M I, BARBOSA-PÓVOA A P. Planning a sustainable reverse logistics system: balancing costs with environmental and social concerns[J]. *Omega*, 2014, 48: 60–74.
- [25] 狄卫民, 马祖军, 代颖. 制造/再制造集成物流网络模糊优化设计方法 [J]. *计算机集成制造系统*, 2008, 14(8): 1472–1480.
- [26] KHISHTANDAR S. Simulation based evolutionary algorithms for fuzzy chance-constrained biogas supply chain design[J]. *Applied Energy*, 2019, 236: 183–195.
- [27] RIBEIRO V H A, REYNOSO-MEZA G. A holistic multi-objective optimization design procedure for ensemble member generation and selection[J]. *Applied Soft Computing*, 2019, 83: 105664.
- [28] CHOI A E S, PARK H S. Fuzzy multi-objective optimization case study based on an anaerobic co-digestion process of food waste leachate and piggery wastewater[J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, 223: 314–323.
- [29] 丁丹军, 戴康, 张新松, 等. 基于模糊多目标优化的电动汽车充电网络规划 [J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(3): 43–50.
- [30] 胡东方, 吴盘龙. 基于遗传算法的个性化服务型产品设计 [J]. *计算机集成制造系统*, 2019, 25(8): 2036–2044.
- [31] HE Z G, LI Q, FANG J. The solutions and recommendations for logistics problems in the collection of medical waste in China[J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2016, 31: 447–456.

(编辑: 石 瑛)