

考虑居民响应行为的生活垃圾分类回收政策模拟仿真研究

黄亚文, 贾晓霞

上海理工大学管理学院, 上海

收稿日期: 2022年11月23日; 录用日期: 2023年1月24日; 发布日期: 2023年1月31日

摘要

目前, 我国大多数城市如北京、上海都陷入了“垃圾围城”的困境。为了缓解生活垃圾给城市带来的各种威胁与挑战, 对生活垃圾进行源头分类和回收利用是一种新的有效治理手段。本文综合分析了影响居民生活垃圾响应行为的因素, 并运用SEM和离散选择模型, 构建城市居民生活垃圾分类回收响应行为决策效用函数模型; 在此基础上, 利用Anylogic软件构建考虑居民响应行为的生活垃圾分类回收政策模拟仿真模型。以上海生活垃圾分类回收活动为样本, 给出组合政策导入下的情景模拟结果, 探索上海生活垃圾治理各模块及其相互作用机理, 并提出促进上海生活垃圾智慧治理的相关管理政策建议。

关键词

生活垃圾, 响应行为, 分类回收, 协同治理

Simulation Research on Household Garbage Classification and Recycling Policy Considering Residents' Response Behavior

Yawen Huang, Xiaoxia Jia

Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Nov. 23rd, 2022; accepted: Jan. 24th, 2023; published: Jan. 31st, 2023

Abstract

At present, most Chinese cities, such as Beijing and Shanghai, are in the predicament of “garbage

siege". In order to alleviate all kinds of threats and challenges brought by household garbage to the city, the source classification and recycling of household garbage is a new effective treatment method. This paper comprehensively analyzes the factors that affect the response behavior of urban household solid waste, and uses SEM and discrete selection model to construct the total decision utility function model of the response behavior of urban household solid waste classification and recycling. On this basis, Anylogic software is used to build a simulation model of household garbage classification and recycling policy considering residents' response behavior. Taking Shanghai's household garbage classification and recycling activities as samples, this paper gives the scenario simulation results under the introduction of combination policies, explores each module of Shanghai's household garbage management and its interaction mechanism, and puts forward relevant management policy suggestions to promote the smart management of Shanghai's household garbage.

Keywords

Householdgarbage, Response Behavior, Sorting and Recycling, Collaborative Governance

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,随着我国经济发展、城市化进程加快和人民生活水平日益提高,城市生活垃圾清运量也不断增长,大多数城市如北京、上海都陷入了“垃圾围城”的困境,给城市可持续发展带来各种挑战与威胁。生活垃圾具有危害性,但还具备资源利用价值,其分类回收利用对于缓解资源消耗、发展循环经济和实施“碳达峰行动”具有重大战略意义。

为了缓解“垃圾围城”的困境,实现生活垃圾减量化、资源化、无害化和低成本化的发展目标,学者们从居民、政府、社会三个维度来探讨影响居民生活垃圾分类回收响应行为的因素。关于居民层面的因素主要有社会网络、主观规范、环境素养、分类知识等。Shaufique 等(2010)、Janmimool (2017)和 Wang 等(2020)的研究显示城市居民的生活垃圾分类行为经常受到周围其他重要个人或组织的期望和观点影响 [1] [2] [3]。Babaei 等(2015)和 Almasi 等(2019)的调查发现居民分类知识水平越高,其参与生活垃圾分类的意愿越强 [4] [5]。关于政府层面的因素主要有宣传教育、分类标准、激励与处罚措施等。Ivens (1998)和徐林等(2017)提出宣传教育是引导居民生活垃圾分类的重要政策手段,左右着居民行为选择 [6] [7]。Wadehra 等(2018)验证了奖惩政策的质量水平显著影响居民的生活垃圾分类行为 [8]。Zheng 等(2021)发现当政府制定的分类标准是科学合理的,则能够增强居民参与生活垃圾分类的意识和积极性 [9]。关于社会层面的因素主要有分类与回收的配套设施等。Malmir 等(2016)根据对伊朗首都德黑兰城市居民参与生活垃圾分类的调研中发现,分类配套设施的质量与便利性将会直接影响居民参与源头分类的积极性 [10]。Cui 等(2021)也发现便利的回收配套设施可以有效推动城市居民进行生活垃圾分类回收利用 [11]。

鉴于此,本文将城市生活垃圾分类回收置于一个有着行动逻辑内在联系的决策系统中进行研究。从多主体行为响应角度,构建考虑居民响应行为的生活垃圾分类回收政策模拟仿真模型,给出组合政策导入下的情景模拟结果,分析各主体寻求效用最大化过程中的行为决策特征,并梳理和定量评估政策实施效果。

2. 城市居民生活垃圾分类回收响应行为影响因素与决策效用函数模型构建

2.1. 居民生活垃圾分类回收响应行为影响因素调查

在归纳总结上述文献的基础上, 本研究采用 Likert-5 评分方法测度各变量, 从居民、政府和社会三个维度设计城市居民生活垃圾分类回收现状调查问卷, 并通过观测变量来解释与衡量, 如表 1 所示。

Table 1. Factors affecting the response behavior of household household garbage classification and recycling and scale composition

表 1. 影响居民生活垃圾分类回收响应行为的因素及量表构成

潜在变量	测量问题项	来源
生活垃圾分类回收行为	混合投放、分类投放、分类出售	/
居民 层面	分类知识(X_1)	Almasi 等(2019)
	环境素养(X_2)	Ajzen (1991)
	参与意愿(X_3)	Pakpour 等(2014)
	社会责任(X_4)	Chu 和 Chiu (2003)
	法规约束(X_5)	Grazhdani (2016)
	社会网络(X_6)	Janmaimool (2017)
	时间花费(X_7)	Abbott (2011)
	交售收益(X_8)	Batch (2004)
政府 层面	宣传教育(X_9)	Ivens (1998)
	激励措施(X_{10})	Wadehra 等(2018)
	处罚措施(X_{11})	Miafodzyeva 等(2013)
	分类标准(X_{12})	Zheng 等(2021)
	垃圾处理费(X_{13})	/
社会 层面	分类配套设施(X_{14})	Malmir 等(2016)
	回收配套设施(X_{15})	Cui 等(2021)
	投放制度(X_{16})	/
	社会参与积极性(X_{17})	/
个人社会 背景特征	性别、年龄、受教育程度、职业类型、收入水平、 家庭人口等	/

本研究通过问卷星平台对上海居民的分类回收现状进行线上调研。在综合考虑各区人口密度、居民社会背景特征等因素的基础上, 根据系统抽样的原则发放问卷, 最终共回收有效问卷 212 份。

2.2. 结构方程模型(SEM)构建与分析

利用 SEM 方法并借助 SPSS 26 和 Amos 26 软件对所获得的有效问卷样本数据进行分析, 建立居民、政府和社会层面各潜在变量对居民生活垃圾分类回收响应行为的作用路径和影响程度。

1) 测量模型的信度与效度检验

通过 SPSS 26 对模型进行信度与效度检验, 得到的 Cronbach's Alpha 为 0.898、KMO 检验值为 0.906 和 Bartlett 球体检验统计值的显著性概率 P 值为 0.000 (如表 2、表 3 所示), 说明测量模型通过信度与效

度检验。

Table 2. Data reliability statistics
表 2. 数据可靠性统计

项目	Cronbach's Alpha	题项数
数值	0.898	18

Table 3. KMO and Bartlett test analysis results
表 3. KMO 和 Bartlett 检验分析结果

项目	数值
KMO 取样适切性量数	0.906
巴特利特球形度检验	近似卡方 自由度 显著性
	1677.030 136 0.000

2) 结构方程模型构建与修正

依据因子分析的结果, 使用 Amos 26 软件构建城市居民生活垃圾分类回收响应行为的初始结构方程模型并进行运算。结果发现, 政府层面的分类标准(X_{12})、垃圾处理费(X_{13})的标准化路径系数值与其他观测变量相比较小且无显著性。另外, 考虑到上海目前生活垃圾处理费并没有对居民征收, 因此对居民生活垃圾分类回收响应行为的影响有限, 故而删除垃圾处理费(X_{13}), 修正后的结构方程模型和标准化路径系数如图 1 所示。

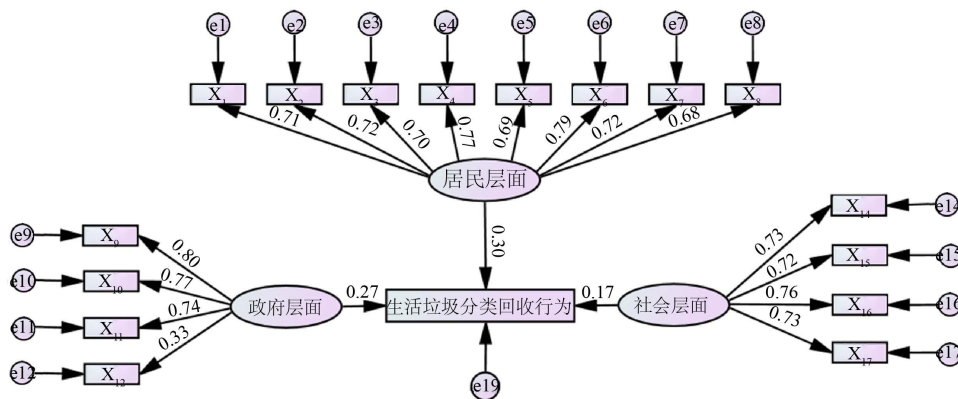


Figure 1. Modified structural equation model and standardized path coefficient
图 1. 修正后的结构方程模型及标准化路径系数

修正前后的模型适配度指标结果如表 4 所示, 可以看出修正后的模型拟合程度优于初始模型, 故修正后的模型设定是可以接受且修正结果理想。

修正后的模型包含的 16 个基本路径假设均成立, 且得到标准化路径系数为最优的参数估计。将各潜在变量对生活垃圾分类回收响应行为的标准化路径系数与各观测变量对所属的潜在变量的标准化路径系数相乘, 则乘积表示各观测变量对生活垃圾分类回收响应行为的间接影响程度, 即为影响城市居民生活垃圾分类回收响应行为因素的敏感性系数, 如表 5 所示。

Table 4. Comparison results of model fitness indexes before and after modification
表 4. 修正前后的模型适配度指标对比结果

拟合指标	CMIN (卡方值)	DF (自由度)	CMIN/DF	RMSEA	GFI	AGFI	CFI
修正前	335.973	130	2.584	0.087	0.830	0.777	0.877
修正后	220.991	114	1.939	0.067	0.902	0.868	0.931

Table 5. Sensitivity coefficient table
表 5. 敏感性系数表

观测变量 X_i	敏感性系数 α_i
分类知识	0.213
环境素养	0.216
参与意愿	0.210
社会责任	0.231
法规约束	0.207
社会网络	0.237
时间花费	0.216
交售收益	0.204
宣传措施	0.216
激励措施	0.208
处罚措施	0.200
分类标准	0.089
分类配套设施	0.124
回收配套设施	0.122
投放制度	0.129
社会参与积极性	0.124

3) 行为决策效用函数

居民主体的生活垃圾分类回收响应行为主要分三种类型：混合投放、分类投放和分类出售。鉴于离散选择模型能够揭示行为规律，可以判断哪些因素真正影响了行为，而且一般以“what-if”的方式考察诸如要素改变、政策实施等造成的前后差异或是对方案、情景的效果展开模拟分析[12]。

因此，基于效用最大化理论的离散选择模型，分析居民主体采取何种生活垃圾响应行为并对其进行较为科学准确的交互行为设计。居民不同的生活垃圾响应行为分别对应着一定的效用 U ，该效用由固定效用 V 与随机两部分 ε 加和构成，固定效用 V 能够被一定的可观测要素 X 和对应敏感性系数 α 所解释，而随机部分 ε 代表未被观测的效用及误差的影响[12][13]。居民选择效用最大的生活垃圾响应行为，每种响应行为出现的概率可以用决策效用函数 U 来表示：

$$U = V + \varepsilon = \sum_{i=1}^i \alpha_i X_i + \varepsilon$$

综上，城市居民生活垃圾响应行为的决策效用函数如下列公式所示：

$$U = \alpha_1 X_1 + \alpha_2 X_2 + \alpha_3 X_3 + \alpha_4 X_4 + \alpha_5 X_5 + \alpha_6 X_6 + \alpha_7 X_7 + \alpha_8 X_8 + \alpha_9 X_9 + \alpha_{10} X_{10} + \alpha_{11} X_{11} + \alpha_{12} X_{12} + \alpha_{14} X_{14} + \alpha_{15} X_{15} + \alpha_{16} X_{16} + \alpha_{17} X_{17} + \varepsilon \quad (1)$$

$$X_7 = -(\beta_1 T_{dis} + \beta_2 T_{deal} + \beta_3 T_{sell}) \quad (2)$$

$$X_8 = \beta_4 * M_1 * P_1 - \beta_5 * C_{dis} \quad (3)$$

其中, α_i 表示居民对可观测影响因素 X_i 的敏感性系数; T_{dis} 表示丢弃或处置垃圾所花费的时间, 单位为分钟; T_{deal} 表示对垃圾整理或分类所花费的时间, 单位为分钟; T_{sell} 表示居民售卖废品所花费的时间, 单位为分钟; M_1 表示人均可回收物产生量, 单位为 kg; P_1 表示可回收物的回收价格, 单位为元/kg; C_{dis} 表示生活垃圾处理费, 单位为元; β_1 、 β_2 、 β_3 、 β_4 和 β_5 均为哑变量, 当居民响应行为中含有这一项时, 取值为 1, 否则取值为 0。

3. 考虑居民响应行为的生活垃圾分类回收多主体系统模块设计与政策模拟仿真模型构建

3.1. 各 Agent 系统模块设计

基于 Anylogic 软件构建考虑居民响应行为的城市生活垃圾分类回收政策模拟仿真模型, 模型包括生活垃圾产生和源头分类子系统、再生资源回收利用子系统、生活垃圾收集清运与处置子系统和政策调控子系统。各子系统对应的主体之间进行动态交互, 并调整行为适应外部环境变化, 以达到各主体的效用最大化。根据对上海市实地调研以及结合 2019 年尉薛菲对上海生活垃圾组分分析数据可知[14], 上海生活垃圾中的有害垃圾理论占比为 1.30%, 占比少且由危废处理厂专门处理, 故本研究中不包含有害垃圾。

3.1.1. 生活垃圾产生和源头分类子系统

城市居民是生活垃圾产生和源头分类子系统的重要参与主体, 也是生活垃圾的产生者和源头分类的第一责任人, 其行为直接影响着生活垃圾产生量及源头分类效果, 其相关属性见表 6。

Table 6. Main attributes of urban residents

表 6. 城市居民主体属性

参数或变量	描述说明
地理位置	按照行政区人口密度随机分布
处理垃圾类型	居民生活垃圾分类回收的响应行为
垃圾产生量	居民的生活垃圾产生量
可回收物产生量	居民的可回收物产生量

3.1.2. 再生资源回收利用企业子系统

再生资源回收利用企业作为生活垃圾分类回收系统中的重要参与主体, 主要负责可回收物的回收与利用, 其行为追求回收买卖差价的利润最大化。同时, 政府为了调动再生资源回收利用企业的积极性, 会给予一定的财政补贴或优惠政策, 也会影响到其行为决策, 具体属性见表 7。

3.1.3. 生活垃圾收集清运与处置子系统

环卫公司在生活垃圾收集清运与处置子系统中负责生活垃圾的前端收集、中端清运和末端处置, 由政府购买服务并接受监管, 要求环卫公司做出较优的策略选择, 具体属性见表 8。

Table 7. Main attributes of renewable resources recycling enterprises**表 7.** 再生资源回收利用企业主体属性

参数或变量	描述说明
地理位置	再生资源回收网点的位置信息
可回收物回收量	从居民回收再生资源的数量
可回收物的回收价格	从居民回收再生资源的价格
可回收物的出售价格	再生资源最终产物出售价格
处理运营成本	再生资源回收利用企业的经营成本

Table 8. Main attributes of sanitation companies**表 8.** 环卫公司主体属性

参数或变量	描述说明
垃圾清运量	随着居民生活垃圾响应行为的改变而调整
垃圾运输成本	收集、清运与处置垃圾过程中的运输成本
垃圾处置成本	垃圾在焚烧或填埋处理过程中发生的成本
垃圾处理产物经济正收益	垃圾在处置过程中产物获利收益
垃圾处理产物环境负收益	垃圾在处置过程中产生的治理环境成本
财政补贴	政府给予环卫公司的财政补贴

3.1.4. 政策调控子系统

政府主体在垃圾分类回收系统中起着引导与调控作用,明确各其他参与主体的责任,其行为将对整个系统以及其他参与主体的行为产生重大影响。

政府行为将作为外部决策变量,在仿真模型中加入政策刺激后,调整居民、环卫公司、再生资源回收利用企业主体的行为,从而改变整个系统的演变方向与过程。经分析在政策调控子系统中设置三个政策决策变量,分别是宣传教育、生活垃圾收费制度与财政补贴。根据具体政策设置不同的政策模拟情景参数,通过调整这些参数的变化情况,定量分析三个政策决策变量在整个系统中的实施效果。

3.2. 模型验证与确认

首先,对于城市居民生活垃圾响应行为总决策效用函数模型,选取上海居民分类回收现状为样本,运用理论建模、实证调研和案例分析,经过多次修正与调整模型,各影响因素均在1%水平上显著,故总决策效用函数合理有效。

其次,仿真模型的初始数据来自尉薛菲[14]、刘汝墨[15]等相关研究、2021年《中国统计年鉴》、政府官网等,调研数据真实可靠。模型在导入数据后,通过Anylogic中模拟运行窗口观察参数变化情况,发现仿真模拟结果基本符合实际情况且能够反映各主体行为选择和交互关系。

再次,对仿真模型进行敏感性分析。敏感性分析是研究模型输出结果变化对其参数变化的敏感程度的方法。选取 X_9 (宣传教育)与可回收物回收量进行敏感性分析,其敏感性分析输出如图2所示。当改变 X_9 取值为0、1、2、3时,模型输出的可回收物回收量约从34.18吨增至61.20吨。由模型敏感性分析结果可以看出,改变参数值,系统输出变化灵敏,说明模型具有可信性。

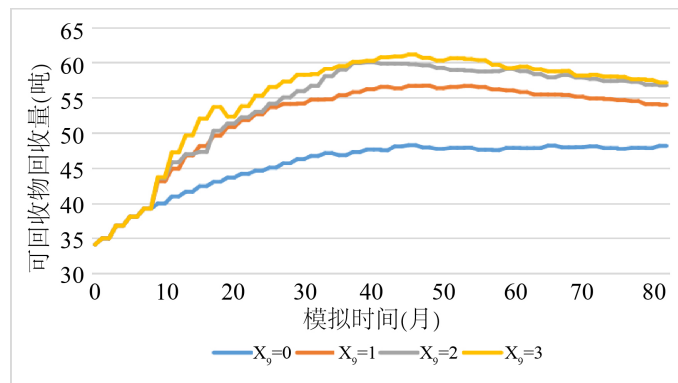


Figure 2. Output diagram of sensitivity analysis of X_9 model
图 2. X_9 模型敏感性分析输出图

4. 考虑居民响应行为的上海生活垃圾分类回收政策模拟仿真模型实例分析

4.1. 模型参数及实例数据确定

本研究以上海市杨浦区为研究案例获取模型初始数据, 如杨浦区人口数量、居民生活垃圾响应行为及花费时间、生活垃圾回收利用率、市场回收价格等。初始数据的获得通过文献和查阅《中国统计年鉴》、杨浦区某小区实地调研展开。

4.1.1. 城市居民 Agent 参数

政策模拟仿真模型选取 1 万人作为仿真人口规模, 干垃圾产生量、湿垃圾产生量、可回收物产生量和生活垃圾收费标准为居民 Agent 需要确定的基本参数。其中, 人均生活垃圾日产生量数据信息如表 9 所示。

Table 9. Data of household garbage production and per capita daily production in Shanghai
表 9. 上海市生活垃圾产生量及人均日产生量数据

年份	常住人口(万人)	生活垃圾清运量总数(万吨)	人均日产生量(kg/人·天)
2015	2457.59	613.20	0.68
2016	2467.37	629.37	0.70
2017	2466.28	743.07	0.83
2018	2475.39	784.73	0.87
2019	2481.34	750.65	0.83
2020	2488.36	868.08	0.96

注: 本表生活垃圾产生量数据用清运量代替。

从表 9 可以看出, 上海市人均生活垃圾产生量整体呈上升趋势, 虽然城市常住人口数量也在不断增长, 但其增长速度远低于生活垃圾产生量增长速度。2020 年上海市生活垃圾产生量有所下降, 是因为 2019 年 7 月 1 日起上海全面实施了《上海市生活垃圾管理条例》所带来的治理效果。考虑到近两年上海市常住人口数量增长趋缓以及生活垃圾产生量有减少趋势, 预计上海市 2021 年人均生活垃圾日产生量可能为 1.00 kg/人·日, 并将其作为后续计算数据的研究中。结合调查问卷以及参考相关文献数据[14], 在去除有害垃圾的理论占比后, 干垃圾、湿垃圾和可回收物的理论占比结果如表 10 所示。目前, 上海市对居民

暂未实行生活垃圾收费制度,参考广州、武汉 5 元/户·月的标准,将生活垃圾清理费设定为 0.064 元/人·天。

Table 10. Theoretical proportion of each component of Shanghai municipal solid waste
表 10. 上海市生活垃圾各成分理论占比

组成成分	理论质量占比(%)
干垃圾	23.03%
湿垃圾	45.50%
可回收物	31.47%
合计	100%

时间花费是影响居民生活垃圾分类回收响应行为的重要参数。根据对居民生活垃圾响应行为现状调研结果可知,三种类型居民生活垃圾响应行为花费的时间范围见表 11 所示。

Table 11. Time spent on garbage disposal (minutes)
表 11. 垃圾处理的时间花费(分钟)

生活垃圾响应行为	T_{deal}	T_{dis}	T_{sell}	模拟取值
混合投放	1~5	5~10	0	均匀分布
分类投放	5~10	5~10	0	均匀分布
分类投放并出售废品	5~10	5~10	20~30	均匀分布

城市居民 Agent 总决策效用函数 U 中最终涉及的 16 个变量和对应的敏感性系数,其数据均来源于前文第 2.2 和 2.3 节。其中,时间花费(X_7)和交售收益(X_8)作为外部影响因素,其取值在 Anylogic 仿真模拟过程中是动态变化的。其余 14 个变量则通过问卷调查获取的 212 个样本作为模型参数取值的范围。

4.1.2. 再生资源回收利用 Agent 参数

选择对位于上海市杨浦区的松花废旧物资回收站进行实地调研。再生资源回收利用主体所需确定的数据信息主要有:每吨可回收物平均回收价格、每吨细分类可回收物平均出售价格、每吨可回收物分类回收价格、每吨可回收物最终产物平均出售价格以及经营成本,并根据对废旧物资回收站点的调研以及结合相关文献数据[14]计算得出,结果如表 12 所示。

Table 12. Investment and income accounting of waste material recycling site (Yuan/ton)
表 12. 废旧物资回收站点投入与收益核算(元/吨)

变量名	取值
每吨可回收物平均回收价格	228
每吨细分类可回收物平均出售价格	1000
每吨可回收物分类回收价格	1000
每吨可回收物最终产物平均出售价格	2920
经营成本	249

4.1.3. 环卫公司 Agent 参数

环卫公司主体所需确定的数据信息主要有:干垃圾、湿垃圾和可回收物的收转运成本、干垃圾和湿

垃圾的末端处置成本、平均处理每吨干垃圾产物收益与负收益、平均处理每吨湿垃圾产物收益与负收益以及财政补贴。根据对相关单位调研以及结合文献数据[14]计算出所需要的数据信息, 结果如表 13 所示。

Table 13. Main income accounting of sanitation company (Yuan/ton)
表 13. 环卫公司主体收益核算(元/吨)

变量名	取值	
收转运成本	干垃圾	255.36
	湿垃圾	214.47
	可回收物	144.6
末端处置成本	干垃圾	290.29
	湿垃圾	361.59
平均处理每吨干垃圾产物收益	119	
平均处理每吨湿垃圾产物收益	79.2	
平均处理每吨干垃圾产物负收益	24	
平均处理每吨湿垃圾产物负收益	28.29	

4.2. 政策仿真模拟及结果分析

4.2.1. 仿真实验情景设计

政府政策在仿真模型中作为外部决策变量, 设置三个政策决策变量: 宣传教育、定额收费与财政补贴。本研究将组合这三种政策情景, 通过调整变量的参数值并观察其对整个系统演化的影响, 从而探索出能够提升各参与主体行为效用的最优政策方案。

政策组合情景以一个月为模拟周期, 参考上海市“十四五”规划的时间, 设置仿真模拟运行时间为 2021 年 1 月 1 日至 2025 年 12 月 31 日, 共计 60 个模拟周期。仿真模型在初始情景下运行两个周期, 然后引入政策组合情景变量并以一个月为周期不断演化, 最后使各主体的行为达到稳定状态。仿真模型 Main 界面设计如图 3 所示。

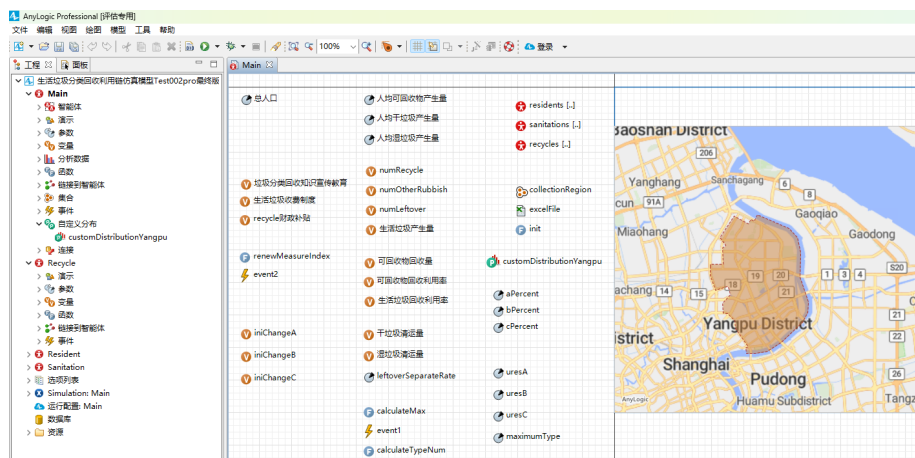


Figure 3. Development interface design of the Main module of the simulation model
图 3. 仿真模型 Main 模块开发界面设计

4.2.2. 仿真结果及分析

从图4中看出,在政策组合情景的刺激下,混合投放类型居民(TypeA)的数量从4335人减到1935人,整体呈持续下降的趋势,前40个月的下降速度较快,后面逐渐趋缓;而分类投放类型居民(TypeB)的数量从3172人增至3185人,整体变化不大;分类出售类型居民(TypeC)的数量从2493人增至4880人,整体以较快的速度持续增加。这是居民在政策组合情景下以及影响分类回收行为的内外部因素共同作用下的动态演化结果。

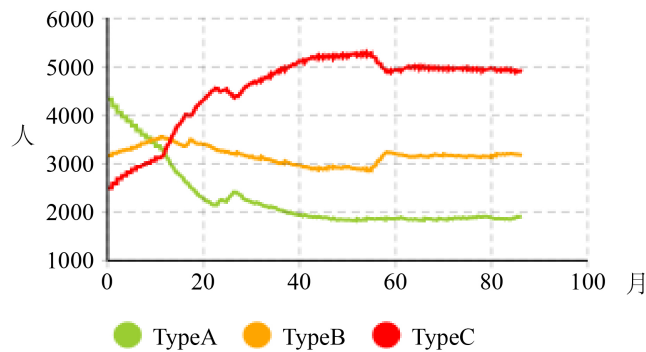


Figure 4. Changes in the number of residents in different types of cities under the policy combination scenario

图 4. 政策组合情景下不同类型城市居民数量变化

上述三种类型居民数量发生变化的原因是,随着仿真模型中加入宣传教育、定额收费和财政补贴组合政策的刺激,影响居民生活垃圾分类回收响应行为的观测变量 X_9 、 X_8 、 X_{14} 、 X_{15} 和 X_{17} 发生变化。其中, X_9 的观测值变大,推动TypeA类型的居民向TypeB、TypeC转变; X_8 因为居民每月需要定额支付生活垃圾处理费使观测值变小,但TypeC类型的居民有出售废品的收益,相对于TypeA、TypeB来说,受到的影响最小。此时,在Anylogic软件中每周期计算更新居民决策效用 U 时, X_8 变小从而使 U 变小,居民寻求决策效用 U 的最大化,TypeA、TypeB类型的居民开始改变其行为,逐渐分类投放垃圾并出售废品。在财政补贴和TypeC类型居民数量增加的叠加作用下,再生资源回收利用企业的利润整体呈持续增长趋势,如图5所示。利润的持续增加且稳定,从而带动了再生资源回收利用企业参与生活垃圾分类回收的积极性,促进居民周围分类回收配套设施不断完善,使 X_{14} 、 X_{15} 和 X_{17} 的观测值变大,则决策效用 U 增大。

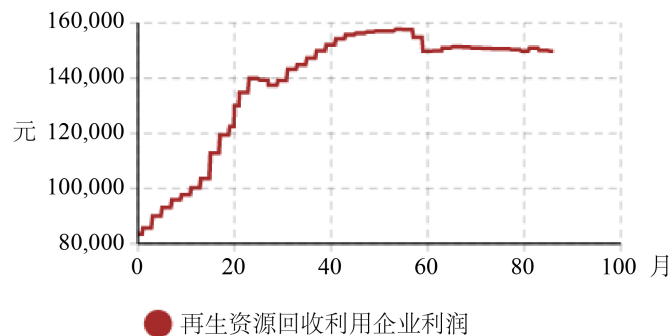


Figure 5. Profit changes of renewable resources recycling enterprises under the policy mix scenario

图 5. 政策组合情景下再生资源回收利用企业的利润变化

图 6~8 分别显示了在政策组合情景下, 可回收物回收量、生活垃圾回收利用率和干垃圾清运量的变化情况。其中, 可回收物回收量约从 34.18 吨增至 57.80 吨, 呈不断上升趋势; 生活垃圾回收利用率从 40% 提高到约 60%; 干垃圾清运量约从 142.97 吨减至 119 吨, 呈逐渐下降趋势。

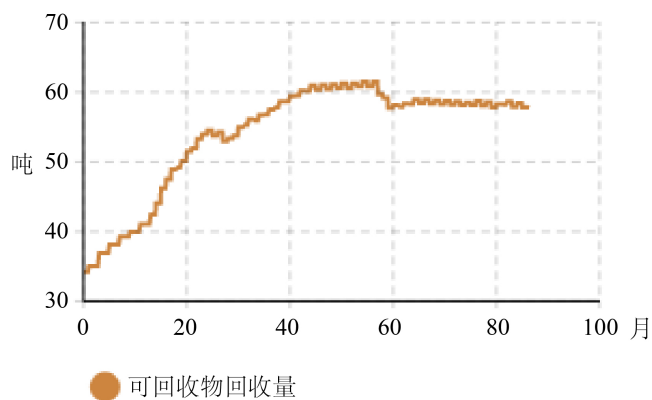


Figure 6. Changes of recyclables under the policy combination scenario

图 6. 政策组合情景下可回收物回收量的变化

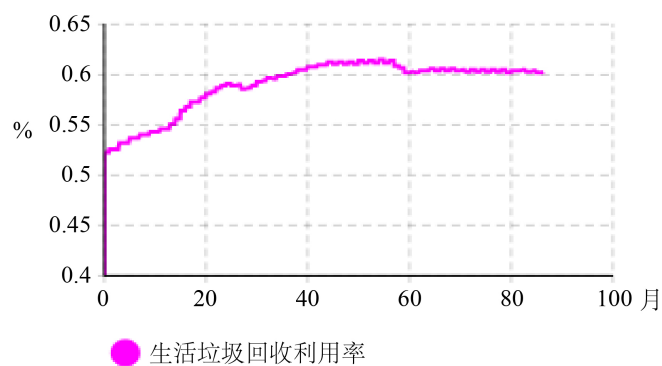


Figure 7. Changes in the utilization rate of household garbage recycling under the policy combination scenario

图 7. 政策组合情景下生活垃圾回收利用率的变化

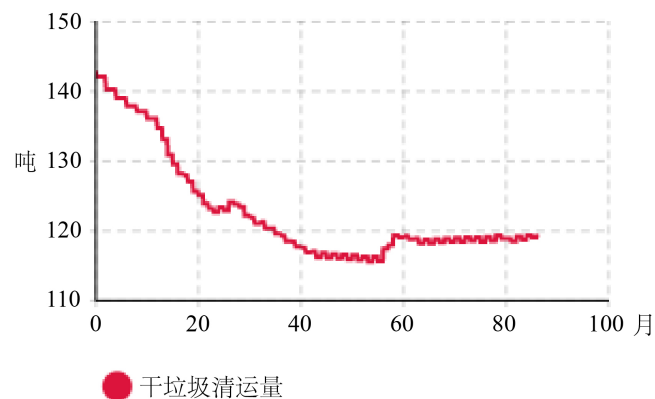


Figure 8. Change of dry garbage collection volume under the policy combination scenario

图 8. 政策组合情景下干垃圾清运量的变化

综上所述, 在政策组合情景下, 提高了居民的效用和再生资源回收利用企业的利润, 同时促进了政府生活垃圾减量化、资源化、无害化和低成本化目标的实现, 达到多主体利益平衡状态。

5. 生活垃圾分类回收系统中各主体协同治理建议

生活垃圾分类回收系统只靠单独的参与主体, 是无法有效治理生活垃圾带来的严峻问题。城市居民、环卫公司、再生资源回收利用企业、政府要在各司其职的同时, 在政府领导下开展良好的合作与交流, 整合多元力量, 推动生活垃圾分类回收系统协同治理。

首先, 形成以政府为主导, 构建分工合作、协调统一的治理格局。政府可以实施绿色采购和 PPP 模式, 引入市场与社会资本, 在政府常态化监督下使双方能够获得更多参与生活垃圾分类回收系统的机会。其次, 推动生活垃圾治理的“两网融合”运营模式, 要完善低价值再生资源产业的循环运作机制, 并出台相应的财政补贴政策。

其次, 鼓励环卫公司和再生资源回收利用企业进行商业模式创新。借助“互联网+”进行商业模式创新, 依托互联网平台拓宽再生资源回收渠道。在政府的统筹下, 构建生活垃圾分类回收系统的信息管理数据库, 整合储存相关信息, 并进行信息公开, 为协同治理提供信息支持。

最后, 为居民持续参与生活垃圾治理提供动力。政府可以和互联网平台企业合作, 通过公益广告、微信公众号、开发 APP 等途径推送垃圾分类的知识, 引导居民提高分类的准确性和再生资源回收利用意识。同时, 政府制定差异化的按量征收生活垃圾处理费制度, 组织专家, 综合考虑居民、再生资源回收利用企业等主体的利益, 确定合理的费用率并进行信息公开。不仅可以缓解生活垃圾治理成本所带来的资金压力, 还可以促进生活垃圾的减量和分类回收, 提高生活垃圾的资源化利用价值。

基金项目

上海市哲学社会科学基金资助项目“城市生活垃圾智慧治理的国际经验与上海实践研究”(2019BCK011)。

参考文献

- [1] Sidique, S.F., Joshi, S.V. and Lupi, F. (2010) Factors Influencing the Rate of Recycling: An Analysis of Minnesota Counties. *Resources, Conservation and Recycling*, **54**, 242-249. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2009.08.006>
- [2] Janmool, P. (2017) Application of Protection Motivation Theory to Investigate Sustainable Waste Management Behaviors. *Sustainability*, **9**, 1079. <https://doi.org/10.3390/su9071079>
- [3] Wang, Y. and Hao, F. (2020) Public Perception Matters: Individual Waste Sorting in Chinese Communities. *Resources, Conservation and Recycling*, **159**, 104860. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104860>
- [4] Babaei, A.A., Alavi, N., Goudarzi, G., et al. (2015) Household Recycling Knowledge, Attitudes and Practices towards Solid Waste Management. *Resources, Conservation and Recycling*, **102**, 94-100. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.06.014>
- [5] Almasi, A., Mohammadi, M., Azizi, A., et al. (2019) Assessing the Knowledge, Attitude and Practice of the Kermanshahi Women towards Reducing, Recycling and Reusing of Municipal Solid Waste. *Resources, Conservation and Recycling*, **141**, 329-338. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.10.017>
- [6] Ivens, U.I., Lassen, J.H., Kaltoft, B.S., et al. (1998) Injuries among Domestic Waste Collectors. *American Journal of Industrial Medicine*, **33**, 182-189. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0274\(199802\)33:2<182::AID-AJIM10>3.0.CO;2-X](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0274(199802)33:2<182::AID-AJIM10>3.0.CO;2-X)
- [7] 徐林, 凌卯亮, 卢星杰. 城市居民垃圾分类的影响因素研究[J]. *公共管理学报*, 2017, 14(1): 142-153.
- [8] Wadehra, S. and Mishra, A. (2018) Encouraging Urban Households to Segregate the Waste They Generate: Insights from a Field Experiment in Delhi, India. *Resources, Conservation and Recycling*, **134**, 239-247. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.03.013>
- [9] Zheng, B., Wan, S., Wen, J., et al. (2021) Do Public Awareness and Behaviors in Rural Domestic Waste Classification

Help Reduce COVID-19? A Case Study in China. *Polish Journal of Environmental Studies*, **30**, 3897-3906.
<https://doi.org/10.15244/pjoes/131008>

- [10] Malmir, T. and Tojo, Y. (2016) Municipal Solid Waste Management in Tehran: Changes during the Last 5 Years. *Waste Management & Research*, **34**, 449-456. <https://doi.org/10.1177/0734242X16632056>
- [11] Cui, T., Su, X. and Zhang, Y. (2021) Study on Compulsory Classification Management and Behavior Synergy of Municipal Solid Waste. *Sustainability*, **13**, 6265. <https://doi.org/10.3390/su13116265>
- [12] 王灿, 王德, 朱玮, 宋姗. 离散选择模型研究进展[J]. *地理科学进展*, 2015, 34(10): 1275-1287.
- [13] 孟小燕. 城市生活垃圾分类回收系统多主体行为模拟与政策分析[D]: [博士学位论文]. 北京: 清华大学, 2017.
- [14] 尉薛菲. 中国生活垃圾分类产业的经济学分析[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国社会科学院研究生院, 2020.
- [15] 刘汝墨. 城市居民生活垃圾分类回收体系研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京邮电大学, 2021.