

青岛市城市垃圾转运优化模型设计

摘 要

随着我国人口的增加和城市化进程的加快，城市生活垃圾的数量呈现逐年较快增长的趋势，因此处理问题变得尤为重要，而收集运输环节是城市生活垃圾处理的重要一环，严重影响到垃圾处理的经济效益、社会效益和环境效益。如今城市生活垃圾的研究和管理较多停留在末端治理和源头控制方面，而对于中间收集运输环节的关注相对较少，垃圾收运车辆的调度和路径优化问题的研究难以进行实际应用。现有研究目标较为单一且对多车型的研究较少，并且很少有进行分类运输的研究。因此本文以垃圾收运路径问题的研究缺口入手，提出了基于城市生活垃圾分类的清运车辆调度。

基于岭回归模型和GM(1, N)模型，建立了城市生活垃圾产量预测的多元组合模型，并以青岛市为例进行了生活垃圾的产量预测。基于岭回归模型和GM(1, N)模型建立的多元组合模型具有很好的预测效果，其预测精度和变量解释程度高于单个模型，同时通过权重系数的分配，降低了单一模型发展趋势的单一性、定向性，综合了单个模型的自身趋势，使得预测曲线在拟合和预测的节点上更加平滑。通过对城市生活垃圾收运系统进行定性和定量分析，结合青岛城市生活垃圾清运现状，描述了现有收运路径并分析存在的问题，对中转站设备配置以及清运车辆调度进行研究。主要分两部分，一部分是对现有混装清运模式的车辆调度进行优化，另一部分是研究分类清运的车辆调度。首先结合排队论优化中转站卸料口的配置并进行经济效益分析；然后依据垃圾收运模式的特点，建立模型，将实际问题中的限制转换成约束条件，提出垃圾分类清运的车辆调度模式，模型求解方面，使用了粒子群算法在MATLAB软件上进行编程求解，得到不同模式下清运车辆的调度方案。

关键词：城市生活垃圾；产量预测；分类清理；车辆调度

目录

一. 问题重述.....	2
二. 问题分析.....	2
2.1 历年数据概览.....	3
三 模型假设.....	3
四 模型的建立与求解.....	4
4.1 问题一模型建立与求解.....	4
4.1.1 岭回归模型.....	5
4.1.2 灰色 GM (1,N) 模型.....	6
4.1.3 预测结果.....	7
4.2 问题二模型的建立与求解.....	8
4.2.1 小型处理设备选址.....	10
4.2.2 生活垃圾处理设备处理能力的函数关系.....	11
4.2.3 大小型生活垃圾处理设备的数量与选址.....	11
4.3 问题三模型的建立与求解.....	15
4.3.1 模型求解.....	17
4.3.2 模型结果分析.....	18
4.4 问题四模型建立与求解.....	20
4.4.1 模型假设.....	20
4.4.2 模型 MT1 的建立.....	21
五 模型评价及优化.....	22
参考文献:	23

一. 问题重述

城市生活垃圾产量预测模型应用——以青岛为例

在生活垃圾大小型设备处理能力、投资成本和运营成本确定时，如何设计大小型设备的分布，使得总成本最低，显然是一个组合优化问题。优化过程中，需要综合考虑运输成本，投资成本，运营成本和环境成本，由于该实际问题的复杂性，将大小型设备的数量与选址问题分开考虑。

根据城市每日生活垃圾总量 M 与大、小型设备的每日最大处理量 $H1$ 和 $H2$ ，用枚举法可以得到 n 个大小型设备的组合方案。若主要考虑经济效益，则根据大、小型设备投资成本、运营成本的差异，可从 n 个组合方案中选出一个成本最低的方案，设该方案中大、小型设备的数量分别为 $N1$ 和 $N2$ 。根据表1数据，仅考虑经济效益时，可能出现小型设备的数量 $N2$ 为零的情况，然而为考虑环保效益，仍需按照一定原则设置小型设备。

二. 问题分析

青岛，别称岛城、琴岛、胶澳，是山东省副省级市、计划单列市，国务院批复确定的中国沿海重要中心城市和滨海度假旅游城市、国际性港口城市。截至2019年，全市下辖7个区、代管3个县级市，总面积11293平方千米，2019年全市常住人口949.98万人。其中，市区常住人口645.20万人。

表 1 青岛市行政区划现状

青岛市行政区划					
名称	面积（平方千米）	城镇化（%）	常住人（万人）	人口密度（人/平方千米）	政府驻地
市南区	30	100	54.48	18160.00	宁夏路 286 号
市北区	65.4	100	102.07	15465.15	延吉路 80 号
黄岛区	2096	80	139.26	664.41	西海岸路 181 号
崂山区	395.8	80	37.95	958.33	仙霞岭路 18 号
李沧区	98	100	51.24	5228.57	黑龙江中路 615 号
城阳区	553.2	80	73.72	1333.09	正阳中路 201 号
即墨区	1780	58.1	117.72	681.64	振华街 140 号
胶州区	1313	68.0	84.31	696.78	北京路 1 号
平度市	3167	52.8	135.74	428.74	长江路 1 号
莱西市	1568	58.1	75.02	492.90	北京中路 105 号

青岛市政府于2019年11月18日出台《青岛市城市生活垃圾管理办法》，该办法明确提出:生活垃圾治理规划应当结合生活垃圾的产量预测和成分特点，确定生活垃圾管理事业的发展方向，统筹生活垃圾处置流量、流向，明确生活垃圾处置结构和设施总体布局。在生活垃圾处理方式上，垃圾清洁填埋目前占据了绝大部分比重;在垃圾的运输方式上，青岛推行清洁直运的垃圾运输政策。其正在运行的二期填埋场设计处理能力2671吨/日，而目前实际处理数量超过6000吨/日，为设计处理能力的两倍以上，处于超负荷运作。因此做好生活垃圾产量的预测工作对垃圾的运输、处置和规划具有重要意义。

2.1 历年数据概览

以2011-2019年青岛市的生活垃圾实际清运量作为生活垃圾的产量数据，数据来源于青岛环境保护局历年发布的青岛市环境状况公报。相关影响因子的历年数据来源于青岛市统计局历年发布的青岛统计年鉴中的人口与就业人员、交通运输、国内贸易、旅游、城市建设、环境保护、教育、物价等章节。

表2 2011-2019年青岛市的生活垃圾实际清运量

年份	X_0	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6
2011	213.8	213.7	167.2	135.4	477.3	97.7	615.4
2012	234.7	215.3	185.9	157.9	532.4	96.1	704.7
2013	250	216	202.2	191.4	658.1	101.7	956.2
2014	261.1	218.3	226.4	231.5	748.7	104.5	1302.7
2015	281.5	218.9	228	271.9	856.8	107.5	1597
2016	308	220.6	248.3	334.8	972.5	108.7	1853.3
2017	330.5	222.4	284.9	378.5	1093	110.5	2301.1
2018	365.5	225.8	338.2	423	1238.2	125	2472.1
2019	378.8	229.6	356.9	465.8	1405.9	128.4	2606.4

X_0 ——生活垃圾产量 (10^4 吨)

X_1 ——人口户数 (10^4 户)

X_2 ——城镇人均消费支出 (10^2 元)

X_3 ——商品零售总额 (10^7 元)

X_4 ——旅游总人数 (10^5 人次)

X_5 ——大学毕业生人数 (10^3 人)

X_6 ——房地产投资 (10^7 元)

三 模型假设

目前的混装清运模式是使用配备移动式容器的清运车辆，属于垃圾收运模型中的拖曳模型。清运车辆路径是从停车场出发，去往垃圾楼，置换箱体后原路返

回中转站卸载垃圾箱的过程,在允许的时间范围内,箱式车可以再次从中转站出发,去往下一个垃圾楼进行清运,重复作业多次最终在规定时间内返回停车场。清运模式见下图 3-3,虚线代表装载空集装箱的路径,实线代表装载垃圾集装箱的路径,其中 3-3(a)为停车场与中转站在不同位置的情况,3-3(b)表示停车场与中转站在同一位置的情况。考虑到模型的适用性,建立多个停车场、多个中转站、停车场与中转站位置不同的车辆调度模型,而在计算模型时,考虑到北京市的实际情况,转换为停车场与中转站位置相同的车辆调度模型。

- (1)各垃圾楼垃圾量已知并且固定,不会随着时间的变化而发生增减,为更加贴近实际,早班和晚班的垃圾量分别计算;
- (2)垃圾楼的开放时间与清运工作时间一致;
- (3)清运车辆每次清运一箱垃圾,每个垃圾楼的垃圾可以由多辆车或一辆车多次清运;
- (4)清运车辆数量充足;
- (5)除高峰期时间段外,车辆在每条线路上的行驶速度一致;
- (6)清运车辆收集垃圾后原路返回中转站,往返行驶距离相同;
- (7)车辆根据到达中转站的时间先到先服务;
- (8)运输成本只与运输距离呈正相关关系。

四 模型的建立与求解

4.1 问题一模型建立与求解

对于诸多的影响因子,需要用一定的方式进行甄别和筛选。本文采用邓氏关联度理论对预选的变量进行关联度分析,保留关联度大的影响因子参与建模。邓氏关联分析属于色关联分析,其基本思想是根据序列曲线几何形状的相似程度来判断其联系是否紧密。线越接近,相应序列之间的关联度就越大。

令生活垃圾产量序列为 $X_0 = x_0(1), x_0(2), \dots, x_0(n)$,所对应各个相关因素序列为 $X_i = x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(n), i=1, 2, \dots, N$ 。 X_0 与 X_i 长度相同且初始值不为零。邓氏关联分析采用公式1-1~1-3进行计算。公式1-2的作用是对两个序列进行数据预处理,获得 X_0 与 X_i 的初值像,分别为 X'_0, X'_i 。通过公式1-2求得差序列 Δ_i ,记 Δ_i 中的最大值和最小值作为最大差值 Δ_{\max} 和最小差值 Δ_{\min} 。由公式1-3确定各个影响序列与生活垃圾产量的邓氏关联度,其中 ξ 为分辨系数。

$$X'_i = \frac{X_i}{x_i(1)} = \left[\frac{x_i(1)}{x_i(1)}, \frac{x_i(2)}{x_i(1)}, \dots, \frac{x_i(n)}{x_i(1)} \right] = (x'_0, x'_1, \dots, x'_i) \quad 1-1$$

$$\Delta_i(k) = |x'_0(k) - x'_i(k)|, \Delta_i = (\Delta_i(1), \Delta_i(2) \dots \Delta_i(n)) \quad 1-2$$

$$\gamma_{0_i}(k) = \frac{1}{n} \sum_k^n \frac{\Delta_{\min} + \xi \Delta_{\max}}{\Delta_i(k) + \xi \Delta} \quad 1-3$$

4.1.1 岭回归模型

$$y = X\beta + \varepsilon \quad 1-4$$

$$\hat{\beta} = (X^T X)^{-1} X^T y \quad 1-5$$

公式 1-4 为一个矩阵形式的 传统多元的线性回归模型，其中 $y = [X_0]^T$ ，为预测值的 $n \times 1$ 的向量； $X = [X_1, X_2, \dots, X_i]^T$ 为 $n \times N$ 的矩阵； $\beta = [\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_i]^T$ 为回归系数的 $n \times 1$ 向量， $\varepsilon = [\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_i]^T$ 为随机误差 $n \times 1$ 的向量。依据公式 1-5 找出最小二乘法(LS)估计向量 β 确定该模型。

岭回归模型作为一种改良的最小二乘估计法，可以有效地解决多重共线性问题。为了获得回归系数更符合实际、更可靠的回归模型，岭回归舍弃最小二乘估计的无偏性，但代价是信息完整度和模型拟合精度降低。具体体现为：岭回归对多元线性回归中 β 的 LS 估计引入了偏离系数 k 使得公式 1-5 转化为公式 1-6,其中 kI 是由 k 值大小决定的一个诊断矩阵。当 k 的取值为零时，对 W 的估计退化为 LS,而逐渐提高 k 值可以降低多重共线性，相应的精度也会有所下降。

$$\hat{\beta}(k) = (X^T X + kI)^{-1} X^T y \quad 1-6$$

$$\begin{aligned} D(\hat{\beta}(k)) &= \text{cov}(\hat{\beta}(k), \hat{\beta}(k)) \\ &= \text{cov}\left(\left(X^T X + kI\right)^{-1} X^T y, \left(X^T X + kI\right)^{-1} X^T y\right) \\ &= \left(X^T X + kI\right)^{-1} X^T \text{cov}(y, y) X \left(X^T X + kI\right)^{-1} \\ &= \sigma^2 \left(X^T X + kI\right)^{-1} X^T X \left(X^T X + kI\right)^{-1} \\ &= \sigma^2 \left(C_{ij}(k)\right) \end{aligned} \quad 1-7$$

$$\text{SSE}(k) < c\text{SSE} \quad 1-8$$

由于岭回归模型计算预先对数据进行了标准化, 因此选定 k 值得到的回归系数是标准化的, 记为 M , 可由公式 1-9 还原为未标准化的方程。

$$\hat{\beta}_i = \sqrt{\frac{\sum_n (X_0(n) - \bar{X}_0)^2}{\sum_n (X_i(n) - \bar{X}_i)^2}} \hat{\beta}_i^* \quad (a)$$

$$\varepsilon = \bar{Y} - \sum \hat{\beta}_i \bar{X}_i \quad (b) \text{ 1-9}$$

4.1.2 灰色 GM (1,N) 模型

$$x_0^{(0)}(n) + az_0^{(1)}(n) = \sum_{i=1}^N b_i x_i^{(1)}(n) \quad 1-10$$

$$z_0^{(1)}(n) = \frac{1}{2} x_0^{(1)}(n) + \frac{1}{2} x_0^{(1)}(n-1) \quad 1-11$$

$$x_i^{(1)}(n) = \sum_{m=1}^n x_i(m) \quad 1-12$$

本研究采用定义型 GM (1,N) 进行建模, 该模型需满足公式 1-10、1-11 和 1-12, 是 N 个自变量且导数阶次为一次的多元模型。

$$y_N = BP_N \quad 1-13$$

$$B = \begin{bmatrix} -z_0^{(1)}(2) & x_1^{(1)}(2) & \dots & x_N^{(1)}(2) \\ -z_0^{(1)}(3) & x_1^{(1)}(3) & \dots & x_N^{(1)}(3) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -z_0^{(1)}(n) & x_1^{(1)}(n) & \dots & x_N^{(1)}(n) \end{bmatrix} \quad 1-14$$

$$x_0^{(1)}(n) = \left[x_0^{(0)}(1) - \frac{1}{a} \sum_{i=1}^N b_i x_i^{(1)}(n) \right] e^{-\alpha(n-1)} + \frac{1}{a} \sum_{i=1}^N b_i x_i^{(1)}(n) \quad 1-15$$

$$x_0^{(0)}(n) = x_0^{(1)}(n) - x_0^{(1)}(n-1) \quad 1-16$$

用矩阵来研究模型和确立模型参数是极为方便的。GM(1,N)模型在矩阵下表示为公式 1-13, 其中 $y_N = [x_0^{(0)}(2), x_0^{(0)}(3), \dots, x_0^{(0)}(n)]^T$, 参数包 $P_N = [a, b_1, b_2, b_3, \dots, b_n]^T$, 各项参数分别为模型中因子变量舞的权系数, 其中 a 称为

发展系数， b 称为协调系数，其大小代表各因子对行为变量的影响大小助。 B 矩阵的结构如公式 1-14 所示。参数 P_n 的各项数值由 LS 计算得出。将获得的力参数代入公式 1-15 的时间响应式中，并通过公式 1-16 进行累减还原，便可得到 GM(1,N)的预测模型。

GM(1, N) 包含灰微分项，决定了它是一种动态变化的多元模型。GM(1, N) 在参数估计上虽然采用了 LS，但由于对原始数据进行了一次累加算子 (1-AGO) 处理，很大程度避免了响应变量的多重共线性导致的条件数过大，解产生漂移的现象。GM(1, N) 模型在形式上类似于岭回归模型，参数包形式相近，可与岭回归模型的参数进行对比，综合判别影响因子对生活垃圾产量影响程度。

最优权重法就属于这一类加权组合预测模型，它的主要原理为：在某种最优准则下构造目标函数 Q ，并在约束条件下（如各权重之和为 1）极小化 Q ，求得组合模型的加权系数。因此，最优权重法构建组合预测模型的顺序为：单项模型、权重系数、模型组合。由于本文固定选择了两个单项预测模型，分别为岭回归模型和 GM(1, N) 模型，故记 $\hat{X}_{kk}, \hat{X}_{GM}$ 分别为岭回归模型和 GM(1, N) 模型对生活垃圾产量的预测值， $e_{RR}(n), e_{GM}(n)$ 分别为两种预测模型在年份 n 的预测误差；设 p_1, p_2 分别为岭回归模型和 GM(1, N) 模型的权重系数并使 $p_1 + p_2 = 1$ ，得组合预测模型 Y 的形式为公式 1-17。

$$Y = p_1 \hat{X}_{RR} + p_2 \hat{X}_{GM} \quad 1-17$$

则岭回归模型和 GM(1, N) 模型的拟合误差矩阵为式 1-18。

$$E = \begin{bmatrix} \sum_{n=1}^m e_{RR}^2(n) & \sum_{n=1}^m e_{RR}(n)e_{GM}(n) \\ \sum_{n=1}^m e_{GM}(n)e_{RR}(n) & \sum_{n=1}^m e_{GM}^2(n) \end{bmatrix} \quad 1-18$$

4.1.3 预测结果

为了保证模型数据源与模型自身的统一性，本文采用一维模型 GM(1, 1) 和一元线性函数生成了相关影响因子未来 5 年的预测值，分别作为 GM(1, N) 和岭回归模型预测数据来源，预测值及拟合情况见表 3、表 4。

表 3 GM(1, 1) 模型对相关因素未来 5 年的预测值

变量	2020	2021	2022	2023	2024
X_1	391.6	432	476.5	525	579
X_2	562.5	651	753.3	871.7	1008.8

X_3	1608	1830	2083	2371.2	2699.7
X_4	131.3	136.6	142.1	147.9	153.8
X_5	3352.5	3929	4604.7	5396.7	6324.6

表4 一元线性拟合对相关因素未来5年的预测值

变量	2020	2021	2022	2023	2024
X_1	229.2	231	232.8	234.6	236.5
X_2	365.6	388.9	421.3	435.7	459.1
X_3	487	529.3	571.5	613.7	655.9
X_4	1464.2	1579.6	1659	1810	1925.9
X_5	128.2	132	135.8	139.7	143.6

4.2 问题二模型的建立与求解

以大型设备至所辖转运站的加权运输距离S最短(式2-1)各大型生活垃圾处理设备的每日垃圾处理量E的标准差最小(式2-2)及各大型设备所在地的恶臭影响程度最低(式2-3)为目标函数,以式(2-4)为约束条件,建立大型生活垃圾处理设备选址模型如下

$$\min y_1 = \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_b(i)} S_{l(i),l(j)}, \quad (2-1)$$

$$\min y_2 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_1} (E_i - \bar{E}_i)^2}{N_1 - 1}}, \quad (2-2)$$

$$\min y_3 = \sum_{i=1}^{N_1} P_{l(i)}, \quad (2-3)$$

$$s.t. \begin{cases} \sum_{j=1}^{N_b(i)} z_{ij} \leq H_1 (i=1, 2, \dots, N_1) \\ \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_b(i)} z_{ij} = \begin{cases} M, N_2 = 0 \\ N_1 \cdot H_1, N_2 \neq 0 \end{cases} \\ l(i) \in E_b (i=1, 2, \dots, N_1) \end{cases} \quad (2-4)$$

大型生活垃圾处理设备选址的数学模型是一个多目标优化[1]问题,直接求解较复杂,因此通过无量纲化将量纲统一,并将fi加权求和转换为一个目标函数F,

以便于模型的求解。

$$F = \omega_1 f_1 + \omega_2 f_2 + \omega_3 f_3,$$

$$f_i = \frac{\max_k(y_{i,k}) - y_{i,k}}{\max_k(y_{i,k}) - \min_k(y_{i,k})}, i = 1, 2, \dots, N_1. \quad (2-5)$$

式(2-4)中的第一式表示各大型设备所辖转运站生活垃圾总量和需满足最大处理量H的限制;式(2-4)第二式表示当小型生活垃圾处理设备数量N2为零时,大型生活垃圾处理设备需将城市生活垃圾总量M全部处理完,当小型生活垃圾处理设备数量N2不为零时,各大型生活垃圾处理设备日处理量需达到最大值H1;式(4)第三式表示第i个大型设备所在节点位置1(i)属于城市路网可设置大型设备的集合Eb;式(5)表示假设模型存在k种结果,分别对3个目标函数值无量纲化;Zij表示第i个大型生活垃圾处理设备所辖第j个转运站的生活垃圾量;Nb(i)表示第i个大型生活垃圾处理设备所辖转运站个数;w1,w2,w3表示各目标函数的权重,且满足权值之和为1。

大型生活垃圾处理设备选址模型是一个多目标组合优化模型,无法使用标准的线性规划求解算法求解,是一个典型的NP(non-deterministic polynomial)问题,因此本文采用改进的粒子群优化(PSO)算法求解上述模型。

1)种群初始化

设大型生活垃圾处理设备的数量为N1;种群的规模为N,随机生成一个节点矩阵 $W_{N1 \times N}$ 。 $W_{N1 \times N}$ 的元素 $W_{ij} \in E$,其任意一列是一个 N_1 维向量,表示 N_1 个大型设备的一种分布。

在PSO算法中,需要用粒子的坐标来实现,为了便于PSO算法计算,将种群的节点矩阵转化为坐标矩阵 $X_{2N1 \times N}$,它的元素 x_{2i-1} 和 x_{2i} ,分别为 $W_{N1 \times N}$ 的元素 W_{ij} 的横坐标和纵坐标,每个粒子 x_j 是一个 $2N_1$ 维的向量。

2)PSO算法流程

Step 1 初始化种群,包括粒子的随机位置和速度;

Step 2 按目标函数 $F = w_1 \cdot f_1 + w_2 \cdot f_2 + w_3 \cdot f_3$ 计算每个粒子的适应度值;

Step 3 根据目标函数值求出全局最优位置 $p_{g,d}^k$ 和每个粒子的最优位置 $p_{i,d}^k$;

Step 4 根据速度和位置更新公式,改变每个粒子的速度和位置,即

$$v_{i,d}^{k+1} = \varphi v_{i,d}^k + c_1 \cdot \text{random}(0,1) \cdot (p_{i,d}^k - x_{i,d}^k) + c_2 \cdot \text{random}(0,1) \cdot (p_{g,d}^k - x_{i,d}^k), \quad (2-6)$$

$$x_{i,d}^{k+1} = x_{i,d}^k + v_{i,d}^{k+1} \quad (2-7)$$

$$\varphi = \varphi_{\max} - (\varphi_{\max} - \varphi_{\min}) \cdot \frac{K}{G} \quad (2-8)$$

式(2-6)表示引入惯性权重 ρ 的粒子速度更新公式,式(2-7)表示粒子位置更新公式,式(2-8)表示较大的 ρ 有利于群体在更大的范围内进行搜索,而较小的 φ 能够保证群体最终收敛到最优位置,因此引入一个 φ 随着进化代数线性递减的式子;

Step5得到的新的粒子的坐标位置,一般并不是原来的节点,按最邻近原则,将飞行后粒子的坐标转移至离它最近的节点上,更新局部最优和全局最优名 $p_{g,d}^k$;
Step6若 满足停止条件,则搜索停止,输出结果;否则返回Step2。

4.2.1 小型处理设备选址

在主要考虑经济效益的前提下,大型设备能将每日城市生活垃圾总量 M 全部处理完,但较长的运输距离将增加垃圾恶臭影响的环保成本。为了量化垃圾恶臭影响的环保成本,假设单位运输时间,单位垃圾量的环保成本为 EC 元。下面将对大型生活垃圾处理设备的总成本 BC 与小型生活垃圾处理设备的总成本 SC 进行比较,得出小型设备选址的一般性结论。

1)定义大型生活垃圾处理设备的总成本 BC

设转运站的生活垃圾运输至大型设备的总成本为 BC 元,包含运输成本和运营成本 C_{bo} 元/t、环保成本和投资成本 C_{bi} 元;设第 i 个转运站至第 j 个大型生活垃圾处理设备的加权距离为 S km;每公里油耗成本为 C_s 元;运输车平均车速为 V km/h;第 i 个转运站的生活垃圾量;大小型设备的折旧年限均为 t 年;即

$$BC = S \cdot C_s + RL \cdot c_{bo} + EC \cdot RL \cdot \sum_{k \in D} \frac{S_k}{V} + \frac{C_{bi}}{365t} \quad (2-8)$$

2)定义小型生活垃圾处理设备的总成本 SC

设转运站的生活垃圾经小型设备处理的总成本为 SC 元,由于转运站的生活垃圾由小型设备处理(最大处理量 H_2),因此仅存在运营成本 C_{so} 元/t与小型设备的投资成本 C_{si} 元,即

$$SC = \left[\frac{RL}{H_2} \right] \cdot \frac{C_{si}}{365t} + C_{so} \cdot RL, \quad (2-9)$$

2) 小型设备选址的一般性结论

当第*i*个转运站至第*j*个大型生活垃圾处理设备的加权距离*S*与转运站的生活垃圾量*RL*满足小型生活垃圾处理设备的总成本*SC*小于大型设备的总成本*BC*时,即可在该转运站设置小型生活垃圾处理设备。

表5大小型生活垃圾处理设备相关数据

生活垃圾处理设备	处理能力/ (t/d)	投资成本/万元	运营成本/ (元/日)
大型	200	4500	150
小型	0.2	28	200

分析表5中的数据,发现大、小型设备的处理能力相差过大。故在满足大小设备处理能力上下限的约束下,比较大、小型设备在不同处理能力下总成本差异,重新计算最优的设备处理能力,使其满足不同城市生活垃圾的收运与处理。

4.2.2 生活垃圾处理设备处理能力的函数关系

假设大、小型设备处理能力*VR*与投资成本*VC*,满足*VR = k1VCt+b1*的线性函数

关系,处理能力与运营成本*VC*,满足*VR = k2VCy, +b2*的线性函数关系,则根据表1中的大、小设备的数据确定参数*k*、*b1*、*k2*、*b2*的值。

当小型设备的处理能力*VR*,小于转运站生活垃圾量*RL*时,可以由多个小型设共同处理;当*VR*,大于各转运站生活垃圾量的最小值时,会造成设备处理能力大的浪费,即

$$0 < VR_s \leq \min_i RL_i \quad (2-10)$$

大型设备由于处理量大,不置于转运站内,单独设置处理中心,因此其处理能力*VRb*,最小值应大于各转运站生活垃圾量的最大值,处理能力最大值不应超过城市每日生活垃圾总量*M*,即

$$\max_i RL_i < VR_b \leq M \quad (2-11)$$

4.2.3 大小型生活垃圾处理设备的数量与选址

已知城市每日生活垃圾总量为 *M*,设满足式(2-11)的大型生活垃圾处理设备个数为 $g \in \{ 1, 2, \dots, n \}$,以总成本最低(式(2-12))为优化目标,以式(2-13)为约束条件,分别计算不同数量的大型生活垃圾处理设备的总成本,可得总成本最小时对应的大型生活垃圾处理设备的个数

g 及其处理能力 VR.,建立如下模型

$$\min \sum_{j=1}^g \sum_{i=1}^{N_b(j)} (S \cdot C + RL_i \cdot VC_y + EC \cdot RL_i \cdot \sum_{k \in D} \frac{S_k}{V} + \frac{VC_t}{365t}) \quad (2-12)$$

$$s.t. \begin{cases} \sum_{j=1}^{N_b(t)} z_{ij} \leq VR_b \\ \sum_{j=1}^g \sum_{i=1}^{N_b(j)} z_{ij} = M \end{cases} \quad (2-13)$$

式(13)第一式表明各大型设备所辖转运站生活垃圾总量需满足最大处理量VR_b的限制;式(13)第二式表明g个大型生活垃圾处理设备的总处理量需等于城市每日生活垃圾总量M。

设满足式(10)的可设置小型设备的转运站个数为N_z ∈ {1,2,...,K},以总成本(运营成本与投资成本)最低(式(2-14))为优化目标,以式(2-15)为约束条件,分别计算不同数量的小型生活垃圾处理设备的总成本,可得总成本最小时对应的小型生活垃圾处理设备的个数N_z及其处理能力VR_s,建立如下模型

$$\min \sum_{i=1}^{N_z} ([\frac{RL_i}{VR_s}] \cdot \frac{VC_t}{365t} + RL_i \cdot VC_y) \quad (2-14)$$

$$s.t. SC < BC \quad (2-15)$$

式(2-15)表明转运站的生活垃圾经小型设备处理的总成本SC小于运输至大型设备的总成本BC,K表示转运站总数。

4.3模型求解

小型收集车辆在沿途运输过程中会对环境产生一定的影响,一部分是运输过程中垃圾恶臭对周边环境的影响,一部分是运输途中车辆排放的尾气。一套合理的清运路线方案不仅要节约运输成本(油耗费用),而且要注重环保效益。

基于上述分析,以车辆油耗成本TC_p(运输距离为加入拥挤系数和环境影响系数的加权距离,油耗随载重线性递减)与车辆运输环保成本TC_e之和最低(式(2-16))为优化目标,以式(2-17)-式(2-19)为约束条件,建立垃圾收集站至转运站的车清运路线的优化模型如下

$$\min(TC_p + TC_e) \quad (2-16)$$

$$TC_p = \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^Q \sum_{i=1}^{N_q(j)} [s_{kji} \cdot c_g \cdot (g_{\min} + (g_{\max} - g_{\min}) \cdot \frac{CZ_{kji}}{R})] \quad (2-17)$$

$$TC_p = \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^Q \sum_{i=1}^{N_q(j)} [\frac{S_{kji}}{R} \cdot CZ_{kji} \cdot EC] \quad (2-18)$$

$$s.t. \begin{cases} CZ_{kji} \leq R \\ \sum_{j=1}^Q \sum_{i=1}^{N_q(j)} CZ_{kji} = \sum_{s=1}^{J_k} SJ_{k,s} \\ \sum_{j=1}^Q \sum_{i=1}^{N_q(j)} \frac{S_{kji}}{V} \leq 8 \end{cases} \quad (2-19)$$

式(2-17)表明垃圾收集车从转运站出发,达到车载容量限制后返回转运站;式(2-18)表明第k个转运站的收集车一天总垃圾运输量应等于该转运站所辖Jk个垃圾收集站生活垃圾量SJk.s的和;表明每辆垃圾运输车的运输时间小于等于8小时;K表示转运站总数;Q表示车辆一天的运输次数;N。(j)表示第j次运输经过的路段集合;cg表示汽油价格(元/升);gin,gmax表示每公里耗油的最小与最大值;CZji表示车辆实时载重;R表示车辆最大载重;SJk.s表示第k个转运站所辖第s个垃圾收集站的生活垃圾量。

小型收集车从转运站出发,当达到车载容量限制时需返回转运站,模型优化目标是使得总成本(运输成本与环保成本)最低,将该问题抽象为K-TSP问题[3]。设 $V=\{V1,V2,..,Vj\}$ 为Jk个垃圾收集站的集合,通过蚁群算法求解总成本最低的回路,以回路中任意一个垃圾收集站为起点,分别按顺时针和逆时针对回路进行分割,使其满足车载容量限制,可得到2Jk个组合,计算各个组合方案车辆从转运站至垃圾收集站往返运输时所需的总成本,选择总成本最小的一个分割方案,作为运输方案。

1)求解垃圾收集站回路

Step1在算法的初始时刻,将a只蚂蚁随机地放到Jk个垃圾收集站,同时将每只蚂蚁的禁忌表的第一个元素设置为它当前所在的垃圾收集站;

Step2每只蚂蚁根据路径上残留的信息素量和启发式信息(即两个垃圾收集站之间的总成本),独立地选择下一个垃圾收集站,更新禁忌表,直到所有蚂蚁完成一次

周游。在时刻 t ,蚂蚁 k 从垃圾收集站 i 转移到垃圾收集站 j 的概率为

$$p_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^r \cdot [\eta_{ij}(t)]^\delta}{\sum_{u \in U_k(i)} [[\tau_{iu}(t)]^r \cdot [\eta_{iu}(t)]^\delta]}, j \in U_k(i) \\ 0, \text{其他} \end{cases} \quad (2-20)$$

启发式信息

$$\eta_{ij}(t) = \frac{1}{s_{ij} \cdot c_g \cdot [g_{\min} + (g_{\max} - g_{\min}) \cdot \frac{CZ_{ij}}{R}] + \frac{s_{ij}}{v} \cdot CZ_{ij} \cdot EC} \quad (2-21)$$

式(2-20)和式(2-21)中: $U_k(i) = \{1, 2, \dots, n\}$ - tabu_k 表示蚂蚁 k 下一步允许选择的垃圾收集站集合; tabu_k 记录了蚂蚁 k 当前走过的垃圾收集站; $\eta_{ij}(t)$ 是一个启发式因子,表示蚂蚁从垃圾收集站 i 转移到垃圾收集站 j 的期望程度; r 和 δ 分别表示信息素和启发因子的相对重要程度。

Step3 当所有蚂蚁完成一次周游后,各路径上的信息素根据下式更新

$$\tau_{ij}(t+n) = (1-\theta) \cdot \tau_{ij}(t) + \Delta \tau_{ij} \quad (2-22)$$

$$\Delta \tau_{ij} = \sum_{k=1}^a \Delta \tau_{ij}^k \quad (2-23)$$

$$\Delta \tau_{ij}^k = \begin{cases} \frac{B}{TC_k}, \text{蚂蚁}k\text{在本次周游中经过边}(i, j) \\ 0, \text{其他} \end{cases}, \quad (2-24)$$

式(2-22)-式(2-23)中: θ 表示路径上信息素的蒸发系数; $1-\theta$ 表示信息素的持久性系数; $\Delta \tau_{ij}$ 表示本次迭代在边 (i, j) .上信息素的增量; Δ 格表示第 k 只蚂蚁在本次迭代中留在边 (i, j) .上的信息素量; TC_k 表示第 k 只蚂蚁完成一次周游所需的总时间。

Step4若满足 预先设定的迭代次数,则循环结束;否则,清空所有禁忌表并对每条边 (i, j) 设置 $\Delta \tau_{ij}=0$,然后转到Step2。

2) 选择最佳分割方案

车辆从转运站出发,当达到容量限制时需返回转运站,因此将蚁群算法求得的总成本最低的运输回路按车载容量进行分割,分别计算任意节点顺向分割方案 $f_i(t)$ 和逆向分割方案 $f_i(i)$ 的成本值,成本最低的分割方案即为最优方案,建立优化模型如下

$$\min\{\min_i f_s(i), \min_i f_n(i)\}, \quad (2-25)$$

$$f_s(i) = \sum_{j=1}^{N_s(i)} \sum_{k \in D_j} [s_{D_j(k)} \cdot c_g \cdot (g_{\min} + (g_{\max} - g_{\min}) \cdot \frac{CZ_{D_j(k)}}{R}) + \frac{s_{D_j(k)}}{v} \cdot CZ_{D_j(k)} \cdot EC] \quad (2-6)$$

$$f_n(i) = \sum_{j=1}^{N_n(i)} \sum_{k \in D_j} [s_{D_j(k)} \cdot c_g \cdot (g_{\min} + (g_{\max} - g_{\min}) \cdot \frac{CZ_{D_j(k)}}{R}) + \frac{s_{D_j(k)}}{v} \cdot CZ_{D_j(k)} \cdot EC] \quad (2-27)$$

其中: $f_s(i)$ 表示第*i*个节点的顺时针分割方案可以分为 $N_s(i)$ 个班次的运输; $f_n(i)$ 表示第*i*个节点的逆时针分割方案可以分为 $N_n(i)$ 个班次的运输; $D_j(k)$ 表示第*j*个班次运输经过的路段集合。

4.3 问题三模型的建立与求解

如果用有向图 $G = \langle V, E \rangle$ 表示清运网格,收运节点 $i, j \in V$,车辆集合 C ,车辆编号为 $c, c \in (1, 2, \dots, C)$,集合车次集合 K ,车次编号为 $k, k \in (1, 2, \dots, K)$,垃圾集合 W ,中转集合 F ,停车场集合 P ,停车节点用 P 表示,定义决策变量:

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1, \text{车次}k\text{访问路径}(i, j) \\ 0, \text{否} \end{cases}$$

$$Y_{ik} = \begin{cases} 1, \text{车次}k\text{达到垃圾楼}i\text{的时间在清运要求内} \\ 0, \text{否} \end{cases}$$

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, \text{车次}k\text{去往垃圾楼}i\text{清运} \\ 0, \text{否} \end{cases}$$

$$Z_{ijk} = \begin{cases} 1, \text{车次}k\text{经过路径}(i, k)\text{时拥挤} \\ 0, \text{否} \end{cases}$$

$$U_{ck} = \begin{cases} 1, \text{车次}k\text{对应的车辆编号为}c \\ 0, \text{否} \end{cases}$$

(1) 目标函数

$$\min F = w_1 F_1 + w_2 F_2 + w_3 F_3 + w_4 F_4 \quad (w_1 + w_2 + w_3 + w_4 = 1) \quad (3-1)$$

$$\min(F_1) = \sum_{c \in C} \gamma_c + \alpha \left(\sum_{k=1}^K \sum_{p \in P_i \in W} d_{pi} x_{pik} + \sum_{k=1}^K \sum_{j \in F_i \in W \cup P} d_{ji} x_{jik} + \sum_{k=1}^K \sum_{j \in F_i \in W} d_{ij} x_{xjk} \right) \quad (3-2)$$

$$\begin{aligned}\min(F_2) &= \text{var}(L_c) \\ \min(F_3) &= \sum_{k=1}^K \sum_{j \in F} t_{jk} \\ \min(F_3) &= \sum_{k=a}^K \sum_{j \in F} t_{jk}\end{aligned}\quad (3-3)$$

式中 w_1, w_2, w_3, w_4 -- 目标函数权重

$x_{pik}, x_{jik}, x_{ijk}$ -- 决策变量, 车次 k 是否经过相应路径;

γ_c -- 车辆 c 的固定成本

α -- 单位运输的成本

ε -- 不满足时间窗造成的惩罚成本

d_{ij} -- 节点 i 到节点 j 的距离

L_c -- 每班每辆车的行车距离

t_{jk} -- k 车次在中转站内的派对等待时间

公式(3-1)表示目标函数加权最小;公式(3-2)表示车辆固定成本与运输成本之和最小, 其中运输成本为停车场到垃圾楼的运输成本、中转站到垃圾楼或者停车场的运输成本、垃圾楼到中转站的运输成本之和;公式(3-3)表示每个车辆总行驶距离均衡, 用方差最小化表示;公式(3-4)表示总等待时间最小;公式(3-5)表示时间窗要求的惩罚成本最小。

(2) 等待时间的计算

将车次 k 以抵达中转站的时间进行从小到大排序, 分别为 $1, 2, \dots, K$; 第一辆抵达中转站 J 的车次的等待时间

将车次 k 以抵达中转站的时间运行从小到大排序, 分别为 $1, 2, \dots, K$;

第一辆抵达中转站 j 的车次的等待时间 $t_{ij} = 0$

第 n 辆抵达中转站 j 的车等待时间

$$t_{ij} = \begin{cases} 0, & w_{ij} \geq w_{j(k-1)} + w_{j(k-1)} + h \\ w_{k-1} + t_{j(k-1)} + h - w_{jk}, & w_k < w_{j(k-1)} + t_{j(k-1)} + h \end{cases} \quad (3-4)$$

式中 w_{jk} -- 第 k 个车次达到中转站 j 的时间

i_{jk} -- 第 k 个车次在中转站 j 的等待时间

h -- 清运车在中转站的卸料时间

第 n 辆抵达中转站 J 的车等待时间

(3) 约束条件:

1) 度约束

$$\sum_{k=1}^K \sum_{p \in P} x_{pik} \geq 1, \forall i \in W \quad (3-5)$$

2) 车辆限流

$$\begin{aligned} \sum_{p \in P} x_{pij} + \sum_{j \in F} x_{jik} &= \sum_{j \in F} x_{ijk}, \forall i \in W; k = 1, 2, \dots, K \\ \sum_{i \in W} x_{ijk} + \sum_{i \in W} x_{jik} + \sum_{i \in W} x_{jpk}, &\forall j \in F; k = 1, 2, \dots, K \end{aligned} \quad (3-6)$$

3) 行驶时间约束

$$\sum_{k=1}^K U_{ck} \left(\sum_{p \in P} \sum_{i \in W} (1 + \sigma Z_{kpi}) v_{pi} x_{pik} + \sum_{i \in W} \sum_{j \in F} [(1 + \sigma Z_{kij}) v_{ij} + \tau_i] x_{ijk} + \sum_{j \in F} \sum_{i \in P \cup W} [(1 + \sigma Z_{kji}) v_{ji} + \tau_j + t_{jk}] x_{ijk} \right) \quad (3-7)$$

4) 清运量约束

$$\sum_{k=1}^K \sum_{j \in F} x_{ijk} = \sum_{i \in W} q_i, \forall i \in W \quad (3-8)$$

清运公式(3-4)表示车流约束，车次 k 去往垃圾楼和离开垃圾楼的次数相同，即任一车次去往垃圾楼清运垃圾后，立即前往中转站卸垃圾;公式(3-5)表示停车场约束，即某车次的车离开停车场后去往垃圾楼进行清运，返回停车场时必须经过垃圾楼 1 且至少经历一次;公式(3-6)表示车辆 c 所有车次从停车场到垃圾楼的总行驶时间+从垃圾楼到中转站的总时间+中转站到下一个垃圾楼的总时间或中转站到停车场的总时间在工作时间限制内;公式(3-8)表示垃圾清运量等于垃圾楼 1 的清运需求。

4.3.1 模型求解

模型以原宣武区的垃圾清运作业为研究对象，在实际问题中车场和中转站距离很近忽略不计，而中转站的数量为 1 个，即马家楼中转站。根据垃圾清运模式的特点，使用粒子群算法进行求解。粒子群算法容易陷入局部最优解，因此引入爬山算法，通过追踪鸟群首路径中的最优解，调整整体走向。

1) 求解步骤:

设置每个粒子的初始位置限制和粒子速度限制。粒子位置限制设为[0,1]，速度限制设为[-0.1,0.1]。根据粒子当前位置适应度函数，将每个粒子的目标函数值作为其适应度值。为了防止出现局部最优的情况，引入小型爬山算法，对粒子位置进行变异计算。对于每个粒子，适应度值与其经过的个体历史最优值位置比较，如果该值优于历史最优值则保留，该值取代个体历史最优值，进入下一步迭代。对于每个粒子，适应度值与粒子种群经历过的最优位置进行比较，如果该值优于粒子群的历史最优值则保留，该值取代个体历史最优值，否则仍保留历史最优值，进入下一步迭按位置和速度的更新对粒子种群中的每个粒子进行迭代更新从而

垃圾楼 编号	垃圾楼名 称	早班清运时间 窗	早班清运 箱数	早班清运时 间窗	早班清运 箱数
0	马家楼中	[0,24]	0	0	0
1	煤市街	[5.5,13.5]	9	[14,22]	9
2	留学路	[5.5,13.5]	4	[14,22]	4
3	东里	[5.5,13.5]	2	[14,22]	2
4	北纬路	[5.5,13.5]	4	[14,22]	3
5	南纬路	[5.5,13.5]	3	[14,22]	3
6	公园	[5.5,13.5]	5	[14,22]	5
7	西门	[5.5,13.5]	1	[14,22]	0
8	春风	[5.5,13.5]	1	[14,22]	0
9	感化	[5.5,13.5]	0	[14,22]	1
10	马连道	[5.5,13.5]	4	[14,22]	3
11	三义里	[5.5,13.5]	1	[14,22]	2
12	小红庙	[5.5,13.5]	3	[14,22]	2
13	红萍	[5.5,13.5]	3	[14,22]	3
14	印钞厂	[5.5,13.5]	3	[14,22]	3
15	一建	[5.5,13.5]	5	[14,22]	0
16	京铁	[5.5,13.5]	6	[14,22]	5

产生新的进化种群。表 6 垃圾楼相关数据

4.3.2 模型结果分析

本小节的模型结果首先对混装清运调度目前的经验方案进行优化研究，优化后仍存在一定的等待时间，因此考虑第三章中转站卸料口配置优化的结果对模型进行求解，同时也提出了清运车辆的调度方案。车辆调度可以参考下表 7 执行。

班次	车	开始	结束	车辆行驶路径	行驶
----	---	----	----	--------	----

早 1	1	5.5	12.82	32-31-24-31-26-31-27-31-2-321-4-31	112.5
早 2	2	5.5	12.96	31-31-24-31-26-31-27-31-2-31-4-31	118.2
早 3	3	5.5	13.1	31-31-24-31-26-31-27-31-2-31-4-31	123.2
早 4	4	5.5	12.24	31-31-24-31-26-31-27-31-2-31-4-31	154.2
早 5	5	5.5	12.96	31-31-24-31-26-31-27-31-2-31-4-31	135.6
早 6	6	5.5	12.96	31-31-24-31-26-31-27-31-2-31-4-31	124.5
早 7	7	5.5	12.55	31-31-24-31-26-31-27-31-2-31-4-31	131.8
早 8	8	5.5	12.34	31-31-24-31-26-31-27-31-2-31-4-31	127.5
早 9	9	5.5	13.5	31-31-24-31-26-31-27-31-2-31-4-31	125.6
早 10	10	5.5	13.41	31-31-24-31-26-31-27-31-2-31-4-31	134.5
早 11	11	5.5	12.96	31-31-24-31-26-31-27-31-2-31-4-31	125.5
早 12	12	5.5	12.33	31-31-24-31-26-31-27-31-2-31-4-31	127.5
早 13	13	5.5	12.62	31-31-24-31-26-31-27-31-2-31-4-31	127.5
早 14	14	5.5	12.45	31-31-24-31-26-31-27-31-2-31-4-31	145.2
早 15	15	5.5	12.21	31-31-24-31-26-31-27-31-2-31-4-31	123.5
早 16	16	5.5	12.5	31-31-24-31-26-31-27-31-2-31-4-31	123.4
早 17	17	5.5	12.96	31-31-24-31-26-31-27-31-2-31-4-31	156.4
晚 1	18	14	21.96	31-31-24-31-26-31-27-31-2-31-4-31	123.5
晚 2	19	14	23.11	31-9-31-20-3115-31-18-3 1 — 30-31	122.5
晚 3	20	14	23.15	31-31-24-31-26-31-27-31-2-31-4-31	122.5
晚 4	21	14	23.55	31-31-24-31-26-31-27-31-2-31-4-31	122.4
晚 5	22	14	23.41	31-31-24-31-26-31-27-31-2-31-4-31	153.4
晚 6	23	14	23.12	31-31-24-31-26-31-27-31-2-31-4-31	152.5
晚 7	24	14	23.44	31-31-24-31-26-31-27-31-2-31-4-31	145.5

晚 8	25	14	23.15	31-31-24-31-26-31-27-31-2-31-4-31	157.5
晚 9	26	14	21.45	31-31-24-31-26-31-27-31-2-31-4-31	147.5
晚 10	27	14	24.22	31-31-24-31-26-31-27-31-2-31-4-31	156.4
晚 11	28	14	21.44	31-31-24-31-26-31-27-31-2-31-4-31	123.4
晚 12	29	14	23.24	31-31-24-31-26-31-27-31-2-31-4-31	134.2

本章在分析垃圾混装清运的现状的基础上，提出清运车调度存在的问题，针对问题进行混装清运车辆调度模型。混装清运模型是垃圾收运过程中使用移动式容器收运的 Rollon-Rolloff 问题，可以抽象成带时间窗、带中间处理设施、多个车场的 VRP 问题。模型设立四个目标函数，通过归一和加权得到总体目标函数；根据混装清运特点对模型进行约束。以马家楼中转站及其对应的原宣武区的垃圾清运作业为例，采用粒子群算法对模型进行求解，并提出车辆调度方案，优化原有车辆调度。

4.4 问题四模型建立与求解

4.4.1 模型假设

(1)各垃圾楼垃圾量已知并且固定，不会随着时间的变化而发生增减，为更加贴近实际，早班和晚班的垃圾量分别计算；

(2)将每个社区作为一个投放点，各垃圾种类的比例相同，个别投放点根据特点进行微调；

(3)可回收物使用箱式车清运，厨余垃圾和其他垃圾使用分仓清运车清运，车辆数量充足；

(4)分仓清运车的各仓载重量固定；

(5)在载重和时间允许情况下，车辆可去往多个地点进行清运；

(6)道路没有转向、单行等限制

(7)垃圾楼的开放时间与清运工作时间一致；

(8)除高峰期时间段外，车辆在每条线路上的行驶速度一致；

(9)节点之间的行驶距离固定；

(10)车辆根据到达中转站的时间先到先服务；

(11)运输成本只与运输距离呈正相关关系。

4.4.2 模型 MT1 的建立

在分类联合清运的模式中，可以将整体模型看作是由两个模型构成，可回收物的清运是单独的路径，作为其中一个模型；另外一个模型是厨余垃圾和其他垃圾的联合清运的路径模型，建模如下：

(1) 目标函数

$$\begin{aligned}
 \min F &= w_2 F_1 + w_2 F_2 + w_3 F_3 + w_4 F_4 (w_1 + w_2 + w_3 + w_4 = 1) \\
 \min(F_1) &= \sum_{c \in C} \gamma_c + \alpha \left(\sum_{k=1}^K \sum_{p \in P_i} d_{pi} x_{pik} + \sum_{k=1}^K \sum_{j \in F_i} d_{ji} x_{jik} + \sum_{k=1}^K \sum_{j \in F \cup G_i} d_{ij} x_{ijk} \right) \\
 \min(F_2) &= \text{var}(L_c) \\
 \min(F_3) &= \sum_{k=1}^K \sum_{j \in F} t_{jk} \\
 \min(F_4) &= \varepsilon \sum_{k=1}^K \sum_{i \in W} (1 - Y_{kj}) X_{ki}
 \end{aligned} \tag{5-1}$$

公式(5-1)表示清运成本，包括车辆固定成本和运输成本，其中运输成本是停车场到垃圾投放点、中转站到垃圾投放点或者停车场、垃圾投放点到下一个垃圾投放点或者垃圾投放点到中转站的运输成本之和。其他目标函数与上一题 MT₁ 的目标函数相同。其他公式含义与模型 MT₁ 相同。

(2) 约束条件

$$\begin{aligned}
& \sum_{k=1}^{K_2} \sum_{j \in G \cup F} x_{ijk} \geq 1, \forall i \in G \cup F \\
& \sum_{i \in V_2} x_{ijk} - \sum_{j \in G \cup F} x_{gik} = 0, \forall g \in G; k = 1, 2, \dots, K, \\
& \sum_{i \in G} x_{ilk} - \sum_{j \in G \cup F} x_{ilk} = 0, \forall l \in F; k = 1, 2, \dots, K \\
& \sum_{i \in G} x_{pik} = \sum_{j \in F} x_{jpk} \geq 1, \forall p \in P; k = 1, 2, \dots, K \\
& \sum_{i \in G} (y_{ik} + f_{ik}) = m_k, k = 1, 2, \dots, K \\
& \sum_{k=1}^K y_{ki} = y_i, \forall i \in G \\
& \sum_{k=1}^K f_{ki} = f_i, \forall i \in G \\
& S_1 \leq w_{ic} \leq E_1, \forall i \in P \cup G \cup F \\
& 0 \leq y_{ik} \leq y_i \sum_{j \in V_2} x_{jik}, \forall i \in G; k = 1, 2, \dots, K \\
& 0 \leq f_{ik} \leq f_i \sum_{j \in V_2} x_{jik}, \forall i \in G; k = 1, 2, \dots, K \\
& y_{ik} + f_{ik} \leq u_{ik} \leq m_k, \forall i \in G; k = 1, 2, \dots, K \\
& f_{ik} \leq u_{iky} \leq m_{ky}, \forall i \in G; k = 1, 2, \dots, K
\end{aligned} \tag{5-2}$$

式中 m_k ----车辆 k 的最大载重

m_{ky} ----表示车次 k 运载其它垃圾的最大载重

Y_{ik} ----车次 k 在垃圾投放点 i 收集的厨余垃圾

f_{ik} ----车次 k 在垃圾投放点 i 收集的其它垃圾

y_i ----垃圾投放点 i 的厨余垃圾总量

f_i ----垃圾投放点 i 的其它垃圾总量

U_{ik} ----车次 k 离开垃圾投放点 i 时的载重，即车辆达到 i 未收集垃圾时车内垃圾重量加上在在 i 点装载的垃圾重量。

五 模型评价及优化

本文是进行基于垃圾源头分类的城市生活垃圾清运调度研究，针对两种垃圾分类清运的类型分别进行具体分析，两种类型都是使用固定容器式的清运车辆对源头垃圾投放点进行垃圾收集，模型可以抽象成带时间窗、带中间处理设施、分批运输的问题。通过建立模型更好的阐述两种分类清运的作业方式，并通过对原宣武区各社区垃圾量的估算以及源头分类率达到 95% 时各类垃圾的比重，使用粒

子群算法进行模型的求解，分别得出具体的清运车辆调度方案。在得出分类清运调度方案的基础上，结合第三章改进中转站设施配置进行进一步的求解。本章主要解决了以下两个内容：第二题和第三题分别就混装清运和分类清运的车辆调度问题进行研究，提出了城市生活垃圾的清运方案，选择清运方式时涉及到的影响因素较多。由于清运环节对后端垃圾处理的影响较大，因此实际进行方案选择时需要考虑到的因素也不止局限于清运阶段的最优目标。首先是对于混装清运和分类清运的选择，若只考虑清运阶段，显然优化后的混装清运方式是最优选择，但是混装清运车辆调度模型只适用于前端未开始实行垃圾分类投放或者垃圾分类投放效果很差的地区，不适合目前的发展趋势，因此清运方式的选择还应该考虑到对后端垃圾处理的影响，实现垃圾收运处理系统整体效益最优；其次是两种分类清运方式的选择，两种方案各有利弊，因此本章针对清运车辆调度方案进行总结和对比分析，并且结合主要影响因素提出相关建议。

参考文献：

- [1]雷德明,严新平.多目标智能优化算法及其应用[M].北京:科学出版社,2009.
- [2]寇晓丽,刘三阳.一种求解连续优化的蚁群混合算法[J].西安电子科技大学学报,2006(05):745-747+758.
- [3]刘援农.蚁群算法在TSP问题中的应用研究[J].硅谷,2011(13):108+114.
- [4]范柳斌,李路,陈妮娜,胡昱,秦侠.城市垃圾分类收运中的数学模型化方法[J].数学建模及其应用,2012,1(02):19-28.
- [5]刘媛媛,宋俊密,杨帆,等.我国生活垃圾的处理现状及分类处理方法浅析[J].环境研究与监测,2018,31(03):71-72+26.
- [6]杭州市人民政府办公厅关于深入推进市区生活垃圾“三化四分”工作的实施意见[J].杭州市人民政府公报,2014(12):22-25.
- [7]柳平.上海市城市生活垃圾分类政策执行研究[D].黑龙江:哈尔滨商业大学,2018:15-16.
- [8]王晓红,阮星,邢霏霏.上海市生活垃圾源头分类的瓶颈及对策思考[J].再生资源与循环经济,2013,6(01):24-27.