

# 餐厨垃圾的季节弹性收运体系构建研究

赵天瑞<sup>1</sup>, 曹旭冰<sup>2</sup>, 李俐频<sup>3</sup>, 田禹<sup>3,\*</sup>

(1. 国家管网集团工程技术创新有限公司 技术创新中心, 天津 300450; 2. 国家管网集团建设项目管理分公司北方项目管理中心, 河北 廊坊 065000; 3. 哈尔滨工业大学 环境学院 城乡水资源与水环境全国重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150090)

**摘要:** 城市化进程加剧了生活垃圾管理的挑战, 特别是对餐厨垃圾的收运提出了复杂需求。针对这一问题, 本研究提出了带有弹性理念的高效餐厨垃圾收运体系, 旨在降低其整体收运成本。为深入解析餐厨垃圾在不同季节的时空波动特征, 综合考虑生活垃圾的月度产量、空间分布以及分出率特征, 构建了 500 m×500 m 分辨率的餐厨垃圾季节性空间分布预测模型。首先, 应用带有季节性差分参数的自回归滑动平均算法(SARIMA), 对北京市连续 10 年的月度生活垃圾产量特征进行了波动规律挖掘及推演。结果表明, 生活垃圾的产生量在 1—2 月为淡季, 7—8 月为旺季, 其余月份为平季, 3 种季节场景下的日均生活垃圾产量比例为 88 : 107 : 100。随后, 构建了岭回归模型, 挖掘了各区人口和兴趣点(POI)等空间分布属性的特征对生活垃圾产量的影响, 结合垃圾分类政策推行后 2021 年研究区域餐厨垃圾的月平均分出比例, 得出了研究区域 19 953 个 0.25 km<sup>2</sup> 空间网格中的餐厨垃圾月产量。基于上述方法, 2021 年淡季、旺季、平季餐厨垃圾分区月产量的时空分布验证( $R^2$ )均高于 0.98, 论证了该方法具有较为稳定的时空外推能力。进一步, 研究推演了 2025 年餐厨垃圾的时空分布, 结合位置分配分析和多路径优化(Vehicle Routing Problem, VRP)算法, 求解了各季节场景下的成本最优餐厨垃圾日收运路径方案, 并探讨了弹性收运方案在降低成本和提高效率方面的优势。研究发现, 平季、淡季、旺季的餐厨垃圾日总收运成本比例约为 1 : 1.08 : 0.90, 不同季节场景下的差异揭示了餐厨垃圾对于环卫系统的季节性成本影响, 从侧面说明了通过构建弹性收运优化现有体系的必要性。本研究不仅为北京市餐厨垃圾收运系统的优化提供了可行的方案, 也为垃圾分类背景下其他城市餐厨垃圾的智能化收运与可持续发展提供了重要参考。

**关键词:** 餐厨垃圾; 季节性预测; SARIMA; 岭回归; 多路径优化

**中图分类号:** X24

**文献标识码:** A

## Construction of a Seasonally Resilient Collection and Transportation System for Kitchen Waste

ZHAO Tianrui<sup>1</sup>, CAO Xubing<sup>2</sup>, LI Lipin<sup>3</sup>, TIAN Yu<sup>3,\*</sup>

(1. *Technical Innovation Center, Engineering Technology Innovation Co., Ltd., National Pipeline Network Group, Tianjin 300450, China*; 2. *Northern Project Management Center, Construction Project Management Branch, National Pipeline Network Group, Langfang 065000, China*; 3. *State Key Laboratory of Urban-rural Water Resource and Environment, School of Environmental Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China*)

**Abstract:** The rapid pace of urbanization has significantly increased challenges in managing municipal solid waste (MSW), especially in the collection and transportation of kitchen waste. As urban

收稿日期: 2026-01-23

修回日期: 2026-03-03

接受日期: 2026-03-07

DOI: 10.20078/j.eep.20260307

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52570154); 国家重点研发计划资助项目(2023YFC3902801)

第一作者: 赵天瑞(1997—), 男, 黑龙江牡丹江人, 工程师, 主要研究方向为工程智能化。E-mail: zhaotr@pipechina.com.cn

\*通讯作者: 田禹(1968—), 女, 黑龙江哈尔滨人, 教授, 主要研究方向为智慧环境管理。E-mail: tianyu@hit.edu.cn

populations and consumption rise, the demand for effective kitchen waste management becomes more complex. In this study, we propose an efficient kitchen waste collection system with seasonal flexibility to reduce overall collection costs. To analyze the spatiotemporal variations in kitchen waste generation, we integrated monthly MSW generation, spatial distribution, and separation rates to predict the seasonal spatial distribution of food waste at a  $500\text{ m} \times 500\text{ m}$  ( $0.25\text{ km}^2$ ) resolution. First, the Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average (SARIMA) model with seasonal differencing was applied to characterize monthly MSW generation in Beijing over ten years (2010–2019). The results show that MSW generation is lowest in January–February (off-season) and peaks in July–August (peak season). The average daily MSW generation ratios for the off-season, peak season, and normal season are  $88 : 107 : 100$  (normal season = 100). This seasonal variability underscores the need for adaptive collection systems. Next, we developed a ridge-regression model to examine how district-level socioeconomic and demographic factors and point-of-interest (POI) distributions influence MSW generation. By combining these predictors with post-sorting kitchen waste separation rates, the model estimated the seasonal spatial distribution of kitchen waste in 2021 across 19 953 grid cells ( $0.25\text{ km}^2$  each). Spatial validation for the off-season, peak season, and normal seasons in 2021 yielded  $R^2$  values greater than 0.98, indicating stable spatiotemporal extrapolation capability. Using this approach, we further projected the spatiotemporal distribution of kitchen waste in 2025. Through location-allocation analysis and a multi-route Vehicle Routing Problem (VRP) optimization, we derived cost-optimal daily collection routes for each season. The analysis indicates that the daily total collection costs for the normal season, off-season, and peak season are approximately in the ratio of  $1 : 1.08 : 0.90$ . These seasonal cost variations highlight the sensitivity of the sanitation system to seasonal dynamics and the necessity of flexible collection strategies. This study provides a feasible method for optimizing kitchen waste collection in Beijing and offers insights for intelligent and sustainable kitchen waste management under source-separation policies in other cities. The findings serve as a reference for urban areas facing similar challenges and demonstrate that flexible, data-driven strategies can improve the efficiency and sustainability of kitchen waste management systems. Finally, we outline directions for future work, including integrating real-time data and advanced machine learning models to further enhance adaptability and sustainability.

**Keywords:** Kitchen waste; Seasonal prediction; SARIMA; Ridge regression; VRP

## 0 引 言

目前,垃圾分类已成为我国生活垃圾治理的战略性任务。为推进该战略任务的落实,《国家生活垃圾分类制度实施方案》提出,到2025年城市生活垃圾分类覆盖率将实现全面提升,全国居民社区垃圾分类全覆盖,并推动垃圾分类与资源化利用协同发展<sup>[1]</sup>。北京市作为政策试点区域,分类工作进入了制度化、精细化的加速推进新阶段<sup>[2]</sup>。然而,北京的餐厨垃圾存在旺淡月份差异,空间分布异质性等特征。若缺乏有效调度,餐厨垃圾的收运车辆将在淡季闲置、旺季超载,进而影响环卫系统服务能效<sup>[3–4]</sup>。现有研究主要集中于垃圾产量预测模型的构建,如基于多元回归、灰色系统理

论及人工智能方法的时间序列预测<sup>[5–6]</sup>,多数研究仍缺乏城市场景下对复杂空间–时间垃圾分类生成特征的深度挖掘<sup>[7]</sup>。

精确制定运输路径,避免不必要的成本浪费,已成为优化垃圾分类管理建设面临的重大挑战<sup>[8]</sup>。目前环卫收运系统的优化研究主要集中于基础设施选址以及运输车辆的路线规划,例如蚁群算法、蜂群算法优化收运路径,采用缓冲区分析优化设施选址等方法<sup>[9–10]</sup>。然而研究往往聚焦大型终端处理设施,对数量众多且影响服务效率的中转站及社区节点的选址与路径优化研究较少。地理信息系统(GIS)作为集成空间分析与网络优化的有力工具,可为城市垃圾热点区域识别、收运路网设计与中转站布局提供更高精度支持,亟待

引入垃圾产生特征的区域性差异,以提升优化结果的适应性<sup>[3,11]</sup>。

综上所述,本研究将时间序列预测与空间网格预测耦合,预测特大城市餐厨垃圾的时空分布特征,并支撑位置分配分析选址与路径优化分析,构建面向带有季节弹性的餐厨垃圾收运体系。本研究旨在提出一套全局综合成本最优的餐厨垃圾季节性收集与运输方案,为超大城市场景下的垃圾分类智慧管理提供理论与实践参考。

## 1 研究区域与数据来源

### 1.1 研究区域

北京是我国的政治、经济与文化中心,总面积 16 410.5 km<sup>2</sup>,拥有 16 个行政区。根据 2025 年的统计数据,北京人口已达 2 300 万,且显著呈现季节流动性,为当地的餐厨垃圾产量带来了显著影响<sup>[12-13]</sup>。作为垃圾分类政策的先行者和示范区,北京的环卫体系建设经验和探索具有重要指导意义。

### 1.2 数据来源与预处理

本文涉及研究数据及处理方法如下:

(1)生活垃圾产量与餐厨垃圾分出数据:2010—2020 年生活垃圾的月产量及垃圾分类后的餐厨垃圾分出率来源于政府信息公开,2010—2020 年生活垃圾年产量来源于《中国城市建设统计年鉴》<sup>[14]</sup>; (2)兴趣点数据(POI):POI 包括医疗保健、住宅区、餐饮服务、交通设施、金融服务、教育机构、旅游景点、商业服务、体育休闲、公共设施、风景名胜、社会机构、交通设施、住宿服务、购物服务、公司企业等 16 类实体的坐标位置。去除空值与重复值,并通过加和统计各行政区及网格中各类 POI 数量,明确各区的产业构成,全面挖掘不同功能区中垃圾产生的差异性; (3)人口数据:采用分区统计工具提取 2020 年各区总人口、年龄结构特征、定居点位置<sup>[15-16]</sup>,精度为 100 m×100 m,作为餐厨垃圾空间产量预测依据; (4)路网、建筑轮廓、水体轮廓等矢量数据来源于 Open street map 网站,用于模拟计算餐厨垃圾中转设施点位及运输路径。 (5)设施位置数据:北京市现有大型餐厨垃圾处理设施的经纬坐标作为餐厨垃圾运输的起终点,构建餐厨垃圾的分季节弹性运输方案,数据来源于当地城市管理委员会。

### 1.3 研究方法

(1)季节性自回归积分滑动平均模型

(SARIMA): SARIMA 通过引入季节性参数,处理并挖掘数据的周期性波动规律<sup>[17]</sup>。求解时间序列中多个影响周期性或者趋势性的时间参数,推演时间序列数据的未来变化,具有较高的可解释性<sup>[18]</sup>。本研究以年为周期,根据研究区域每月的波动特征,将一年划分为旺季、平季、淡季模拟垃圾产量月度波动,并计算了均方根误差(RMSE)与平均绝对百分比误差(MAPE)表征预测结果,为分季节弹性收运方案提供数据支撑。

(2)岭回归模型:岭回归是对传统最小二乘回归的改进方法,通过引入正则项有效避免样本较少可能造成的过拟合问题,尤其适用于数据有限的场景<sup>[19]</sup>。研究结合精度为 500 m×500 m 的北京市人口分布和 POI,构建了垃圾量与空间分布间的关系模型,为面向季节差异的弹性垃圾收运系统构建提供支持。

(3)位置分配分析:该方法用于评估地理空间中设施服务能力的覆盖范围,帮助决策者合理分配资源,确保服务覆盖的最大化与成本的最小化<sup>[11]</sup>。研究首先采用 ArcMap 10.7 服务区分析模块中的位置分配模型进行餐厨垃圾中转设施选址,通过线性规划算法实现服务区选址需求。

(4)Vehicle Routing Problem(VRP)算法:根据给定的需求点和设施位置,通过不断迭代优化全局最优解,计算在满足车辆容量、时间窗限制等现实约束条件下的多车辆协同、多路径运输最优路线<sup>[20]</sup>。研究基于 ArcMap 10.7 网络分析模块的 VRP 功能,综合路网、位置分配分析中转设施选址结果及旺季、淡季和平季的餐厨垃圾分布,在保证餐厨垃圾日产日清的前提下提出具有季节弹性的垃圾收运方案。

## 2 研究内容

### 2.1 SARIMA 垃圾产量季节性波动预测

本研究首先采用 SARIMA 算法挖掘生活垃圾总产量的季节性波动特征,为弹性收运体系的构建提供基础。SARIMA 算法对北京市 2010—2019 年生活垃圾月度波动特征进行解析,开始模型训练与调优,并基于 AIC 最小原则搜索参数,预测了 2020—2025 年季节性变化。SARIMA 模型的验证和预测结果如图 1 所示。在北京市总量层面,生活垃圾产量模型拟合效果良好(RMSE 为 2.36, MAPE 为 2.53),并呈现明显周期性:1—2 月较低、7—8 月较高。因此,将 1—2 月设定为产废

淡季,7—8月设定为旺季,其他月份为平季。上述划分与研究区域春节返乡人口流出,夏季旅游人口涌入的特征契合。

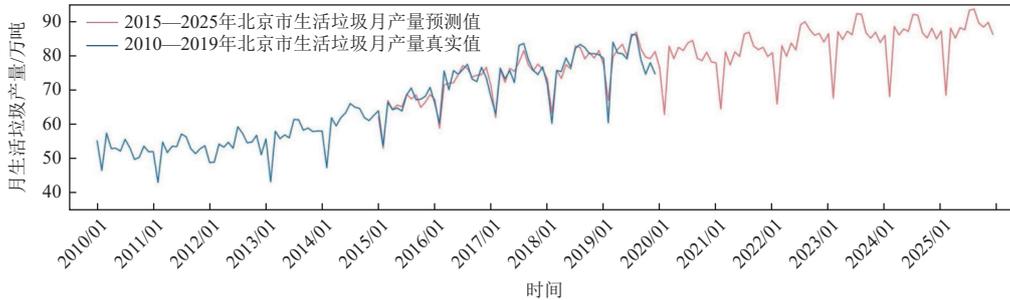


图1 北京市生活垃圾总量季节性波动特征

Fig. 1 Seasonal variation characteristics of municipal solid waste (MSW) in Beijing

SARIMA 对 2015—2020 年的生活垃圾产量预测结果与真实状况相近,并预测在未来研究区域的生活垃圾产量将保持季度波动特征,并缓慢上升。进一步将模型方法应用到各区县,使用 2015—2019 年的月度垃圾产量进行验证。结果表明,除房山区、通州区、延庆区外,多数区县的 MAPE 在 8% 以内,见表 1。

表 1 SARIMA 模型生活垃圾月产量验证结果

Table 1 SARIMA model validation for monthly MSW generation

区域	RMSE/(万吨·月 <sup>-1</sup> )	MAPE/%
东城区	0.38	6.37
西城区	0.21	3.33
朝阳区	1.13	4.97
丰台区	0.32	2.98
石景山区	0.09	4.00
海淀区	0.27	2.56
门头沟区	0.04	4.19
房山区	0.65	19.00
昌平区	0.32	3.98
顺义区	0.34	6.21
通州区	0.80	17.38
大兴区	0.62	7.24
平谷区	0.09	5.27
怀柔区	0.14	6.72
密云区	0.14	6.53
延庆区	0.16	13.86

基于 SARIMA 计算结果,研究得到 2025 年淡季/旺季/平季相对 2020 年日均生活垃圾产量的差

异倍率,作为预测不同季节场景中月度生活垃圾总产量波动的依据,如图 2 所示。

## 2.2 餐厨垃圾空间分布预测岭回归模型

现实场景中,由于生活垃圾产生源高度分散、产量随季节变化,有必要引入生活垃圾的精细化预测,支撑分类收运体系的有效运行。基于 ArcMap 10.7,研究首先构建了 500 m×500 m 渔网,将研究区域划分为 19 953 个正方形网格,作为空间预测的最小单元。考虑到人口、产业分布特征对垃圾产量的显著影响,研究基于网格范围提取了北京市 16 区 2020 年的人口总数、定居点、年龄结构特征(15 岁以下儿童、15~60 岁中青年、60 岁以上老年人)与 16 类 POI 的空间分布特征作为解释变量,构建多种空间特征与各区生活垃圾产生量的岭回归模型,以网格为单位预测餐厨垃圾空间产生量。

根据各区域的月度餐厨垃圾产生总量的真实值及网格加和值开展模型验证,  $R^2=0.9619$ ,说明可以利用上述解释变量有效预测餐厨垃圾的产生,各区的验证结果如图 3 所示。基于岭回归模型,研究明确了生活垃圾的空间分布年产趋势,结合 2025 年预测的生活月产量季节,本研究可以计算出各空间网格的月产生活垃圾特征。

在垃圾分类后,2021 年后研究区域各区的餐厨垃圾分出率趋于稳定<sup>[21]</sup>。取 2021 年各区餐厨垃圾平均分出率作为后续餐厨垃圾分出的比例,见表 2。各网格中 2025 年的生活垃圾预测值与各区域的分出率相乘,得到餐厨垃圾的空间分布特征。

为验证本研究餐厨垃圾时空预测方法的有效性,以餐厨垃圾分出率统计完整的 2021 年为例,将不同区域真实的餐厨垃圾统计值与所有网格加



图 2 2025 年月生活垃圾产量的预测结果  
Fig. 2 Prediction of monthly waste in 2025

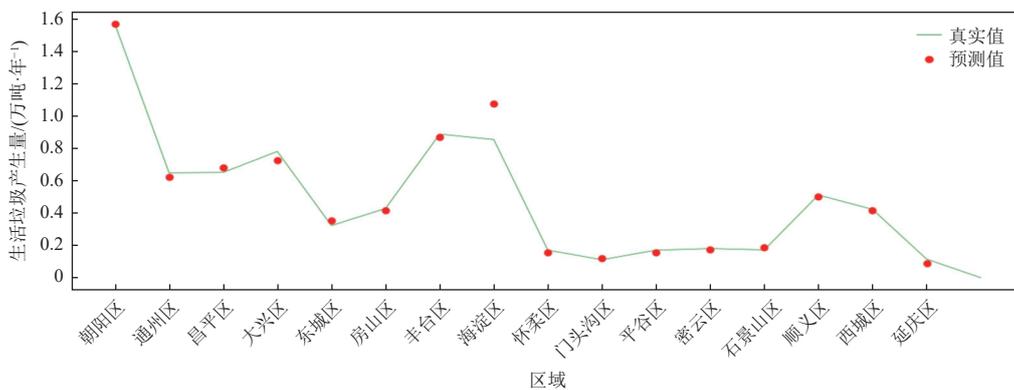


图 3 生活垃圾空间分布预测的分区域验证  
Fig. 3 District-level validation of spatial distribution forecasts for MSW

和计算得出的餐厨垃圾预测值进行比较,并计算总体的  $R^2$ , 验证结果见表 3。

由表 3 可知,餐厨垃圾的时空预测方法在不同季节均获得了较好的可解释性,  $R^2$  均在 0.980 0 以上。因此本研究面向 2025 年的餐厨垃圾时空产生特征预测具有可信度。首先,基于线性推导,计算了 2025 年 500 m 网格尺度下用于垃圾产量空间预测的解释变量预测值,并输入训练后的岭回

归模型,获得了 2025 年的生活垃圾空间产量分布预测值,再根据图 2 中各区 2025 年月度产废特征,得到 2025 年餐厨有机垃圾的平季、旺季与淡季的日均生活垃圾产量空间分布。综合各区垃圾分类后的月平均餐厨垃圾分出率,研究得到平季、旺季、淡季的餐厨垃圾产生量空间分布,如图 4 所示。

通过划分平季、旺季和淡季 3 个差异显著的季节,对研究区域餐厨垃圾空间产生量的时空差

表 2 餐厨垃圾分出率

Table 2 Separation proportion of kitchen waste

地区	餐厨垃圾分出率/%
东城区	33
西城区	35
朝阳区	21
丰台区	23
石景山区	26
海淀区	25
门头沟区	22
房山区	14
昌平区	22
顺义区	17
通州区	21
大兴区	21
平谷区	21
怀柔区	20
密云区	22
延庆区	19

异开展了分析。平季、旺季和淡季的餐厨垃圾日均产量为 6 078、6 517、5 350 吨/天,产生餐厨垃圾较多的区域多集中在东城区、西城区、朝阳区等北京主城区。与此同时,近郊与郊区餐厨垃圾产量较少,主要集中在其他区的中心人口聚集区。部分网格由于人口高度集聚,在 0.25 km<sup>2</sup> 范围内,餐厨垃圾产生量可以达到 20 吨/天以上。上述餐厨垃圾的空间分布预测结果用于后续季节弹性收运体系的构建与计算。

### 2.3 候选设施点构建与位置分配选址

餐厨垃圾的收运通常基于人力及小型车辆,从居民点收集至餐厨垃圾转运楼等中转设施,后由大型车辆统一运送至集中处理设施。尤其是在发展中国家,垃圾运输过程的费用占比高达环卫系统运营成本的 50%~80%,有必要结合实际情况开展收运体系的深入优化<sup>[22]</sup>。由于难以获得餐厨垃圾的实际收运点位与路线,研究使用模拟方法,在满足餐厨垃圾收运需求的前提下,通过位置分配方法模拟了餐厨垃圾从居民产生与处理设施之间的中转设施布设,以提出弹性收运体系的构建方法。

研究首先筛除餐厨垃圾旺季日均产量 10 kg

表 3 餐厨垃圾预测值的验证结果

Table 3 Validation of kitchen waste forecasts

区域	平季产量/ (万吨·月 <sup>-1</sup> )		旺季产量/ (万吨·月 <sup>-1</sup> )		淡季产量/ (万吨·月 <sup>-1</sup> )	
	真实值	预测值	真实值	预测值	真实值	预测值
昌平区	1.58	1.76	1.65	1.83	1.42	1.58
朝阳区	3.72	3.91	4.01	4.21	3.37	3.55
大兴区	0.97	0.93	0.98	0.95	0.70	0.68
东城区	1.31	1.48	1.41	1.59	1.19	1.34
房山区	0.27	0.28	0.27	0.29	0.24	0.26
丰台区	2.01	1.78	2.19	1.94	1.74	1.54
海淀区	1.29	1.32	1.50	1.54	0.96	0.98
怀柔区	0.43	0.53	0.44	0.55	0.40	0.49
门头沟区	0.27	0.33	0.29	0.36	0.25	0.31
密云区	0.36	0.43	0.39	0.47	0.32	0.38
平谷区	0.13	0.12	0.17	0.17	0.12	0.12
石景山区	0.22	0.17	0.24	0.18	0.19	0.15
顺义区	1.53	1.53	1.78	1.78	1.57	1.57
通州区	2.23	2.13	2.09	2.00	1.99	1.90
西城区	0.97	0.68	1.15	0.80	0.75	0.52
延庆区	0.40	0.39	0.42	0.41	0.30	0.29
总和	17.68	17.78	18.98	19.06	15.51	15.65
$R^2$	0.982 0		0.980 6		0.984 6	

以下的网格,保留了需要集中进行餐厨垃圾收运的区域。以各网格的中心点建立 2 km 圆形缓冲区域,模拟了前期小型车辆收集居民点餐厨垃圾至中转设施的服务范围。接下来引入当地的建筑与自然水体轮廓并简化,通过构建 200 m 缓冲形成邻避性擦除区,防止餐厨垃圾中转设施的选址产生负面环境影响。最后,在当地满足大型垃圾运输车运行的路段上,生成最小间距 200 m 的随机点,产生满足限制条件的 9 346 个点位,并作为初步候选设施点。各个候选点均分布在有收运需求的网格周围,在具有较小环境影响的同时,满足了餐厨垃圾收集和面向处理设施运输的交通便利性。

研究基于 ArcMap 10.7 的网络分析模块,开展了位置分配分析。本研究提出了以 3 km 为服务半径,服务范围最大化、覆盖所有产废网格的最优位置分配方案。如图 5 所示,分配了各中转设施餐厨垃圾的服务范围。为进一步概化各中转设施的大致日餐厨垃圾负荷,以中转设施点为中心点,

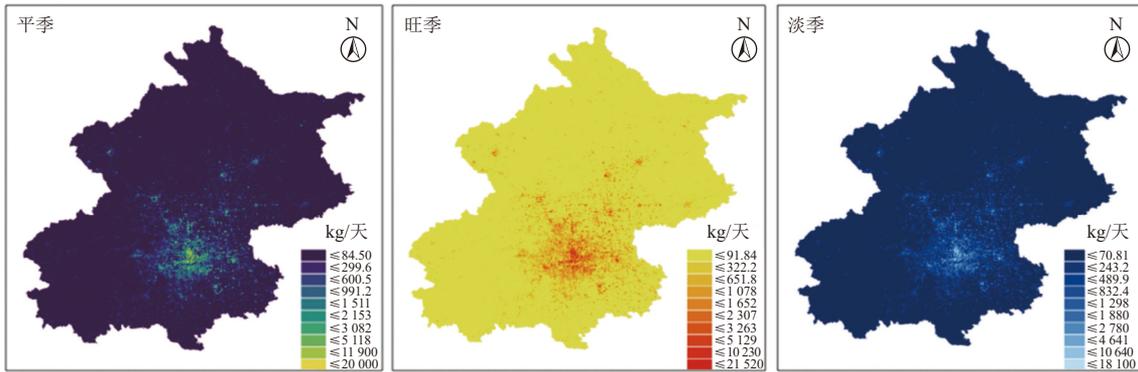


图 4 2025 北京市餐厨垃圾季节性空间分布特征

Fig. 4 Seasonal and spatial distribution characteristics of kitchen waste in Beijing, 2025

构建了泰森多边形,假设泰森多边形中各个网格产生的垃圾均汇集到了中心的中转设施。基于上述步骤,研究明确了用于构建季节弹性收运方案时,各个中转设施在不同季节场景下的餐厨垃圾日转运需求。

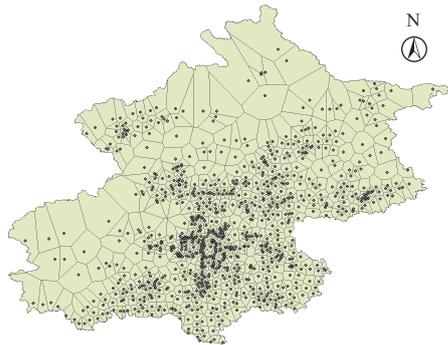


图 5 北京市中转设施的餐厨垃圾点位及服务范围

Fig. 5 Locations and coverage of transfer facilities in Beijing

## 2.4 基于 VRP 的弹性收运方案生成

有效完成运输资源调度是城市韧性的重要体现<sup>[23]</sup>。利用 VRP 算法求得不同季节场景下的最优车辆运输路径。利用图 5 中泰森多边形提取图 4 中的各网格餐厨垃圾空间产量,即明确了不同中转设施的日均负荷。以中转设施点位为起点、大型处理设施点位为终点,将可通行 20 吨大型餐厨垃圾收运车的路段路网构建了收运专题的网络数据集,并以预测得到的日均餐厨垃圾分布作为 VRP 分析过程的工作负荷:参考一般餐厨垃圾运输过程的车次和运作方式<sup>[24]</sup>,本次方案以 20 吨收运车为运输工具,工作时间均设为每班次 8 h,每次装卸垃圾需要 15 min,并结合处理厂日处理能力开始车辆分配与路径优化。由于旺季气温高且垃圾量多,采用一天三运;平季与淡季垃圾量少,

采用一天两运,保障每日餐厨当日收集处理。考虑到数据取值波动带来的敏感性问题,研究列出了用于餐厨垃圾运输路径方案计算的关键参数范围,并参考以往研究进行了取值,见表 4。

表 4 参数范围

Table 4 Parameter ranges

参数	参考 下限	常用 基准	参考 上限	研究选值
中转站服务半径/km	3	5	7	3 <sup>[25]</sup>
车辆装卸时间/min	10	15	30	15 <sup>[26]</sup>
车辆载重/t	5	10~20	25	20 <sup>[7]</sup>
餐厨垃圾分出率/%	10	20	40	选取各区均值

基于上述约束条件求解 VRP 模型,平季、旺季、淡季的运输方案如图 6 所示,三角形为各餐厨垃圾的集中处理设施位置,与设施点颜色相同的路线为该设施对应的餐厨垃圾运输车辆作业路径。

基于当地的环境卫生作业预算定额<sup>[26]</sup>,本研究综合计算了设备成本与人力成本,得到不同季节收运场景下的日均收运成本支出,见表 5。

综上所述,带有季节弹性的收运方案识别了产废规律的时空异质性,充分根据场景需求做出了方案调整,尤其在车次、成本和里程方面。通过合理调整资源,季节性收运方案在平季、旺季及淡季均实现了餐厨垃圾的应收尽收,增强了对淡季、旺季等异常场景的应对能力,仅在旺季产废需求较高时提升车次与运输成本,变相节约了全年的运输成本与工作时间。综上所述,通过更精准的资源配置,具有季节弹性的餐厨垃圾收运能够在提高运输效率的同时,在全年范围内达到成本和资源的最优配置。

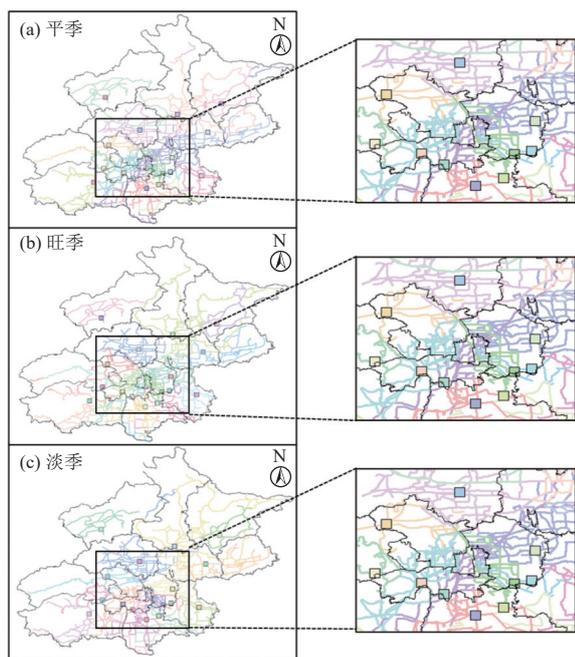


图 6 平季 (a)、旺季 (b)、淡季 (c) 餐厨垃圾收运路线

Fig. 6 Kitchen waste collection and transportation routes for (a) normal season, (b) peak season, and (c) off-season

表 5 餐厨垃圾运输方案对比

Table 5 Comparison of transportation options for kitchen waste

属性	平季	旺季	淡季
收集垃圾量/(吨·日 <sup>-1</sup> )	6 078	6 517	5 350
日总里程/km	14 097	15 003	14 138
日总成本/元	57 249	62 317	51 556

### 3 结果与讨论

本研究首先应用 SARIMA 算法对研究区域 10 年的生活垃圾季节性波动特征进行了挖掘。在现有研究中,大多数方法倾向于在静态、平均层面探讨垃圾的生成与收运问题,忽视了垃圾产生的季节性波动及其对资源调配的影响<sup>[27]</sup>。本研究表明,当地生活垃圾产生具有鲜明的季节性波动:1—2 月为淡季,7—8 月为旺季,其余月份为平季。基于 2015—2020 年的月度产废数据开展了分区域的验证, RMSE 为 2.36, MAPE 为 2.53, 表明该模型拟合效果良好,具有识别周期性波动及推演预测的潜力,并且增强了环卫系统应对不确定性风险的能力<sup>[28]</sup>。在淡季、旺季和平季场景下,日均生活垃圾总产量的比例约为 88 : 107 : 100, 模型展示了不同季节的垃圾产生规律,进一步论证了弹性收运方案在不同季节场景下的重要性。

基于岭回归模型,研究进一步预测了 2025 年北京市各区餐厨垃圾的空间分布。人口分布及 POI 等数据特征为垃圾空间分布的预测提供了支撑,能够有效展示垃圾产生分布。空间特征的引入有效表达了垃圾产生的集聚规律,可以协助研究区域政府部门识别管理过程的薄弱环节,进一步提升管理能效<sup>[29]</sup>。结合垃圾分类政策推行后不同区域餐厨垃圾的分出特征,研究发现北京市餐厨垃圾量集中在主城区及其他区的中心人口聚集地。模型通过多种算法的叠加,避免了降尺度伴随的预测性能下降问题<sup>[30]</sup>,验证  $R^2$  达到了 0.9800。通过分析 2025 年餐厨垃圾的月度产生特征,研究发现旺季日均产量为 6 517 吨,平季为 6 078 吨,淡季为 5 350 吨,突出了不同区域垃圾管理需求的时空异质性。传统的预测算法往往忽视了餐厨垃圾的网格化管理,因而欠缺根据不同种类固废产生的时空差异合理布设收运资源的能力。研究通过多种算法的结合,避免了单一方法可能造成的不确定性<sup>[31]</sup>,对于餐厨垃圾的季节性管理提供了决策支持,同样也有望应用于季节、空间波动显著的其他种类城市固废中。

本方法有望充分发掘不同区域的管理需求差异,并辅助提出一城一策的精细化管理方案,帮助城市高效开展垃圾分类工作<sup>[32]</sup>。基于餐厨垃圾的分布特征,研究通过位置分配分析,确定了 200 个餐厨垃圾中转设施的最优位置,为基于 VRP 算法的不同季节收运路径提供了途径点位。经济支出是反映环卫系统能效的重要指标,研究得出了不同季节的餐厨垃圾收运方案年经济支出。结果显示,旺季的总运输日成本为 62 317 元,平季为 57 249 元,淡季为 51 556 元。与全年统一收运方案相比,季节性收运方案更加适应餐厨垃圾的时空波动,弹性优化了收运成本、车次、时间和运输效率,充分利用了有限的收运资源,本研究为管理部门提升环卫服务灵活性与应急响应提供了可行方案。

本研究提出的弹性餐厨垃圾收运方案在实际应用中仍面临一些挑战。例如,关键参数如中转站服务半径、车辆装卸时间、餐厨垃圾分出率、运输车辆载重及设施日中转能力在实际运行中具有不确定性,这些变化可能导致模型结果存在差异<sup>[33]</sup>。未来的研究可在本研究基础上引入情景分析或不确定性传播方法,系统评估这些关键参数变化对方案效率和成本的影响,从而为餐厨垃圾收运与中转设施规划提供更加全面的决策支持。

随着数据治理体系的逐步完善,餐厨垃圾产生量的精度有望得到提升,尤其在节假日或突发事件等垃圾分类管理的情景下,日尺度的餐厨垃圾精细化管理将成为可能。然而,现有收运体系在快速动态调整路径方面仍存在一定的局限性,未来仍需进一步细化弹性收运方案的响应效率。智慧环卫管理系统的数字赋能,如车载 GPS 和实时调度平台,预计将显著提升一线人员对调度方式的快速响应与配合<sup>[34-35]</sup>。因此,本方法的应用需要与地方管理能力、信息化能力相结合,循序渐进地进行改进和应用。

## 4 结 论

本研究通过整合 SARIMA 模型和岭回归分析,揭示了研究区域餐厨垃圾的季节性波动特征及空间分布规律,结合位置分配与 VRP 方法,为构建创新的弹性收运系统提供了可操作的优化路径。研究表明,季节性因素对垃圾产生和收运成本具有显著影响,因此,弹性收运体系的引入对降低成本和提高效率具有重要作用。研究提出的季节性识别和空间分布细化的优化路径方案,也同时为我国其他城市的餐厨垃圾收运与处理提供了可行参考。然而在实际应用过程中,弹性收运系统仍面临不确定性、实时数据应用、动态调整等挑战。因此,未来的研究应着重于情景分析、模型不确定性分析以及实时数据系统的优化,进一步完善动态应对机制,以提升弹性收运方案的精准度和响应效率,推动城市垃圾管理的智能化与绿色化发展。

### 参考文献 (References) :

[1] 国务院办公厅转发《生活垃圾分类制度实施方案》[J]. 环境卫生工程, 2017, 25(2): 58.  
State council general office forwarding "Implementation Plan for Household Waste Sorting System"[J]. Environmental Sanitation Engineering, 2017, 25(2): 58.

[2] 北京市住房和城乡建设委员会. 北京市生活垃圾管理条例[Z]. 北京, 2020.  
Beijing Municipal Commission of Housing and Urban-Rural Development. Beijing municipal municipal solid waste management regulations[Z]. Beijing, 2020.

[3] KANG Yating, YANG Qing, WANG Liang, et al. China's changing city-level greenhouse gas emissions from municipal solid waste treatment and driving factors[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2022, 180: 106168.

[4] HALKOS G, PETROU K N. The relationship between

MSW and education: WKC evidence from 25 OECD countries[J]. *Waste Management*, 2020, 114: 240-252.

[5] 刘京京. 深圳市生活垃圾处理社会总成本分析[J]. 现代商业, 2018(30): 180-182.  
LIU Jingjing. Analysis of the total social cost of municipal solid waste treatment in Shenzhen[J]. *modern commerce*, 2018(30): 180-182.

[6] NGUYEN X C, NGUYEN T T H, LA D D, et al. Development of machine learning-based models to forecast solid waste generation in residential areas: A case study from Vietnam[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, 167: 105381.

[7] 赵天瑞. 基于堆栈集成学习的生活垃圾多组分产量时空预测与分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2025: 1-15.  
ZHAO Tianrui. Spatiotemporal prediction and analysis of municipal solid waste multi-component generation based on stacked ensemble learning[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2025.

[8] ZHANG Shuai, LEI Qingyu, WU Le, et al. Supply chain design and integration for the co-processing of bio-oil and vacuum gas oil in a refinery[J]. *Energy*, 2022, 241: 122912.

[9] 张睿涵. 基于模拟退火算法的校园垃圾清运最优线路研究——以北京师范大学校园为例[J]. 数码世界, 2019(6): 90.  
ZHANG Ruihan. Optimal campus garbage collection route based on simulated annealing algorithm: A case study of Beijing normal university campus.[J]. *Digital World*, 2019(6): 90.

[10] 李倩倩. 废弃物逆向物流网络设计与研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2015: 1-10.  
LI Qianqian. The design and research for waste reverse logistics network[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2015: 1-10.

[11] ZHANG Jiaxin, ROBINSON D T. Investigating path dependence and spatial characteristics for retail success using location allocation and agent-based approaches[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2022, 94: 101798.

[12] XIE Chaoliang, DENG Xuemei, ZHANG Jingyu, et al. Multi-period design and optimization of classified municipal solid waste supply chain integrating seasonal fluctuations in waste generation[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2023, 93: 104522.

[13] PAN Jinghu, LAI Jianbo. Spatial pattern of population mobility among cities in China: Case study of the national Day plus Mid-Autumn Festival based on Tencent migration data[J]. *Cities*, 2019, 94: 55-69.

[14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 中国城市建设统计年鉴(2001—2020)[Z]. 北京: 住房和城乡建设部办公厅, 2021. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. China urban construction statistical yearbook (2001-2020)[Z]. Beijing: General Office of the

- Ministry of Housing and Urban-Rural Development, 2021.
- [15] Worldpop and Center for International Earth Science Information Network (Ciesin) C U. Age and sex structures/Unconstrained individual countries 2000-2020/China 100m. Age structures [Z/OL]. <https://dx.doi.org/10.5258/SOTON/WP00646.2018>.
- [16] Worldpop and Center for International Earth Science Information Network (Ciesin) C U. Global Settlement Growth/Individual countries/China 100 m. Covariates[Z]. <https://dx.doi.org/10.5258/SOTON/WP00649.2018>.
- [17] ZHANG Wanqing, LIN Zi, LIU Xiaolei. Short-term offshore wind power forecasting—A hybrid model based on Discrete Wavelet Transform (DWT), Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average (SARIMA), and deep-learning-based Long Short-Term Memory (LSTM) [J]. *Renewable Energy*, 2022, 185: 611–628.
- [18] TUĞBA ÖNDER G. Comparative time series analysis of SARIMA, LSTM, and GRU models for global SF<sub>6</sub> emission management system[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2024, 265: 106393.
- [19] RIPLEY S, MINET L, ZALZAL J, et al. Predicting spatial variations in multiple measures of PM<sub>2.5</sub> oxidative potential and magnetite nanoparticles in Toronto and Montreal, Canada[J]. *Environmental Science & Technology*, 2022, 56(11): 7256–7265.
- [20] KINOBE J R, BOSONA T, GEBRESENBET G, et al. Optimization of waste collection and disposal in Kampala city[J]. *Habitat International*, 2015, 49: 126–137.
- [21] ZHAO Tianrui, SUN Huihang, WANG Yihe, et al. Building the resilient food waste supply chain for the megacity: Based on the multi-scale progressive fusion framework[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2025, 215: 108144.
- [22] DAS S, BHATTACHARYYA B K. Optimization of municipal solid waste collection and transportation routes[J]. *Waste Management*, 2015, 43: 9–18.
- [23] WANG Gang, ZHANG Kangning. Turning peril into opportunity: Construction and validation of a resilience assessment system for China's coastal megacities[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2024, 112: 105606.
- [24] SANDHU G S, FREY H C, BARTELT HUNT S, et al. Real-world activity, fuel use, and emissions of heavy-duty compressed natural gas refuse trucks[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 761: 143323.
- [25] 李明月. 城乡垃圾移动式小型化处理设备配置与路径优化研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021: 1–12.  
LI Mingyue. Study on configuration and route optimization of mobile miniaturized waste treatment equipment for urban and rural areas[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.
- [26] 北京市城市管理委员会. 北京市环境卫生作业预算定额 [Z]. 北京: 北京市财政局, 2017.  
Beijing Municipal Commission of Urban Management. Beijing municipal environmental sanitation operation budget quotas[Z]. Beijing: Beijing Municipal Bureau of Finance, 2017.
- [27] WANG Yangqing, LEI Yu, LIU Xi, et al. Sulfonamide and tetracycline in landfill leachates from seven municipal solid waste (MSW) landfills: Seasonal variation and risk assessment[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 825: 153936.
- [28] ARBULÚ I, REY MAQUIEIRA J, SASTRE F. The impact of TOURISM and seasonality on different types of municipal solid waste (MSW) generation: The case of Ibiza[J]. *Heliyon*, 2024, 10(13): e33894.
- [29] MADDEN B, FLORIN N, MOHR S, et al. Spatial modelling of municipal waste generation: Deriving property lot estimates with limited data[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, 168: 105442.
- [30] LI Shiting, XU Chao, SU Meirong, et al. Downscaling of environmental indicators: A review[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 916: 170251.
- [31] LI Longxiang, BLOMBERG A J, STERN R A, et al. Predicting monthly community-level domestic radon concentrations in the greater Boston area with an ensemble learning model[J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 55(10): 7157–7166.
- [32] ZHANG Lei, LI Huan, HU Tao, et al. The reduction of the carbon footprint of municipal solid waste management via source classification and supporting strategies: An analysis for the megacity of Shenzhen[J]. *Waste Management*, 2024, 187: 145–155.
- [33] TSAO Y C, TESHAYE BALO H, LEE C K H. Resilient and sustainable semiconductor supply chain network design under trade credit and uncertainty of supply and demand[J]. *International Journal of Production Economics*, 2024, 274: 109318.
- [34] SADEGHI R K, OJHA D, KAUR P, et al. Explainable artificial intelligence and agile decision-making in supply chain cyber resilience[J]. *Decision Support Systems*, 2024, 180: 114194.
- [35] BOATENG F G, APPAU S, BAAKO K T. The rise of 'smart' solutions in Africa: A review of the socio-environmental cost of the transportation and employment benefits of ride-hailing technology in Ghana[J]. *Humanities & Social Sciences Communications*, 2022, 9(1): 245.