

基于垃圾分类的垃圾中转站多目标选址问题研究

王雪婷¹, 李 嘉², 程 洁³, 贾永基^{1*}

¹东华大学旭日工商管理学院, 上海

²上海市现代流通学校, 上海

³东华大学发展联络处, 上海

收稿日期: 2023年6月12日; 录用日期: 2023年7月3日; 发布日期: 2023年7月24日

摘 要

基于垃圾分类回收网络, 垃圾中转站的选址不仅要满足垃圾全部清运需求, 还要考虑其产生的环境负影响, 以此建立了网络总成本最小和环境负效应最小的双目标集合覆盖选址模型。该模型在满足所有需求的前提下, 确定在哪些候选点建造设施, 并获得需求点与设施的对应分配关系。为了求解该模型, 提出了Epsilon约束法, 并设计了三种不同规模的测试算例, 测试结果表明该算法能在短时间内有效求解垃圾中转站多目标选址问题。

关键词

垃圾分类, 中转站选址, 多目标优化, Epsilon约束法

Multi-Objective Location Problem of Waste Transfer Stations Based on Waste Classification

Xueting Wang¹, Jia Li², Jie Cheng³, Yongji Jia^{1*}

¹Glorious Sun School of Business and Management, Donghua University, Shanghai

²Shanghai Modern Circulation School, Shanghai

³Development Liaison Office, Donghua University, Shanghai

Received: Jun. 12th, 2023; accepted: Jul. 3rd, 2023; published: Jul. 24th, 2023

*通讯作者。

文章引用: 王雪婷, 李嘉, 程洁, 贾永基. 基于垃圾分类的垃圾中转站多目标选址问题研究[J]. 管理科学与工程, 2023, 12(4): 508-517. DOI: 10.12677/mse.2023.124061

Abstract

Based on the waste classification and recycling network, the location of waste transfer stations not only needs to meet the needs of all waste collection and transportation, but also takes into account the negative environmental impact it generates. Therefore, a dual objective set coverage location model is established to minimize the total network cost and the negative environmental effects. The model determines the locations for constructing facilities among the candidate points, while meeting all requirements, and establishes the corresponding allocation relationship between demand points and facilities. To formulate this model, the ε -Constraint method is proposed, and three test cases of different scales are designed. The test results demonstrate the algorithm's ability to effectively solve the multi-objective facility location problem for waste transfer stations within a short time.

Keywords

Waste Classification, Location Problem of Transfer Stations, Multi-Objective Optimization, ε -Constraint Method

Copyright © 2023 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

近年来,我国城市生活垃圾的产量逐年攀升,到2020年已增长至2.35亿吨,未来还将不断增长,这引发环卫需求大幅增长,给城市生活垃圾管理带来了更大的挑战[1]。为解决这一难题,2016年6月,我国出台了垃圾分类政策,选定了46个试点城市进行垃圾分类管理。2019年,上海市政府颁发《上海市生活垃圾管理条例》,以“四分法”的标准对城市生活垃圾进行分类,构建了分类投放、分类收集、分类运输和分类处理的生活垃圾分类回收体系。同年,住建部发布《生活垃圾分类标志》,统一规定生活垃圾的四分类标准。至此,我国正式拉开了强制实行垃圾分类的序幕。城市生活垃圾分类配套体系建设是一个复杂的、综合性的系统工程,既连接垃圾产生源头又衔接垃圾末端处理厂的中转站,是垃圾分类回收网络的重要枢纽设施。中转站对接收到的生活垃圾经过压缩处理,实现垃圾减量化,从而提高车载效率。然而,中转站不可避免地会对周围居民的生活环境造成影响,常被视为“半厌恶设施”[2]。因此,市容环保部门在进行中转站选址战略决策时权衡经济成本和环境影响,显得尤为重要。

2. 文献综述

随着全球对生活垃圾回收和处理问题的持续关注,越来越多的学者们开始研究垃圾回收过程中涉及的设施选址问题。Darmian等[3]结合城市分区的实际情况,寻找固体废弃物收集中心最优选址位置和建设数量。刘佳敏等[4]利用地理信息系统(Geographic Information System, GIS)和层次分析法研究垃圾填埋场选址问题。Habibi等[5]同时确定垃圾中转站、回收厂和垃圾填埋场的最优选址,并优化三种设施之间的容量分配。钟翠萍等[6]将视角转换到垃圾楼公共设施选址问题,结合GIS空间分析将北京西城区居民点的密度中心作为垃圾楼候选点。垃圾中转站作为生活垃圾回收网络重要的转运设施,只有少数文献对其选址问题进行了深入研究。Chen等[7]发现过往研究大多集中在选址算法和评价准则方面的创新,忽视优化垃圾中转站数量决策,因此提出一种最小化节点距离和最大化覆盖需求的多目标选址模型。Höke

和 Yalcinkaya [8]利用 GIS 进行适宜性分析从而确定合适的备选中转站集合。Dai 和 Chen [9]考虑到生活垃圾发电的动态特性,设计了具有动态容量约束的垃圾中转站选址模型。已有的垃圾中转站选址研究中,较少学者考虑垃圾分类场景,吴琳瑛[10]对垃圾分类与垃圾不分类两种场景下的包含中转站的生活垃圾网络设施选址-路径问题进行对比研究。王梦儒[11]依据生活垃圾的四分类法将选址-路径问题拆分为四个模型分别求解。李慧等[12]基于上海市的垃圾分类标准,在湿垃圾回收网络优化的研究中考虑了湿垃圾中转处理点的选址问题。考虑到垃圾收集点与垃圾中转站之间的运输成本,需要将垃圾中转站建设在距离垃圾收集点较近的位置,而垃圾中转站对于居民小区会产生较严重的环境污染和噪音污染等问题,由此便产生了环境负影响。陈佛保和郝前进[13]运用特征价格法量化上海市垃圾中转站的邻避效应。李海君等[14]则是通过设置补偿费用来控制中转站的环境负效应。王海燕和张岐山[15]在垃圾中转站对居民区的环境负影响讨论中考虑了风向和风力的因素,构建了基于扩散距离的负效应函数。马艳芳等[16]研究垃圾焚烧站处理垃圾过程中排放的污染气体所产生的负面影响,从风向和距离两个因素入手来测量负效应。

综上所述,虽然已有部分文献从环境负效应角度出发研究垃圾中转站选址问题,但是同时考虑垃圾分类场景、中转站容量限制和环境影响的现实约束,建立多目标选址优化模型的研究仍然是少数。鉴于此,本文基于生活垃圾分类回收网络,建立垃圾中转站的设施选址模型,从经济维度和环境维度出发,设立了网络总成本最小和中转站环境负效应最小两个优化目标。此外,本文还设计了 Epsilon 约束法用来求解垃圾中转站多目标集合覆盖选址模型。

3. 问题描述与数学模型

3.1. 问题描述

基于上海的垃圾分类政策,本文仅考虑干垃圾和湿垃圾两种类型生活垃圾作为清运对象,构建了 M 个垃圾收集点、 M 个备选垃圾中转站、1个干垃圾焚烧处理和1个湿垃圾资源化利用厂的三级城市生活垃圾分类回收网络,如图1所示。其中,生活垃圾分类回收网络共有两个阶段:第一个阶段为包含垃圾收集点和垃圾中转站的生活垃圾分类收集阶段;第二阶段为包含垃圾中转站和垃圾处理厂的生活垃圾分类转运阶段。

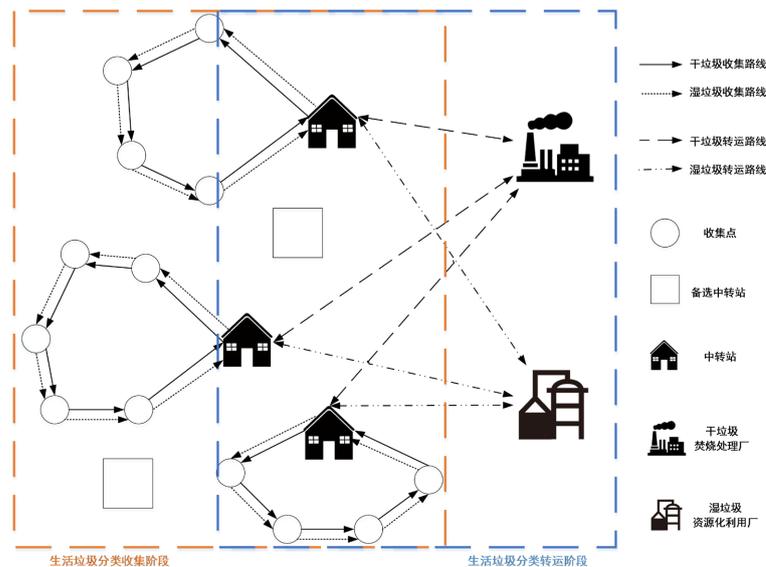


Figure 1. Municipal solid waste classification and recycling network

图 1. 城市生活垃圾分类回收网络

本文所研究的垃圾中转站选址问题可以描述如下：在城市生活垃圾分类回收网络中，假设垃圾中转站的规格和容量是同质的。也就是说，尽管在垃圾收集阶段对垃圾收集点的干垃圾及湿垃圾的清运工作是独立进行的，但是这两类生活垃圾最终都被运送至中转站，所以中转站的垃圾处理总量为接收的干垃圾总量和湿垃圾总量之和。此外，考虑到垃圾中转站存在垃圾渗透液污染、散发难闻气味和噪音影响等问题，对附近居民区的环境造成负面影响，故需要量化中转站对收集点的环境负效应。因此，本文基于中转站容量、垃圾清运需求和垃圾减量化等约束，以最小化网络总成本以及最小化环境负效应为优化目标，构建双目标集合覆盖选址模型。

为了简化问题，做出如下假设：

- 1) 备选中转站的地理位置和建设成本已知，且规格相同；
- 2) 居民小区收集点的地理位置和垃圾产量已知；
- 3) 干垃圾焚烧处理和湿垃圾资源化利用厂设定在郊区，不考虑环境负效应；
- 4) 收集点的垃圾已经按照干、湿分类投放；
- 5) 中转站对收集到的垃圾分类压缩，起到垃圾减量作用，为不同种类的生活垃圾设定最大减量率；
- 6) 收集点的垃圾必须经过中转站中转，不直接运送至末端处理厂。

本文所使用的符号和变量如表 1 所示。

Table 1. Symbol description

表 1. 符号说明

符号	描述
R	备选中转站和收集点的集合， $R = M \cup U$
N	收集点集合， $N = \{ M +1, M +2, \dots, M + N \}$ ，共有 $ N $ 个收集点
M	备选中转站集合， $M = \{1, 2, \dots, M \}$ ，共有 $ M $ 个中转站
P	末端处理厂集合， $p \in P$ ， $p=1$ 表示干垃圾焚烧处理厂， $p=2$ 表示湿垃圾资源化利用厂
G	垃圾种类集合， $g \in G$ ， $g=1$ 表示干垃圾， $g=2$ 表示湿垃圾
d_{ij}	收集点 $i \in N$ 与中转站 $j \in M$ 之间的距离(km)
d_{jp}	中转站 $j \in M$ 与 p 类末端处理厂之间的距离(km)
f_j	中转站 $j \in M$ 建设成本
c_j	中转站 $j \in M$ 单位容量运营成本
q_j	中转站 $j \in M$ 最大容量
t_{ij}^g	收集点 $i \in N$ 到中转站 $j \in M$ 的 g 类垃圾单位运输成本(元/km·kg)
t_{jp}	中转站 $j \in M$ 到 p 类末端处理厂的垃圾单位运输成本(元/km·kg)
S_{ig}	收集点 $i \in N$ 的 g 类垃圾产生量(kg)
γ_g	中转站压缩处理 g 类垃圾的最大减量率(%)
α	中转站容量对负效应的影响系数
β	中转站与收集点之间距离对负效应的影响系数
x_j	0-1 决策变量，若在备选 $j \in M$ 点建设中转站，则为 1，否则为 0
y_{ij}	0-1 决策变量，若收集点 $i \in N$ 被中转站 $j \in M$ 服务，则为 1，否则为 0
s_{ij}^g	收集点 $i \in N$ 运送到中转站 $j \in M$ 的 g 类垃圾量(kg)
u_{jp}	中转站 $j \in M$ 到 p 类末端处理厂的垃圾运输量(kg)

3.2. 目标函数

1) 网络总成本

网络总成本包括垃圾中转站的建设成本 F_{11} 、中转站的运营成本 F_{12} 以及网络设施间的运输成本 F_{13} 。
建设成本：垃圾中转站的建设费用是固定且已知的，计算公式为：

$$F_{11} = \sum_{j \in M} f_j x_j \quad (1)$$

运营成本：为了避免浪费中转站能力，中转站运营成本与中转站容量有关，计算公式为：

$$F_{12} = \sum_{j \in M} c_j q_j x_j \quad (2)$$

运输成本：考虑干垃圾和湿垃圾两类生活垃圾的特质不同，其单位运输成本存在差异，总运输成本由两部分组成。第一部分是将垃圾从收集点运到垃圾中转站产生的运输成本，其与运输距离 d_{ij} 和 g 类垃圾运输量 s_{ij}^g 有关；第二部分是从垃圾中转站到 p 类末端处理厂的运输成本，其与运输距离 d_{jp} 和垃圾运输量 u_{jp} 有关。总运输成本的计算公式为：

$$F_{13} = \sum_{i \in N} \sum_{j \in M} \sum_{g \in G} t_{ij}^g s_{ij}^g d_{ij} + \sum_{j \in M} \sum_{p \in P} t_{jp} u_{jp} d_{jp} \quad (3)$$

最后，网络总成本 $F_1 = F_{11} + F_{12} + F_{13}$ 。

2) 环境负效应

垃圾中转站会对周围造成负面影响，本文采用文献[17]提出的负效应函数： $(q_j)^\alpha (d_{ij})^{-\beta}$ 。该函数用来衡量垃圾中转设施产生的负效应，设定负效应与设施容量 q_j 成正比，与设施和影响点之间的距离 d_{ij} 成反比。中转站的环境负效应目标函数为：

$$F_2 = \sum_{i \in N} \sum_{j \in M} (q_j)^\alpha (d_{ij})^{-\beta} x_j \quad (4)$$

其中， α 为中转站容量对负效应的影响系数， β 为中转站与收集点之间的距离对负效应的影响系数，何波[18]在研究中提到，一般将 α 和 β 的值设置为 1。

显然，在选址过程中，若考虑经济成本，则中转站的位置应缩短到收集点和处理厂的距离，从而减少运输成本；若考虑环境负效应，则中转站的位置应远离收集点，从而减少产生的环境负面影响。因此，网络成本最小和负效应最小是两个相互矛盾的优化目标。

3.3. 数学模型

基于垃圾分类的中转站多目标选址模型如下：

$$\min F_1 = \sum_{j \in M} f_j x_j + \sum_{j \in M} c_j q_j x_j + \sum_{i \in N} \sum_{j \in M} \sum_{g \in G} t_{ij}^g s_{ij}^g d_{ij} + \sum_{j \in M} \sum_{p \in P} t_{jp} u_{jp} d_{jp} \quad (5)$$

$$\min F_2 = \sum_{i \in N} \sum_{j \in M} (q_j)^\alpha (d_{ij})^{-\beta} x_j \quad (6)$$

$$x_j \geq y_{ij}, \forall i \in N, j \in M \quad (7)$$

$$\sum_{j \in M} y_{ij} = 1, \forall i \in N \quad (8)$$

$$S_{ig} \leq \sum_{j \in M} s_{ij}^g, \forall i \in N, g \in G \quad (9)$$

$$0 \leq s_{ij}^g \leq M y_{ij}, \forall i \in N, j \in M, g \in G \quad (10)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{g \in G} s_{ij}^g \leq q_j, \forall j \in M \quad (11)$$

$$(1 - \gamma_g) \sum_{i \in N} s_{ij}^g \leq u_{jp}, \forall j \in M, p \in P, g \in G, p = g \quad (12)$$

$$x_j \in \{0, 1\}, \forall j \in M \quad (13)$$

$$y_{ij} \in \{0, 1\}, \forall i \in N, j \in M \quad (14)$$

$$u_{jp} \geq 0, \forall j \in M, p \in P \quad (15)$$

4. Epsilon 约束法

Epsilon 约束法是求解多目标问题最流行且高效的精确算法，其基本思想是：首先优化单个目标，得到单目标优化最优解，然后将其他目标转化为约束，加入到原模型中，构建一个新的 ε 约束问题，然后在取值范围内不断调整 ε 的值，对模型进行多次求解，从而得到帕累托最优解集。

Epsilon 约束法的理论基础是帕累托支配。对于本文的最小化双目标模型而言，帕累托支配是指：若 x_1 和 x_2 是满足模型约束的两个可行解，当且仅当 $F_1(x_1) \leq F_1(x_2)$ 且 $F_2(x_1) < F_2(x_2)$ 时，认为可行解 x_1 支配可行解 x_2 ，同时称 x_1 为非支配解，称 x_2 为被支配解。此时，在目标函数可行解空间里所有不被支配的非劣解构成帕累托最优解集。对于本文建立的最小化网络总成本和最小化环境负效应的双目标数学模型，使用 Epsilon 约束法需要先计算出以下三组解：

- ① 计算两个目标函数的最优解： $F_1^+ = \min\{F_1(x)\}$ ， $F_2^+ = \min\{F_2(x)\}$ ；
 - ② 计算两个目标函数的最差解： $F_1^- = \min\{F_1(x) : F_2(x) = F_2^+, x \in X\}$ ，
 $F_2^- = \min\{F_2(x) : F_1(x) = F_1^+, x \in X\}$ ；
 - ③ 计算帕累托解集的边界解： $F^E = \{(F_1^+, F_2^-), (F_1^-, F_2^+)\}$ ， $F_1^E = (F_1^+, F_2^-)$ ， $F_2^E = (F_1^-, F_2^+)$ 。
- 最后，上述得到的三组解在目标函数可行解空间的分布情况如图 2 所示。

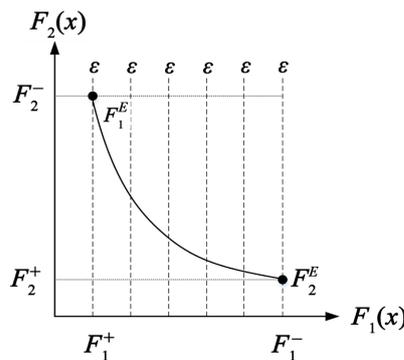


Figure 2. The solution space of epsilon constraint method

图 2. Epsilon 约束法的解空间

求解垃圾中转站多目标选址问题的 Epsilon 约束法的计算步骤如下：

- Step 1 计算最优解 $F^+ = (F_1^+, F_2^+)$ 和最差解 $F^- = (F_1^-, F_2^-)$ ；
- Step 2 选择 $F_1(x)$ 为主目标，得到 $F_2(x)$ 的 ε 取值范围为 $[F_2^+, F_2^-]$ ；
- Step 3 确定步长值 δ ，令 $\varepsilon = F_2^- - \delta$ ，初始化非支配解集 $F^* = \emptyset$ ；
- Step 4 while $\varepsilon \geq F_2^+$,

求解以 $\min F_1(x)$ 为优化目标, 添加 $F_2(x)$ 为约束条件的单目标优化问题, 计算两个目标值 F_1^* 和 F_2^* 将非支配解 (F_1^*, F_2^*) 放入解集 F^* 中,

更新 $\varepsilon = \varepsilon - \delta$;

endwhile;

Step 5 从解集 F^* 中移除被支配的解, 从而得到 Pareto 解集。

5. 仿真测试

本文利用 IBM ILOG CPLEX 12.9 求解器对 Epsilon 约束法进行代码实现, 所有仿真实验均在 Intel Core i5-1135G7 & 2.40GHz CPU-16 GB RAM 的个人笔记本电脑中进行测试。

5.1. 算例设计与参数设置

现有文献尚没有适合该问题的标准算例, 因此本文基于收集点、中转站和末端处理厂三级设施共同组成的垃圾分类回收网络, 在 $100 \text{ km} \times 100 \text{ km}$ 的区域内随机生成垃圾收集点和备选垃圾中转站等相关信息, 最终构造了小规模 ($|N| = 30, |M| = 8$)、中规模 ($|N| = 60, |M| = 10$) 以及大规模 ($|N| = 90, |M| = 12$) 3 类算例, 每类算例 2 个, 总计 6 个算例, 如表 2 所示。根据上海生态环境局发布的数据, 上海市生活垃圾日人均产量为 1.32 kg, 其中干垃圾 0.6 kg, 湿垃圾 0.42 kg, 其余为可回收物和有害垃圾。因此, 本文设定各个收集点的干垃圾产量在 $(0, 6000]$ 区间内随机产生, 湿垃圾产量在 $(0, 4000]$ 区间内随机产生。

根据文献[12]的数据, 设置参数如下: 中转站容量为 60 吨; 建设成本为 260 元/天; 中转站的运营成本为 130 元/吨(包括电费 120 元/吨、水费 1 元/吨和其他材料费用 9 元/吨)。

Table 2. Test examples

表 2. 测试算例

算例	$ N $	$ M $	q_j (吨)	f_j (元/天)	c_j (元/吨)
Instance-1	30	8	60		
Instance-2	30	8	60		
Instance-3	60	10	60	260	130
Instance-4	60	10	60		
Instance-5	90	12	60		
Instance-6	90	12	60		

5.2. 实验结果分析

针对垃圾中转站多目标选址模型, 获得的帕累托前沿如图 3 所示, F_1 表示网络总成本, F_2 表示环境负效应, 可以看出它们是两个矛盾的目标。具体地说, 网络总成本与建设的中转站数量和网络中设施间的距离有关, 环境负效应则与中转站容量以及中转站与收集点之间的距离有关。总成本越低说明建设的中转站总容量越小, 中转站数量越少, 设施距离越近, 势必会牺牲掉部分的环境负影响。

从现实意义上来讲, Epsilon 约束法获得的帕累托解集中的任意解都是可行的, 具体解决方案取决于管理决策者的偏向性, 若决策者侧重于环境目标, 愿意牺牲部分网络总成本以换取降低对附近居民的环境影响, 那么可以选择目标函数 F_1 值较低的解决方案; 若决策者强调成本的重要性, 可接受一定程度上的环境负影响, 则可以选择目标函数 F_2 值较低的解决方案; 若管理决策者想要两个目标之间处于一个平衡状态, 则可以选择处于解集两个目标值相互均衡区间的解决方案。

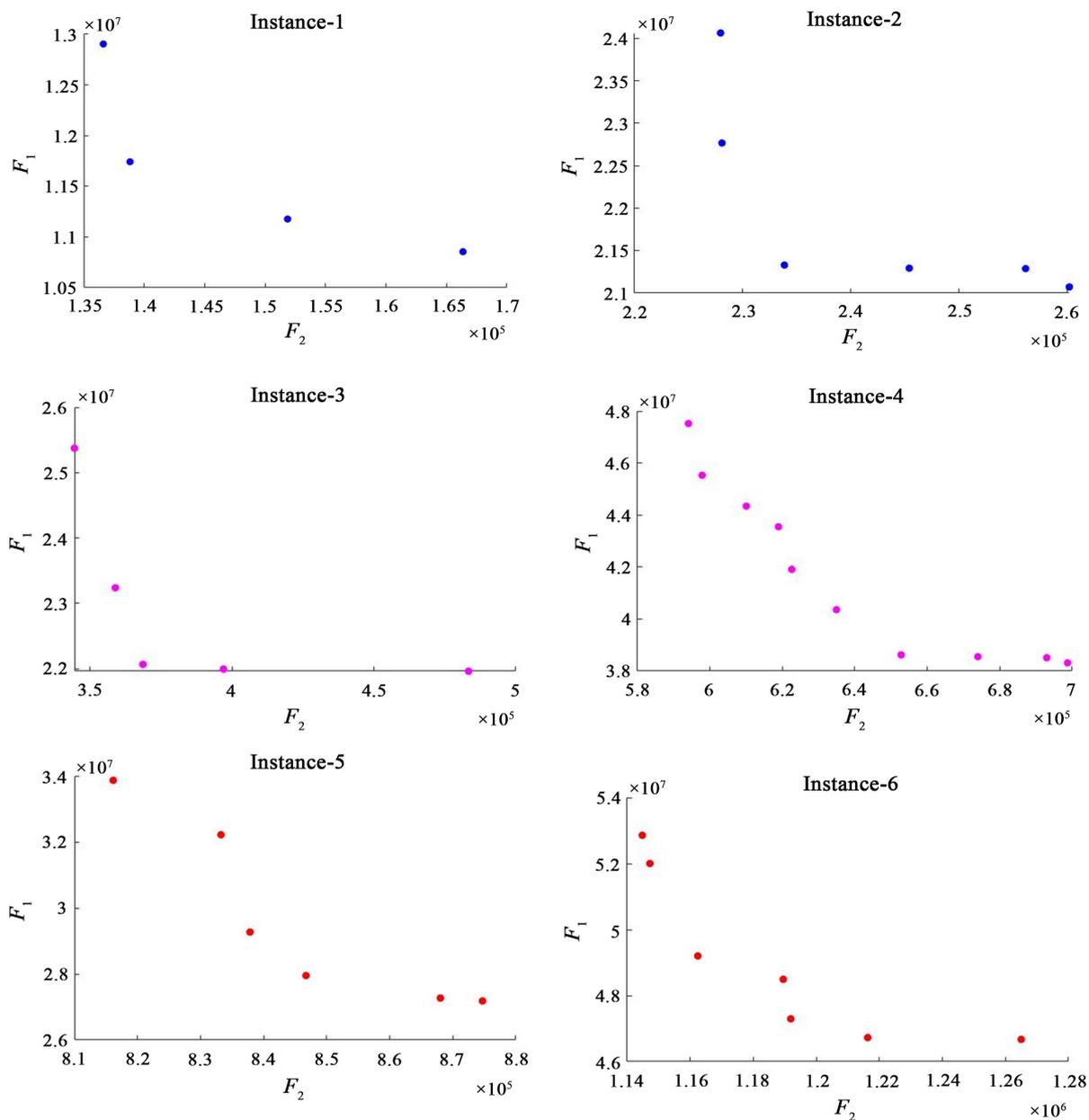


Figure 3. Solution results of the example

图 3. 算例求解结果

5.3. 选址方案分析

以大规模算例 6 为例, 从帕累托解集中任意选取一个非支配解, 其选址结果及所对应的目标函数值如表 3 所示。从中可以看出, 中转站的建设数量与垃圾产量和中转站容量有关, 从 12 个候选中转站中选取 5 个即可满足该算例的全部垃圾清运需求, 且每个中转站负责清运的垃圾收集点数量较为均衡。在此基础上, 对该算例中的垃圾收集点、垃圾中转站和垃圾处理厂三类设施节点布局进行可视化处理, 如图 4 所示。一般来说, 垃圾处理厂通常设置在郊区, 其位置距离垃圾收集点和垃圾中转站较远。通过模型求解, 可以获得垃圾中转站的建设位置和服务关系, 如图 5 所示, 所有收集点都被分配至某个垃圾中转站。考虑到垃圾处理厂和中转站之间的运输成本, 得到的选址方案更偏向于靠近处理厂的中转站位置。

Table 3. Location plan
表 3. 选址方案

中转站	收集点	F_1 (万元)	F_2
6	9, 25, 26, 31, 43, 45, 51, 58, 64, 66, 71, 78, 79, 81, 82, 83, 85, 86		
8	11, 12, 15, 16, 32, 37, 38, 39, 40, 41, 47, 52, 59, 67, 84, 89, 90		
9	8, 10, 18, 21, 27, 42, 49, 50, 53, 56, 57, 62, 65, 68, 70, 72, 73, 76, 77	4672.76	1,216,300
10	5, 6, 13, 17, 19, 22, 23, 24, 29, 30, 34, 36, 44, 63, 75, 87		
11	1, 2, 3, 4, 7, 14, 20, 28, 33, 35, 46, 48, 54, 55, 60, 61, 69, 74, 80, 88		

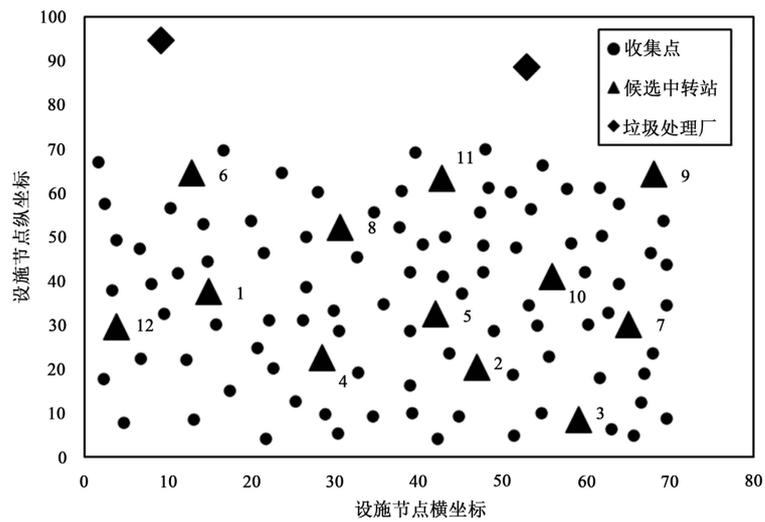


Figure 4. Node distribution diagram of garbage classification and recycling network facilities
图 4. 垃圾分类回收网络设施节点分布图

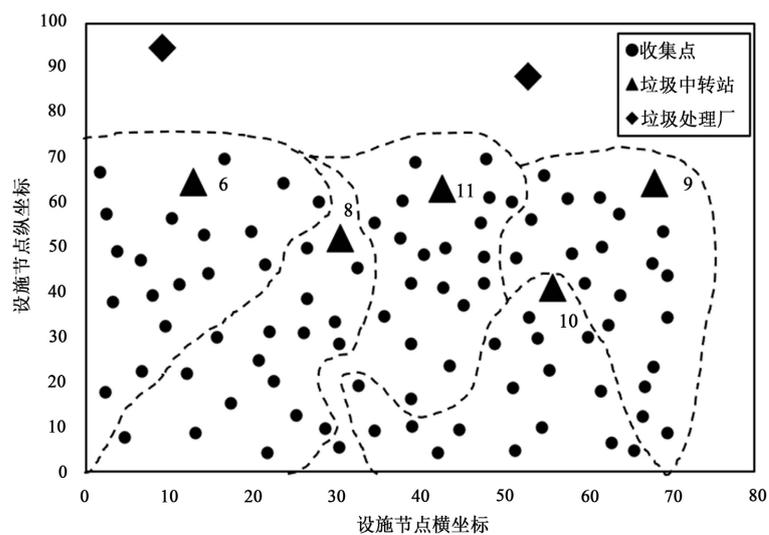


Figure 5. Facility node distribution map after site location decision
图 5. 选址决策后的设施节点分布图

6. 结语

在垃圾分类背景下, 针对城市生活垃圾分类回收网络的建设要求, 本文考虑了具有容量限制、垃圾分类场景和满足垃圾全部清运需求的城市垃圾中转站的选址问题, 建立了多目标中转站集合覆盖选址模型。优化目标之一为包括建设成本和运输成本在内的网络总成本最小, 优化目标之二为中转站的环境负效应最小。然后, 设计 Epsilon 算法求解该双目标选址模型。为了验证算法的有效性, 设计三种规模的 6 个测试算例进行仿真实验。实验结果表明, Epsilon 能够有效得到双目标优化问题的帕累托前沿。本研究可以为环保部门进行垃圾中转站选址提供决策支持。

基金项目

中央高校基本科研专项资金资助项目(2232018H-07); 东华大学人文社科预研究重大项目(2022Z003)。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
- [2] Yapicioglu, H., Smith, A.E. and Dozier, G. (2007) Solving the Semi-Desirable Facility Location Problem Using Bi-Objective Particle Swarm. *European Journal of Operational Research*, **177**, 733-749. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.11.020>
- [3] Darmian, S.M., Moazzeni, S. and Hvattum, L.M. (2020) Multi-Objective Sustainable Location-Districting for the Collection of Municipal Solid Waste: Two Case Studies. *Computers & Industrial Engineering*, **150**, Article ID: 106965. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106965>
- [4] 刘佳敏, 梁致远, 李月诗, 肖彬, 焦继宗. 基于模糊逻辑的多准则建模方法在兰州市垃圾填埋场选址中的应用[J]. 西北师范大学学报(自然科学版), 2022, 58(4): 113-119.
- [5] Habibi, F., Asadi, E., Sadjadi, S.J. and Barzinpour, F. (2017) A Multi-Objective Robust Optimization Model for Site-Selection and Capacity Allocation of Municipal Solid Waste Facilities: A Case Study in Tehran. *Journal of Cleaner Production*, **166**, 816-834. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.063>
- [6] 钟翠萍, 靖常峰, 杜明义, 刘思君. GIS 和免疫算法的垃圾楼选址优化[J]. 测绘科学, 2021, 46(4): 142-149, 185.
- [7] Chen, Y., Dai, F. and Cao, M. (2021) An Optimized MSW Transfer Station Location System Based on Internet of Things. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, **12**, 675-688. <https://doi.org/10.1007/s13198-021-01062-6>
- [8] Höke, M.C. and Yalcinkaya, S. (2021) Municipal Solid Waste Transfer Station Planning through Vehicle Routing Problem-Based Scenario Analysis. *Waste Management & Research*, **39**, 185-196. <https://doi.org/10.1177/0734242X20966643>
- [9] Dai, F. and Chen, Y. (2022) Integrated Dynamic Municipal Solid Waste Transfer Station Location Decision Study Based on the Dynamic MSW Generation. *Environment, Development and Sustainability*, **25**, 6033-6047. <https://doi.org/10.1007/s10668-022-02292-9>
- [10] 吴琳璘. 考虑不确定性和外包的生活垃圾回收设施选址模型与优化[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 东北大学, 2012.
- [11] 王梦儒. 针对垃圾分类问题的城市逆向物流回收点选址——路径问题研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安电子科技大学, 2021.
- [12] 李慧. 考虑不确定需求和收运策略的城市生活垃圾回收网络优化研究[D]: [博士学位论文]. 上海: 上海大学, 2022.
- [13] 陈佛保, 郝前进. 环境市政设施的邻避效应研究——基于上海垃圾中转站的实证分析[J]. 城市规划, 2013(8): 72-77.
- [14] 李海君, 张耀文, 杨月巧. 考虑回收——补偿约束的卫星城镇生活垃圾中转站选址研究[J]. 运筹与管理, 2020, 29(4): 30-35.
- [15] 王海燕, 张岐山. 考虑负效应的城市废弃物中转站多目标选址模型及算法[J]. 管理工程学报, 2013, 27(1): 135-141.
- [16] 马艳芳, 张文, 李宗敏, 闫芳, 郭凌云. 考虑负效应的垃圾回收两级选址——路径模型与算法[J]. 计算机应用, 2023, 43(1): 289-298.
- [17] Erkut, E. and Neuman, S. (1992) A Multiobjective Model for Locating Undesirable Facilities. *Annals of Operations Research*, **40**, 209-227. <https://doi.org/10.1007/BF02060478>
- [18] 何波, 杨超, 任鸣鸣. 废弃物处理站选址问题及多目标演化算法求解[J]. 系统工程理论与实践, 2007(11): 72-78, 147.