

DOI: 10.5846/stxb202011012795

孟小燕, 张宇婷, 王毅. 城市生活垃圾综合管理决策研究进展. 生态学报, 2021, 41(16): 6303-6313.

Meng X Y, Zhang Y T, Wang Y. Research process on decision-making of comprehensive management of municipal solid waste. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(16): 6303-6313.

城市生活垃圾综合管理决策研究进展

孟小燕¹, 张宇婷², 王毅^{1,3,*}

¹ 中国科学院科技战略咨询研究院 可持续发展战略研究所, 北京 100190

² 清华大学 环境学院, 北京 100084

³ 中国科学院大学 公共政策与管理学院, 北京 100049

摘要:城市生活垃圾综合管理主要是指选择合适的方案、政策手段等来实现特定的管理目标。选择适宜的研究方法是开展城市生活垃圾管理科学决策的重要基础和保障。综述了近年来该领域常用的相关研究方法和研究进展, 总结分析了以统计分析、多准则决策分析、全生命周期分析、费用效益分析等为代表的传统数学模型方法和以系统动力学、基于 Agent 的建模等为代表的复杂系统模拟方法两大类方法的适用场景、优缺点和研究进展, 分析了未来该领域研究的趋势和需重点关注的方向。研究发现: 传统的数学模型方法被广泛应用于生活垃圾管理决策领域, 成为支撑决策的重要研究工具, 但这类方法通常大多以单一主体为研究对象, 难以解释各种因素对其它主体及整个生活垃圾管理系统的作用, 且大多为静态的或对某个或某几个时间点进行分析, 容易忽略系统性和系统中各主体间的非线性关系、行为的交互作用及随时空的动态变化等。未来研究需充分关注城市生活垃圾管理系统的复杂性和系统不同主体间的行为交互作用, 加强系统模拟模型开发, 开展系统性政策评估分析等, 为城市生活垃圾精细化管理决策提供科学支撑。

关键词:城市生活垃圾; 数学模型; 复杂系统; 管理决策; 研究进展; 发展前景

Research process on decision-making of comprehensive management of municipal solid waste

MENG Xiaoyan¹, ZHANG Yuting², WANG Yi^{1,3,*}

¹ Division of Sustainable Development Strategy, Institutes of Sciences and Development, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

² School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China

³ School of Public Policy and Management, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: The integrated management of municipal solid waste mainly refers to the selection of appropriate plans, policy tools, etc. to achieve specific management goals. Appropriate research methods serve as an important foundation and ensure scientific decision-making in municipal solid waste management. This paper reviews the related research methods commonly used in this field in recent years as well as the research progress, summarizes and analyzes the applicable scenarios, advantages and disadvantages, and research progress of the conventional mathematical model methods represented by statistical analysis, multi-criteria decision analysis, full life cycle analysis, cost-benefit analysis, etc., and the complex system simulation methods represented by system dynamics and agent-based modeling, etc. The future research trends in this field and the directions are analyzed. The study found that traditional mathematical model methods were widely used in the field of municipal solid waste management and became an important research tool to support decision-making. However,

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(71904184); 国家重点研发计划“固废资源化”重点专项项目(2018YFC1901505); 中国科学院科技战略咨询研究院院长青年基金项目(E0X3821Q)

收稿日期: 2020-11-01; 网络出版日期: 2021-05-21

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangyi@casisd.cn

most of these methods usually only take a single subject as the research object, and cannot explain the effects of various factors on other subjects and the entire domestic waste management system. Further, these methods, most of which are static, analyze a single or several time spans, but downplays the system and the nonlinear relationship between the subjects in the system, the interaction of behavior, and the dynamic changes along with time and space. Future researches need to pay full attention to the complexity of the municipal solid waste management system and the behavioral interaction between different subjects of the system, strengthen the development of system simulation models, carry out systematic policy evaluation and analysis, etc., to provide support for the decision-making of refined management of municipal solid waste.

Key Words: municipal solid waste; mathematical model; complex system; management decision-making; research progress; development prospects

城市生活垃圾管理是城市生态系统管理的重要内容之一,其管理模式及成效对城市代谢过程的优化具有举足轻重的作用。生活垃圾管理贯穿生活垃圾产生、收集、运输、循环利用处理和最终处置的各个环节,涉及生产者、运输者、处置者等多个主体,与水污染、大气污染、土壤污染、人体健康、资源代谢等密切相关,具有很强的系统复杂性,管理难度较大^[1]。在开展“无废城市”试点建设^[2]、全面推进生活垃圾分类的新形势下,我国城市生活垃圾面临更科学、更精细的管理需求。因此,合理选择研究方法对城市生活垃圾管理科学决策具有重要意义。生活垃圾综合管理决策是指“选择、应用合适的技术、工艺和管理程序达到特定的管理目标”,实现环境有益、经济成本可承受和社会可接受^[3]。

为支撑该领域科学合理决策,各国学者运用多种模型方法开展了大量研究,积累了丰富的研究经验。总结而言,常用方法可以分为两大类:第一类是传统的数学模型方法,用于模拟垃圾产生量^[4]、垃圾丢弃行为^[5]、垃圾收运情况或整体评估生活垃圾管理措施效果;第二类是基于复杂系统理论的系统仿真建模方法,将生活垃圾管理视作复杂系统,以系统动力学^[6]、基于主体建模^[7]等为代表模拟各主体与外界环境的互动关系。模型选择及运用与系统认知直接相关:在单独关注产生、丢弃、收运、处理处置等环节时,基于统计数据演变规律、变量影响机制探讨等构建数学模型方法;在认识到生活垃圾复杂系统特征后,引入系统动力学、基于主体建模等复杂系统模拟方法仿真主体行为与环境交互。总结各类城市生活垃圾管理决策方法概况,如图1所示。

基于以上分类标准,本研究分别梳理两类方法的发展历程、适用场景、优缺点等,分析模型发展前景,在全面推行生活垃圾分类、推进产业链协同共治的新形势下,为进一步促进城市生活垃圾综合管理决策研究提出建议。

1 数学模型方法

数学模型方法可用于模拟评估城市生活垃圾产生、收运、分类、回收处理处置全流程各环节,常见方法包括统计分析方法、生命周期评价^[8]、费用-效益分析^[9]、多准则决策分析法^[10]、绩效评价体系^[11]等。数学模型方法的基本机理是抽象化评价问题,利用符号、函数关系等描述关注对象与其他因素之间的变化关系,实现评估、预测等目的。

1.1 统计分析方法

统计分析方法通常用于城市生活垃圾产生现状分析与预测。城市生活垃圾的产生量及成分是综合管理的基础信息,可用于支撑城市收集、运输、存储、处理处置相关基础设施布局与规划设计。城市生活垃圾产生量研究可分为两类:(1)依据过往产生量数据进行分析与趋势外推,如灰色模型、时间序列分析等。朱家明等基于2005—2018年安徽省垃圾产量数据建立GM(1,1)模型预测垃圾产生总量^[12];全延增等基于2013—2017年天津市生活垃圾清运量及无害化处理量数据构建灰色分数阶FGM(1,1)模型预测未来3年生活垃圾清运量及无害化处理量^[13];熊华平等基于湖北省2007—2013年城市生活垃圾清运量建立新陈代谢GM(1,1)

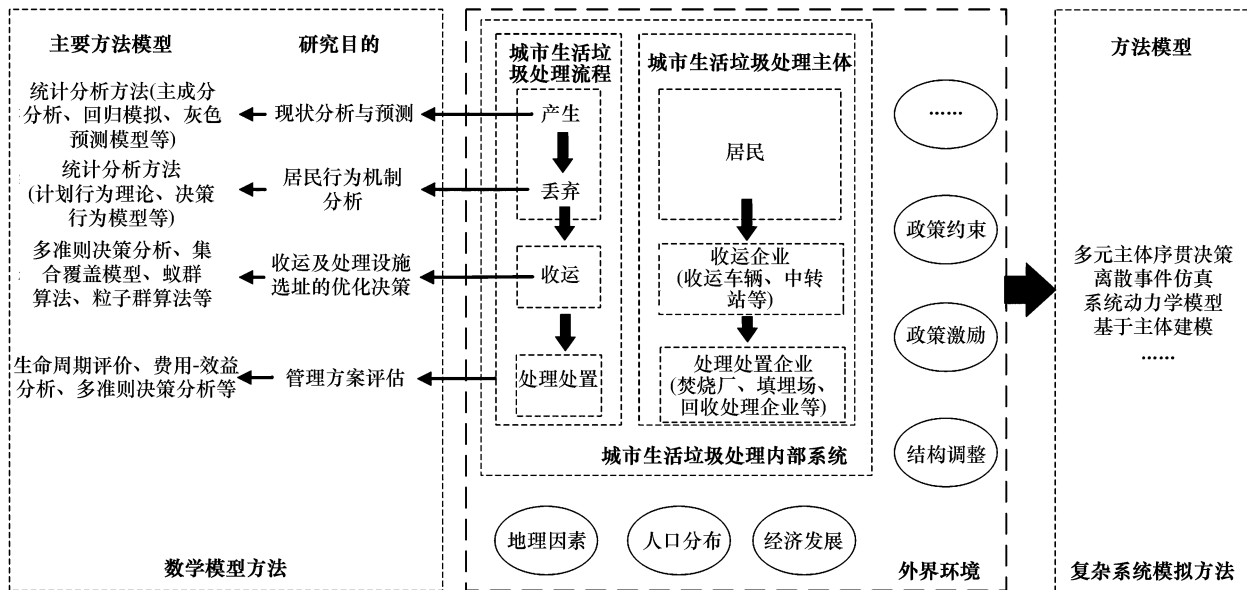


图1 城市生活垃圾管理决策方法概览

Fig.1 Overview of decision-making of municipal solid waste management

模型预测未来七年城市生活垃圾清运量^[14]。该类方法历史已久,但近年来仍被采用。其优势为适用于数据离散有限、序列变化趋势明显情景,符合生活垃圾产生量数据特征,高效易操作;但该方法对过往数据质量及平滑度依赖大,准确性难以保证,多用于短期预测,无法探究众多因素影响机制。(2) 识别产生量的影响因素,分析其与社会经济的互动关联,根据各因素变动情况预测产生量,最常见的方法为回归分析。生活垃圾产生与经济增长具有明显关联,杜森等基于北京市 16 个区 2009 年—2016 年面板数据开展实证研究,发现城市生活垃圾产生量与人均 GDP 呈现“倒 N 型”EKC 曲线^[15]。汪坪垚等进一步将影响因素扩展为 GDP、社会消费品零售总额和人均可支配收入,采用多元线性回归预测大连市生活垃圾人均日产生量^[16]。除经济发展外,其他社会生活因素陆续纳入考量。杨小妮等按照人口、经济发展水平、居民生活水平、基础设施水平 4 个层面分别选取指标,建立多元回归和 ARIMA 模型预测西安市城市生活垃圾产生量^[17]。此类国际研究中,区域差别导致影响因素各异。Atul Kumar 基于家庭规模、总收入、教育水平、职业和厨房煤炭用量预测印度生活垃圾产生量^[18]。总体而言,常见影响因素为 GDP^[19-20]、家庭收入^[21]等,另有研究关注气温^[22]、失业率^[23]、人口年龄组成^[24]、市容环境卫生费用^[25]等变量。除分析与预测总体产生量外,分析生活垃圾组分也具有研究意义^[26]。杜吴鹏等作为早期研究代表,关注南北方、大中小城市等大范围地理区域的生活垃圾组分区别^[27];后续研究不断精细化,李昂分析小区定位与生活垃圾物理成分规律发现小区物业费与厨余垃圾占比成反比^[28]。相比总量研究,组分研究较为零散,组分占比分布规律及影响因素探索尚不深入。

统计分析方法还可用于分析城市居民生活垃圾处理行为机制。居民是产生生活垃圾和参与垃圾分类回收的关键主体,其行为选择直接关系城市垃圾管理工作的成效。目前,国内外关于居民环境行为与选择的研究^[29-30]可以分为三类:(1) 基于环境社会学的研究方法。从微观个体与社会环境系统的相互作用关系出发,认为个体的观念、行为选择由社会和技术系统发展历程及状况决定,多用于个体行为定性分析。(2) 基于环境心理学的研究方法,引入非理性因素对个体行为的作用。最主要的理论基础为规范行为理论、理性行为理论、计划行为理论和 A-B-C 理论^[31-32]。其中最常见的计划行为理论(The theory of planned behavior, TPB)由 Ajzen 于 1985 年在理性行为理论基础上拓展提出^[33],强调个体行为受主观态度、社会规划和感知行为控制的影响。已有很多学者运用 TPB 理论对垃圾分类回收行为进行研究^[33-34],Nguyen 等发现个人道德规范是促进居民参与分类回收的重要影响因素;Park 等表明居民在看到邻居或同伴进行垃圾分类回收时,自己的行为也

会受到带动影响^[35]。但 TPB 理论模型框架仅考虑个体主观因素,对将行为意愿转变为真正行动产生干扰的外部条件(情境)因素考量不足。为此 Stern 和 Oskamp 在 1987 年构建了一个复杂环境行为模型^[36],提出环境行为是由外部情境因素(包含社会制度、具体结构及经济激励等)和主观因素(如环境态度、信仰、相关知识信息和行为意向等)共同作用的结果。在此基础上,Guagnano 等在 1995 年提出 A-B-C 理论^[37],指出居民生活垃圾回收利用行为(Behavior, B)同时受居民态度(Attitude, A)和外部条件(Condition, C)影响^[38],并将外部条件作为至关重要的因素。A-B-C 理论成为首个面向生活垃圾回收行为建立的理论,对以往以心理学为主的生活垃圾回收行为研究进行了扩展补充。(3) 基于微观经济学的效用最大化理论。以离散选择模型为典型代表^[39],其基本假设微观个体在做出行为选择决策时,会对各备选项的“效用”进行理性比较并选择“效用”最高选项^[40],“效用”可理解为微观个体总体“满意度”或者“好”的程度。但社会规范、心理状态等众多非理性因素的干扰,使得该理论不一定总是成立,为突破局限后续研究者不断完善模型,如兼顾个体理性与非理性因素影响构建居民垃圾处理行为决策效用函数模型^[41]。

1.2 多准则决策分析法

多准则决策分析法(Multi-Criteria Decision-Making, MCDM)通过评估比较各备选方案的多个属性,比选得到最佳方案。多目标优化、层次分析法、功效系数法等是 MCDM 法的常用求解方法。

MCDM 可用于城市生活垃圾收运环节优化。城市生活垃圾种类繁多、分布分散,垃圾产生后的收集、运输、转运等收运环节优化需要关注。早期研究多关注生活垃圾处理设施选址优化,Yurteri 等最早提出用线性规划确定中转站位置^[42],随后模糊综合评价^[43]、层次分析^[44]、集合覆盖模型与整数规划相结合^[45]等方法相继运用,以垃圾收运系统费用最小为目标选定中转站位置。除将设施作为单独节点进行布局优化,垃圾运输车辆调度及路径优化也会影响生活垃圾收运效率。陈彦等依据垃圾收集点位置绘制网络拓扑图,以车辆行走距离最小为目标抽象为 VRP 问题,构建混合整数规划模型探索收运路线优化^[46]。不论是选址优化或路径优化,优化目标及约束条件在不断更新。Ombuki-Berman 基于车辆工作负荷和环境效益进行优化,减小车辆使用数量和行驶时间^[47];Li 等将车辆总费用最小化作为目标函数构建调度 NP 模型^[48];随着对垃圾收运系统多目标优化的认知提高,李海君进一步考虑了同时优化回收路径及选址的经济、社会、环境负效应,将其作为综合目标设计调度模型^[49]。随着科技发展与运用,收运环节拥有了海量数据和智能技术支撑,如利用 GIS^[50]、RFID、GPS^[51]实时追踪定位、物联网精准监管等为多目标优化获取基础数据。

关注收运环节的研究已较为成熟,但作为连接前端产生与终端处理的中间环节,中转站及车辆容量、布局等都依赖于垃圾产生量与处置手段的选择,单独研究该环节无法得出系统最优方案。为此,MCDM 也用于评估城市生活垃圾管理全过程的系统方法。陈三清运用层次分析法的模糊综合评价法(AHP-FCE)对深圳市宝安区 5 种垃圾分类方案进行比选,得到适于宝安区现阶段发展水平的居民区垃圾分类方案^[52]。Yap 和 Nixon 对印度和英国市政垃圾能源化利用的几种备选方案进行比较分析,认为气化和厌氧消化分别是英国和印度市政垃圾能源化处理最佳方案^[53]。但评价指标权重确定难以形成客观统一标准,MCDM 存在主观性与局限性。

1.3 费用-效益分析法

费用-效益分析法(Cost-Benefit Analysis, CBA)将各种政策或备选方案的全部直接或间接成本及效益定量货币化,用于评价其可行性或确定优先次序,为决策者提供科学依据^[54]。其中成本包括政策或备选方案实施的经济成本、自然资源消耗或污染物排放带来的环境成本,效益包括经济收益及环境质量改善带来的不直接用货币价值表示的收益等。CBA 广泛运用于城市生活垃圾分类回收管理方案或政策评价^[55],如 Yang 等使用 CBA 评估优化城市生活垃圾处理系统^[56],程云飞等对孝感市居民区不同垃圾分类回收管理方法开展比较^[57];刘学之等利用 CBA 分析得出深圳市“源头分类+全量焚烧”生活垃圾处理模式最具经济效益^[58]。CBA 优势在于可体现行为选择的理性,以衡量个人为获取一定收益的支付意愿或弥补一定损失的赔偿预期。但城市生活垃圾管理决策涉及众多利益相关主体,CBA 模型难以简单表征;有研究者构建生活垃圾管理社会成本评估方法,用以计算全部社会成本^[59],但在将环境资源等问题货币化过程中,存在模型参数不准确、追求经济

利益最大化而忽视环境问题的风险。

1.4 生命周期评价法

生命周期评价法(Life cycle assessment, LCA)被作为评价环境影响及效应的重要工具广泛应用于生活垃圾管理决策领域^[60]。常用于分析某类废物处理与回收利用的环境效应,如废玻璃回收利用^[61]、废纸回收利用^[62]、PET 瓶回收利用^[63]和废物资源化途径^[64]。除针对具体废物品类外,也有研究采用 LCA 评估生活垃圾管理系统成效,曹艳乐等分析了不同生活垃圾分类收集管理模式的效益^[65],赵岩等利用 EASTWASTE 模型对北京某城区当前生活垃圾系统与规划系统下垃圾处理过程进行了生命周期评价^[66]。传统 LCA 在生活垃圾管理决策研究领域使用较为成熟,但 LCA 重点评估环境影响指标,忽略了经济效益等分析;原始数据需求量较大;系统边界不一致可能导致结果不可比且存在“截断误差”^[67];属于静态分析方法,缺乏灵活性、时效性等。针对以上不足, LCA 拓展出其他模型,如生命周期成本分析(Life cycle costing, LCC)^[68-69]、混合生命周期评价(Hybrid life cycle assessment, HLCA)^[70]用于评估含经济效益在内的综合效率;环境投入产出—生命周期评价(Environmental Input-Output Life Cycle Assessment, EIO-LCA)模型将 EIO 追溯上游获知环境影响隐含流动的优势与 LCA 联合,突破边界划定带来的不准确性等。

1.5 其他数学模型方法

除以上常见数学模型外,物质流分析(Material Flow Analysis, MFA)通过模拟经济系统与生态系统间物质流动规律,来核算输入、输出经济系统的物质流量和存量^[71]。该方法已广泛运用于模拟生活垃圾代谢情况^[72]、核算生活垃圾回收流向^[73]、支持生活垃圾管理多目标分析决策^[74]等研究中。

近年来,随着智能计算技术的发展,在传统数学模型基础上出现了新算法、新技术在城市生活垃圾管理决策中的最新尝试。如运用模糊数学理论构建全新的生活垃圾防治指标^[75],运用遗传算法迭代优化生活垃圾设施选址^[76],运用物体识别、文字识别和大数据分析技术支持垃圾智能处理系统^[77],开发基于卷积神经网络算法的智能垃圾分类系统提高生活垃圾分类准确率及效率^[78]等,这些研究体现了在生活垃圾高效精细管理需求下数学模型方法的发展趋势。

2 复杂系统模拟方法

城市生活垃圾综合管理体系涵盖众多主体和环节,互相关联;同时受到经济发展、政策干扰等外界因素影响,这些因素共同决定生活垃圾管理效果。随着对综合管理决策的认知不断提高,数学模型难以完全满足需求,研究者开始探索复杂系统模拟在管理决策中的应用。

复杂系统是一个社会(Society),其成员称为主体(Agent),主体具有自治性、适应性、主动性、可通信性和反应能力;主体间存在交互作用及信息、物质和能量的交换^[79]。复杂适应系统(Complex Adaptive System, CAS)是复杂系统中最具代表性的一类^[80],最早在 1995 年由 Holland 提出,认为系统中各主体的主动性及主体与环境的相互作用是促使系统演化的根本原因。涌现(Emergence)是复杂系统理论的中心概念^[81],指多个要素构成一个新系统后可得到以前没有的性质,使得系统整体功能表现大于各主体表现之和,涌现性是系统中各主体之间非线性交互作用的结果。

复杂适应系统由若干元素组成,元素间存在交互作用,包含大量非线性关系,整体系统行为特征不是由单个元素特征简单线性加和,因此很难使用以往数学模型方法进行定量表征和分析。复杂系统模拟方法的基本机理是,借助计算机建模技术,把复杂系统中各个主体之间的非线性关系转化为可执行的程序,以模型程序自动运行的方式推演模拟系统,从而能以简化的方式对那些实际中的需要长时间演化的系统进行动态仿真,实现对复杂系统中主体间交互作用及其带来的系统涌现进行模拟分析。目前,针对复杂系统的建模方法主要有系统动力学建模(SD)、基于智能体/主体建模(AB)、基于过程建模的离散事件仿真(DE)等经典方法。每种建模方法都有其适用的抽象层级范围,如图 2 所示。

系统动力学模型适用于较高的抽象层次,例如经济、社会系统、生态系统等,已在这些领域的决策建模中

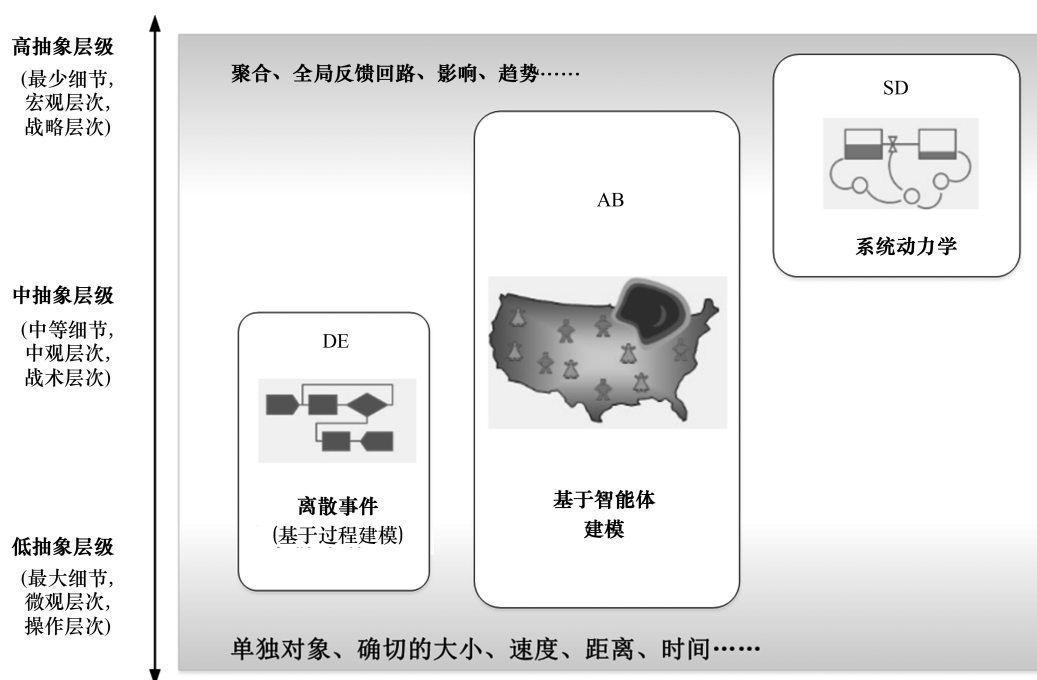


图2 复杂系统仿真建模的主要方法

Fig.2 The main methods of complex system simulation modeling

得到了广泛应用;基于主体的建模适用于中高抽象层级,如项目管理、交通、供应链、经济社会系统等领域;离散事件仿真方法主要适用于中低层级的建模,如行人活动、微观交通系统、机场车站、控制系统等领域。城市生活垃圾管理系统符合复杂适应系统特征,包括元主体序贯决策^[82]、系统动力学、基于主体建模等方法常用于模拟分析城市生活垃圾管理系统。

2.1 系统动力学模型

20 世纪 50 年代,以麻省理工学院福雷斯特教授为首的研究组创立了系统动力学模型方法 (System Dynamics, SD)^[83],该方法是一种基于反馈机制的系统分析方法,将复杂系统中存在的各子系统之间的关系、子系统与外部环境的关系等用函数或微分方程表达,主要应用在复杂系统随时间变化而产生的行为模式的研究中,该方法认为行为的动态变化是系统中反馈结构随时间变化的结果。在环境领域,SD 方法被广泛应用于资源管理^[84]、可持续发展评估^[85]等。在城市生活垃圾管理研究中,SD 分析可用于分析垃圾产生量^[86-87],如张蕾等运用 SD 分析影响垃圾产生量的各因素关系并预测深圳市生活垃圾产生量^[88];SD 更多运用于模拟评估生活垃圾管理政策的效果,代峰等关注垃圾焚烧发电,运用 SD 对三方进化博弈过程进行动态模拟仿真^[89];Cesar, Augusto 等为巴西 23 万名居民构建 SD 模型并为 10 年后生活垃圾管理进行情景设置与评估^[90]。其典型优势在于可以模拟复杂系统随时间变化的线性及非线性关系,但也存在一定局限。如只能模拟可以用函数或微分方程进行表达的系统中各主体的反馈机制,无法表达不能用函数方程表达的交互作用机制等。

2.2 基于主体的建模方法

主体 (Agent) 的概念最早由麻省理工学院计算机学家及人工智能学科创始人之一 Minsky 在其 1986 年出版的《思维的社会》(The Society of Mind)中提出。他认为社会中的各 Agent 之间通过协议能够得到某问题的解,同时认为 Agent 具有智能性和交互功能^[91]。目前 Agent 的准确定义尚未达成统一,但大多研究者认为 Agent 具有自治性、主动性、交互性和社会性等属性。由于复杂系统结构复杂,内部包含大量交互成分,且交互频繁,传统的建模方法(如解析法、数值分析法、归纳推理法等)已不能解决复杂系统的研究问题,基于 Agent 与多 Agent 的建模和仿真方法 (Multi-Agent Based Modeling and Simulation, MABMS) 被认为是最具活力、

最有效的研究方法。这种方法将 CAS 系统中的各主体抽象为各 Agent,通过刻画主体的行为响应和主体间的交互作用机制,对系统的整体行为进行模拟,是一种自下而上的建模方法。

基于主体的模型(Agent Based Model, ABM)包含三个元素:Agent、环境及交互作用。每个 Agent 都有信息接收、信息输出(数值或函数)的功能,通常用多个控制变量、决策目标、决策函数、行为规则来刻画;环境定义 Agent 的感知条件和行动对象,无自主行动但是 ABM 仿真中必不可少的部分;交互作用是 Agent 协调协作的基础,其核心是消息传递,常见形式如 Agent 之间收发消息直接交流或模仿蚁群利用信息素传递信息调节群体行为等。基于主体的模型对应三类建模活动:行为模型、环境模型及调度模型,分别描述 Agent 感知行动、环境互动演化及二者耦合。

目前基于主体的建模方法已被广泛应用在社会系统^[92]、电力市场、供应链研究^[93]、碳排放交易^[94]等,在环境领域也逐渐运用于水资源管理、能源政策分析^[95]。近年来,国内外学者开始采用主体建模方法应对城市固体废物综合管理系统中的复杂性问题,但相关研究仍很匮乏。美国迈阿密大学 Shi 等开发基于 Agent 的 SSR(Single-stream recycling)系统仿真决策模型框架^[96](图 3),利用基础数据库支撑仿真模块识别系统仿真的各种不确定因素,比较和评价 SSR 系统的各种替代路径。该模型被实际运用于佛罗里达州,为实现 2020 年废物资源化率达 75%的目标提供决策依据;李清慧等运用 ABM 构建了工业废物交换复杂系统的仿真模拟模型,探讨了宜兴开发区产业系统中的废物交换机制和宏观系统的演化过程^[97];Meng 等构建基于 ABM 的生活垃圾分类回收仿真模型,并以苏州为案例开展政策模拟分析^[7]。

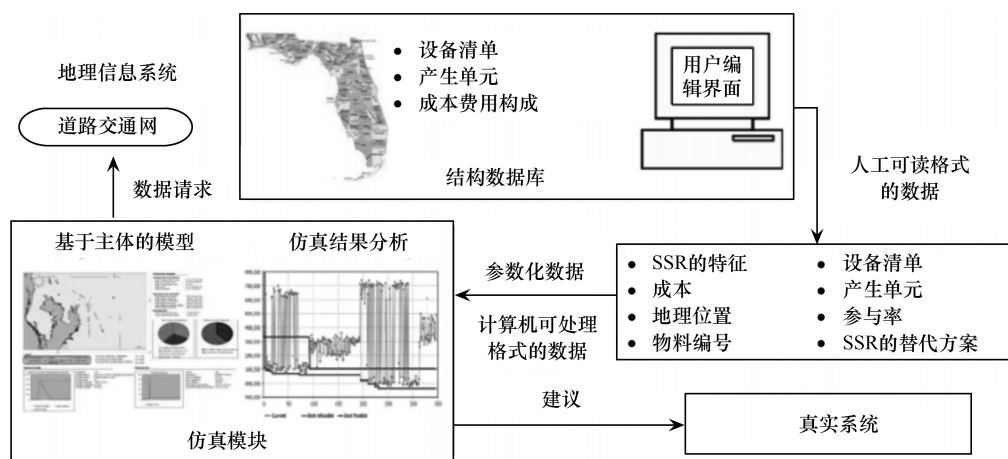


图 3 基于 Agent 的 SSR(Single-stream recycling) 系统仿真决策模型框架

Fig.3 Agent-based SSR (Single-stream recycling) system simulation decision model framework

基于主体的建模分析方法可充分考虑系统的复杂性,如系统中不同主体的目标、属性、行为、信息等;可制定环境、经济、社会的不同规则和决策目标,对系统进行整体调控模拟;可跨越长时间尺度,综合空间地理信息,对系统进行预测、优化等动态分析。可见其具有传统数学模型方法无法比拟的优势。但由于基于多主体的仿真建模尚属于新兴研究领域,建模理论和方法仍需进一步完善,特别是在模型不确定性分析与可靠性检验等方面还较为薄弱^[98],加上模型中各主体的行为规则和决策机制的准确刻画比较复杂,目前该方法在城市生活垃圾管理决策中的应用研究还比较少,有待进一步加强。

3 城市生活垃圾管理决策研究评述与展望

对国内外城市生活垃圾综合管理决策方法进行综述,主要发现如下:

(1) 总体而言,常见的城市生活垃圾管理决策方法包括传统数学模型方法和复杂系统模拟方法两大类,可基本涵盖城市生活垃圾产生、丢弃、收运、回收处理处置等所有环节,关注生活垃圾产生者、收运方、终端处

置者等不同主体角色。

(2) 总结以往关注单独环节的研究,城市生活垃圾产生现状和预测的研究从数据规律外推转变为影响因素探讨,有利于探索生活垃圾产生机制的重要转变,但数学模型方法仍无法体现主体间非线性关系对产生量的影响;居民生活垃圾处理行为机制的研究多为基于社会调查的统计分析,分析因素逐渐发展为同时包含理性与非理性因素,但多以单个主体为对象,无法解释各因素交互作用对系统的影响;城市生活垃圾收运的研究从运筹领域布局、路径优化建模开始发展,逐步借助新技术与数据,试图将社会、经济、环境效益纳入全面考量,但仍无法全面衡量不同产生量、不同居民行为以及不同终端处理手段下的收运系统响应情况。

(3) 总结以往生活垃圾管理方案总体评估的研究,LCA、CBA、MCDM 等数学模型研究方法大多为静态的或对某几个时间点进行分析,忽略了系统性和系统中各主体间的非线性关系、行为的交互作用及随时空的动态变化等。虽然也有少量研究采用系统动力学等系统建模方法,但大多集中在环境因素对系统的影响或对垃圾产生量的预测等方面,对系统中各主体间行为交互作用及其对系统演化的影响的研究仍很匮乏。

(4) 城市生活垃圾管理系统具有复杂适应特征,这是目前管理决策研究中常被忽视的问题。城市生活垃圾管理系统是一个复杂系统,包含多个主体且主体间交互作用,对该系统的优化和政策调控需要新的决策模型工具来支撑。在城市废物管理政策评估中,大多单独评估减量化效益、资源节约效益、环境效益、经济效益等,其中很多研究只是基于社会调查、专家评估、案例比较等进行定性分析;定量研究也多采用传统线性数学函数模型,无法体现系统中存在的大量非线性关系、主体间信息传递和交互作用,没有充分考虑到城市生活垃圾处理系统的复杂性。针对已有研究对城市生活垃圾管理系统的复杂性、各利益相关主体行为响应机制、政策实施效果的定量化评价与预测均较为缺乏的现状,认为有必要充分考虑城市生活垃圾管理的复杂性和系统模拟方法的适用性,加强系统仿真和预测模拟模型开发,定量预判政策实施效果,为决策提供依据。

(5) 随着经济发展和社会结构转变,城市生活垃圾管理体系面临新的挑战,以往的简单模拟方法将越来越受到模型合理性与数据准确性的局限。不同的管理需求为生活垃圾管理方法提出不同的要求,如以电商、快递、外卖等为代表的新兴行业使得城市生活垃圾的产生更为量大分散,产生情况受消费者习惯影响明显,需通过运用大数据平台与数据挖掘获知数量与时空分布;如生活垃圾可回收物管理涉及产业链上下游多主体,如何完成废物收集、处理和处置,需通过多主体行为建模进一步明确环境责任等。以基于主体建模、物联网与大数据等为代表的方法,将拥有更广泛的应用前景,共同为实现最佳环境、经济和社会效益的固体废物综合管理决策提供工具支撑。与此同时,鉴于基于主体的建模、计算机模拟仿真等方法本身存在的局限性,未来也应进一步加强在建模方法、模型不确定性分析与可靠性检验等方面的改进研究,以提升模拟结果的准确性和可靠性。

4 结语

促进生活垃圾源头减量和资源回收、构建前后端匹配的生活垃圾基础设施体系、管理运营财政支出低成本化等是城市生活垃圾综合管理的直接目标,据此达成环境、社会、经济效益最优的最终目标。如今我国已逐渐迈入生活垃圾精细化管理时代,系统中不同主体需承担共同但有区别的责任。新形势要求下,管理决策研究需与时俱进,摆脱单一主体、有限目标、部分环节、线性关系等局限,充分探索复杂系统模拟方法,注重社会学、数学建模、计算机技术与环境管理等学科方法的交叉融合,加强系统性分析,关注系统中各利益相关主体间的非线性交互作用及其对系统演化的影响等,以助力实现城市生活垃圾精准化管理和系统、科学决策。

参考文献(References):

- [1] 周传斌,徐琬莹,曹爱新.城市生活垃圾代谢的研究进展.生态学报,2014,34(1):33-40.
- [2] 郑凯方,温宗国,陈燕.“无废城市”建设推进政策及措施的国别比较研究.中国环境管理,2020,12(5):48-57.
- [3] 庄瑛,任馨,吴伟祥,陈英旭.城市生活垃圾综合管理决策模型研究进展.环境污染与防治,2008,30(1):72-75.
- [4] 王琛,李晴,李历欣.城市生活垃圾产生的影响因素及未来趋势预测——基于省际分区研究.北京理工大学学报:社会科学版,2020,22

- (1): 49-56.
- [5] 王瑛,李世平,谢凯宁.农户生活垃圾分类处理行为影响因素研究——基于卢因行为模型.生态经济,2020,36(1):186-190,204-204.
- [6] Wang W J, You X Y. Benefits analysis of classification of municipal solid waste based on system dynamics. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 279: 123686.
- [7] Meng X Y, Wen Z G, Qian Y. Multi-agent based simulation for household solid waste recycling behavior. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018, 128: 535-545.
- [8] 赵薇,梁赛,于杭,邓娜.生命周期评价方法在城市生活垃圾管理中的应用研究述评.生态学报,2017,37(24):8197-8206.
- [9] 马本,杜倩倩.中国城市生活垃圾收费方式的比较研究.中国地质大学学报:社会科学版,2011,11(5):7-14.
- [10] 苏为华,赵丽莉,刘相锋.中国城市生活垃圾处理绩效的影响因素:基于VAR模型的实证研究.浙江工商大学学报,2018,(6):73-87.
- [11] 朱家明,杨阳.安徽省城市垃圾产生量影响因素的计量分析.长春师范大学学报,2020,39(4):99-104.
- [12] 全延增,陈艳,陈海俊,赵冠华,吴利丰.基于FGM(1,1)模型的天津市生活垃圾处理量预测.数学的实践与认识,2020,50(8):67-72.
- [13] 熊华平,李鹏辉.基于新陈代谢GM(1,1)模型的湖北省城市生活垃圾清运量预测.数学的实践与认识,2019,49(1):9-14.
- [14] 杜森,邵昱姝,安帅.北京市生活垃圾与经济增长——基于面板数据实证研究.金融理论与教学,2019,(6):88-93.
- [15] 汪坪垚,章华涵,姜勇,张燕.大连市主城区生活垃圾产生量预测.环境卫生工程,2019,27(2):41-44.
- [16] 杨小妮,张凯轩,杨宏刚,于媛.西安市城市生活垃圾产生量的多元回归及ARIMA模型预测.环境卫生工程,2020,28(2):37-41.
- [17] Kumar A, Samadder S R. An empirical model for prediction of household solid waste generation rate - A case study of Dhanbad, India. *Waste Management*, 2017, 68: 3-15.
- [18] 徐礼来,闫祯,崔胜辉.城市生活垃圾产量影响因素的路径分析——以厦门市为例.环境科学学报,2013,33(4):1180-1185.
- [19] Lu J W, Zhang S K, Hai J, Lei M. Status and perspectives of municipal solid waste incineration in China: a comparison with developed regions. *Waste Management*, 2017, 69: 170-186.
- [20] Chen C C. Spatial inequality in municipal solid waste disposal across regions in developing countries. *International Journal of Environmental Science & Technology*, 2010, 7(3): 447-456.
- [21] Han Z Y, Liu Y, Zhong M, Shi G Z, Li Q B, Zeng D, Zhang Y, Fei Y Q, Xie Y H. Influencing factors of domestic waste characteristics in rural areas of developing countries. *Waste Management*, 2018, 72: 45-54.
- [22] Keser S, Duzgun S, Aksoy A. Application of spatial and non-spatial data analysis in determination of the factors that impact municipal solid waste generation rates in Turkey. *Waste Management*, 2012, 32(3): 359-371.
- [23] Lebersorger S, Beigl P. Municipal solid waste generation in municipalities: quantifying impacts of household structure, commercial waste and domestic fuel. *Waste Management*, 2011, 31(9/10): 1907-1915.
- [24] 许博,赵月,鞠美庭,楚春礼,张哲予.中国城市生活垃圾产生量的区域差异——基于STIRPAT模型.中国环境科学,2019,39(11):4901-4909.
- [25] Ma S J, Zhou C B, Chi C, Liu Y J, Yang G. Estimating physical composition of municipal solid waste in China by applying artificial neural network method. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(15): 9609-9617.
- [26] 杜吴鹏,高庆先,张恩琛,缪启龙,吴建国.中国城市生活垃圾排放现状及成分分析.环境科学研究,2006,19(5):85-90.
- [27] 李昂.基于SPSS软件浅析垃圾物理成分与小区定位关系——以北京市朝阳区为例.科技传播,2020,12(5):1-3.
- [28] Bortoloto A P, Kurisu K H, Hanaki H. Model development for household waste prevention behaviour. *Waste Management*, 2012, 32(12): 2195-2207.
- [29] Wang Z H, Guo D X, Wang X M, Zhang B, Wang B. How does information publicity influence residents' behaviour intentions around e-waste recycling? *Resources, Conservation and Recycling*, 2018, 133: 1-9.
- [30] Abdelradi F. Food waste behaviour at the household level: a conceptual framework. *Waste Management*, 2018, 71: 485-493.
- [31] Nguyen T T P, Zhu D J, Le N P. Factors influencing waste separation intention of residential households in a developing country: evidence from Hanoi, Vietnam. *Habitat International*, 2015, 48: 169-176.
- [32] Ajzen I. From intentions to actions: a theory of planned behavior//Kuhl J, Beckmann J, eds. *Action Control: From Cognition to Behavior*. Berlin: Springer, 1985: 11-39.
- [33] Botetzagias I, Dima A F, Malesios C. Extending the theory of planned behavior in the context of recycling: the role of moral norms and of demographic predictors. *Resources, Conservation and Recycling*, 2015, 95: 58-67.
- [34] Gao L, Wang S Y, Li J, Li H D. Application of the extended theory of planned behavior to understand individual's energy saving behavior in workplaces. *Resources, Conservation and Recycling*, 2017, 127: 107-113.
- [35] Park J, Ha S J. Understanding consumer recycling behavior: combining the theory of planned behavior and the norm activation model. *Family & Consumer Sciences Research Journal*, 2014, 42(3): 278-291.

- [36] Stern P C, Oskamp S. Managing scarce environmental resources//Stokols D, Altman I, eds. Handbook of Environmental Psychology. New York: Wiley, 1986.
- [37] Guagnano G A, Stern P C, Dietz T. Influences on attitude-behavior relationships: a natural experiment with curbside recycling. *Environment and Behavior*, 1995, 27(5): 699-718.
- [38] 曲英, 朱庆华. 情境因素对城市居民生活垃圾源头分类行为的影响研究. *管理评论*, 2010, 22(9): 121-128.
- [39] Hoen A, Koetse M J. A choice experiment on alternative fuel vehicle preferences of private car owners in the Netherlands. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2014, 61: 199-215.
- [40] Hensher D A, Rose J M, Greene W H. *Applied Choice Analysis: A Primer*. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- [41] Meng X Y, Tan X C, Wang Y, Wen Z G, Tao Y, Qian Y. Investigation on decision-making mechanism of residents' household solid waste classification and recycling behaviors. *Resources, Conservation and Recycling*, 2019, 140: 224-234.
- [42] Yurteri C, Siber S. An application of locational models for transfer stations//Curi K, ed. *Appropriate Waste Management for Developing Countries*. Boston: Springer, 1985: 633-642.
- [43] Chang N B, Chen Y L, Wang S F. A fuzzy interval multiobjective mixed integer programming approach for the optimal planning of solid waste management systems. *Fuzzy Sets and Systems*, 1997, 89(1): 35-60.
- [44] 陈炳禄, 王志刚, 陈新庚, 张淑娟, 王盛雄. 广州市生活垃圾处理方式及物流管理方案优化. *上海环境科学*, 2000, 19(11): 511-515.
- [45] 贾传兴, 彭绪亚, 刘国涛, 刘长玮, 伍翔, 邓稼佳. 城市垃圾中转站选址优化模型的建立及其应用. *环境科学学报*, 2006, 26(11): 1927-1931.
- [46] 陈彦, 胡晓军, 卢川, 何帅龙. 基于混合整数规划模型的垃圾收运线路优化. *交通科技与经济*, 2019, 21(1): 28-32.
- [47] Ombuki B, Ross B J, Hanshar F. Multi-objective genetic algorithms for vehicle routing problem with time windows. *Applied Intelligence*, 2006, 24(1): 17-30. PHam
- [48] Li J Q, Borenstein D, Mirchandani P B. A decision support system for the single-depot vehicle rescheduling problem. *Computers & Operations Research*, 2007, 34(4): 1008-1032. PHam
- [49] 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. *运筹与管理*, 2020, 29(4): 30-35.
- [50] 刘洁, 何彦峰. 基于 GIS 的成都市生活垃圾收运路线优化研究. *西南师范大学学报: 自然科学版*, 2013, 38(4): 80-87.
- [51] Hannan M A, Arebey M, Begum R A, Basri H. Radio Frequency Identification (RFID) and communication technologies for solid waste bin and truck monitoring system. *Waste Management*, 2011, 31(12): 2406-2413.
- [52] 陈三清. 居民区生活垃圾分类主体行为研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013: 66-66.
- [53] Yap H Y, Nixon J D. A multi-criteria analysis of options for energy recovery from municipal solid waste in India and the UK. *Waste Management*, 2015, 46: 265-277.
- [54] 张妍. 费用效益分析在项目评估中的应用. *环境科学导刊*, 2009, 28(S1): 21-22.
- [55] Yang G, Zhou C B, Wang W L, Ma S J, Liu H J, Liu Y J, Zhao Z L. Recycling sustainability of waste paper industry in Beijing City: an analysis based on value chain and GIS model. *Waste Management*, 2020, 106: 62-70.
- [56] Yang Z F, Zhou X C, Xu L Y. Eco-efficiency optimization for municipal solid waste management. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 104: 242-249.
- [57] 程云飞, 盛继群. 典型住宅小区垃圾分类成本效益分析——以孝感市城站小区为例. *湖北工程学院学报*, 2013, 33(6): 120-123.
- [58] 刘学之, 董政武. 基于成本最小化视角的深圳市生活垃圾处理方案选择//2018 中国环境科学学会科学技术年会论文集(第三卷). 合肥: 中国环境科学学会, 2018: 10-10.
- [59] 孙月阳, 宋国君, 张大为, 张琨, 黄秀丽. 生活垃圾管理社会成本评估方法与应用——以北京市为例. *干旱区资源与环境*, 2019, 33(9): 1-9.
- [60] Laurent A, Clavreul J, Bernstad A, Bakas I, Niero M, Gentil E, Christensen T H, Hauschild M Z. Review of LCA studies of solid waste management systems-Part II: methodological guidance for a better practice. *Waste Management*, 2014, 34(3): 589-606.
- [61] Blengini G A, Busto M, Fantoni M, Fino D. Eco-efficient waste glass recycling: integrated waste management and green product development through LCA. *Waste Management*, 2012, 32(5): 1000-1008.
- [62] Wang L, Templer R, Murphy R J. A Life Cycle Assessment (LCA) comparison of three management options for waste papers: bioethanol production, recycling and incineration with energy recovery. *Bioresource Technology*, 2012, 120: 89-98.
- [63] Liang S, Zhang T Z, Xu Y J. Comparisons of four categories of waste recycling in China's paper industry based on physical input - output life-cycle assessment model. *Waste Management*, 2012, 32(3): 603-612.
- [64] Vázquez-Rowe I, Marvuglia A, Rege S, Benetto E. Applying consequential LCA to support energy policy: land use change effects of bioenergy production. *Science of the Total Environment*, 2014, 472: 78-89.

- [65] 曹艳乐, 杨洁, 朱阳光, 王桢桢. 生活垃圾分类管理模式的效益评估研究进展. 安徽农业科学, 2014, 42(34): 12266-12269.
- [66] 赵岩, 邢薇, 王洪涛, 陆文静. 基于生命周期模型的生活垃圾分类收运与处理系统环境影响评估//2012 中国环境科学学会学术年会论文集(第三卷). 南宁:中国环境科学学会, 2012: 2374-2376.
- [67] Suh S. Functions, commodities and environmental impacts in an ecological-economic model. Ecological Economics, 2004, 48(4): 451-467.
- [68] 赵薇, 孙一桢, 张文宇, 梁赛. 基于生命周期方法的生活垃圾资源化利用系统生态效率分析. 生态学报, 2016, 36(22): 7208-7216.
- [69] 胡鸣明, 张纯博, 董亮, 向鹏成, 张倩. 支撑资源循环可持续性评价的经济决策工具——生命周期成本分析的发展与应用. 中国环境科学, 2018, 38(12): 4788-4800.
- [70] 赵薇, 杨雪秀, 满鑫香, 陈永梅, 冯翠洋, 梁赛. 基于混合生命周期评价的生活垃圾处理系统生态效率分析. 生态学报, 2020, 40(1): 77-88.
- [71] 王军, 周燕, 刘金华, 岳思羽. 物质流分析方法的理论及其应用研究. 中国人口·资源与环境, 2006, 16(4): 60-64.
- [72] 高会苗, 戴铁军. 城市生活垃圾循环利用系统物质代谢框架的构建. 再生资源与循环经济, 2014, 7(4): 9-14.
- [73] Villalba L. Material Flow Analysis (MFA) and waste characterizations for formal and informal performance indicators in Tandil, Argentina: decision-making implications. Journal of Environmental Management, 2020, 264: 110453.
- [74] Makarichi L, Techato K A, Jutidamrongphan W. Material flow analysis as a support tool for multi-criteria analysis in solid waste management decision-making. Resources, Conservation and Recycling, 2018, 139: 351-365.
- [75] 汤玉苗, 田俊, 岳子奇. 基于模糊数学的城区生活垃圾污染防治研究. 科技创新与应用, 2017, (9): 34-34.
- [76] 韩清钰, 石卫星. 基于遗传算法的农村生活垃圾设施选址优化研究——以扬州市江都区丁沟镇沈南村庄为例. 农村经济与科技, 2019, 30(19): 242-245.
- [77] 刘田田. 基于大数据的垃圾智能处理系统的分析与设计. 电脑知识与技术, 2020, 16(30): 67-68.
- [78] 王育新, 朴林华, 朴然, 李备, 丁霞. 基于卷积神经网络的垃圾分类系统的实现. 北京信息科技大学学报: 自然科学版, 2020, 35(5): 30-34.
- [79] 廖守亿, 王仕成, 张金生. 复杂系统基于 Agent 的建模与仿真. 北京: 国防工业出版社, 2015: 1-12.
- [80] Holland J H. Hidden Order: How Adaptation Builds Complexity. Reading: Addison-Wesley, 1995.
- [81] 谭跃进, 邓宏钟. 复杂适应系统理论及其应用研究. 系统工程, 2001, 19(5): 1-6.
- [82] 朱青, 张维, 罗志红. 生产者责任视阈下的城市生活垃圾分类多元主体序贯决策分析. 企业经济, 2020, (2): 24-30.
- [83] Forrester J W. Principles of Systems. Cambridge: Productivity Press, 1968.
- [84] 孙宗凤. 系统动力学在水资源管理中的应用. 水利水电技术, 2005, 36(6): 14-16, 21-21.
- [85] 王艳, 李思, 吴叶君, 丁凡, 黄振中. 中国可持续发展系统动力学仿真模型——社会部分. 计算机仿真, 1998, 15(1): 5-7.
- [86] 吴灵玲. 基于系统动力学的深圳市生活垃圾产生量预测[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
- [87] 蔡林. 城市生活垃圾问题研究的系统动力学方法. 环境污染治理技术与设备, 2006, 7(5): 65-69.
- [88] 张蕾, 席北斗, 王京刚, 霍守亮, 苏婧. 系统动力学方法在城市生活垃圾产生系统的应用. 环境科学研究, 2007, 20(5): 72-78.
- [89] 代峰, 戴伟. 基于系统动力学的城市生活垃圾发电进化博弈. 工业工程, 2017, 20(1): 1-11.
- [90] Pinha A C H, Sagawa J K. A system dynamics modelling approach for municipal solid waste management and financial analysis. Journal of Cleaner Production, 2020, 269: 122350.
- [91] 廖绍雯, 陈勇. 个性化搜索引擎关键技术及应用. 软件导刊, 2011, 10(8): 120-121.
- [92] 邱枫, 米加宁, 梁恒. 基于主体建模仿真的公共政策分析框架. 东北农业大学学报: 社会科学版, 2013, 11(4): 71-78.
- [93] Inchiosa M E, Parker M T. Overcoming design and development challenges in agent-based modeling using ASCAPE. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2002, 99(S3): 7304-7308.
- [94] Tang L, Wu J Q, Yu L A, Bao Q. Carbon emissions trading scheme exploration in China: a multi-agent-based model. Energy Policy, 2015, 81: 152-169.
- [95] 毕贵红, 王华, 李强, 侯燕. 基于 Agent 的居民环境行为动态演化与政策仿真模型. 广西师范大学学报: 自然科学版, 2008, 26(1): 198-202.
- [96] Shi X R, Thanos A E, Celik N. Multi-objective agent-based modeling of single-stream recycling programs. Resources, Conservation and Recycling, 2014, 92: 190-205.
- [97] 李清慧, 石磊. 基于主体建模的废物交换模型与仿真分析. 环境科学研究, 2012, 25(11): 1297-1303.
- [98] Babaei A A, Alavi N, Goudarzi G, Teymouri P, Ahmadi K, Rafiee M. Household recycling knowledge, attitudes and practices towards solid waste management. Resources, Conservation and Recycling, 2015, 102: 94-100.