

面向废弃物—能源—经济耦合的 城市垃圾物流收运系统设计： 基于智能体建模的研究

杨 洋,裴童心,张晓聪

(中国矿业大学(北京)管理学院,北京 100083)

摘 要:针对城市垃圾运输两阶段设计“废弃物—能源—经济”耦合的城市物流收运系统,以北京市为例,选取128个社区收集点、18个转运站和6个发电厂进行智能体(ABM)建模,基于蚁群融合算法求解收运体系的车辆路径规划问题,通过算例分析对仿真模型进行验证。研究结论表明:(1)在城市垃圾收运全程中使用柴油车辆、汽油车辆等五种车辆收运垃圾进行发电产生的碳排放低于同等电力燃烧标煤产生的碳排放,实现“废弃物—能源”转换。(2)在“收集点—转运站”阶段使用3t的电动车辆、在“转运站—发电厂”使用8t的汽油车辆可达到成本及碳排放最优目标,体现“能源—经济”价值在城市交通环境以及垃圾量不确定的情况下该方案亦成立。

关键词:废弃物—能源—经济;蚁群遗传融合算法;智能体建模(ABM);城市垃圾物流收运系统

中图分类号:F426; F542

文献标识码:A

文章编号:1005-0566(2023)12-0155-10

Design of urban waste logistics collection and transportation system for the coupling of waste-energy-economy: A study based on intelligent agent modeling

YANG Yang, PEI Tongxin, ZHANG Xiaocong

(School of Management, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: Design a “waste-energy-economy” coupled urban logistics collection and transportation system for two stages of urban waste transportation, take Beijing as an example, select 128 community collection points, 18 transfer stations and 6 power plants for intelligent body (ABM) modeling, solve the vehicle path planning problem of the collection and transportation system based on the ant colony fusion algorithms, and validate the simulation model through the analysis of examples. The simulation model is validated by case analysis. It is concluded that: (1) The carbon emission of using five types of vehicles to collect garbage for power generation, including diesel vehicles and gasoline vehicles, in the whole process of urban waste collection and transportation is lower than that of burning standard coal with the same power realizing the conversion of “waste-energy”. (2) The use of 3t electric vehicles in the “collection point—transfer station” stage and 8t gasoline vehicles in the “transfer station—power plant” stage can achieve the optimal cost and carbon emission targets. This is an “energy-economical” value. This scenario is also valid in the case of uncertainty in the urban transportation environment and the amount of waste.

收稿日期:2023-09-05 修回日期:2023-11-20

基金项目:北京市社会科学基金重点项目“北京市经济高质量发展的新能源产业政策转型研究”(19YJA001)。

作者简介:杨洋(1981—),女,北京人,博士,中国矿业大学(北京)管理学院教授,博士,研究方向为管理科学与工程和智能决策。

Key words: waste-energy-economy; ant colony genetic fusion algorithm; agent-based modeling; urban waste logistics collection and transportation system

随着城市社会生活的日益发展、城市化进程的不断加快、城市扩建导致垃圾呈现快速增长态势,我国城市垃圾排放量大致以每年 9% ~ 10% 的速度递增,收运车辆从垃圾聚集区运输至垃圾处理中心途中由于垃圾撒漏、渗透液以及运输车辆对扬尘、噪音、超重等因素造成的污染十分显著。实现城市废弃物收运过程进行低成本、高循环的多目标规划,能够解决我国绝大部分城市面临的难题。第一,城市废弃物收运不及时容易对居民日常生活和出行造成影响,对环境承载力带来压力,随着城市化进程的推进,公众对自身生活质量的废弃物处理问题的关注度也日益提高。第二,城市废弃物分类与废弃物收运过程之间存在矛盾,废弃物处理过程要求居民对于废弃物进行分类,但是在收运过程中采用相同类型车辆对已分类废弃物进行运输,这一过程使收集阶段的废弃物分类失去意义,多车辆到同一地点收运不同类型的垃圾也会增加物流成本和碳排放。第三,城市废弃物资源化程度较低,其实废弃物资源化能够在解决垃圾处理问题的同时使废弃物得到资源化利用,但由于废弃物处理的成本较高,技术上无法满足资源化发展的需要,对资源循环利用不够彻底^[1]。第四,城市道路资源利用程度较低,废弃物运输车辆体积大、运速慢,容易造成城市交通拥堵,车辆排放废气引起二次污染,一旦大型运输车辆密度超出城市道路设计通过能力,就会产生集聚非经济^[2]。

现代流通是以生态文明为方向,以环境保护为导向的“全生命周期流通”^[3],如何形成绿色物流、形成绿色消费循环型流通是城市垃圾收运过程中需要考虑的问题。城市废弃物资源化能够实现循环经济发展,降低废弃物对居民^[4]、环境^[5]、社会的影响,城市物流收运系统的车辆选择与路径规划能够节约环境治理成本,实现绿色低碳循环理念的现代流通。因此,设计城市垃圾收运物流体系对促进城市废弃物资源化以及减轻城市运输压力、减少环境污染具有重大意义。本文基于废弃物—能源—经济耦合协调模型,建立基于智能体 (ABM)

的城市废弃物管理模型,通过测算柴油车辆、汽油车辆、乙醇汽油车辆、天然气车辆和电动车辆运输的碳排放量对城市物流收运系统中的车辆进行选择,仿真模拟多转运中心车辆路径规划混合整数模型,求解城市物流收运体系的车辆路径规划问题,通过算例分析对仿真模型进行验证。

一、理论基础和研究框架

(一)城市垃圾收运车辆选择

随着新能源汽车的推广应用,环卫等公共领域开始进行传统燃油车辆到新能源车辆的更新换代。已有学者针对车辆载重、车型、速度等局部影响因素展开研究,特别是垃圾分类实施之后有学者开始关注运输模式对车辆选择的影响问题^[6]。一旦基础设施的位置和城市垃圾流量的分配固定,运输活动产生的二氧化碳排放量和每日系统成本值不会因车辆速度的变化而发生显著变化^[7]。从车辆属性角度,结合车辆载重和环境效益优化垃圾收运车辆路径能够降低车辆使用数量^[8]。从政策角度,采用低碳排放量的车辆和进行城市规划等政策能减少垃圾收运的碳排放。从城市垃圾危害性角度,需要考虑多周期运行路径中车舱数量的选择问题^[9]。从车辆成本角度,不同车型的固定成本和可变成本均有所不同^[10]。综上所述,本文结合垃圾收运现状,选取汽油、柴油、乙醇汽油、天然气、纯电动 5 种燃料类型、不同载重的车辆,对垃圾收运全过程的两个运输阶段分别展开优化研究。

(二)城市垃圾收运路径规划

社会对绿色交通的关注度越来越高,对城市垃圾的路径优化更加关注碳排放、燃油消耗等因素。目前已有研究考虑每辆车的容量限制,解决容量约束下的车辆路径问题 (CVRP)^[11];考虑为每一位顾客在时间范围内提供服务,解决带时间窗的车辆路径问题 (VRPTW)^[12];供应商使用许多仓库来供应客户,解决多于一个仓库的车辆路径问题 (MDVRP)^[13];客户可以将一些货物退回仓库,解决提货和交付功能的车辆路径问题 (VRPPD)^[14];企业可以通过不同的车辆为客户提供服务,在有拆

分交付下解决车辆路径问题(SDVRP)^[15]。城市垃圾的运输能耗略低于其他垃圾,但我国生活垃圾分类运输能耗高的问题一直未得到根本解决。本文以最小化运输碳排放和收运成本为目标,对“收集点—转运站”和“转运站—发电厂”两个收运阶段分别进行探讨分析。

(三)废弃物—能源—经济耦合协调模型

本文从废弃物—能源—经济的角度出发,设计合理的垃圾回收物流路线,减少运输距离和时间,减少车辆的燃料消耗,从而降低能源消耗^[16]。垃圾回收物流的能耗、碳排放减少,有助于城市减少对全球气候变化的负面影响^[17],以最低经济成本和环境负效应最小化的目标函数设计面向“收集点—转运站”和“转运站—发电厂”两阶段的“废弃物—能源—经济”耦合的城市垃圾物流收运系统,有利于实现能源和经济双目标下的能源循环利用,降低废弃物收运成本,如图1所示。第一,在循环经济体系中,通过合理处理城市垃圾,有利于营造低碳收运环境,减少废弃物对环境的污染和破坏。第二,优化车辆选择以及路径,可以提升垃圾处理过程中的经济效益,降低废弃物处理成本。第三,废弃物收运系统可以通过合理的物流设计和运营,包括废弃物的收集、运输和处理等环节,节省时间成本,提升居民生活水平。第四,通过优化废弃物物流和运营模式,节省城市道路资源,减少城市拥堵。第五,“废弃物—能源—经济”耦合体系实现了由“分散”向“集中”物流的现代流通,将废弃物进行分类、分拣和回收,促进资源的再利用。

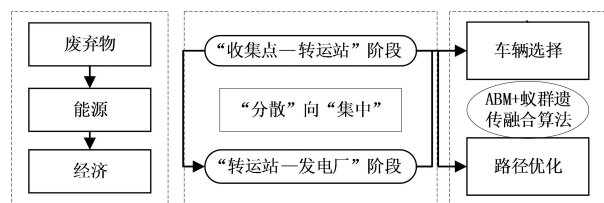


图1 “废弃物—能源—经济”耦合体系

二、基于智能体建模的城市垃圾物流收运系统

废弃物的收运过程实际上是减轻城市环境污染压力的过程,在此过程中同样要避免因运输而导致的环境污染。在传统路径规划问题中,认为

距离最短即为最佳路径,然而考虑到车辆自身重量、道路拥挤程度,距离不再是判断路径是否最优的唯一标准^[18]。城市垃圾收运路径问题也被称为VRP问题,即向特定需求的客户提供服务,使成本等目标最小,确定最佳的配送车辆和行车路线^[19]。本文分为两个阶段进行研究,即“收集点—转运站”阶段是带软时间窗的多转运中心路径优化问题,“转运站—发电厂”阶段是带硬时间窗的单处理中心车辆选择问题。

(一)基于ABM的城市垃圾收运体系模型构建

从运输的体积和质量角度看,收运1 t厨余垃圾产生的碳排放量极可能接近160 kg标煤在焚烧过程产生的碳排放量,城市厨余垃圾收运非绿色物流收运方式将加剧城市碳排放的压力。城市垃圾中的碳均为生物源碳,根据北京市朝阳区高安屯发电厂实测值其燃烧1 t厨余垃圾仅产生二氧化碳1.2 kg,垃圾焚烧发电的碳排放主要为收运过程中消耗外部能量、物质引起的间接碳排放,即收运过程中产生的碳排放。已知煤炭运输与燃烧过程产生的碳排放比例为1:900^[20],故在本文中对照仅考虑标煤燃烧产生的碳排放量,将城市垃圾运输过程产生的碳排放量与530 t标煤燃烧产生的碳排放量进行对比,如果高于530 t标准煤燃烧产生的碳排放量,则认为城市垃圾的收运阶段是高碳排放量作业,不具备普遍推广性。本文选取了128个社区收集点、18个转运站和6个发电厂,建立三级收运网络为多发电厂、多转运站和多个收集点,在Anylogic中设置智能体参数以及各个智能体之间的逻辑关系,根据各个节点实际位置,基于GIS地图导入经纬度坐标构建模型。

假设目前北京市在“收集点—转运站”阶段主要使用载重3 t的汽油汽车,在“转运站—发电厂”阶段主要使用载重10 t的汽油车辆。已知530 t标煤燃烧发电的碳排放量约为1 300 t。①在“收集点—转运站”阶段,不同燃料车辆的碳排放量由大到小依次是柴油车辆、汽油车辆、乙醇汽油车辆、天然气车辆和纯电动车辆,均低于530 t标煤火力发电碳排放量,所以使用任何燃料类型的车辆都是合理的,但显然纯电动汽车最具环保性。②在“转运站—发电厂”阶段,虽然车辆载重大,距离

远,但路径单一,所需车辆少,所以产生的总碳排放量少。纯电动车辆碳排放在“转运站—发电厂”阶段高于“收集点—转运站”阶段,且高于“转运站—发电厂”阶段的乙醇汽油汽车和天然气汽车的碳排放量,原因为大型电动车电耗远高于小型电动车。国内很多大型电动车实际能耗达到甚至超过了 $2\ 200\ \text{kW} \cdot \text{h}/\text{km}$ 的水平,电动汽车为了追求续航增加电池重量,车重普遍超重,增加电动车能耗的压力。使用电动车辆运输的合理性需要考虑车辆载重和路程等因素建立模型并进行验证。

(二) 蚁群融合求解算法设计

计算启发式算法可以求解较大规模的 VRP,因此本文采用蚁群遗传融合算法求解大规模垃圾收运优化问题。蚁群算法寻优初始期间信息素缺乏而且挥发,积攒初期信息素耗费时间过多,寻优效果不好,遗传算法在进行全局搜索时会造成大量无用的迭代过程使得求解效率不高,单一蚁群算法和遗传算法皆有缺陷。考虑到蚁群算法的鲁棒性和正反馈性机制优势以及遗传算法直接对参数编码进行操作、搜索更为灵活等优点,现将遗传、蚁群算法融合,采用最大—最小蚂蚁系统算法(MMAS)对蚁群算法进行改进,在解决过早停滞问题和提高有效性方面与标准蚂蚁系统(AS)相比 MMAS 更佳。将蚁群算法设置为:①目标函数与适应值函数:同遗传算法。②信息素初始值:MMAS 将初始信息素设置为最大值,经过遗传算法的计算,求得路径上的信息素,故设置信息素初始值见式(1)。其中, τ_c 表示信息素常数,由实际求解的问题确定,对应 MMAS 中的 $\tau_{\min}$, τ_c 是将遗传算法中运行后所得到的结果变换成的信息素值。③信息素更新模型在一圈路径中只能对最短路线的蚂蚁增加信息素,对于全部路径轨迹,其方程见式(2)。其中, $\tau_{ij}(t)$ 为路径 (i,j) 在 t 时刻的信息素轨迹强度; $\tau_{ij}^k(t)$ 为蚂蚁 k 在路径 (i,j) 上留下的单位长度轨迹信息素数量; ρ 表示轨迹的持久性, $0 \leq \rho < 1$, 将 $(1 - \rho)$ 解为轨迹衰减度。

$$\Delta\tau_s = \tau_c + \tau_G \quad (1)$$

$$\tau_{ij}(t+1) = \rho\tau_{ij}(t) + \sum \tau_{ij}^k(t) \quad (2)$$

(三) 模型假设及参数说明

城市垃圾的收运过程是垃圾从供应链下游节点(居民),经过初步收集、初步收运、预处理、送达垃圾焚烧发电厂。垃圾的回收利用体系包括:社区收集点、转运站、垃圾焚烧发电厂、无害化填埋场 4 个环节,各环节分别对应垃圾的收集作业、分类运输作业、分拣和干燥预处理作业,以及存储和焚烧处理作业。垃圾运输车辆首先从车场出发,在合理的收运时间段内前往各个收集点进行收集,满载后运至转运站并进行排空的过程称为车辆的一次行程。本文在垃圾收运网络中将转运站设置为车厂,所有的车辆均从转运站出发完成收运工作回到转运站。

1. “收集点—转运站”阶段

本文描述的城市垃圾收运模型,提出以下假设:①转运站:多个且地理位置已知,有足够的卸载空间,能接纳所服务收集点产生的垃圾,其时间窗也能够满足所有收集点的服务时间需求限制;②车辆:运输车辆除燃料类型和装载容量不一样,车辆的性能和速度都相同且已知,最大工作时间等参数都相同且已知;③收集点:收集点的垃圾量已知,单个收集点仅能被一辆车服务,且与转运站、发电厂的距离已知;④非满载问题:任意垃圾收集点的产生量不大于服务该点的车辆载重,单车可为多个垃圾收集点提供收运服务;⑤能力约束:考虑到车辆荷载约束,单行程路线上的收集点垃圾总产生量不超过车辆荷载,考虑到车辆路线容量约束,车辆每天行驶时间不超过车辆最大工作时间;⑥闭环问题:初步运输过程中所有车辆都从转运站出发,运输过程中可经过多次收集点,在服务完所有的收集点之后必须返回转运站;⑦及时收运问题:考虑垃圾车的“半厌恶”特性,在到达收集点后立刻进行收运,不存在等待收运的问题;⑧垃圾收运车辆在收集点规定的最佳时间窗内对其进行服务不会令居民产生不满,否则会造成负面影响;⑨不可抗拒因素:不考虑道路状况、恶劣天气和车辆事故等意外因素;⑩运输对象:为单一类型、运输规范相同的垃圾。为了构造城市垃圾“收

集点—转运站”阶段优化模型,需满足以下条件:

$$y_i^n = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$$

该变量为 1 时表示将指派垃圾收集点 i 给车辆 n , 否则为 0。

$$x_{ij}^n = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$$

该变量值为 1 时表示车辆 n 从 i 节点访问 j 节点, 否则为 0。

2. “转运站—发电厂”阶段

城市垃圾从转运站到焚烧发电厂的过程, 属于考虑城市环境带时间窗的单处理中心车辆选择问题。假设: ①发电厂: 单个发电厂问题, 且地理位置已知, 发电厂的时间窗满足所有转运站的服务时间需求限制; ②硬时间窗问题: 垃圾收运车辆在垃圾焚烧发电厂规定的时间内到达, 其余时间不接受运送至的垃圾; ③对转运站、车辆、能力约束、闭环问题、不可抗拒因素、运输对象的假设同“收集点—转运站”阶段。同时满足以下条件:

$$y_i^n = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$$

该变量值为 1 表示由车辆 n 为垃圾转运站 i 提供运送服务, 否则为 0。

(四) 约束分析和成本分析

1. “收集点—转运站”阶段

(1) 居民时间窗要求分析

一般在垃圾收运过程中环保企业必须根据居民要求城市交通拥堵时段, 选择合理时间窗收运。“收集点—转运站”阶段选取带有软时间窗的收运路径优化模型 (VRPTW)。具体描述为:

假设完成任务 i 所需要的时间为 T_i (即上门服务时间), 居民要求的时间窗为 $[a_i, b_i]$, 其中 a_i 表示居民允许的最早开始服务的时间, b_i 为居民允许的最晚开始服务的时间。若用 T_i 表示运输车辆到达收集点 i 的时间, 那么 T_i 要满足以下关系:

$$a_i \leq T_i \leq b_i \quad (3)$$

如果未在居民规定的时间窗内将垃圾收运,

将会支付一定的惩罚成本。若收运人员在居民要求的时间以前达到, 则需要等待, 造成一定等待成本; 如果时间晚于居民要求的时间, 则根据延迟时间支付罚款费用。用时间窗约束垃圾收运, 能够反映环卫企业和城市交通管理水平。

(2) 居民满意度函数分析

居民满意度指的是随着时间的推移居民对垃圾收运服务的满意程度, 能够充分反映出当前垃圾收运车辆调度的合理性。在规定的時間窗 $[a_i, b_i]$ 内包含居民的期望时间窗, 设为 $[a_i^0, b_i^0]$ 。期望时间窗是指居民期望垃圾收运的时间范围, 假如在这个时间段内进行垃圾收运, 那么顾客满意度为 100%, 即完全满意。另外一个时间段是居民可以接受的时间范围, 即期望时间窗外的时间段, 在这个范围居民满意度会随时间的推移有所变化。若垃圾收运时间在居民可允许的最大开始服务时间范围 $[a_i, b_i]$ 之外, 那么居民满意度就为 0。本文将居民满意度函数设定为连续的线性函数, 各部分时间范围内居民满意度随时间推移的线性变化可用模糊隶属函数来表示, 限制居民平均满意度高于 80%。 Q_i 表示转运站点 i 的垃圾整合量, 居民满意度函数为:

$$Q_i(t_i) = \begin{cases} \frac{0.8 \times (T_i - a_i)}{(a_i^0 - a_i)} + 0.2, T_i \in [a_i, a_i^0] \\ \frac{0.8 \times (b_i - T_i)}{(b_i - b_i^0)} + 0.2, T_i \in [b_i^0, b_i] \\ 1, T_i \in [a_i^0, b_i^0] \\ 0, T_i \notin [a_i, b_i] \end{cases} \quad (4)$$

(3) 成本分析

本文以物流收运总成本最低为决策目标, 必须综合考虑在收运过程中可能产生的各种费用, 包括车辆固定成本、车辆运输燃料成本、惩罚成本和碳排放成本 4 个部分。

① 车辆固定成本

车辆固定成本指的是垃圾收运车辆的购买成本、车辆的维护成本、车辆定期保养成本以及支付

给司机的劳动成本等,在本文中车辆固定成本仅考虑车辆购置折现成本。本文将车辆的固定成本用与执行收运任务车辆的数量成正比例关系的函数形式体现在模型当中,用 R_n 表示车辆 n 的购置折现成本, LF_n 判断车辆是否出行,车辆固定成本用 A_1 表示:

$$A_1 = \sum_{n \in N} R_n LF_n \quad (5)$$

②运输燃料成本

由于垃圾一般需要密封车辆运输,运输燃料费用通常比同等载重量的普通货车要高。因此,车辆运输燃料成本是构建模型不可忽视的一部分。一般来说,收运车辆行驶路程越短,产生的各种成本就越小,所以车辆运输成本与行驶距离成正比比例关系。用 F_n 表示单位距离内产生的运输成本, D_{ij} 表示节点 i 到节点 j 的距离,则总运输成本 A_2 可表示为:

$$A_2 = \sum_{n \in N} \sum_{i \in K} \sum_{j \in K} F_n D_{ij} x_{ij}^n \quad (6)$$

③惩罚成本

根据前文对居民时间窗问题的探讨,用 σ_1 、 σ_2 分别表示提前到达、延迟到达节点 i 并开始服务的惩罚系数,未在客户要求的时间范围内将货物送达的惩罚成本为 A_3 ,其中前半部分表示在最早开始服务时间之前收运产生的等待成本,后半部分表示在最晚开始服务时间之后收运导致的延迟成本。

$$A_3 = \sigma_1 \sum_{n \in N} \sum_{i \in C} \sum_{j \in K} x_{ij}^n \max(a_i - T_i, 0) + \sigma_2 \sum_{n \in N} \sum_{i \in C} \sum_{j \in K} x_{ij}^n \max(T_i - b_i, 0) \quad (7)$$

④碳排放成本

碳排放成本指二氧化碳的排放成本,垃圾在收运过程中所产生的二氧化碳是车辆燃料消耗所致。已知车辆载重 W_n 对驶向收集点 (i, j) 的单位距离消耗燃油量 ρ 呈线性关系:

$$\rho(W_n) = k(W_0 + W_n) + u \quad (8)$$

已知车辆自重 W_0 , 最大载重 W , 设车辆在空载下的单位距离燃油消耗量为 ρ_0 , 满载时为 ρ^* , 见式(9):

$$\begin{aligned} \rho_0 &= kW_0 + u \\ \rho^* &= k(W_0 + W) + u \end{aligned} \quad (9)$$

由式(9)可得出:

$$k = \frac{\rho^* - \rho_0}{W} \quad (10)$$

$$\rho(W_n) = \rho_0 + \frac{\rho^* - \rho_0}{W} W_n \quad (11)$$

在垃圾收运的过程中,假定由收集点 i 收运垃圾 W_{ij} 到收集点 j , ε 为每单位油耗所产生的碳排放量,可得出燃油车辆在向收集点 (i, j) 的收运过程中产生的碳排放量 C_1 , 如公式(12)所示。

$$C_1 = \varepsilon D_{ij} \rho(W_{ij}) \quad (12)$$

用 P_n 判断车辆 n 是否为纯电车,0 代表否,1 代表是; γ_n^d 为电动车辆 n 的单位里程平均电耗; δ_n 为电动车辆 n 的碳排放系数; C_e 为碳税(取 50 元/t 二氧化碳)。车辆的碳排放量 C_1^d 公式见式(13)。

$$C_1^d = D_{ij} \gamma_n^d \delta_n^d \quad (13)$$

产生的总碳排放量成本为:

$$A_4 = C_e \left[\sum_{n \in N} (1 - P_n) \sum_{i \in K} \sum_{j \in K} \varepsilon \rho(W_{ij}) D_{ij} x_{ij}^n + \sum_{n \in N} P_n \sum_{i \in K} \sum_{j \in K} D_{ij} \gamma_n^d \delta_n^d x_{ij}^n \right] \quad (14)$$

2. “转运站—发电厂”阶段

在城市垃圾由转运站运往发电厂过程中,假设各个城区只有 1 个发电厂,转运站与发电厂之间只存在一条往返路径,因此仅存在车辆选择问题,没有路径规划问题,但仍需要满足发电厂的硬时间窗要求,在规定时间内将垃圾运送至焚烧发电厂,其余时间不接受运送。用 V_n 表示车辆 n 的行驶速度, S 表示发电厂最早开始允许接收车辆服务的时间, E 表示最迟允许接收车辆服务的时间。其具体内容为:

$$\sum_{i \in Z} y_i^n \frac{D_i}{V_n} \leq E - S, \forall n \in N \quad (15)$$

在城市垃圾“转运站—发电厂”收运阶段,车辆选择涉及的成本主要有以下几种。

①车辆固定成本:

$$B_1 = \sum_{n \in N} \sum_{i \in Z} R_n y_i^n \quad (16)$$

②运输燃料成本:

$$B_2 = \sum_{n \in N} \sum_{i \in Z} F_n D_i y_i^n \quad (17)$$

③碳排放成本:

$$B_3 = Ce \left[\sum_{n \in N} (1 - P_n) \sum_{i \in Z} \varepsilon \rho(W_i) D_i y_i^n + \sum_{n \in N} P_n \sum_{i \in Z} D_i \gamma_n^d \delta_n^d y_i^n \right] \quad (18)$$

(五)模型建立

1. “收集点—转运站”阶段

该阶段车辆选择与路径优化模型表示为:

$$\begin{aligned} \min Z = & A_1 + A_2 + A_3 + A_4 = \sum_{n \in N} R_n L F_n + \\ & \sum_{n \in N} \sum_{i \in K} \sum_{j \in K} F_n D_{ij} x_{ij}^n + \\ & [\sigma_1 \sum_{n \in N} \sum_{i \in C} \sum_{j \in K} x_{ij}^n \max(a_i - T_i, 0) + \\ & \sigma_2 \sum_{n \in N} \sum_{i \in C} \sum_{j \in K} x_{ij}^n \max(T_i - b_i, 0)] + \\ & Ce \left[\sum_{n \in N} (1 - P_n) \sum_{i \in K} \sum_{j \in K} \varepsilon \rho(W_{ij}) D_{ij} x_{ij}^n + \right. \\ & \left. \sum_{n \in N} P_n \sum_{i \in K} \sum_{j \in K} D_{ij} \gamma_n^d \delta_n^d x_{ij}^n \right] s. t. \end{aligned} \quad (19)$$

计算碳排放量:

$$\begin{aligned} & \sum_{n \in N} (1 - P_n) \sum_{i \in K} \sum_{j \in K} \varepsilon \rho(W_{ij}) D_{ij} x_{ij}^n + \\ & \sum_{n \in N} P_n \sum_{i \in K} \sum_{j \in K} D_{ij} \gamma_n^d \delta_n^d x_{ij}^n \leq C_k \end{aligned} \quad (20)$$

每个垃圾收集点必须有一辆汽车上门服务:

$$\sum_{i \in C} y_i^n = 1, \forall i \in C \quad (21)$$

对于每辆车而言从同一个转运站出发必须要从该转运站返回:

$$\sum_{i \in C} x_{zi}^n = \sum_{i \in C} x_{iz}^n, \forall n \in N, z \in Z \quad (22)$$

对于每个收集点而言必须确保被服务一次且只能被同一辆车访问:

$$\sum_{j \in K} x_{ij}^n = \sum_{j \in K} x_{ji}^n = y_i^n, \forall i \in C, n \in N \quad (23)$$

访问路径不能从转运站到转运站:

$$\sum_{i \in Z} \sum_{j \in Z} x_{ij}^n = 0, \forall n \in N \quad (24)$$

确保运送的垃圾不超过每辆车的载重:

$$\sum_{i \in C} q_i y_i^n \leq W_n, \forall n \in N \quad (25)$$

居民满意度约束,限制平均居民满意度要高于80%:

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_i(t_i) \geq 0.8 \quad (26)$$

判断车辆是否出行:

$$L F_n \geq y_i^n, \forall n \in N, i \in C \quad (27)$$

每辆非电车的工作时间不超过8个h,电车的工作时间不超过4个h:

$$(1 - P_n) T_e^n + P_n T_e^n \leq (1 - P_n) 8 + 4 P_n, \quad \forall n \in N \quad (28)$$

2. “转运站—发电厂”阶段

该阶段车辆选择与路径优化模型表示为:

$$\begin{aligned} \min Z = & B_1 + B_2 + B_3 = \sum_{n \in N} \sum_{i \in Z} R_n y_i^n + \\ & \sum_{n \in N} \sum_{i \in Z} F_n D_i y_i^n + Ce \left[\sum_{n \in N} (1 - P_n) \sum_{i \in Z} \varepsilon \rho(W_i) D_i y_i^n + \right. \\ & \left. \sum_{n \in N} P_n \sum_{i \in Z} D_i \gamma_n^d \delta_n^d y_i^n \right] s. t. \end{aligned} \quad (29)$$

计算车辆碳排放:

$$\begin{aligned} & \sum_{n \in N} (1 - P_n) \sum_{i \in Z} \varepsilon \rho(W_i) D_i y_i^n + \sum_{n \in N} P_n \sum_{i \in Z} D_i \gamma_n^d \delta_n^d y_i^n \\ & \leq C_k \end{aligned} \quad (30)$$

每个转运站的汽车必须运完所有垃圾:

$$\sum_{n \in N} y_i^n W_n \geq Q_i, \forall i \in Z \quad (31)$$

判断车辆是否出行:

$$L F_n \geq y_i^n, \forall n \in N, i \in Z \quad (32)$$

每辆非电车的工作时间不超过8个h,电车的工作时间不超过4个h:

$$(1 - P_n) T_e^n + P_n T_e^n \leq (1 - P_n) 8 + 4 P_n, \quad \forall n \in N \quad (33)$$

每辆汽车被派出的服务总时间不超过发电厂的服务时间窗:

$$\sum_{i \in Z} y_i^n \frac{D_i}{V_n} \leq E - S, \forall n \in N \quad (34)$$

三、面向废弃物—能源—经济耦合的城市垃圾物流收运系统

城市垃圾车辆选择优化是一个复杂的多因素问题,在“转运站—发电厂”阶段仅仅是点对点的往返运输,不会出现一辆车去往多个转运站和发电厂的情况,因此主要讨论车辆选择的问题,不涉及路径优化。最优的车辆选择方案不单单能降低成本,还可以减少碳排放,提高垃圾发电减排潜

力。本文以北京城六区为例,根据谷歌地图拾取各个节点实际位置,高斯转换为北京 54 系平面坐标,基于蚁群遗传融合算法优化城六区垃圾收运路径。

(一)算例基础数据

北京市在建和在运营的垃圾焚烧发电项目超 10 座,包含 6 个发电厂,18 个转运站,128 个垃圾收集点,属于大规模路径优化问题。使用 Anylogic 软件将各个区域的垃圾收集点、转运站、发电厂的位置描绘在地图上。除了个别参数假设外,其他数据均为实地调研所得真实数据,优化结果可为北京环卫集团固废物流公司进行车辆更新换代选择提供依据。

结合实际情况,本文设置各个收集点的最佳时间窗为 5:00 ~ 6:30,车辆在此时间窗到达收集点进行服务居民满意度最高;可容忍时间窗为 4:30 ~ 7:00,车辆在此时间窗内到达,仍然可以进行服务,各个收集点的服务时间均为 20 分钟。本文中不同燃料车辆碳排放系数 δ_i 分别为:柴油汽车 2.68 kg/L,汽油汽车 2.40 kg/L,乙醇汽油汽车 2.16 kg/L,天然气汽车 1.96 kg/L。车辆固定成本仅考虑车辆购置费用,可变成本只考虑燃料消耗成本。

(二)算例优化结果

1. “收集点—转运站”阶段

选择柴油车辆、汽油车辆、乙醇汽油车辆、天然气车辆和纯电动车辆共 5 种燃料的车辆,并分别使用 3 t、5 t 和 8 t 三种载重类型的车辆进行算法优化。图 2 为 3 t 汽油车辆路径优化结果部分示例,表 1 为各种类型车辆的使用数量、成本及碳排放量,3 t 汽油车辆优化路径见附表 1。得出结论:在“收集点—转运站”阶段适合采用 3 t 载重车辆运输。①车辆总运营成本分析:所有燃料类型车辆,车辆载重越大,车辆的运营成本越大,其原因之一是购置车辆费用增加,同时在“收集点—转运站”阶段,大载重车辆不具备灵活性,燃料费用增加。纯电动大载重车辆运营成本与小载重车辆相差幅度较大,大载重的电动车辆较传统燃料车辆购置费用更高,且大型电动车辆满载时的燃料消耗是

小型电动车辆的两倍以上,对于天然气燃料车辆的情况也是类似。柴油汽车、汽油汽车和乙醇汽油汽车随着载重变化,运营成本波动较小,但仍处于较高的水平。②车辆碳排放分析:假设电动车辆使用的能源全为绿电,对于柴油车辆、汽油车辆、乙醇汽油车辆和天然气车辆,随着载重的增加,车辆使用数量减少,总碳排放量减少。相反,对于电动汽车,随着车辆载重的增加,总碳排放量增加。其主要原因是大型电动车为了追求续航,盲目增加电池重量,导致车重本身重量过大,如果满载,更加增加了电动车能耗的压力,8 t、10 t 等大型电动车的实际能耗水平超过了 $2\ 200\ \text{kW} \cdot \text{h}/\text{km}$,意味着电动车比燃油车排放更多二氧化碳,更加不具备环保性。

2. “转运站—发电厂”阶段

在该阶段就所有类型燃料车辆来说,如果采用载重较大的车辆,车辆使用数量减少。对于分析比较不同燃料类型车辆的使用成本和碳排放量见表 1。在低车辆运营成本和低碳排放的目标下,城市垃圾“转运站—发电厂”阶段使用载重 8 t 的汽油车辆运输最为合适。①车辆运营成本分析:柴油汽车、汽油汽车、乙醇汽油汽车和天然气汽车为 $8\ \text{t} < 10\ \text{t} < 5\ \text{t}$,载重较小使用车辆数量增多,车辆购置总费用高;载重较大则单车购置费用高且燃料消耗成本高。电动汽车运营成本为 $10\ \text{t} < 8\ \text{t} < 5\ \text{t}$,中大型电动汽车对电池以及车辆要求极高,中大型电动汽车购置费用过高,且 5 t 载重车辆使用数量过多,总购置费用昂贵。在“转运站—发电厂”阶段,中大型电动车续航能力差,不能够支持远距离运输,故不考虑使用电动汽车。②车辆碳排放水平分析,柴油汽车、汽油汽车、乙醇汽油汽车和天然气汽车为 $8\ \text{t} < 10\ \text{t} < 5\ \text{t}$,转运站垃圾量较大。若采用较小载重车辆,车辆使用数量多增加碳排放;若采用大载重车辆,单车燃料消耗较高增加总碳排放量。电动汽车的碳排放量为 $10\ \text{t} > 8\ \text{t} > 5\ \text{t}$,且 10 t 电动汽车的碳排放高于所有类型车辆的碳排放量,大型电动车的实际能耗水平超过传统燃油车,更加不具备环保性。

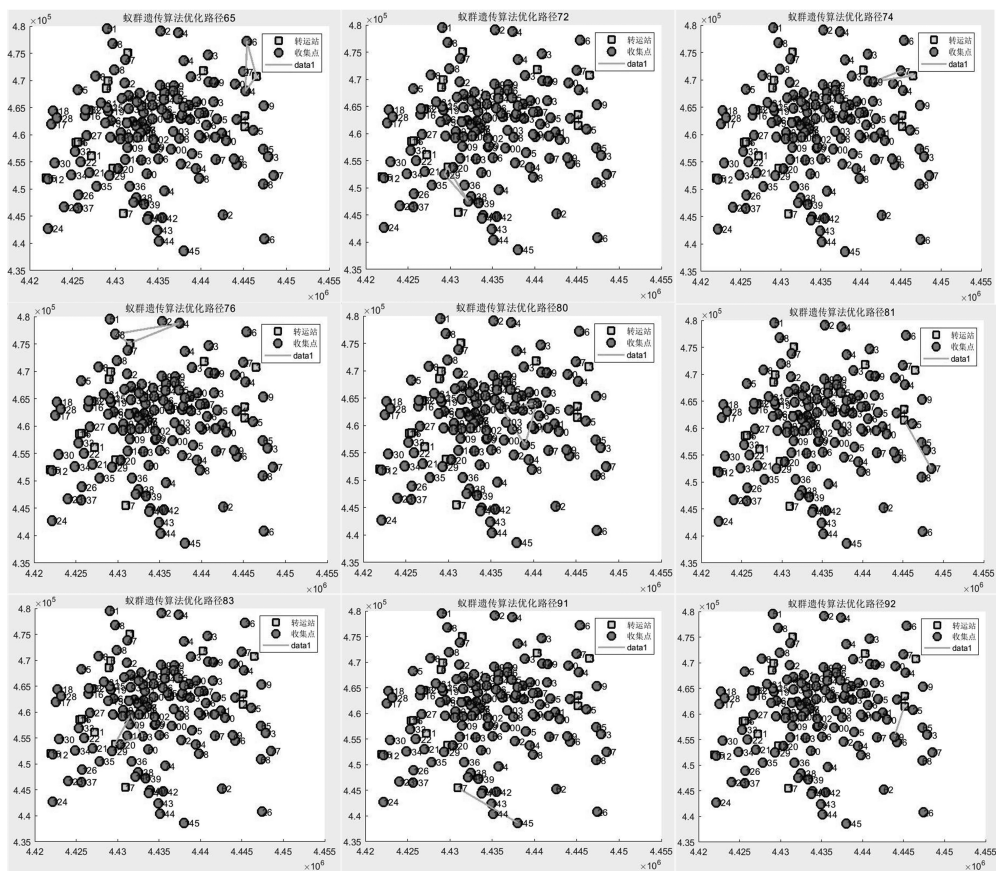


图2 3 t 汽油车辆车路径优化图部分示例

表 1 两阶段各种类型车辆的使用数量、成本及碳排放量

车辆类型		使用数量		总成本/元		碳排放/t	
		收集点— 转运站	转运站— 发电厂	收集点— 转运站	转运站— 发电厂	收集点— 转运站	转运站— 发电厂
柴油 汽车	3 t	92	43	18 800	10 833	290	237
	5 t	49	26	18 600	8 493	250	140
	8 t	30	22	19 880	10 233	235	143
汽油 汽车	3 t	92	43	16 080	9 453	287	187
	5 t	49	26	18 360	7 923	238	112
	8 t	30	22	18 480	8 343	210	125
乙醇 汽油 汽车	3 t	92	43	17 120	15 243	227	179
	5 t	49	26	18 560	11 733	220	110
	8 t	30	22	21 120	12 213	179	115
天然气 汽车	3 t	92	43	12 520	13 323	230	188
	5 t	49	26	16 840	10 233	205	113
	8 t	30	22	21 040	10 653	140	118
电动 汽车	3 t	92	43	9 640	16 383	130	125
	5 t	49	26	16 360	15 943	150	226
	8 t	30	22	24 320	13 063	167	338

3. 讨论

综上所述,对每个收集点的产量以 50% 的概率增大 10% (记为 Case1) 或减小 10% (记为 Case2), 结果如表 2 所示,其中 Case0 表示垃圾产量不发生波动的情景。由于改变了收集点的垃圾产量,使得一次收运完成所需的车辆数量有变,进而影响车辆运营成本和碳排放。根据算例结果可知,从

能源和经济角度兼顾车辆载重和运输次数,在“收集点—转运站”阶段使用 3 t 纯电动汽车,“转运站—发电厂”阶段使用 8 t 汽油车辆是最符合要求的。对比原始方案(“收集点—转运站”阶段使用 3 t 汽油车辆,“转运站—发电厂”阶段使用 10 t 汽油车辆),考察数据主要包括总成本、车辆使用数量、总路程和碳排放,两种方案收运的运营数据如表 2 所示。最优方案在总成本、总路程及碳排放是优于原始方案的,本文提供的最优车辆选择方案,可达到成本降低 33. 3% 和碳减排水平 43. 7%。

表 2 两种收运方案运营数据对比

方案	总成本/元	车辆使用 数量/辆	总路程/km	碳排放/t
原始方案	26 313	92/22	65 296. 5	430
最优方案	17 563	92/26	43 176. 1	242

四、总结

本文研究结论:①在城市垃圾收运全程中使用柴油车辆、汽油车辆、乙醇汽油车辆、天然气车辆和纯电动车辆收运垃圾进行发电产生的碳排放低于同等电力燃烧标煤产生的碳排放,实现“废弃

物—能源”转换。②在“收集点—转运站”阶段使用 3 t 的电动车辆、在“转运站—发电厂”使用 8 t 的汽油车辆可实现成本及碳排放最优目标,体现“能源—经济”价值。③在城市交通环境以及垃圾量不确定的情况下该方案亦成立。设计面向废弃物—能源—经济耦合的城市垃圾物流收运系统,有利于提高垃圾收运的效率,增加垃圾收运工作的便利性,有助于降低垃圾收运的运输成本。本文的研究基于静态的交通网络,未考虑实际运输网络的复杂性和动态性,目前诸如 GPS、GIS 等技术都可以实时更新道路的拥堵状况。未来有必要在模型中重点考虑新技术的融入,研究动态交通网络下的垃圾收运路径优化及车辆选择问题,通过监测路网和垃圾量的实时状态获得更有效的解决方案,以实现垃圾收运绿色目标,推动垃圾焚烧发电行业可持续发展,为政府完善建设城市垃圾收运管理体系提供理论依据。

参考文献:

- [1] 臧秀清,方淑芬. 城市生活垃圾多循环处置系统的形成机理及其运行特征[J]. 中国软科学,2010(S2):28-32.
- [2] 柯善容,郑腾飞. 中国城市车辆密度、劳动生产率与拥堵成本研究[J]. 中国软科学,2015(3):65-79.
- [3] 矫旭东,吴佳,王韬,等. 基于全生命周期管理的固体废物分类资源化利用研究[J]. 环境工程,2021,39(10):201-206,170.
- [4] 李明月,李俐频,左薇,等. 基于 GIS 与改进蚁群算法的垃圾收运路径规划[J]. 环境工程学报,2022,16(7):2388-2396.
- [5] 肖建华,张文雪,潘钰雅,等. 基于分类垃圾收运时效性的多周期多车舱路径优化研究[J/OL]. 中国管理科学:1-15 [2023-07-15]. <https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2023.0050>.
- [6] 孙丽君,周雅娴,滕玥,等. 多车舱车辆路径问题的研究现状与发展[J]. 系统工程理论与实践,2021,41(6):1535-1546.
- [7] MOHSENIZADEH M, TURAL M K, KENTEL E. Municipal solid waste management with cost minimization and emission control objectives: a case study of Ankara[J]. Sustainable cities and society, 2020(52): 101807.
- [8] 张玉州,张子为. 基于合作协同进化的多回收站点垃圾收运问题求解[J]. 中国科学技术大学学报, 2020, 50(5): 695-704.
- [9] AYDEMIR-KARADAG A. Bi-objective adaptive large neighborhood search algorithm for the healthcare waste periodic location inventory routing problem[J]. Arabian journal for science and engineering, 2022, 47(3): 3861-3876.
- [10] RABBANI M, FARROKI-ASL H, RAFIEI H. A hybrid genetic algorithm for waste collection problem by heterogeneous fleet of vehicles with multiple separated compartments[J]. Journal of intelligent & fuzzy systems, 2016, 30(3):1817-1830.
- [11] JIN H, LI J Q. A hybrid complementary metaheuristic for VRPTW with product classification and pickup-delivery constraints[J]. Journal of intelligent & fuzzy systems, 2023, 44(1): 1305-1322.
- [12] HESAM SADATI M E, ÇATAY B, AKSEN D. An efficient variable neighborhood search with tabu shaking for a class of multi-depot vehicle routing problems[J]. Computers & operations research, 2021(133): 105269.
- [13] GUTIÉRREZ-SÁNCHEZ A, ROCHA-MEDINA L B. VRP variants applicable to collecting donations and similar problems: a taxonomic review[J]. Computers & industrial engineering, 2022(164): 107887.
- [14] ZENG M, WANG M, CHEN Y, et al. Dynamic evacuation optimization model based on conflict-eliminating cell transmission and split delivery vehicle routing[J]. Safety science, 2021(137): 105166.
- [15] FATIGATI F, DI BARTOLOMEO M, CIPOLLONE R. Development and experimental assessment of a low speed sliding rotary vane pump for heavy duty engine cooling systems[J]. Applied energy, 2022(327): 120126.
- [16] 李进,张江华. 基于碳排放与速度优化的带时间窗车辆路径问题[J]. 系统工程理论与实践,2014,34(8):2092-2105.
- [17] ERDOGAN S, MILLER-HOOKS E. A green vehicle routing problem[J]. Transportation research part E: logistics and transportation review, 2012, 48(1):100-114.
- [18] 梁凤婷,胡坚堃,黄有方. 低碳环境下电动汽车车辆路径问题[J]. 上海海事大学学报,2018,39(2):34-40.
- [19] 刘城宇,杨洪明. 废弃物到能源的闭环供应链:循环供能、协同运作与可持续性[J]. 农业工程学报,2021,37(10):182-191.
- [20] 罗广芳,张建军,李胜男,等. 矿业城市能源消费碳排放变化及其影响因素研究[J]. 中国矿业,2015,24(8):53-58.

(本文责编:默 黎)