

杭州电子科技大学

硕 士 学 位 论 文

题 目：电子废弃物回收处理渠道演化
的计算实验研究

研 究 生 冯丛娜

专 业 管理科学与工程

指导教师 余福茂 教授

魏 洁 副教授

完成日期 2016 年 3 月

杭州电子科技大学硕士学位论文

电子废弃物回收处理渠道演化
的计算实验研究

研 究 生：冯丛娜

指导教师：余福茂 教授

魏 洁 副教授

2016 年 3 月

**Dissertation Submitted to Hangzhou Dianzi University
for the Degree of Master**

Computational Experiment Study on the Evolution of the Electronic Waste Recycling Processing Channel

Candidate: Feng Congna

Supervisor: Prof. Yu Fumao

A.P. Wei Jie

March, 2016

杭州电子科技大学

学位论文原创性声明和使用授权说明

原创性声明

本人郑重声明： 所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品或成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。

申请学位论文与资料若有不实之处，本人承担一切相关责任。

论文作者签名： 日期： 年 月 日

学位论文使用授权说明

本人完全了解杭州电子科技大学关于保留和使用学位论文的规定，即：研究生在校攻读学位期间论文工作的知识产权单位属杭州电子科技大学。本人保证毕业离校后，发表论文或使用论文工作成果时署名单位仍然为杭州电子科技大学。学校有权保留送交论文的复印件，允许查阅和借阅论文；学校可以公布论文的全部或部分内容，可以允许采用影印、缩印或其它复制手段保存论文。(保密论文在解密后遵守此规定)

论文作者签名： 日期： 年 月 日

指导教师签名： 日期： 年 月 日

摘 要

随着电器电子产品更新换代速度的加快，电子废弃物已成为我国增长速度最快的固体垃圾之一。面对数量巨大的电子废弃物，我国电子废弃物回收处理产业的生产效率却十分低下，环境污染和资源浪费等问题日益凸现。电子废弃物的回收处理渠道混乱，大量电子废弃物经由非正规渠道回收处理，是这些问题产生的主要原因。

目前，计算实验方法在社会科学研究领域的应用越来越广泛。电子废弃物回收处理系统作为一个典型的多主体参与的复杂系统，其研究非常适合使用计算实验方法。因此，本文使用计算实验的方法对我国电子废弃物回收渠道进行演化仿真，希望能提出促进电子废弃物回收渠道健康发展的对策。

论文首先从电子废弃物回收处理的相关法律法规、回收处理渠道的决策优化和利益相关主体的行为模式三个角度对国内外相关文献进行梳理，剖析了电子废弃物现有回收处理渠道的结构特征，总结了我国在回收处理电子废弃物的过程中存在的关键问题，为仿真模型的建立及分析奠定理论根基。

从复杂适应系统理论的视角，论文详细分析了电子废弃物回收处理渠道演化的复杂性，以组成电子废弃物回收处理系统的各类微观主体为研究对象，提出了仿真模型的基本假设、Agent 行为规则及其交互规则，以此作为电子废弃物的回收处理渠道演化模型的实验框架。

以 RePast 为 Agent 建模工具，本研究建立了电子废弃物回收处理渠道演化的仿真模型，并且以实地调研的数据和相关理论为参数调整依据，实现重复实验。通过对消费者回收行为，小商贩数量、回收量及利润的动态变化，以及对正规回收企业的研发投入演化等的分析，本研究认为：（1）政府对回收处理渠道的监管必不可少。政府对正规回收企业实施激励政策，为其提供财政补贴或技术支持，鼓励正规企业进行处理技术的研发投入，有助于回收渠道的净化；政府管制打压非正规回收处理的小商贩，协助小商贩转向正规渠道，有利于回收渠道的规范化发展。（2）需加强消费者的正规回收意识。小商贩数量减少，非正规回收渠道无法再向消费者提供很强的回收便利，继而消费者便会转向正规企业。周围人的行为不断相互影响，最终消费者都将选择正规渠道进行电子废弃物的回收处理。

基于计算实验结果，为了加快电子废弃物回收处理渠道的正规化、生态化发展，论文最后为政府等相关管理部门提出五条政策建议。

关键词：电子废弃物，计算实验，渠道演化，Agent

ABSTRACT

With the accelerated updates and upgrades of electronics and electrical appliances, electronic wastes have become one of the fastest growing solid wastes in China. Facing with enormous waste in China, the e-waste recycling is inefficient nowadays. Environmental pollution and waste of resource also spring up gradually. Enormous waste are recycled and disposed in non-standardized and irregular channels, which should be responsible for these problems.

Sofar, computational experiment method has been widely applied in the field of social science research. E-waste recycling and disposing system, as a typical complex multi-subject attended system, is apt to use this method. Hence, in this paper, it adopts computational experiment method to evolving and simulating e-waste recycling channels in China, hoping to raise some feasible strategies to the healthy development of e-waste recycling.

Firstly, it arranged international or domestic papers relating to this topic including three perspectives as follows: the relevant laws and regulations of e-waste recycling, the decision optimization of e-waste recycling channels and stakeholders' pattern of behaviors concerning e-waste recycling. In this paper, it analyzed features of the structure of e-waste recycling channels now, summarized key problems during the process of e-waste recycling in China and laid the foundations of establishing and analyzing the simulation model.

In this paper, it made a detailed analysis on the complexity of evolution of e-waste recycling channels from the perspective of Complex Adaptive Systems Theory. It took every kind of microcosmic bodies consisting of e-waste recycling and processing system as research objects. The basic hypothesis of the simulation model, the rules of Agents and the interaction are also raised. They are regarded as the computational experiment framework of e-waste recycling channel's evolution model.

Finally, Repast is selected as the Agent modeling tool to establish e-waste recycling processing channel in this research. It adjusted parameter on the basis of data from investigations and relevant theories and realized repeated experiments. According to the analysis on consumers' recycling behaviors, the dynamic changes of the number of small traders, recycling and profits, and evolution of researching investment of formal recycling enterprises. It is reckoned that: On the one hand, it is indispensable for the government to make supervision on e-waste recycling channels. It is helpful to purify recycling channels when the

government encourages the development of formal recycling enterprises, providing financial subsidies or technical support and encouraging technology investment of formal recycling enterprises. It may be more favorable for the regulation of recycling channels when the government control and suppress the recycling of irregular small traders and help them turn to regular ones. On the other hand, consumers' awareness of recycling should also be enhanced. When the number of small vendors cut down, irregular recycling channels can not afford the convenience for citizens, then consumers will turn to formal recycling channels eventually.

Based on computational experiment results, It puts forward five policy recommendations for the government and other relevant management departments in order to accelerate the ecologicalization and regularization development of e-waste recycling and processing channels .

Key words: Electronic waste, Computational experiment, Channel evolution, Agent

目 录

摘 要.....	I
ABSTRACT.....	II
1 绪论.....	1
1.1 研究背景与研究意义.....	1
1.1.1 研究背景.....	1
1.1.2 研究意义.....	3
1.2 研究目的及主要内容.....	3
1.2.1 研究目的.....	3
1.2.2 主要内容.....	4
1.3 研究方法与技术路线.....	6
1.3.1 研究方法.....	6
1.3.2 技术路线.....	6
1.4 主要创新点.....	7
2 理论基础及文献综述.....	8
2.1 电子废弃物回收处理实践现状分析.....	8
2.1.1 电子废弃物回收处理的相关法律法规.....	8
2.1.2 关于电子废弃物回收渠道决策优化的研究.....	9
2.2 关于主要参与主体行为模式的研究.....	11
2.2.1 生产商回收行为研究进展.....	11
2.2.2 消费者回收行为研究进展.....	12
2.2.3 关于其他相关主体回收行为的研究进展.....	13
2.3 电子废弃物回收处理中存在的问题.....	14
2.4 计算实验方法及其在政策研究中的应用.....	16
2.4.1 复杂适应系统理论.....	16
2.4.2 基于 Agent 的建模方法.....	17
2.4.3 计算实验在环境管理政策研究领域的应用.....	19
3 计算实验模型构建.....	21

3.1 电子废弃物回收处理渠道的复杂性分析.....	21
3.1.1 多主体行为形成的复杂性.....	22
3.1.2 系统层次性形成的复杂性.....	22
3.1.3 系统开放性形成的复杂性.....	23
3.2 问题描述与模型假设.....	24
3.2.1 问题描述.....	24
3.2.2 模型假设.....	26
3.3 电子废弃物回收处理渠道演化模型框架.....	27
3.3.1 Agent 的行为规则分析	27
3.3.2 Agent 之间的交互分析	29
3.4 本章小结.....	30
4 实验仿真及结果分析.....	31
4.1 Agent 建模平台选择	31
4.1.1 几种建模平台的比较.....	31
4.1.2 RePast 模型库.....	32
4.2 演化模型的软件实现.....	33
4.2.1 演化模型的实现.....	34
4.2.2 参数初始值讨论.....	36
4.3 仿真实验及结果分析.....	38
4.3.1 实验运行.....	38
4.3.2 仿真实验.....	39
4.3.3 政策建议.....	44
4.4 本章小结.....	45
5 结论与展望.....	47
5.1 研究结论.....	47
5.2 未来研究建议.....	48
致 谢.....	50
参考文献.....	51
附录：攻读硕士学位期间发表学术论文及参加科研项目情况.....	56

1 绪论

1.1 研究背景与研究意义

1.1.1 研究背景

电子废弃物（electronic waste），是被消费者丢弃、不再使用的电子或电器设备及其淘汰的配件等，主要包括洗衣机、电视机、冰箱、空调等废旧家用电器及移动电话、个人电脑等废旧电子产品。随着科学技术的高速发展、电子科技产品更新换代的加速，电子废弃物逐步成为我国增长迅猛的固体垃圾之一。电子废弃物的种类和数量增长迅速，预计 2020 年我国各类电子废弃物的总量将达到 $926.9 \times 10^4 \text{t}$ ，年平均增长率高达 11.4%^[1]。此外，还有大批的电子废弃物经由非法途径流进中国，给我们带来越来越沉重的处置压力。

电子废弃物通常蕴含着汞、六价铬、铅、溴化阻燃剂等有害成分，如果不妥善处理，将会严重污染环境，造成生态破坏，进而危害人类的生存家园和社会的和谐、可持续发展^[2]，如表 1.1 所示。

表 1.1 电子废弃物中主要有害化学物质及其对环境健康的危害

名称	用途	潜在危害
铅（Pb）	润滑剂、光学玻璃、硬化剂、电镀液、印刷电路板	干扰内分泌系统；影响大脑发育；损伤中枢和周围神经系统、血液循环系统及肾脏
汞（Hg）	油漆、电池、保险丝、稳定剂	血压升高，影响大脑功能和记忆力；大脑、肾脏、肺及胎儿慢性损伤
六价铬（Cr）	催化剂、防腐剂、电极、燃料、水银灯	可转化为甲基汞，导致肝、肾、神经系统慢性损伤；可能会引起 DNA 损坏，是一种致癌物质
铝（Al）	阴极射线管、印刷电路板、电脑主板、显卡、接头	导致呼吸道疾病，骨骼疾病，并可能会引发 Alzheimer 氏疾病（老年痴呆症）
镉（Cd）	电池、半导体、染料稳定剂	动脉硬化、肺部损伤、肾脏疾病、骨骼易碎裂，很可能是一种致癌物质
溴化阻燃剂	塑料外壳、电线电缆、电路板	干扰内分泌，影响胎儿发育；干扰甲状腺激素的分泌，增加消化和淋巴系统患癌症的风险
氟利昂（CFC）	制冷剂 CFC-2、发泡剂 CFC-11	破坏臭氧层

生活中并没有绝对的垃圾，只有放错位置的资源，循环经济和可持续发展早已成为时代发展的主题。电子废弃物——资源的综合载体，也含有许多宝贵的资源，特别是贵金属，一般其回收成本比开掘自然矿藏低很多。因此，关于电子废弃物的合理回收及其循环利用，我们需足够重视。既要严厉监管电子废弃物产生的源头，禁止海外电子废弃物不法流入中国，也需完善电子废弃物回收处理的相关法制，理顺治理体系，明确相关管理部门的权力与监管责任^[3]。

面对数量庞大的电子废弃物，我国的处置状况却并不乐观。当下，我国存在两种电子废

弃物的回收处理渠道，如表 1.2 所示，正规渠道：正规回收处理企业对电子废弃物进行回收，并使用专门的设备进行处置；非正规回收处理渠道：非正规的小商贩、个体户走街串巷回收后，在自家的小作坊非法处理，严重危害环境。我国消费者对电子废弃物回收处理企业还没有清楚的认识，小商贩出价高，大多消费者就会选择将电子废弃物交给小商贩进行回收。目前，超过 80%的电子废弃物由小商贩进行回收，之后由自家小作坊进行拆解、处理，这种模式已经构成了一条成熟完整的灰色产业链，年产值近千亿元，他们基本上垄断了电子废弃物的回收资源^[3]。为了保障企业的正常运作，“食不果腹”的正规回收企业被迫回收小商贩手里的电子废弃物，两种渠道之间的恶性竞争逐渐激烈。

表 1.2 电子废弃物回收渠道的特征比较

指标	正规回收渠道（正规回收企业）	非正规回收渠道（小商贩）
处理能力	大	小
数量	少	多
回收价格	低	高
处理成本	高	低
利润	低	高
处理方式	正规、环保	人工拆解
环境危害	对环境污染小	对土壤、空气、水资源污染严重

在小商贩占据主要回收市场的情况下，他们不思量长远的环境要素，只谋求自身利益的最大化，采用手工拆解、强酸萃取、焚烧、填埋、丢弃等方式对电子废弃物处理。这样的处置产生了大量的有毒物质和重金属，严重危害生态环境，也浪费了珍贵的资源。如广东省贵屿镇，从 20 世纪末开始便从事电子废弃物的回收，如今已形成集回收、拆解、再加工到销售为一体的成熟产业链。根据有关数据估算，贵屿当地的电子废弃物拆卸处理能力已超过百万吨/年。但是，当地的水资源却遭到重度污染，根本无法作为生活用水。

因而，我们在电子废弃物的回收处理中急需应对的主要问题是正规回收率低、环境污染程度重，而问题产生的根源在于，没有建立有序的回收处理渠道协调机制。如何设计政策才能有效地培养消费者的电子废物分类回收行为，以便达到源头减量和提高源头分类的目标？如何制订综合处置方案才能达到电子废物回收处理的规范化、资源化和无害化目标？这些问题值得我们深思。要加快我国电子废弃物的回收处理渠道的生态化、规范化进程，在激励正规回收处理渠道有效发展的同时，还需要约束非正规的回收处理渠道的增长。本文借鉴复杂适应系统理论，构建基于 Agent 的计算实验模型来研究各利益相关主体的行为演化规律，分析电子废弃物回收处理渠道的演化机制，为我国政府对各参与主体实施激励与管制的相关决策提供政策建议。

1.1.2 研究意义

电子废弃物是宝贵的资源载体，也是难以治理的污染源头。大部分电子废弃物通过小商贩进入拆解作坊，酿成正规的回收处理企业难为“无米之炊”的困境。已经有许多国内外学者成功地对电子废弃物的处置进行了钻研，但是，现有类似研究一般仅限于少量正规回收处理主体，常常忽视非正规主体的影响。本论文引入促进非正规主体转向正规化发展的思维，结合浙江省台州市的实践状况，从微观层次和宏观层次来研究电子废弃物回收处理渠道的动态演化 and 政策调控仿真模型，通过仿真建模分析揭示电子废弃物回收处理渠道的演化过程、发展规律，探寻非正规主体转向正规渠道回收处理的鼓励机制，并为政府等管理部门制定电子废弃物的回收处理政策提供建设性意见。

（1）理论意义

本文最后得出一个能够对电子废弃物回收处理系统进行预测、模拟和决策分析的模型，可以用此系统演化的规律，帮助人们做出科学决策，对电子废弃物正规化的回收治理具备指导意义；同时，模型可以解释系统宏观规律与微观行为之间的联系，帮助人们深入认识此系统的演化机制，模拟实施各种政策、进行对比研讨，为电子废弃物回收管理相关政策法规的制定、完备提供政策建议。

（2）现实意义

通过本文的研究，能够使更多的消费者认识到对电子废弃物的回收处理渠道管理的重要性，在一定程度上对政府、生产商、消费者、回收处理商等相关主体的行为产生影响，促进电子废弃物回收处理渠道的规范化、生态化进程。总之，会有助于降低环境污染，减少宝贵资源的浪费，帮助正规回收企业降低处理成本，加强其行业竞争力，最终提高消费者的生存环境质量，达到全体社会的和谐、可持续发展。

综上，本文进行的研究将有助于提高资源的循环利用率，降低环境污染、净化生态环境，对促进社会的长期安定发展有必然的实际意义。

1.2 研究目的及主要内容

1.2.1 研究目的

数量庞大的小商贩方便了消费者对电子废弃物的回收，却给正规回收处理企业带来亏损和停工，严重妨害了我国的电子废弃物处置规程，并导致了严重的生态环境破坏。在这种情形下，政府等管理部门应该加强监督和管制，促进电子废弃物的生态化处理^[4]。

本论文以可持续发展、资源有效循环利用为出发点，深入探究我国在电子废弃物回收处理中的现存问题，引入复杂适应系统理论及其建模方法，建立基于 Agent 的模型，以构成电子废弃物回收处理系统的微观主体为研究对象，模拟回收处理渠道的基本演化规律，观察电子废弃物的回收处理系统中各个微观主体之间复杂的交互机制及其行为特征，来研究系统整体特性的涌现。从理论上研究政府如何对电子废弃物正规回收处理进行激励、如何对非正规

回收处理渠道进行管制打压，来加快电子废弃物的正规化、生态化回收处理进程。本文研究了宏、微观层面上解决回收处理中资源循环利用和环境污染问题的方法，最终为电子废弃物回收处理渠道的健康、持续发展提供建设性意见。

本文研究的主要目的是：

(1) 剖析电子废弃物的正规、非正规回收处理渠道上各个利益相关主体的行为规律，探究非正规回收处理主体向正规回收转化的内在机制；

(2) 探索政府激励政策对不同渠道中处理商的回收策略选择的影响力，找到抑制非正规渠道发展的约束机制以及促进正规回收渠道发展的激励机制，指导人们在现实生活中作出科学合理的决策；

(3) 为电子废弃物回收处理有关政策法规的制定、完善提供参考价值，为政府有效激励各利益相关主体主动加入电子废弃物的生态化、正规化处置提供政策建议。

电子废弃物的有效回收处理涉及到经济、社会、生态环境的领域，按照经济学的观点看，电子废弃物回收处理系统中涉及到的主体都是以谋求自身效益最大化为目标的理性经济实体，但是在系统的实际运行中，主体的经济目标之间存在矛盾。因此，协调主体之间的冲突、实现各自的经济利益的同时，完成电子废弃物的循环有效利用，达到经济、社会、生态整体效益的最大化，也是本文研究的重点。

1.2.2 主要内容

人们在电子废弃物的回收管理实践中，不断对电子废弃物的回收处理系统进行深入了解。它是由很多个互相联系、互相影响的个体组成的具备自适应性的复杂系统，必须以整体的观念来对待。

供应商，生产商，分销商，消费者，回收处理商，小商贩、小作坊等都是组成电子废弃物回收处理渠道的主要微观主体，此外，还涉及政府管理部门、市场、行业协会等外部环境个体。这些微观主体不断跟外界进行信息、物质、能量的交换，依照“刺激-反馈-学习-调整”的机制发生行为变化。不同主体的行为偏好和交互规则，使微观主体的行为产生分化，并在与外部环境的相互作用和不断学习适应的过程中，形成不同的演化路径，造就了系统宏观层面上的复杂性。本文借鉴复杂适应系统理论、自组织理论等，采用基于 Agent 的计算实验建模方法来分析，探索针对各类微观主体的激励、约束策略，并为协调多主体间的行为提供政策建议。不停地针对电子废弃物的治理模式进行优化，重视电子废弃物的回收和循环使用管理，谋求整个电子废弃物管理过程的社会、环境、经济效益的最大化，以便最后达到社会认可、环境能够持续发展、经济基础足够的理想状态。

本文主要的研究内容为：

(1) 界定研究问题与环境。结合理论研究进展、法规政策制定、实践发展、国内外研究现状等几方面，通过文献研究、实地调研，梳理电子废弃物回收处理现实系统的体系结构、系统的功能、系统所处的环境及系统要实现的目标。

(2) 确定研究的基本假设。分析各个利益相关主体的认知及行为偏好，探究电子废弃物环境污染重、正规回收率低等问题的起因，概括出系统的重要特性，确定基本假设，建立 Agent 的行为规则与交互描述。

(3) 建立 Agent 计算模型框架。借鉴复杂适应系统理论、自组织理论等基本理论和研究方法，采用基于 Agent 的建模方法建立电子废弃物回收处理系统的计算实验模型框架。

(4) 实现计算实验。以各类主体的策略调整及发展演化过程作为对象，进行 Agent 仿真建模，观察微观主体的行为活动，模拟系统的演化规律，分别从微观和宏观层次研究系统主体行为决策与交互机制对系统演化整体特性的影响。

(5) 对比分析实验结果。对比分析实验结果与现实情况的差异，不断调整参数，通过可重复的实验来推断和分析系统演化的原因，并得出结论。对促进多主体回收行为协调优化的政策工具进行理论总结，从经济学、系统科学、政策科学等角度对政策原理进行科学解释，并评估其可行性；从运行机制、政策实施等角度向政府等管理部门提供政策建议。

以这样一个能对电子废弃物回收处理系统进行预测、模拟、调控的仿真模型，优选可以促进电子废弃物回收处理的正规化、生态化发展的政策组合，帮助人们作出科学决策，为政府等管理部门制定、完善有关政策法规提供建设性意见。本文的研究框架，如图 1.1 所示。

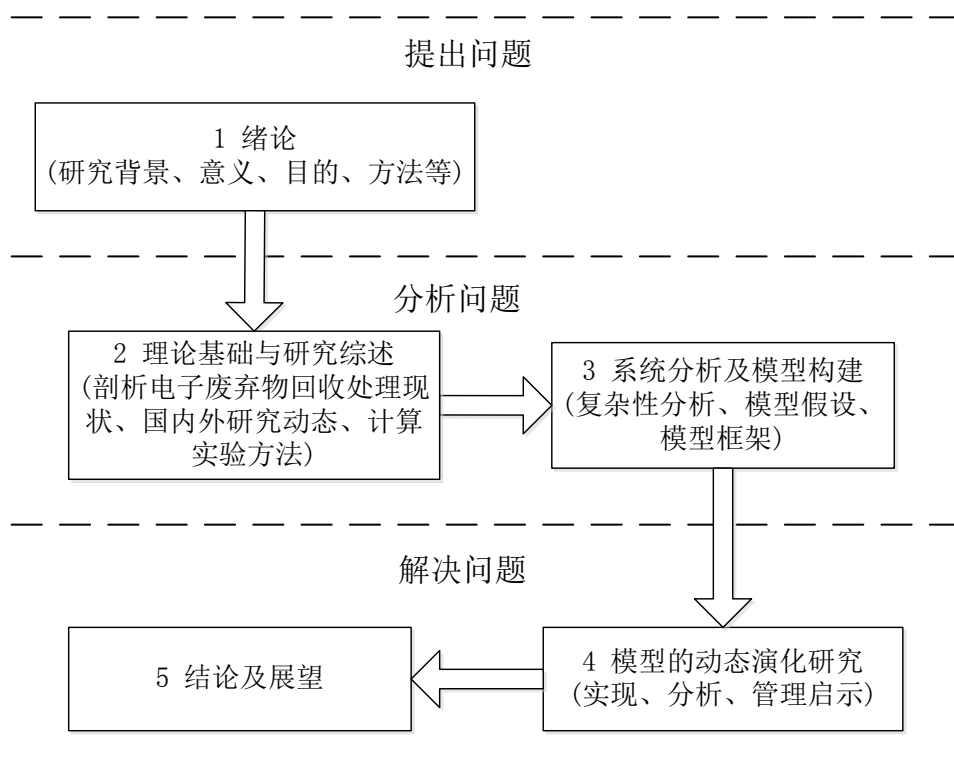


图 1.1 论文的研究框架

1.3 研究方法与技术路线

1.3.1 研究方法

本文的研究方法主要有：

- (1) 文献分析法：搜索国内外关于电子废弃物回收处理方面的文献，汇总分析有关研究成果，梳理电子废弃物回收处理现实系统的体系结构、系统的功能、系统所处的环境及系统要实现的目标，以此为基础确定本论文的研究重点，为后续的定量研究提供支撑。
- (2) 实地调研法：选取浙江省台州市路桥区的工业园区及个体商户（电子废弃物比较集中）进行实地调研，定性地了解电子废弃物的来源、处理、流向及正规企业和小商贩的年处理能力，为模型中参数的设定提供理论依据和数据支撑。
- (3) 基于 Agent 的计算实验建模方法：电子废弃物回收处理渠道微观上的各个利益相关主体不断适应外界环境，导致了系统的宏观复杂性。以复杂适应系统理论作为基础，采用基于 Agent 的建模方法建立电子废弃物回收处理渠道演化的计算实验仿真模型，探索针对各类微观主体的激励、约束策略，并为协调多主体间的行为提供政策建议。
- (4) 对照分析法：通过反复实验，对比分析、总结模型仿真实验结果，探寻电子废弃物回收处理正规与非正规渠道上各主体行为的监管机制。将实验结果与现实结果进行分析比较评价，来推断和分析系统演化的原因，帮助人们作出科学预测与决策，为政府等管理部门制定相关政策提供建设性意见。

1.3.2 技术路线

本文研究的技术路线如图 1.2 所示。

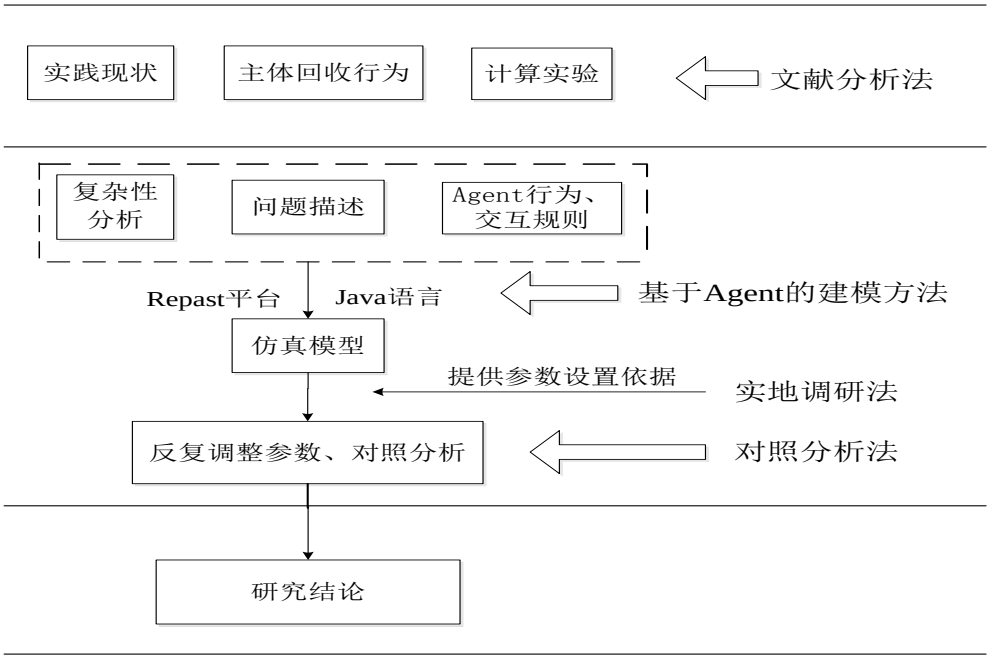


图 1.2 技术路线

1.4 主要创新点

本文的创新主要体现在 3 个方面。

(1) 国内外研究学者针对电子废弃物回收渠道的有关问题已经进行了一定的钻研,然而,现有相关研究一般局限于正规渠道上的少量主体,经常忽视非正规回收渠道上各类主体的影响,而且提出的政策意见常常欠缺实证检验及实验模拟。本研究注重非正规回收渠道上各主体之间及各自与环境的相互作用,选题更加贴近实际,是对同类相关研究的补充。

(2) 国内外关于电子废弃物回收的实践与管制政策、各利益相关主体回收行为模式及协调优化、回收处理系统的动力学仿真领域已经取得了许多重要的研究成果。但是,关于电子废弃物回收处理渠道多主体演化的微观行为交互及宏观涌现机制还缺乏深入的研究。本文的研究从电子废弃物回收处理渠道上的微观主体出发,观察各个主体的行为规律,为探求加快电子废弃物的回收处理渠道正规化、生态化发展的政策工具提供建设性意见。

(3) 有关电子废弃物回收处理的现有研究,已经有学者使用系统动力学方法剖析了电子废弃物回收处理系统演化的动力学机制。本研究通过借鉴复杂适应理论,使用自下而上的基于 Agent 的建模方法,演绎各主体回收行为的决策模式及交互机理,通过计算实验进行模拟,并与现实情况对比、分析,得出结论。

2 理论基础及文献综述

2.1 电子废弃物回收处理实践现状分析

从相关法律法规、回收渠道决策优化两个方面对电子废弃物的回收处理实践进行探究，以便对电子废弃物的回收处理渠道有更深入的认识。

2.1.1 电子废弃物回收处理的相关法律法规

电子废弃物污染的问题是全世界都十分注重的问題，世界各国都制定了相关的立法。其中，1996 年，德国颁布了《促进废物闭合循环管理及确保与环境相容的废物处置法》，这是世界首部促进环境保护与废物综合利用相结合的法规。欧盟于 2001 年公布了《电子电器废弃物法》，要求 2005 年以后，废旧家电产品的再商品化率必须超过 70%^[5]。美、德、法等国家，也相继拟定了有关的法律法规。

因为我国回收处理体系的规范性不足，非法小作坊的拆解处置屡见不鲜，不仅浪费了大量可利用资源，还对环境造成了严重的污染，危害了消费者的生存权益。采用法律措施强制人们进行电子废弃物的循环化使用，有利于更好地监督、管理电子废弃物的处置。因此，为了促进电子废弃物回收处理的规范化，2001 年起我国开始借鉴美国、日本、欧盟等国家的经验，建设中国电子废弃物的回收管理体系，并完善相关的立法工作。如表 2.1 所示。

表 2.1 我国电子废弃物回收处理主要的法律及管理办法

名称	主要内容	颁布时间
《关于坚决控制境外废物向我国转移的紧急通知》	控制境外废物向我国转移	1995.11
《危险废物污染防治技术政策》	规定了危险废物的管理和处理处置技术	2001.12
《关于加强废弃电子电气设备环境管理的公告》	要求对电子废弃物的回收、处置、利用以无害化方式进行	2003.8
《危险废物跨省辖市或跨省交换、转移审批及管理规定》	控制国内危险废物的跨境运输	2005.1
《电子信息产品污染控制管理办法》	限制或禁止研发、设计、生产、销售、进口等环节的有毒有害物质	2006.2
《废弃家电与电子产品污染防治技术政策》	推行电子废弃物减量化、资源化和无害化，建立生产者责任延伸制度	2006.8
《中华人民共和国循环经济促进法》	对生产列入强制回收名录的产品或包装物的企业作出了规定	2008.8
《废弃电器电子产品回收处理管理条例》	实行资格许可制度，电器电子产品生产者、进口电器电子产品的收货人或其代理人应按照规定履行纳税义务；国家建立基金，用于废弃电器电子产品处理费用的补贴	2009.2

我国 2011 年起执行了《废弃电器电子产品处理资格许可管理办法》，以标准化电子废弃

物处理资格的许可审查机制。2012年7月起施行的《废弃电器电子产品处理基金征收使用管理办法》，规范了电子废弃物处理基金使用的管理。为了更好地规范电子废弃物处理企业的生产活动，提升整体的环境治理水平，我国已经颁布了很多的政策法规^[6]。

这些法规政策实施以来，电子废弃物的回收处理取得了一定的进展。有关部门经过核对，发现有106家企业取得了政府的处理基金补贴，电子废弃物的许可处理能力达1.27亿台/年^[6]。到2013年底，各个正规处理企业拆解、处理了4756万台废旧电子产品，得到39.35亿元的政府补贴，跟施行《条例》前做比较，电子废弃物的处理能力增长了20多倍，正规企业实际年处理量增长了100多倍^[7-8]。

但是，因我国电子废弃物的回收处理发展仍然不成熟，处理企业缺乏经验、处理技术不完善等缘由，在生产过程中有些处理企业的责任主体依然不明确、管理标准并不健全，电子废弃物的污染防治受到了一些不良的影响^[8]。因此，电子废弃物回收处理渠道的正规化、生态化发展进程负重致远。

2.1.2 关于电子废弃物回收渠道决策优化的研究

深入分析电子废弃物回收处理的渠道结构，会发觉我国正规回收率低、环境污染重的关键原因——我国现有正规和非正规两种回收渠道，效率低下的非正规回收小商贩普遍存在和环境监管缺失是环境污染问题产生的主要原因。钟永光等（2010）通过对青岛市的电子产品的现有情况、废弃情况及现存处理状态进行调查和研究，发现消费者将大部分电子废弃物交给了非正规的小商贩，选择正规回收的比例较低；还研究了如何激励消费者积极参与电子废弃物的正规回收，对政府提出提高正规回收企业的服务和回收价格、增加环保宣传费用的建议^[9]。小商贩仍然是主要的电子废弃物回收处置主体，他们对电子废弃物使用不正规的拆解和处理方式，造成了严重的生态破坏和资源浪费等问题；正规回收企业有先进的设备能够对电子废弃物进行专业处置，却由于电子废弃物的回收量不够，而导致处理设备闲置、被迫长期歇工^[10]。并且，小商贩、小作坊大多使用简单的焚烧和强酸浸泡的方式，当大批电子废弃物被小商贩非正规回收处理时，有毒粉末在空气、水流和土壤中弥漫，同时还存在有毒重金属的严重危害。日积月累，带来的污染越来越严重，生态环境每况愈下，防治电子废弃物对环境的污染，是维护生态安全的必然要求。

当前我国关于电子废弃物回收处置管理的法规政策还不成熟，同时，电子废弃物数量庞大、种类繁多、处置过程复杂等因素增加了其回收处理渠道选择的复杂程度，国内外学者陆续对电子废弃物回收处理渠道的有关决策优化问题展开了研究。

Yang等（2008）对中国当前的电子废弃物回收体制进行了深入探索，发现正规回收处理企业如果不能降低处理成本，将无法与大量的非正规处理商（手工拆解小作坊）竞争；处理商的回收成本影响电子废弃物的流向，是决定政府开展电子废弃物回收处理试点方案成败的关键因素；怎样建立正规的电子废弃物回收处理渠道是急需解决的紧要问题^[11]。

最初, Savaskan 等 (2006) 探究了单一垄断的生产商经由两个相互竞争的零售商销售产品的情景下, 闭环供应链对回收渠道的抉择问题, 研究结果表明生产商选用直接回收要比委托零售商回收的效率, 为生产商选择回收渠道提供了决策建议和方法支持^[12]。Webster 等 (2007) 比较分析了完全由生产商所控制的单独回收体系和联合回收体系的差异, 发现, 电子废弃物的联合回收体系能够为生产商带来较高的利润, 并且还会起到激发全社会回收处理行为的作用^[13]。但是, 对电子废弃物的单独回收体系, 生产商通常从设置的电子废弃物处理企业的市场准入门槛中获得利润, 在政策制定者的眼中, 这具有明显的垄断行为性质, 不利于电子废弃物的规范化回收处理。

于是, Toyasaki 等 (2010) 使用两阶段序贯博弈的方法建立模型, 剖析了回收商和生产商之间的竞争策略^[14]。倪明、莫露骅 (2013) 考虑在再制造闭环供应链中只有 1 个生产商和 1 个销售商的情形下, 对比零售商回收和维修中心回收这两种不同回收模式下的模型, 经过算例研究发现, 当产品再造所节约的单位成本比维修中心的修理成本高时, 零售商回收下给出的回收价格较高, 此时, 人们会倾向于零售商回收^[15]。徐红 (2014) 构建了回收渠道存在冲突时闭环供应链的定价模型, 剖析了在不同回收渠道中, 各主体的最佳定价策略和最优利润, 提出了一种改良的价格折扣契约模式, 来实现供应链的整体优化; 还构建了生产商回收和零售商回收并存的混合回收渠道中, 供应链的定价决策模型, 来协调电子废弃物的回收^[16]。

后来有学者考虑到了逆向物流中零售商之间存在的竞争。易余胤 (2009) 建立了零售商回收模式下的闭环供应链博弈模型, 对比在市场无领导者、生产商领导、零售商领导 3 种情况下, 电子废弃物回收率、销售价、参与主体收益、供应链总收益的区别^[17]。孙多青等 (2012) 探讨了逆向供应链中有多个零售商参与时, 最优定价策略的制定及利润分配的问题, 发现联合定价策略下, 回收价格提高、电子废弃物回收量的增加, 会带来整个逆向供应链收益的增加, 由此说明各方的合作有利于商家和消费者^[18]。

又有些研究加入了第三方回收的形式。Gu Qiaolun 等 (2008) 假定电子废弃物的回收率是回收价格的增函数, 比照分析了第三方回收、制造商回收、销售商回收, 3 种回收模式的决策机制^[19]。王文宾等 (2010) 将市场进行详细划分, 建立了电子废弃物采取零售商回收及第三方回收形式下闭环供应链的决策模型, 发现采取零售商回收时, 零售商有更高的回收付出, 而第三方具有更高的回收主动性; 对于产品的售价而言, 第三方回收形式下产品的价格高于零售商回收下的价格^[20]。聂佳佳 (2011) 探讨了由第三方企业进行电子废弃物回收的情形下, 零售商预计信息共享对闭环供应链的影响, 研究发现, 零售商分享私有的预计信息不利于零售商自身收益的获取, 而且信息分享对零售商、第三方回收企业的价值及各方对信息共享模式的行为偏好取决于电子废弃物的回收价格^[21]。周小双 (2012) 构建了第三方回收形式下的逆向供应链模型, 来分析生产商与第三方回收企业间的相关协调问题, 发现对称信息下的价格补贴契约机制能够调高生产商和第三方回收企业的收益, 从而达到协调整体逆向供应链系统的目标^[22]。Hong 等 (2012) 对比分析了零售商回收和第三方回收两种电子废弃物回收处置方式下, 回收率、生产商利润、各回收渠道主体总利润等指标^[23]。郭军华、李帮义、

倪明（2015）研究发现当消费者对再制造产品和新产品的支付意愿存在差别时，考虑回收率最大化，生产商应该选择直接回收；而当零售价最低、生产商收益最高时，零售商回收模式是首选，为生产商回收模式的选择提供了参考意见^[24]。邵小伟（2015）建立了再制造闭环供应链数学模型，来研究电子废弃物的生产商回收、零售商回收、第三方回收这 3 种回收方式，分别考虑集中决策、分散决策来对比分析模型求解及定价选择；并制定了改进的收益共享契约，以协调 3 种模式下的闭环供应链分散决策模型，探讨了消费者的支付意愿及政府补贴的变动对 3 种模式下电子废弃物再制造闭环供应链的定价决策的影响^[25]。余福茂等（2015）基于政府的引导和回收补贴激励，建立了制造商回收、经销商回收、第三方回收、处理企业回收 4 种电子废弃物回收处理模式的决策模型，并探讨了其最优参数，研究表明，要根据实际情况的不同，选择针对性的电子废弃物回收方式，考虑生产者责任延伸制度可以实现较高的回收率，并需要不断完善、优化政府对相关回收主体的引导激励机制^[26]。

还有一些学者运用数学模型定量分析了逆向供应链优化的影响因子。Wee 等（2011）比较了库存成本、销售价格、回收率等对电子产品的逆向供应链模型的不同影响^[27]。Dat 等（2012）使用数学规划模型的方法，计算出了实现电子废弃物逆向回收网络结构最优化的成本^[28]。

总之，关于电子废弃物回收渠道决策优化的研究已有较多成果，并仍在不断完善，从单一回收模式扩展到 4 种回收模式，研究不断深入。本研究在探索电子废弃物回收处理各类参与主体动态演化规律时可以对这些研究成果进行参考借鉴。

2.2 关于主要参与主体行为模式的研究

生产商，零售商，消费者，正规回收商、处理商，非正规回收渠道上的小商贩、小作坊等，都是电子废弃物回收处理中的主要利益相关主体。此外，还涉及政府管理部门、市场、行业协会等外部主体。本节将对生产商、消费者及其他参与主体的行为模式进行综述研究。

2.2.1 生产商回收行为研究进展

发达国家和地区的学者较早地认识到了生产商在电子废弃物回收处理过程中扮演的重要角色，Carter 等（1998）认为企业履行废弃产品回收责任的驱动因素主要来自 4 个方面：政府立法、供应商、竞争者和消费者^[29]。也意识到了政策法规、资源限制、经济利益等因素对于生产商实施回收处理的驱动作用（Mitra 等，2008；Lau 和 Wang，2009；Aksen，2009）^[30-32]。

我国学者也研究了影响生产商回收行为的相关因素。王兆华等（2008）采用实证研究发现，生产商的电子废弃物回收处理行为与有关的法律法规制度、企业领导者的环保认识、经济收益、消费者要求回收的意愿，呈明显的正相关关系^[33]。黄祖庆等（2008）通过研究，认为企业回收行为的驱动要素是回收产品获取的潜在期望收益，并且产品的回收价格越低、潜在的利润越多，就越能激发回收行为^[34]。陶建格等（2009）通过基于演化博弈模型的研究，发现影响企业环境治理行为演变的主要因素有，监管力度、企业的社会责任等^[35]。

翁孙哲（2014）研究发现，企业环境责任规范化的经济原因主要是外部性问题内部化、解决囚徒困境问题、提高企业利益相关者利益、通过个体行为加强法律施行效果等，我国在企业实践行为中还存在一些问题，需要不断完善^[36]。周旭、张斌和王兆华（2014）通过实证研究发现，家电生产商履行废弃产品回收责任的 5 个主要影响因素分别是政策法规、企业环保意识、废弃家电的回收处理成本、消费者环保意识、消费者参与回收的实际行为；其中，政策法规起最主要的作用，企业和消费者的环保意识及回收习惯次之，回收成本的影响程度最小^[37]。

还有一些学者考虑了 EPR（Extended Producter Responsibility，生产者责任延伸制度）的影响，Klausner 等（2000）基于 EPR 制度，以生产商回收为前提，就如何降低整个供应链的运营成本等问题展开讨论；并且以德国为例，采用定性与定量相结合的方法分析讨论了如何提高电子产品的回收利用效率，降低产品的运输成本和处理费用，最终提出了有关的建设性意见^[38]。何文胜（2009）引入多维的博弈理论，剖析了在 EPR 制度下，生产企业——实施 EPR 制度最关键的主体，在积极、消极两种不同的态度下其市场利益的变化^[39]。

现有的相关研究还不够完善，大多是采用实证研究。并且，我们要重点研究适合中国特色的电子废弃物回收处理方式。

2.2.2 消费者回收行为研究进展

如何降低电子废弃物回收处理所带来的污染，是全社会密切关注的问题。消费者使用电子产品，向供应链中输送电子废弃物，因此，消费者的行为选择是电子废弃物能否顺利回收的关键。国内外学者对消费者回收行为意向的研究发现，消费者偏向将电子废弃物交给小商贩进行回收，对正规回收渠道没有足够的了解^[40]。所以，探究消费者参与电子废弃物回收处理的影响因素，在实践中引导消费者选择正规的电子废弃物回收渠道，迫在眉睫。

Jacob 等（1995）对 67 篇实证研究的文献进行综合分析得出，消费者回收行为的影响因素有 5 种：内部促进、内部激励、外部促进、外部激励、人口统计因素，并成为日后众多学者选取影响因素的标准^[41]。

在消费者对电子废弃物的处置行为方面，Chan（1998）经过分析，认为预测消费者回收行为意向的关键因素是主观规范、环境态度，感知的行为控制在预测消费者回收行为意向上并没有显著的统计学意义，并且，环保宣传对消费者行为的影响程度等同于主观规范的作用程度^[42]。Stern（2000）认为影响消费者进行电子废弃物回收的因素包括环境态度、社会规范、环境政策、生活习惯以及个人能力文化素养、收入、知识和技能等^[43]。Bamberg（2003）经过研究，发现一般来说，消费者的环境意识并不能直接影响其环境行为，而是内化为一定的行为态度、主观规范，通过主观规范、行为态度、感知的行为控制间接影响消费者的环境行为^[44]。Tonglet 等（2004）对消费者的回收行为进行研究，发现行为态度、过去的行为习惯、感知的行为控制、对社区环境的关注以及行为结果 5 个因素显著影响了消费者的回收行为，但主观规范、情境因素、道德规范并没有统计学意义^[45]。

很多学者针对不同地域、不同国家的消费者的回收行为展开了研究。Nixon 等（2007）运用 logistics 模型对加利福尼亚州居民调查发现，年龄、收入、对政府和企业的信任、与现有回收设施的接近程度、社区人口密度、教育和环境态度等是影响消费者支付提前回收费用意愿的重要因素^[46]。陆莹莹、赵旭（2009）对上海地区的消费者进行了问卷调查和统计，建立了 Logistic 模型进行实证分析发现，消费者的回收行为显著受其过去的回收习惯、对回收设施和途径的认识、对回收经济性的态度这 3 个因素的影响；消费者更偏向于社区集中回收或销售商上门回收^[47]。Seunghae 等（2011）运用多元回归分析及相关性检验发现韩国消费者的环保态度和一些人口类因素影响其回收行为^[48]。Wang 等（2011）基于 Logistic 回归的研究表明，回收便利性、居住条件、回收习惯和经济利益是北京市居民电子废弃物回收意愿和行为的主要影响因素^[49]。Saphores（2012）运用 Logit 模型研究了 2136 个美国家庭样本对电子废弃物的回收行为，得出家庭回收意愿的主要解释变量是回收便利程度、回收经验和电子废弃物毒性知识，性别、婚姻状况、教育、年龄和种族是次要解释变量，而回收法律知识、家庭收入则没有统计学意义^[50]。Song 等（2012）使用 Logistic 回归方法分析了澳门消费者的电子废弃物回收支付意愿，研究表明年龄、教育水平、收入是影响消费者支付意愿的显著因素^[51]。Li 等（2012）对保定市城镇居民的研究发现高学历群体更为倾向于支付回收处理费用^[52]。

蓝英、朱庆华（2009）使用实证研究的方法，发现行为态度、经济动机、主观规范、服务动机、行为障碍对消费者参与废旧家电正规回收的行为意向有明显的影响；还使用方差分析研究了这些影响因素对不同性别、年龄、学历、职业、收入的消费者行为影响的差异性^[53]。余福茂、段显明等（2011）的研究表明消费者回收行为的影响因素通常有，回收便利性、主观规范、环境知识、环境态度、居住条件、收入、性别、婚姻、年龄、教育程度等，然而不同国家和地区学者的实证研究结论并不十分一致，特别是关于环境知识、回收便利性及人口统计变量的解释效力，有较大分歧^[54]。余福茂（2012）对 317 名城市消费者的问卷调查结果使用分层调节回归分析方法研究发现，对消费者有关电子废弃物回收的宣传力度越强，越有利于促进消费者的回收行为意向转变为最终的实际回收行动；消费者自身拥有的有关环保知识越多，便会越倾向于参与废旧家电的正规回收；回收渠道的便利性越高，消费者对电子废弃物的回收越积极^[55]。陈占锋、陈纪瑛、张斌等（2013）经过研究发现，环保认知、感知的行为控制、回收态度、经济成本、回收习惯和环保宣传对消费者参与电子废弃物回收的积极性有明显的影响^[56]。

2.2.3 关于其他相关主体回收行为的研究进展

除了关于生产商和消费者回收行为的研究，还有一些学者针对电子废弃物回收处理中涉及到的其他相关主体的回收行为进行了探究。

Lindhqvist 等（2003）认为政府应该加大对该行业的扶持及政策的偏向，同时还应当制定相应的激励措施保证生产商的在产品设计的初期就考虑到绿色环保的因素，以便于该行业的长期稳定发展，并达到保护自然生态的目的^[57]。张曦（2007）认为，要想对废旧电子产品进

行有效的回收处理,政府需要从立法、监管、治理 3 个方面进行努力,还提出了要加强电子废弃物回收体系的建设,构筑社会化的回收网络^[58]。Deniz Aksen 等(2009)研究了政府作为领导者最小化单位补贴,企业作为跟随者最大化净利润时支持性政策和立法性政策对政府补贴金额的不同要求^[59]。汪翼等(2009)探讨了生产商和分销商分担回收责任、生产商责任延伸制及分销商责任制等不同的回收管制政策对闭环供应链中各个主体行为的影响^[60]。Yabar 等(2013)通过对日本电子产品制造业进行实证分析得出,政府环境政策和市场需求是推动企业技术改造的重要因素^[61]。张汉江等(2014)将政府也作为一个决策主体并以财政支出最小化为目标,建立了一个 Stackelberg 主从博弈模型来分析以政府为领导者、生产商和回收商为跟随者的回收再制造过程,设计了制造商对回收商回收努力的最优激励契约,对政府不参与决策和参与决策这两种情形求解了其短期均衡。通过对均衡结果的分析讨论了政府决策的绩效以及制造商的风险态度对闭环供应链的影响^[62]。任鸣鸣等(2015)建立了一个以政府期望收益最大化为目标的优化模型,来分析政府潜在收益和监督机制之间的相互作用,研究发现,电子产品制造商参与电子废弃物源头污染治理的内在动力是消费者对绿色电子产品的偏好而增加的潜在收益;政府除了通过监督、激励引导制造商进行电子废弃物源头的污染治理,还应该充分地监督消费者的行为^[63]。

这些研究主要是考虑了政府这一主体的激励和监管作用。

而曹束等(2013)制定了一个政府对生产商的激励契约,剖析了政府激励契约与生产商的再制造率、付出程度等因素之间的关系,探讨了 EPR 制度施行的不同阶段中各类因素对政府期望收益的影响,最终发现,政府激励契约机制能够很好地达到生产商高效度激励的目标,并增加政府的期望收益^[64]。

总之,国内外学者对消费者回收行为的实证研究往往借鉴计划行为理论,使用结构方程模型、Logistic 回归等方法进行统计检验。但是,与之类似的对生产商回收行为的实证研究则相对少见,至于对小商贩、小作坊、正规回收商或处理商等主体行为偏好的研究更多以思辨或定性方法为主,实证研究则更少。同时,现有成果在研究主体间的行为交互时,大多数是以生产商或处理商为主,考虑回收商的研究更是凤毛麟角。因此本文将从新的角度,深入考虑正规回收企业 and 非正规回收的小商贩,探究电子废弃物回收处理渠道的动态演化进程。

2.3 电子废弃物回收处理中存在的问题

电子废弃物的回收处置过程中,最关键的问题在于管理。回收渠道的不正规、法律法规的不健全、消费者环保意识的缺失等等,造成当前我国电子废弃物的回收处理中迫切需要解决的问题:①电子废弃物很难流进正规回收渠道。正规回收企业运作成本高,几乎不盈利甚至亏损,因此投入到回收中的精力和成本很少;而且,正规回收企业大多提供统一的回收价格,灵活性差,不能像小商贩那样随机应变。多种原因造成正规回收企业难以盈利,甚至亏损,因此正规回收渠道难以与小商贩竞争。②电子废弃物不能得到妥当的处置。由于电子废弃物回收处理设备建设方面的滞后,回收来的电子废弃物大部分被送到不法的手工作坊拆解、

处理，或直接被送到二手市场售卖。此外，更重要的原因是电子废弃物一开始没有进入正规回收渠道，造成后续的处理过程没有收到有效的监管和控制。

另外，电子废弃物的回收处理中涉及到许多不同类型的参与主体，消费者、生产商、回收商、经销商和政府等主体需要密切配合，才能实现全社会效益的最大化。目前，我国电子废弃物的回收处置管理还处在初级阶段，与回收管理有关的法规、制度还很不成熟。

(1) 缺乏系统的法规和标准体系。现存的法律法规对收费机制、评价体系等问题并没有针对性的解决方案，且大多有一定的执行难度。如“消费者不能擅自丢弃不用的家电或将其拆解，应该将废旧家电交给家电售后服务机构、经销商或者回收企业进行处理”，这些类似的规定总体上有助于促进我国电子废弃物回收管理的协调发展，但在实际生活中可操作性还需进一步讨论。

(2) 缺乏严格的行业监管体系。我国当前还没有建立专门的机构承担电子废弃物产品回收、管理的职责，也没有颁布详细的激励措施和扶持政策等。因而，电子废弃物的正规回收处理工作进展得并不顺利。发改委、海关总署、质检总局、工商总局、环保部等有关部门对自己管辖的电子产品制定了一些法规，但在实施过程中会产生一定的混乱，企业不明确自己要遵循的章程有哪些，可能会顾此失彼。

(3) 缺少规范的回收处理操作制度。回收来的电子废弃物在贮存、运输的过程中，存在一些潜在的危险，可能会泄漏有毒的污染物，不妥善处置必将严重危害环境和人们的生命。所以，当务之急是建立有效的回收、贮存、运输管理制度。

(4) 缺乏针对非正规回收的一揽子解决方案。非正规回收渠道回收数量大，而且环境污染严重，应该对其重点管理。但是，目前针对个体户形式的回收、拆解缺乏有针对性的解决方案，而且对非正规渠道的监管手段过于单一。

针对这些问题，很多学者做出了研究。以往的研究一般借助还原论，对系统中存在的复杂交互关系做了简化处理，不能严谨地解释系统中微观主体的行为是怎样带来系统宏观层面的变化，即使做出了解释，也可能与现实系统相差很远。这种研究思路建立在电子废弃物的管理成员从大局出发、以共同的目标来指导自身行为的假设之下，但现实情况是，企业一般在遵循规章制度的前提下，谋求最大化自身经济利益的方式，独立地进行自主决策，未必会遵照上级的指示。

纵观这些学者的研究，对参与主体的回收行为影响因素的分析，更多考虑的是不同主体的属性因素、政府的补贴因素等，较少考虑同类主体之间的竞争因素。并且在电子废弃物回收处理主体之间的交互方面的研究，大多考虑的是多种不同主体相互作用下的演化，对单个群体之间内部的演化分析较少，而以非正规回收主体的研究则更少。因此，本文以复杂适应系统理论为基础，借鉴其建模技术，研究电子废弃物回收商的行为，尤其是非正规回收的小商贩的行为演化，建立电子废弃物回收处理渠道演化的计算实验模型，剖析电子废弃物回收处理渠道的动态演化规律，提出促进电子废弃物回收处理渠道的正规化、生态化发展的相关建议。

2.4 计算实验方法及其在政策研究中的应用

在本论文中，电子废弃物回收处理渠道演化模型的建立使用的是计算实验的方法。

计算实验是利用科学计算技术，模拟现实系统运转的规律，依托计算机将现实系统转化成人工社会系统，对现实科学问题进行仿真实验研究的方法^[65]，如图 2.1 所示。

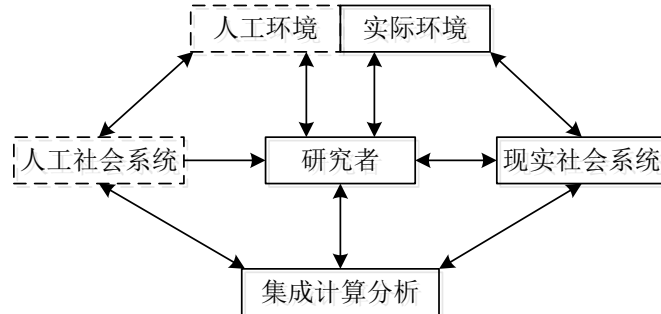


图 2.1 社会科学计算实验的研究框架图

计算实验还可以用于研究因为法律、伦理、技术、实验周期等条件限制而导致无法进行实际实验的场景。从规范化科学研究的角度看，社会科学计算实验的研究范式主要包括 5 个方面：界定研究问题及环境、确定研究假设、建立模型框架、实现计算实验、评估与比较实验结果^[66]。关键是对研究对象进行概念化建模，模型一般由社会系统层次、智能主体层次、智能主体基元层次这 3 个层次组成^[66]，如表 2.2 所示。

表 2.2 社会科学计算实验的三层模型结构

层次	描述
社会系统层次	对应于行政区域、经济系统、行业、社会组织、供应链等社会系统
智能主体层次	对应于企业、社会组织、组织中的人等独立决策单位
智能主体的基元层次	包括智能主体的记忆、认知、行为、学习、偏好等

2.4.1 复杂适应系统理论

计算实验研究是以复杂适应系统理论为基础的。

钱学森（1990）提出，社会系统是一个“开放的复杂巨系统”，他认为复杂性问题实际上是由复杂系统的动力学特征产生的^[67]。20 世纪末 Holland 提出 CAS (Complex Adaptive System, 复杂适应系统) 理论是一种复杂性科学理论。他的观点是，作为系统组成部分的“要素”是“具有适应能力的主体”。系统的整体性变化主要来源于系统内部各主体间的“适应性”，主体的行为规律是系统产生宏微观变化的源头，即“适应性造就复杂性”^[68]。

总体来说，CAS 理论主要有以下特点：把系统的构成要素看成是有生命的主体；认为主体与环境之间、主体与主体之间的相互影响和相互作用是系统演化的驱动力；为架设宏观与微观之间的桥梁提供了一种新的思路；把随机因素引入了遗传算法，因为，主体状态、系统结构及整体行为方式都会受到随机因素的影响^[69]。

CAS 理论的组成架构蕴含宏观和微观两个方面。微观方面，就是指具有适应性的主体。系统在主体与主体之间、主体与环境之间的相互作用中发展，并不断适应环境，由此形成了

系统宏观上的复杂性。复杂适应系统将宏、微观联合起来，由微观主体的行为推演整体的宏观效应。

每个主体根据自身掌握的信息及其行为偏好做出预测与抉择，所有主体的选择行为共同影响系统的运作，同时，社会系统的发展又会影响各个主体的行为，使其不断更新行为预测规则^[70]。我们的研究重点在于剖析客观事物的进化原因、演化历程等，并力求尽最大能力精确地预测将来的状态。

所以，详细地了解 CAS 理论的思想是运用计算实验的前提条件。供应商，生产商，零售商，消费者，回收商，处理商，小商贩、小作坊等都是构成电子废弃物回收处理渠道的重要微观主体，此外，还涉及政府管理部门、行业协会、民间组织等相关参与主体，这些微观主体及其环境（市场、政府、社会公众等）组成了一个复杂的适应系统，本文就使用 CAS 相关理论，采用基于 Agent 的建模方法来进行研究。

2.4.2 基于 Agent 的建模方法

由于复杂系统本身的特性，一般的数学模型可能无法完整地描述整体系统的运作，因此，我们大多使用宏微观相结合、定性与定量相结合、逻辑推理与思辨的方法来研究复杂系统。随着计算机的科学计算能力的提高，人们发现可以把复杂系统中各个因素之间的非线性关系转化为程序，以程序的运行来模拟系统的演化，进而能对实际需要长时间演化的系统进行动态仿真，即计算机建模方法，其仿真流程，如图 2.2 所示。

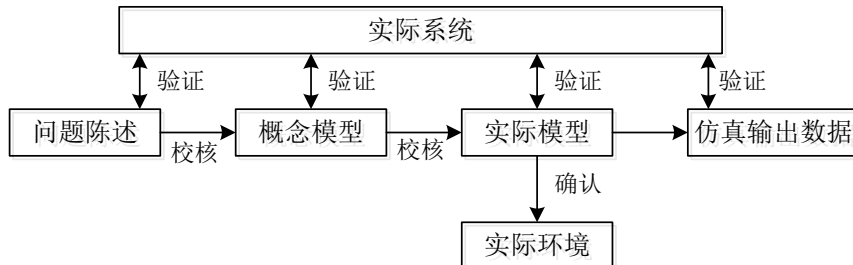


图 2.2 计算机建模仿真流程

校核，分析研究者是否能将现实问题陈述准确地转化成概念模型；验证，是为了测试在实际应用中仿真模型对现实系统的反映程度；确认，是对模型的有效性、可行性的判定。仿真模型必须与问题陈述进行校核，并验证与实际系统的契合程度，再经过最终确认才可以投入应用。

由于其建模特点，计算实验方法成为了继实验、实证、数理分析之后的另一种科学研究方法^[71]，它使用由下及上的研究思路，建立仿真模型，观察各主体的行为规则与交互方式来探究系统的动态演化规律，常用的 3 种计算机建模方法的比较^[72]如表 2.3 所示。

表 2.3 三种建模方法的比较

模型	系统动力学	元胞自动机	ABMS
建模观点	自下而上	自下而上	自下而上
模型表现形式	一系列的方程	一系列模型构造的函数规则	多个自主的 Agent 构成，Agent 之间存在交互

参数特征	缺乏空间因素,时间、属性及要素间反馈关系都是连续的	时间、空间、状态都是离散的	时间、空间、状态都是离散的
支持网络结构	否	否	是
学习机制	无	无	有
适用领域	依赖物理规则控制的系统	复杂系统的时空演化仿真	对人类社会行为和个体决策的建模,或分布式计算

ABMS (Agent-Based Modeling and Simulation) 方法——基于 Agent 的建模与仿真,是从关系数据库产生之后最主要的建模方法之一,起源于分布式人工智能领域的研究。主要思路就是,将微观与宏观相结合,对现实系统进行抽象,在计算环境中建立需要研究的系统模型,通过模型内部主体之间的交互行为研究整个系统的动态演化行为。其建模流程如图 2.3 所示。

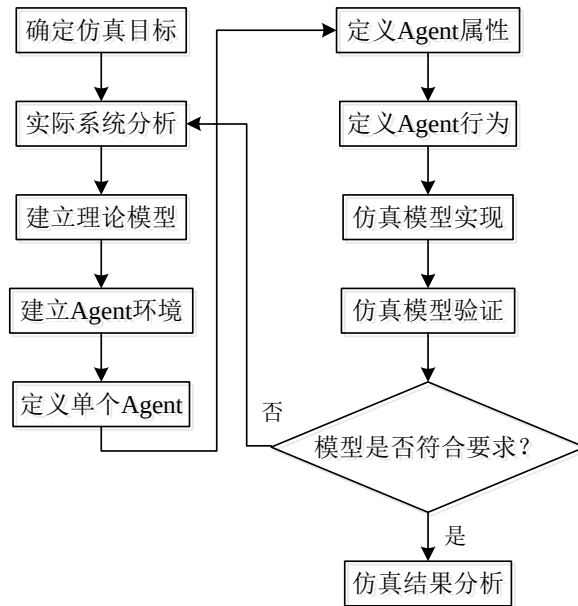


图 2.3 ABMS 流程

与传统的建模方法相比, ABMS 方法有如下几个突出的特征^[73]: ①系统中的主体具有自身的主动性、适应性、学习进化能力,不再只是被动地接受。②重点关注相关个体的交互行为和作用,自下而上地研究系统从微观到宏观的发展。③采用更契合客观实际、质变和量变相互联系的思想去探索系统发展和演化的内在规律^[74]。④克服了实证研究、统计规律的局限性,从对系统中各个互相紧密联系的层次的研究去观测实际现象。如表 2.4 所示。

表 2.4 传统模型与 ABM 方法的比较

研究方法	传统模型	ABMS 方法
系统分析与设计方式	自上而下	自下而上
模型系统的基本元素	基于方程	适应性 Agent
模拟结果对目标系统的意义	很难解释	解释能力强
系统参数的数量	少	多
环境的角色	给定环境	创建环境
建模者与模型的关系	建模者能对模型做出反应	建模者可以从模型学到知识

方法中提到的主体 Agent 一般具有以下特性^[75]: ①自主性。不受外界因素的干预,根据自身状态、对外界信息的认知及某种规则,决定自身的形态和行为。②反应性。能够通过各

种通信机制，发现系统外部的环境变更，然后做出反应。③社会性。依照某种通讯规则与其他的主体发生行为交互及协调。④主动性。能够通过内部行为机制驱动而采取主动行为，有目的地与外部环境交互。⑤适应性。依据自身的学习经验，为在一定程度上适应外界的环境变动而做出行为调整。⑥移动性。遵照某种规则在系统环境中游走。⑦偏好性。依照主体的内部行为规则，显现出其行为选择的偏好。

Agent 特性越多，构建的仿真模型就越接近现实，但是系统建模的过程就越复杂。因此，在明确了研究目标之后，梳理 Agent 必须具备的特性、合理把握 Agent 建模的深度，以满足研究目标，是运用 ABMS 方法研究的症结所在。

运用 ABMS 方法进行研究，首先要将该现实系统进行梳理，理清现实系统的体系结构、系统的功能、系统所处环境以及系统要实现的目标，区分系统中的不同主体，明确 Agent 仿真模型的构建对象；其次，将系统的关键属性抽象出来，建立系统成员的 Agent 模型，设定主体的属性、行为偏好、交互规则及有关的限定条件；最后通过多 Agent 系统的运行，来研究系统成员个体行为对系统整体特性产生的影响，在某些情况下可以将实验结果与现实结果进行比较分析评价，通过可重复的实验来推断和总结系统最终行为产生的原因。其详细的研究思路如图 2.4 所示。

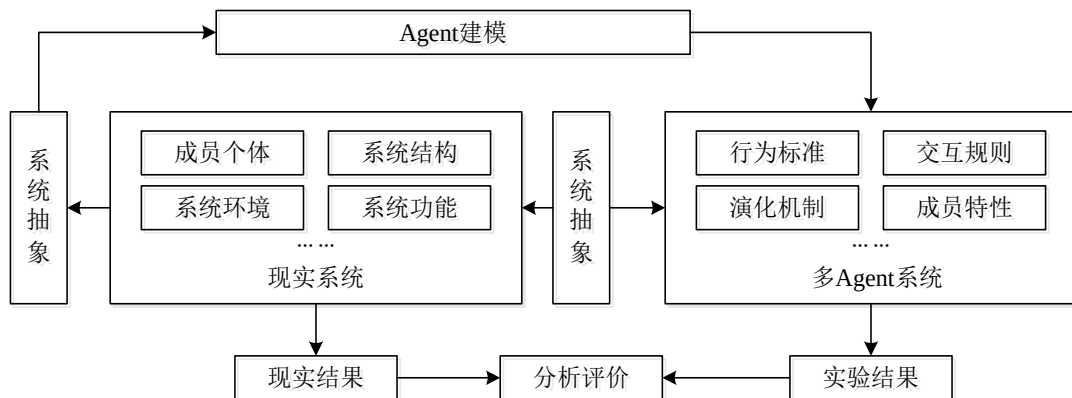


图 2.4 基于 Agent 建模的计算实验的详细研究思路

2.4.3 计算实验在环境管理政策研究领域的应用

在目前社会环境管理领域的探究中，定性分析占据主导，而数理分析、实证分析在企业环境的管理研究中占有主要位置。然而，由于计算机仿真的研究优势，有些学者采用了计算实验方法、多 Agent 技术来钻研环境问题的规律性及环境管理政策的实施效果。基于计算实验的研究，最早的是通过糖域模型的研究和扩展，分析人类财富的分配问题和原始经济产生的依据^[76]。

许多学者基于人工社会模型和计算实验方法来研究复杂系统的演化规律。

毕贵红（2008）以 CAS 理论为基础，结合 ABMS 与系统动力学将实验结果进行对照，剖析了消费者对固体废物的回收行为与政策间的动态关系，为人们制定合理有效的政策提供建议^[77]。赵秀美（2008）为了实现水资源分配的最优化，建立了天津市水资源的 Agent 仿真模型，研究了多水源、多用户的情形下，水价的变化对用户用水的影响^[78]。王继荣（2009）

使用多 Agent 理论建立了系统动力学模型, 来研究废旧家电回收处理的调度问题, 比较分析实验结果与真实数据, 为有效优化废旧家电回收再利用过程中的库存管理提供了理论依据^[79]。朱江艳(2010)建立了发电商竞价的演化博弈模型, 分别分析了在不同的市场需求、不同的竞价机制、不同的最高限价等情形下, 发电商报价策略的演化过程, 发电商可以参考模型分析出的其竞争对手的策略偏好, 重新调配自身的竞价策略, 实现收益的最大化^[80]。赵剑冬(2010)借鉴了计算机科学中 Agent 技术在信息网络、软件工程、分布式计算和智能控制等方面的研究成果, 结合人工社会的思想, 建立了产业集群下企业竞争的 Agent 仿真模型。在仿真结论的基础上, 提出了七条促进产业集群可持续发展的针对性策略其研究成果对产业集群政策设计以及经济社会系统建模研究具有重要的意义^[81]。潘里虎和黄河清(2010)考虑农民、农户这两类主体建立模型, 模拟实现了在社会制度、政策措施、经济条件存在差异的情况下, 两类主体对土地利用的不同决策, 从而得到了人与自然交互的一些规律^[82]。金帅(2011)建立了排污权交易的计算实验模型, 再结合数理分析、实践分析, 立足政府的需求, 研究了我国排污权交易中系统效率优化、政府监管动态演化、初始分配机制设定的有关问题^[83]。Zhang 等(2011)在分析排污权交易系统中企业主体的属性和行为规则的基础上, 构建了排污权交易系统模型的结构, 开发了基于 Netlogo 的排污权交易仿真模型^[84]。李真(2012)为了达到工程供应链的整体协调与优化, 使用计算实验方法对工程供应链中的工期优化策略、成本优化策略、质量激励策略、工期风险控制策略、技术创新策略等问题进行了深入研究^[85]。龚承柱、李兰兰、柯晓玲等(2012)用 NetLogo 对不同种类的煤矿水害事件进行了演化模拟模型, 剖析了在不同地质条件的矿区, 多种因素对煤矿水害的动态演化进程的影响^[86]。刘闯、肖条军、田晨(2015)建立了由供应商、消费者、生产商组成的多 Agent 模型, 研究了不同的理性消费者在谋求自身效益最大化、具有不同选择偏好的情形下, 生产商的产品生产策略选择偏好^[87]。

总之, 基于 Agent 模型的仿真方法为政策制定领域首创了兼具科学性和人性化的应用远景^[88]。盛昭瀚(2009)、张维(2010)等建议国内外研究者不断摸索计算实验等创新方法论在重大复杂管理问题中的研究应用, 而且做了大量应用推广工作^[89-90]。

总的来说, 计算实验方法采用自下而上的仿真建模方法, 结合演化理论、多 Agent 技术等来研究复杂社会系统的动态演化规律。目前, 虽然计算实验方法尚未形成一个完善的理论体系, 然而它已经深深地渗透到经济学、管理学、传播学、公共政策等社会科学领域, 成为首要的研究方法。正是计算实验方法散发出的蓬勃朝气与生命力, 激励着我们把这种方法应用到环境管理政策认识、设计与优化的研究中。因此, 本文的研究就是以 CAS 理论为基础, 以 ABMS 方法进行展开。

3 计算实验模型构建

关于电子废弃物回收处理渠道的研究是一个复杂的问题。由于众多利益相关主体、政府等之间复杂的相互作用，还有复杂的经济、环境因素的影响，使得电子废弃物的回收处理具有多种渠道演化路径，难以捉摸与控制。本章首先剖析电子废弃物回收处理渠道的复杂性，接着提出模型的基本假设和主体交互规则，初步构建电子废弃物回收处理渠道演化的计算实验模型框架。

3.1 电子废弃物回收处理渠道的复杂性分析

电子废弃物回收处理企业的数量多、回收渠道广、处置工艺复杂，毫无疑问电子废弃物回收处理系统是一个非线性的复杂系统，牵涉到许多不同类型的相关主体，供应商、生产商、经销商、消费者、回收商和政府等，这些异质性主体具有自主的学习能力。他们能够根据外部环境变化或其他主体策略的改变而相应地调整自己的行为，主体与环境之间、主体与主体之间的交互常常表现出非线性的、动态且密切的关系，然后造成上一层次甚至整体层次上的系统结构分化或产生多样性的繁杂行为。系统的行为特征不等价于各主体行为的叠加，其中的每个利益相关主体根据学习和反馈不断改变自身行为方式，也影响着其他利益相关主体的决策，导致系统结构的动态演化。

用计算实验方法对电子废弃物回收处理系统的演化分析进行建模时，其整体模型结构一般有以下三个层次：电子废弃物回收处理系统宏观层次、参与主体层次、参与主体的基元层次，如图 3.1 所示。所以，我们从这三个层次来分析该系统的复杂性。

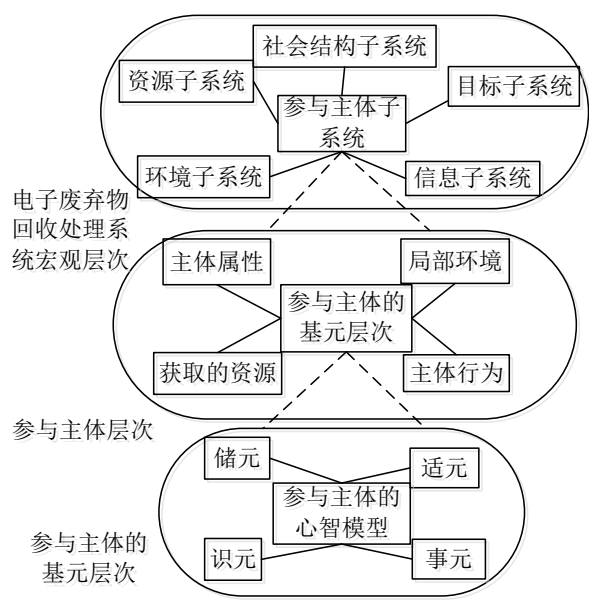


图 3.1 电子废弃物回收处理系统的计算实验模型框架

3.1.1 多主体行为形成的复杂性

模型参与 Agent 层次——描绘电子废弃物的回收处理中所涉及的主体的行为偏好，主要有政府、供应商、生产商、分销商、消费者、回收商、处理商等参与主体。我们要对所有影响参与主体行为活动的相关要素进行分析，在此层次上通常包含：

①主体的属性，包括描述在实验过程中相对不变的特征，如主体的标识、学习能力等，以及可能变化的特征，如政府的法规政策、消费者的电子废弃物处理行为偏好等。

②可获取资源，主要指可获得的人、资金、信息、技术等，在模型中有被全局定义的，如电子废弃物的市场回收价格等，也有被局部定义的，包括企业的处理能力、对历史决策的记忆等。

③主体的局部环境，主要是指各个主体在电子废弃物的回收处理中所面临的有限环境，包括主体邻居的集合、在系统中所处的地位等。

④主体的行为，是主体基元模型的计算结果，是对市场环境的某种适应性反应的结果^[66]。主体根据其自身属性、可获取资源及其他主体行为等信息综合计算出下一步的行为决策。

人是电子废弃物回收处置管理中的枢纽，是最活跃、最重要的因素，具备自主的经济行为偏好和社会性特征，在对电子废弃物的使用、回收、处理等社会经济行为的过程中，将人类和环境资源紧紧相连在一起。同时，系统中的消费者、制造商、回收商、处理商等主体是多元化的利益相关群体构成的，具备很强的自主学习能力，且目标明确。主体进行行为偏好决策的过程，就是与系统中的其他 Agent 交互、与外界环境交互，然后不断学习、进化，改变本身的行为方式去适应整体环境变化的过程^[66]。由于系统中各主体存在主观性，采取的行为活动也具有差异，使主体的行为表现出多样性与自适应性。一方面，电子废弃物的回收处理显露出很强的随机性、不确定性；同时，在某种程度上又展现了一定的秩序性、规律性，故而，在研究主体行为的复杂性是难以完全摒弃主体活动的无序性、偶然性^[91]。所以我们认为，主体的适应性成就了整体系统的复杂性，参与主体行为的适应性造成了电子废弃物回收处理系统的高度复杂性。

3.1.2 系统层次性形成的复杂性

宏观层次，是用来描绘整个电子废弃物回收处理过程的宏观特性的，以这个模型为背景进行演化实验，通过对该系统演化的实验现象与现实社会现象进行比对分析，而实现对现实系统的管理与控制。其中：

①环境子系统描述了影响电子废弃物回收处理系统的各种因素，例如原材料市场变动、回收处理技术变动、回收渠道变动、环境容量大小等等因素，环境子系统根据计算的需要模拟现实系统的真实情景。

②参与主体子系统主要包括政府、消费者、制造商、回收商、处理商等，在该模型中可以根据研究目的不同构建不同类型及数量的参与主体^[92]。例如，构建具有不同电子废弃物回

收处理技术水平差异性的企业来分别对应现实中不同区域的实施条件与环境。这个子系统的行为活动及功能可以进一步由参与主体模型来描绘。

③资源子系统用于描述系统中所涉及的环境与信息资源，主要受环境的承载量、生产资源投入等的限制。

④社会结构子系统描述系统中的各个主体之间的供应和交互关系及过程，例如，政府与回收处理企业间的关系、系统中回收处理企业间的关系、污染排放量与自然环境间的关系。

⑤目标子系统描述电子废弃物的回收处理过程向着生态化、规范化、循环化的综合目标发展。

电子废弃物的回收处理复杂系统是电子废弃物产生、回收与处理、综合管理调控等子系统，是人、物、信息、知识等多种要素的动态集合。这些重要的因素构成了一定的层次或网络结构，当这些层次或网络结构随着系统的演化而不断产生差异时，便会显示出繁杂的动态演化现象^[66,93]。对该系统的研究要充足地斟酌由各主体的行为偏好和系统结构的差异性形成的复杂现象，并且系统中的有关要素与电子产品的生产、消费、回收、处理主体之间所有联系的总和构成一个整体的动态复杂布局，随着电子废弃物回收处理渠道的动态演化，系统结构也会不时发生变更^[94]。

3.1.3 系统开放性形成的复杂性

电子废弃物的回收处理系统同时也具备开放性，与复杂的社会经济系统之间具有频繁的物质、信息等交流，并会受到外界环境状况的动态影响，是一个人、物、信息的等要素不断流动的动态集合体。外部环境的复杂性必然会引起电子废弃物回收处理系统行为的不确定性与不稳定性。另外，因为经济全球化进程的发展，全球电子废弃物的回收处理中任何一项技术、法规的变化都有可能通过改变电子废弃物回收处理复杂系统的某一个环节而引发其整体性的变化，从而引起系统行为与管理行为的变更，并产生复杂性。

系统中的参与主体不断与外部环境进行交互。基元模型描述了参与主体心理和行为活动的基本要素，对应单个主体的心理和行为在人工系统中的演化，是研究电子废弃物回收处理渠道发展进程的基础。充分思量各个相关的微观主体的心理认知、行为偏好、交互规则在系统中的动态变化规律，才可以概括地反映整体系统的宏观涌现机制^[66]。因此，在计算实验研究中，参与主体会为了达到他的目的，根据环境或周围个体的行为变化，不停地协调各自的行为活动规律^[95]。例如，对于电子废弃物正规回收处理企业来说，假定其为理性经济人，不同类型的企业，其学习能力、预测方式等都存在差异性，它在决定是否违规排放废水、废气或者采用何种处理技术时，需要对各种可选方案进行对比分析，并据此拟定其生产经营策略。

3.2 问题描述与模型假设

3.2.1 问题描述

由以上的分析可知，本研究的关键环节就是利用 Agent 建模技术构造一个能够模拟电子废弃物回收处理渠道动态演化的模型，而后才能进行演化分析，如图 3.2 所示。

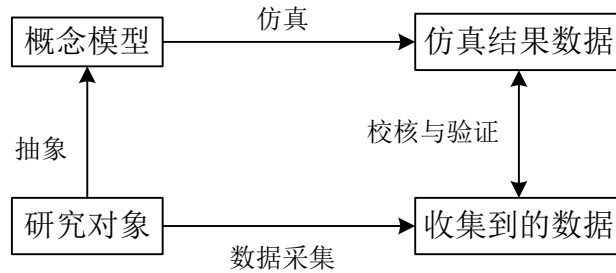


图 3.2 仿真建模的逻辑框架

因此，首先需要将现实系统抽象成概念模型，充分体现现实系统的真实特性。

电子废弃物回收处理系统中包含供应商 Agent、生产商 Agent、分销商 Agent、零售商 Agent、消费者 Agent、小商贩 Agent、正规回收企业 Agent、政府 Agent 等利益相关主体，如图 3.3 所示。

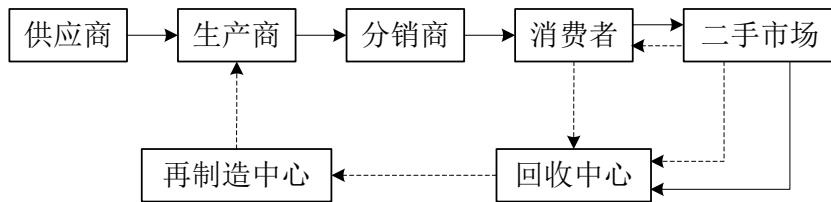


图 3.3 电子废弃物回收处理涉及主体

（1）供应商 Agent

供应商 Agent 为生产商提供生产产品所必需的原材料、零件或半成品，在其运作过程中售出原材料，同时需要付出一定的固定成本，包括交易成本、环境投入成本、技术创新成本。企业会根据实际经营状况，采取一定的价格调整策略，但这种改变会受到成本约束，比较有限。当企业的资产小于零时，就会宣布破产。供应商在运作过程中应该在改进原材料生产过程的工艺和技术，尽力选用能循环利用的材料及低毒害材料，保证资源的高效利用^[96]。

（2）生产商 Agent

生产商 Agent 的主要活动即充分了解本身的生产能力及当下的库存情况，在合适的时间订购合适数量的原材料，然后对其进行加工^[92]。原材料的来源有两种：供应商提供的新材料；经过处理商处理的二手零件、材料等。生产商把由新材料与二手材料制造好的电子产品运送给分销商，分销商再将产品输送到零售商，最后，到达消费者手里，由此形成一条紧密连接的协作供应链。企业在经营过程中也会采取一定的价格调整战略来适应市场变化，但这种改

变同样也是有限的。

在生产者责任延伸制下，生产商需要负责电子废弃物的回收工作，包括选取回收形式、整合回收流程、协调与消费者之间的交互等。

（3）分销商 Agent

分销商 Agent 协调零售商与生产商之间的关系，要求生产商提供产品，以满足零售商的订单需求，并将产品供应给零售商^[92,97]。

有一定数量的分销商会参与电子废弃物的回收。

（4）零售商 Agent

零售商 Agent 主要进行购、销、存、拆零、分包等活动，直接服务目标是方便消费者随时随地的购买，在产品的销售过程中扮演着重要的角色，构建起了生产商、分销商、消费者之间联系的桥梁。

（5）消费者 Agent

消费者 Agent，寻找价格、质量等合适的生产商和电子产品，完成购买行为，对电子产品进行消费；消费完毕后，选择电子废弃物最终的回收渠道。本论文主要考虑消费者的投入行为。在正向物流中，生产商有需求，供应商就会提供其所需的物料，与正向物流正好相反，电子废弃物的提供者是在不需要再使用这个产品时，才将产品提供出来。

（6）小商贩 Agent

小商贩大量存在于县级城市、农村等地区，游走在街头巷尾回收电子废弃物。回收之后，在自己的家庭小作坊里手工拆解、处理电子废弃物。

（7）正规回收企业 Agent

正规回收企业 Agent，将回收品收集起来并进行集中管理，以便处理企业进行再生制造。他们可能是分散在各地的分销商、零售商或与再制造商签署了协议的生产商等。

（8）处理商 Agent

处理商 Agent，对回收到的电子废弃物实施分类检测，经过测试、修理后可以继续安全使用的，售卖给二手市场；不能再循环使用的电子废弃物产品，使用环保的手段进行拆解，合理地循环利用资源，对实在不能再利用的资源采用无害化方式进行处理，力求降低环境污染、提高资源有效利用率。在时间、金钱充裕的情况下，还可以自主研发或从国外引进适合我国特色的电子废弃物处理技术^[98]。

本研究的核心环节是电子废弃物的回收处理过程。消费者考虑其本身的便利性及收益的最大化，较少选取将电子废弃物交给正规回收企业进行回收。这些问题，导致正规回收、处理企业的电子废弃物来源难以保障，企业的健康发展受到影响，造成当前我国电子废弃物的回收处理中迫切需要解决的问题：一方面，大多数消费者考虑到便利程度和收益，仍然偏向于将电子废弃物交给走街串巷的小商贩进行回收，小商贩的整体回收量占到全国可回收电子废弃物的 80% 以上。这些回收品的一部分被简单维修后流向二手市场，另一部分则在小作坊进行拆解、处理。但他们没有正规的拆解和处理技术，一般以低效和高污染的方式进行；无

法获利的部分则只是被简单得焚烧、掩埋或丢弃，浪费了很多资源，对环境还有很大的危害。另一方面，正规回收处理企业本有专业的设备和技术可以对电子废弃物进行处理，却由于在回收价格和便利程度上无法与小商贩竞争而回收量严重不足，“食不果腹”，无法支撑处理设备的运转，而被迫面临着长期停工的困境，巨大的资本投入得不到预期的经济效益和财务收益。因而，我们迫切需要改变当前电子废弃物在正规与非正规回收渠道分配严重不均的状况。

3.2.2 模型假设

电子废弃物回收处理系统所面临的决策环境十分复杂，为了便于分析，我们将电子废弃物回收处理渠道演化的仿真模型进行了简化，暂时只考虑消费者 Agent、小商贩 Agent、正规回收企业 Agent 及政府 Agent 四种主体。为了便于分析，我们对模型进行以下假设：

(1) 各个主体分布在一个二维世界里，它们有局部感知能力，只能感知到左、右、上、下、左上、右上、左下、右下这 8 个方向的信息（我们可以设置不同的感知半径 r ，来增加其感知能力）。Agent 之间的相互作用、相互影响在系统结构中传播，也就是说，组织中每个 Agent 的行为都会对其他主体产生一定的影响，其影响因子为 α 。但 Agent 能够获取的信息资源是有限的，Agent 对信息的处理能力也是有限的，他们的决策只是在有限信息的基础上进行的，通常都是根据自己感知到的信息做出反应。

(2) 仿真模型中的 Agent 都是有限理性的个体，具有各自不同的行为偏好。在市场机制下，非正规回收商一般都是盲目寻求最大化自身经济利益的途径，较少的考虑环境因素，因此，非正规的回收商会倾向于对回收来的电子废弃物进行简单的拆解，获取有用的资源，或者出售给二手市场。

(3) 把各种电子废弃物抽象成一类，这样建立的模型，可以适当改变参数来观测不同种类电子废弃物的趋势。

(4) 不对小商贩设置电子废弃物的回收上限，回收的数量多，需要处理的数量也就多。

(5) 演化模型的迭代周期为 $T=50$ 。模型中涉及到的第 t 个周期（ $t=1,2,...,50$ ）的各个参数描述如表 3.1 所示。

表 3.1 参数符号描述

参数符号	符号描述
r	Agent 的感知半径
Cu_t	消费者 (Custmer) 的数量
P_t	消费者选择小商贩回收的概率
$1-P_t$	消费者选择正规回收企业回收的概率
α	周围消费者的影响系数
Pe_t	小商贩 (Pedlar) 的数量
En	正规回收企业 (Enterprise) 的数量

Q_t^p	小商贩的电子废弃物回收量
Q_t^e	正规回收企业的电子废弃物回收量
p_t^p	小商贩的回收价格
p_t^e	正规回收企业的回收价格
c_t^p	小商贩的处理成本
c_t^e	正规回收企业的处理成本
s_t^p	小商贩的售出价格
s_t^e	正规回收企业的售出价格
En_t	正规回收企业的研发投入
R_t^p	小商贩的利润
R_t^e	正规企业的利润
b_t	管制成本
a_t	财政补贴

3.3 电子废弃物回收处理渠道演化模型框架

要探究复杂系统的行为演化，不但要分析系统的各组成主体是通过怎样的协同作用影响了系统的整体行为规则，还要理解各部分自身的行为。如果不了解系统各部分的行为，就不能正确地认识复杂系统的详细整体行为。复杂系统之所以复杂，就是因为系统的部分难以理解和分析，尤其是以人作为个体的系统更是如此。不论 Agent 的构成如何，每个主体都具有其自身的行为活动规则。因此，要将概念模型转化成可以进行仿真实验的计算机模型，对电子废弃物回收处理系统中各主体行为规则、行为间的相互作用的详细分析至关重要，能够帮助我们建立电子废弃物回收处理渠道演化的模型框架。

3.3.1 Agent 的行为规则分析

(1) 消费者 Agent

假设第 t 个周期系统中消费者的个数为 Cu_t ，消费者产生废弃物的速率是固定的，每隔一段时间，产生一个。消费者选择小商贩进行回收的概率是 P_t ，则其选择正规回收企业回收的概率为 $1-P_t$ 。这个选择概率的影响因素有 4 个：回收价格、便利程度、周围人的影响、上一个迭代周期 T 消费者的行为，等因素。

$$P_t = f(p_t, Pe_t, \alpha, h_{t-1}) \quad (3.1)$$

模型中小商贩的回收价格为 5 单位，而正规企业的回收价格设置为 3 单位。便利程度，以小商贩数量的多少 Pe_t 为依据。感知半径 r 中的消费者行为对消费者 Agent 的影响程度为 α ， $0 < \alpha < 1$ ，周围若有超过一半的人将电子废弃物交给小商贩，则该消费者也将选择小商贩；反之，亦然。 h_{t-1} ，表示上一个迭代周期 T 消费者的行为对本周期消费者行为的影响程度。

当 $P_t > 0.5$ 时，消费者选择小商贩作为电子废弃物的回收渠道。

(2) 小商贩 Agent

小商贩在模型中主要有两个行为：①针对不同类型的电子废弃物，给出相应的价格（以自身利益最大化为准则）。②继续/退出/进入/不改变等状态的选择。

小商贩对自身行为状态的选择考虑利润率和电子废弃物回收数量两个因素，

$$\pi_{Pe_t} = \frac{R_t^p}{(p_t^p + c_t^p) * Q_t^p} \times 100\% \quad (3.2)$$

$$R_t^p = (s_t^p - p_t^p - c_t^p) * Q_t^p \quad (3.3)$$

其中， π_{Pe_t} 、 R_t^p 分别为第 t 个周期小商贩的利润率、利润。

当前周期参与回收的小商贩，若其利润率低于 18% 或电子废弃物回收数量少于 3 个，下一迭代周期退出回收，否则，将继续回收；当前周期未参与回收的，若其观察到小商贩的利润率高于 25%，即有利可图，下一周期进入回收，否则，他不改变当前状态，即

$$\begin{cases} \pi_{Pe_t} < 18\% \text{ 或 } Q_t^p < 3, \text{ 下一周期小商贩退出回收} \\ \pi_{Pe_t} \geq 18\% \text{ 或 } Q_t^p \geq 3, \text{ 下一周期小商贩继续回收} \end{cases} \quad (3.4)$$

$$\begin{cases} \pi_{Pe_t} \leq 25\% \text{ 时, 下一周期潜在小商贩不改变当前状态} \\ \pi_{Pe_t} > 25\% \text{ 时, 下一周期潜在小商贩进入回收} \end{cases} \quad (3.5)$$

因此，第 t 个周期系统中小商贩的个数为 Pe_t ，第 $t+1$ 个周期系统中小商贩的个数就为

$$Pe_{t+1} = Pe_t + Pe_{\text{进入}} - Pe_{\text{退出}} \quad (3.6)$$

(3) 正规回收企业 Agent

正规回收企业的回收数量、处理规模等比较稳定，且进入需要通过严格的电子废弃物回收处理资格审查，因此假设他的数量不变。正规回收企业在模型中也主要有两个行为：①根据电子废弃物类型的不同，给出相应的价格。由于正规回收企业有生态化排污要求，处理设备正规先进，他的处理成本比小商贩高很多（ $c_t^e > c_t^p$ ），因此他给出的价格会比小商贩低一些。②企业研发投入。企业的处理技术、处理设备规模庞大，需要不断引进先进技术或购买专利等，来降低其处理成本或者提升电子废弃物处理后的价值（售出价格上升），实现长远获利。研发投入的大致走势，如图 3.4 所示。

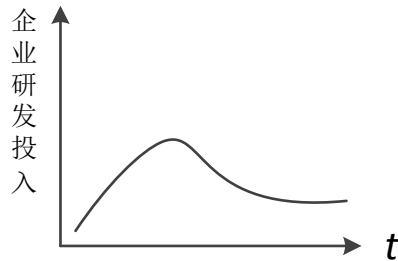


图 3.4 正规回收企业研发投入的趋势图

企业不会把所有的利润都用来投入研发，也不会每个时期都投入，研发投入跟利润率息息相关。

$$\pi_{En_t} = \frac{R_t^e}{(p_t^e + c_t^e) * Q_t^e} \times 100\% \quad (3.7)$$

$$R_t^e = (s_t^e - p_t^e - c_t^e) * Q_t^e \quad (3.8)$$

其中， π_{En_t} 、 R_t^e 分别为第 t 个周期正规回收企业的利润率、利润。

若其利润率高于 20%，说明他的处理技术、处理能力已经很高，足够让他持续获利，便不需要再投入研发；若其利润率低于 5%，说明他的利润是很低的，没有能力投入研发；当企业的利润率在 5%-20% 之间时，企业会进行一定的研发投入。

企业的研发投入一般为利润的 1.5%^[98]。

(4) 政府 Agent

政府在模型中是起到监管的作用，他的最终目标是促进电子废弃物回收处理渠道的生态化、正规化发展，最大化整体系统的环境效益、社会效益、经济效益。政府有两种行为：激励正规回收企业的发展，对其进行财政补贴；管制打压小商贩。

在系统中，小商贩回收了 80% 的电子废弃物，另外 20% 由正规回收企业进行回收。当小商贩的数量过多、对环境造成的污染严重时，政府会对小商贩采取管制打压措施，进而小商贩的数量减少，小商贩回收的电子废弃物的数量也随之减少，正规回收企业的回收数量增加，环境污染程度有所下降。同时，因为正规回收企业的处理设备先进、处理成本高、所获收益却小，政府为激励正规回收企业参与电子废弃物回收处理的积极性，会适当对他们进行财政补贴 a_t 。

因此，政府采取行为主要会考虑小商贩的个数、企业的利润率、时间周期，这 3 个参考因素。

3.3.2 Agent 之间的交互分析

Agent 的行为在系统演化的过程中，不仅受到周围环境的影响，还会受到系统中其他相邻 Agent 的行为影响，这种影响可以是直接的，也可以是间接的。系统中每个 Agent 的行为都可以通过系统的结构传播，最终都可能直接或间接地对其他 Agent 产生影响。现实情况下各主体不太可能对所有信息都能充分了解，Agent 的行为对电子废弃物回收处理系统的影响是局部有限的，更多的应该是在不停的主体交互过程中，根据历史数据进行学习或决策。

根据上述分析，本论文的电子废弃物回收处理渠道中的各个参与主体之间的交互行为，如图 3.5 所示。

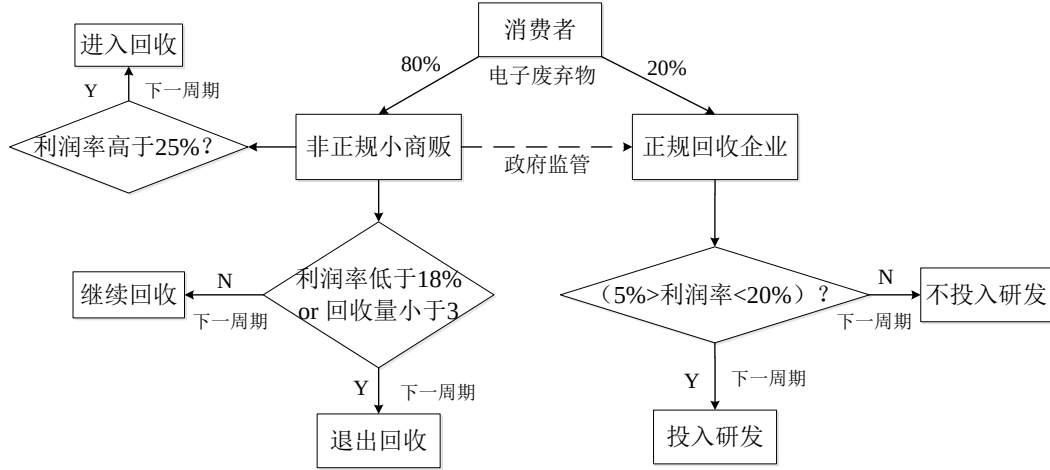


图 3.5 Agent 的交互行为

在各个主体之间交互的过程中，他们都是具有有限理性的“经济人”，最终寻求最大化自身总体收益的行为活动。在某种程度上，主体的行为偏好及其分布影响着系统演化的结果，反之，电子废弃物回收处理渠道的总体结构也影响着每一个 Agent 的行为偏好。在模型的演化过程中，消费者 Agent、小商贩 Agent、正规回收企业 Agent、政府 Agent 在这种制约下，通过一代代的遗传和变异，形成不同的演化路径。同时，这些 Agent 对信息的感知和获取是不同的，这就影响到每个 Agent 的适应能力和学习能力。

各个 Agent 在周围因素的影响下，不断学习去适应外界环境的变化。消费者 Agent 会不断地根据周围人的影响来调整自己的行为，日积月累，就会有更多的消费者偏向正规回收企业的回收。小商贩 Agent 在利润率和回收量的影响下不断改变自己的状态，达到自身整体利益最大化。正规回收企业 Agent 根据利润率的大小决定研发投入的比例，增大与小商贩的竞争力。政府 Agent 考虑整体系统的效益最大化，在不同情景下，实施不同的策略。

3.4 本章小结

本章依据计算实验方法的研究范式对电子废弃物回收处理渠道进行了复杂性分析，主要是由于多主体行为、系统层次性和系统开放性形成的复杂性。接着对本文需要研究的问题进行概念化描述分析，确定仿真模型的基本假设、Agent 的行为规则和 Agent 之间的交互过程，建立了电子废弃物回收处理渠道演化模型的框架，为最终模型的具体实现做好了理论基础。当 $P_t > 0.5$ 时，消费者选择小商贩进行电子废弃物的回收，否则，消费者将选择正规回收企业进行回收。消费者的选择概率受回收价格、便利程度、周围人的影响、上一个迭代周期 T 消费者的行为，等因素的影响。当前周期参与回收的小商贩，若其利润率低于 18% 或电子废弃物回收数量少于 3 个，下一迭代周期退出回收，否则，将继续回收；当前周期未参与回收的潜在小商贩，若其观察到小商贩的利润率高于 25%，即有利可图，下一周期进入回收，否则，他们不改变当前状态。当企业的利润率在 5%-20% 之间时，企业会进行一定的研发投入。政府考虑小商贩的个数、企业的利润率、时间周期等因素，来决定实施对正规回收企业的激励政策，还是对小商贩的管制打压政策，亦或两者兼备。

4 实验仿真及结果分析

本章首先对几种基于 Agent 建模的平台 Swarm、NetLogo、Ascape 和 RePast 做出详细的比较，并选择适合本模型的 RePast 进行模型的建立。然后，通过对 Model、Space、Agent 这三个主类的完整的程序编写，最终实现电子废弃物回收处理渠道演化的仿真模型。借鉴实地调研的相关数据和理论，为模型设置合理的参数，并在这个基础上详细剖析电子废弃物回收处理渠道的动态演化规律，最终得出促进电子废弃物回收处理渠道正规化、生态化发展进程的管理启示。

4.1 Agent 建模平台选择

4.1.1 几种建模平台的比较

在复杂系统的研究中，运用的建模仿真平台主要有 Swarm、NetLogo、Ascape 和 RePast，它们之间的比较如表 4.1 所示。

表 4.1 ABMS 仿真平台的比较

平台名称	Swarm	NetLogo	Ascape	RePast
开发者:	SFI	美国西北大学	布鲁金斯研究所	芝加哥大学
支持的操作系统及环境:	Windows,Mac,Unix 等	Windows,Mac,Unix 等	Windows,Mac,Unix, 及网络环境	Windows,Mac,Unix 等
编程语言:	Java、Objective C	Logo	Java	Java、Python、C#
内置智能算法支持:	遗传算法	无	无	神经网络、遗传算法
编程难度:	相对最高，代码量较大	较低	一般，代码量较少	相对最高，代码量较大
应用领域:	可用于生物学、经济学、人类学和生态学等领域	其模型库涉及及到各方面	主要是社会系统和经济系统	涉及人为、社会经济、社会模型等。
共同点:	均体现了 Agent 的建模思想，使用流程相似，有高度的抽象性。			

Swarm，由美国的圣塔菲研究所(SFI)设计的专门钻研、探讨复杂系统的建模软件。Swarm 的开发语言主要是 Objective-C。Swarm 软件并没有对模型与模型中要素之间的交互规则做出相关的约束，灵活性较大。目前运用 Swarm 的相关研讨范畴主要有社会学领域、经济学领域、生物学领域、物理学领域、生态学领域和化学领域等。

NetLogo，是 1999 年推出的一种可编程建模环境，主要用于仿真自然现象和社会现象，在成千上万的“代理”中，建模人员能够非常容易地单独控制各个代理，更有助于我们深入探究微观主体的行为偏好与系统宏观“涌现”之间的内在规律性。

Ascape，是 The Brookings Institution——布鲁金斯研究所，开发的一款建模平台，主要是

建立多主体仿真模型来支持对社会经济系统的研究。其实现语言是 Java，具有高度概括性，能够通过某种方式描述基础的建模思想，并且可以在其他的环境和架构中进行检测。具有高度的抽象性，尽可能最大的能力封装了所有可能用到的仿真建模思想及方法。

这些建模工具把 Agent 建模成拥有一定属性和行为的实体，尽管它们可能会学习，但并没有在实验模拟的过程中展示出它们学习的行为。而 Agent 最关键的特质就是其智能性和学习性。这些建模工具都提供了用于 Agent 交互的环境，但都没有提供支持 Agent 的行为及 Agent 之间交互关系的、高度模块化的底层基础结构。

而 RePast (Recursive Porous Agent Simulation)，是由芝加哥大学的社会科学计算管理研究方法室开发的工具，建立多主体仿真模型的方式主要是以使用 Java 编程语言为主^[99]。它是复杂系统建模的著名软件之一，由于其强大的功能和灵活的表现能力，被许多领域的研究学者作为首选的应用工具。在一个基于主体的模拟平台上，提供给了建模者大量可以直接使用的类库，并能够记录模型运行过程中的某一时刻的片段或整体的演化过程。RePast 提供了 Java、C#、Python 等语言实现版本，容易被不同类型的建模者使用，并且具有良好的扩展性。

Eclipse 是一个基于 Java 的、可扩展的开发平台，利用不同功能的插件可以帮助用户建立各种不同的仿真模型，国内外学者大多是把 RePast 平台嵌入在 Eclipse 中，进行 Agent 建模。本论文也使用这种方法来完成复杂系统的建模。

4.1.2 RePast 模型库

在 RePast 软件中，uchicago.src.sim 包是多 Agent 仿真建模必须用到的包，这个包里还有很多功能各异的子包^[100]，当中最核心的功能包及其功能描述，如表 4.2 所示。

表 4.2 RePast 核心功能包及其功能说明

子包名	功能说明
engine	是 RePast 的仿真引擎，负责仿真的建立、操控并驱动仿真的运行。包含仿真调度器、仿真模型接口等最重要的类与接口。该包还为仿真运行与运行控制提供图形用户接口。RePast 仿真调度器功能很强大，支持离散时间与离散事件两种调度方式。
analysis	主要包含两大类功能：1.用于收集并记录仿真过程中产生的数据。2. 用于仿真数据的可视化显示，可以生成多种图表，例如序列图、柱状图等，且图表可以实时更新。
network	用于网络仿真。在一些模型中 Agent 之间具有复杂的网状结构关系，该包能记录并存放网络拓扑结构信息。该包还提供特定格式的文件读写功能，用于保存或读取网络拓扑结构信息。
space	用于描述 Agent 的空间关系。此包还与下面的 gui 包一起用于空间以及空间中所含 Agent 的可视化显示。在 RePast 中，空间实际上是二维的。例如，Multi2DGrid 是一种栅格空间，在每个小格子里能容纳一个或多个 Agent。
gui	RePast 的图形用户接口包。

Model 类，有且只有一个，是 RePast 仿真建模程序的重心。本文程序中运用到的主要方法，如表 4.3 所示。

表 4.3 模型定义类说明

方法	功能说明
main	将模型定义类调入内存。如果是批处理运行方式，仿真将会随即运行。否则将出现 RePast 的图形控制界面（交互运行方式）。
setup	这是一个模板方法，在仿真程序第一次运行时被系统自动调用。由于仿真程序在交互运行方式下可以被运行多次，每次在 RePast 的图形控制界面上按 setup 按钮时该方法也会被系统自动调用。该方法用于仿真模型定义类的参数初始化，例如给模型参数设置缺省值、创建调度器对象等。
begin	这也是一个模板方法。在每次仿真开始运行时被系统自动调用。在 begin 方法中一般都会调用本表的后三个方法。在 RePast 中，这三个方法的命名已经成为一种约定成俗的命名规范。
buildModel	实例化仿真模型中的 Agent 对象，建立 Agent 对象间的空间关系。
buildSchedule	建立仿真模型的行为（ action ）对象及调度关系。
buildDisplay	说明仿真程序的可视化显示方式，并建立可视化显示对象与数据源对象的绑定关系。

RePast 软件是通过对 **SimModelImpl** 的继承，建立不同用户所需要的仿真模型，同时，在用户模型与 **SimModelImpl** 之间还有一个 **Template** 结构，模型的层次关系图如图 4.1 所示。

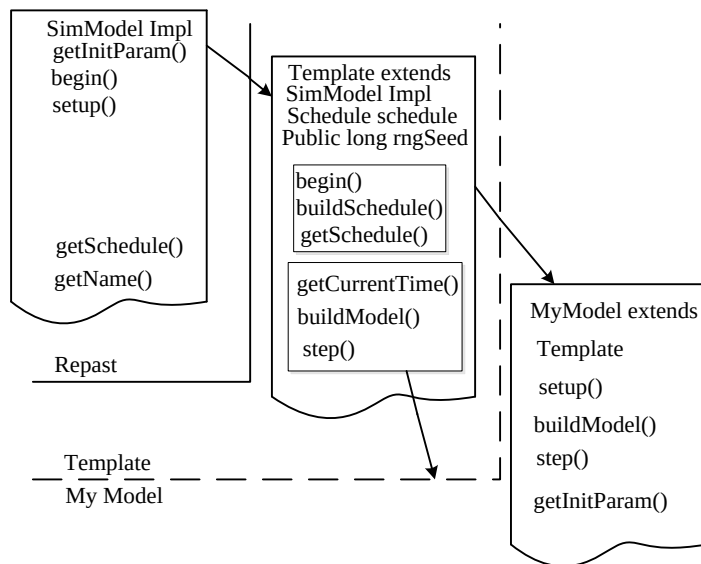


图 4.1 模型的层次关系图

通过以上对实验原理的分析，我们已经对 RePast 仿真平台的内部机理和建模思想有了一定的了解，怎样完成本文的电子废弃物回收处理渠道演化模型的建立，并从实验中得到一定的电子废弃物管理启示，是整个实验的关键。下面，我们将具体实现整个 **Agent** 模型。

4.2 演化模型的软件实现

通过对现实电子废弃物的回收处理系统进行具体分析、抽象，本节将详细构建基于计算实验的研究平台——电子废弃物的回收处理演化系统，以方便研究者通过反复、可控的实验，研究电子废弃物回收处理渠道的动态演化趋势和各主体的行为规律。我们将电子废弃物回收

处理系统模型简化为暂时只考虑消费者 Agent、小商贩 Agent、正规回收企业 Agent 及政府 Agent 四种主体的仿真系统。

本研究使用多主体建模软件 Repast 进行系统的设计开发，依托 Eclipse 作为开发环境，选择面向对象的编程语言——Java 作为开发语言，这主要考虑的是 Java 语言的跨平台性、可移植、分布式、可靠性等优势。

4.2.1 演化模型的实现

在研究中，一个最基础的 RePast 模型务必要蕴含如下的元素^[100]：

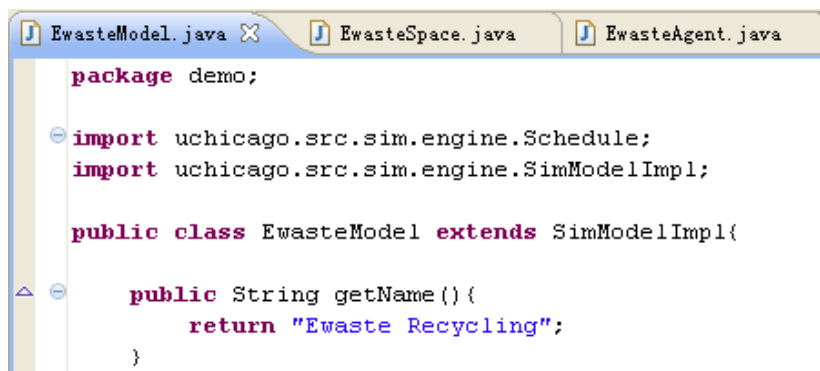
①一个 Model 对象，负责模型的构建控制和运行控制，它既是仿真模型本身，也是模型运行的开端。

②一个 Space 对象，就是 Agent 行为的活动空间，它用来控制各个主体行为发生的具体环境。

③一个 Agent 对象，即活动在 Space 中的 Agent 行为主体对象，用来描绘各个主体的属性、行为偏好等。

在 Eclipse 中创建名为 Ewaste 的工程，在 src 文件中新建一个包 demo，接下来，在 demo 中建立 3 个 Java 类：EwasteModel，EwasteSpace，EwasteAgent。

要想实现模型，首先模型的主类 Model 要继承 SimModelImpl 类，并建立 getName 方法来返回电子废弃物回收处理仿真模型的名字、及其他需要显示的变量或名称，如图 4.2 所示。



```
package demo;

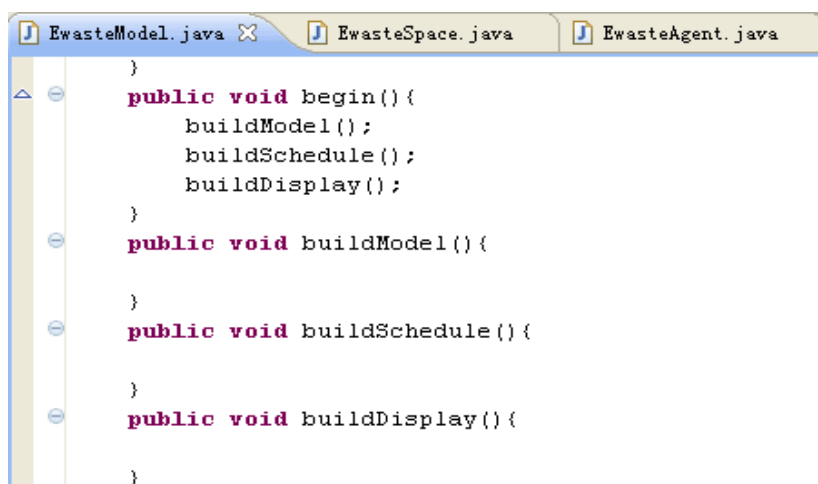
import uchicago.src.sim.engine.Schedule;
import uchicago.src.sim.engine.SimModelImpl;

public class EwasteModel extends SimModelImpl{

    public String getName(){
        return "Ewaste Recycling";
    }
}
```

图 4.2 模型初步代码

加入 begin 方法，以便初始化仿真器，并在 begin 方法中建立 buildModel，buildSchedule，buildDisplay，这 3 个方法，如图 4.3 所示。



```

}

public void begin(){
    buildModel();
    buildSchedule();
    buildDisplay();
}

public void buildModel(){

}

public void buildSchedule(){

}

public void buildDisplay(){

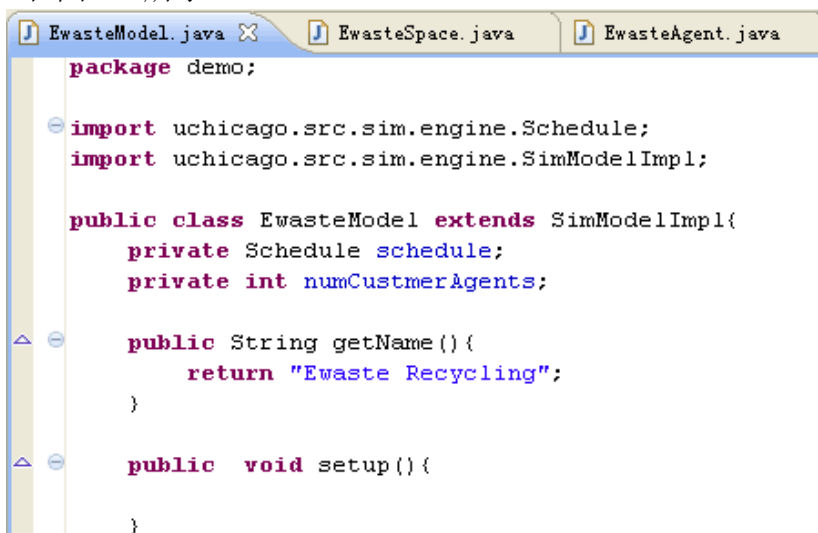
}

```

图 4.3 begin 方法

若想彻底实现电子废弃物回收处理系统仿真模型的建立，还有 3 个必须实现的函数：

①setup 函数，模型运行的起始；②getSchedule()函数，它至少需要能够返回一个 Schedule 类型的对象；③getInitParam 函数，返回需要显示的参数列表，每一个参数都要有 get 和 set 方法。分别如图 4.4 和图 4.5 所示。



```

package demo;

import uchicago.src.sim.engine.Schedule;
import uchicago.src.sim.engine.SimModelImpl;

public class EwasteModel extends SimModelImpl{
    private Schedule schedule;
    private int numCustmerAgents;

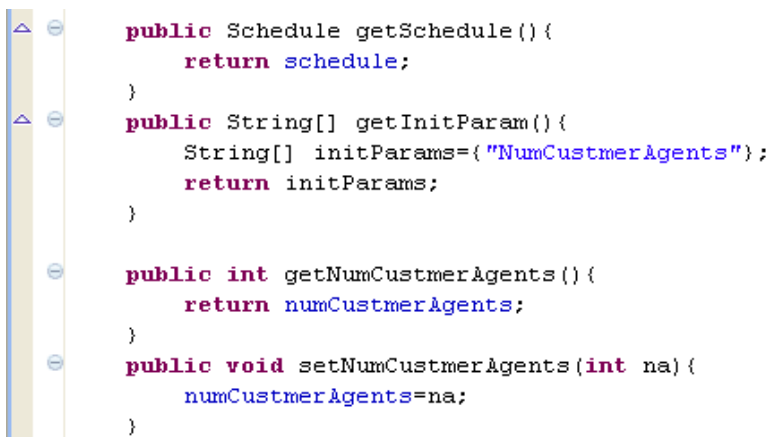
    public String getName(){
        return "Ewaste Recycling";
    }

    public void setup(){

}

```

图 4.4 setup 函数



```

public Schedule getSchedule(){
    return schedule;
}

public String[] getInitParam(){
    String[] initParams={"NumCustmerAgents"};
    return initParams;
}

public int getNumCustmerAgents(){
    return numCustmerAgents;
}

public void setNumCustmerAgents(int na){
    numCustmerAgents=na;
}

```

图 4.5 getSchedule、getInitParam 函数

接下来，加入 main 函数，导入 SimInit 包，装载电子废弃物回收处理系统的演化模型，如图 4.6 所示。

```
public static void main(String[] args) {
    SimInit init=new SimInit();
    EwasteModel model=new EwasteModel();
    init.loadModel(model, "", false);
}
```

图 4.6 装载模型

电子废弃物回收处理渠道演化仿真模型详细的代码设计如附录所示，模型的具体仿真流程如图 4.7 所示。

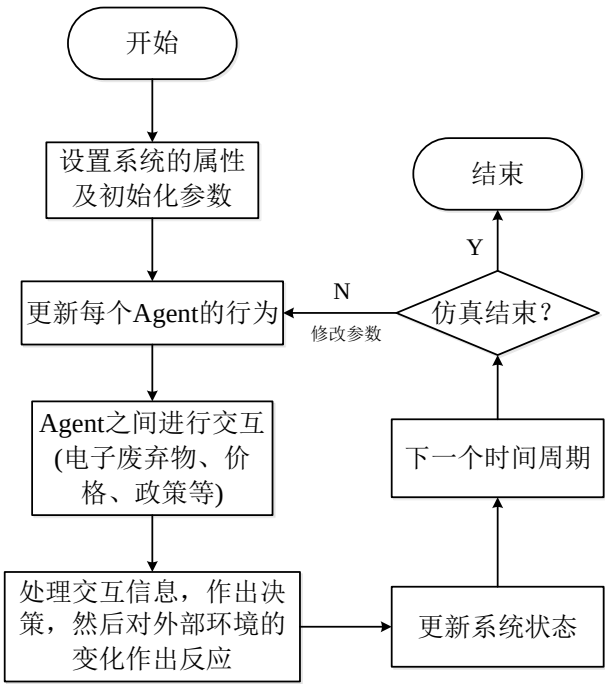


图 4.7 电子废弃物回收处理渠道演化模型的仿真流程

4.2.2 参数初始值讨论

仿真模型的输出结果依赖于输入参数，仿真输入参数的初始值不同可能会导致完全不同的仿真输出结果。为了使得仿真结果更加与现实相吻合，在本研究中仿真参数初始值主要通过实际调查得到，再根据调查数据进行等比例的简化；也有一些参数是通过情景假设，或者是在其他仿真参数确定的基础上，通过仿真模型的平衡状态确定输入参数的大致范围。

笔者于 2014 年 7 月 7 日-2014 年 7 月 13 日进行了电子废弃物回收处理现实情况的实地调研，选择了浙江省台州市路桥区（电子废弃物拆解业比较发达）为调研地点，对电子废弃物正规及非正规回收处理企业展开现场调查、走访，以非正规的家庭小作坊为主。调研发现，路桥区峰江工业园区有 34 家企业，主要从事拆解和分类工作。园区内的企业拆解、处理的电子废弃物，主要是从日本进口废旧家电。主要被调查企业的年处理能力，如表 4.4 所示。下古岙村的电子废弃物非正规回收拆解点以 3-4 人家庭作坊，或 10-20 人的合伙制小厂为主。

其中家庭式回收拆解作坊占较大比重，合伙制拆解企业大概有 17 家左右。工厂的电子废弃物拆卸、处理能力大约有 8100 吨/年。

表 4.4 被调查企业的年处理能力

企业名称	年处理能力（万吨/年）
台州市繁荣金属再生有限公司	16.864
台州大峰野金属有限公司	18.296
台州市友兴金属回收有限公司	13.465
台州中德环保有限公司	13.201
台州市路桥光鑫物资有限公司	15.929

正规企业的处理能力随着处理技术的进步会逐渐提升，假设为 20 万吨/年。根据比例，可以假设单个小商贩的年处理能力为 3200 吨/年。张伟等（2013）以我国 1993-2010 年电子废弃物的统计资料为依据，使用 Stanford 模型预计 2015 年我国电子废弃物总量为 613 万吨^[1]。同时，有关数据显示，走街串巷的小商贩的回收数量约占电子废弃物总量的 80%以上，正规渠道只回收了剩余不到 20%的电子废弃物^[84]。

根据这些数据，可以估算 2015 年整个电子废弃物回收处理中小商贩与正规回收企业的数量：

小商贩年处理总量： $613 \times 80\% = 490.4$ 万吨

正规企业年处理总量： $613 \times 20\% = 122.6$ 万吨

小商贩个数： $490.4 \text{ 万吨} \div 3200 \text{ 吨/年} = 1532$ 个

正规企业个数： $122.6 \text{ 万吨} \div 20 \text{ 万吨/年} = 6$ 个

因此，小商贩与正规企业的数量比例是 1532:6，约为 250:1。这可以作为模型中设置参数的依据。

另外，模型中的消费者可能是一个个体，也可能是一个家庭，总之，他是一个产生电子废弃物的单位。假设消费者与小商贩的数量比例是 8:1，小商贩的回收价格是 5 单位，正规回收企业的回收价格设定为 3 单位；小商贩的处理成本为 2 单位，正规企业的处理成本为 4 单位。当然，这些数据的假设有可能存在着一些局限。计算机的处理能力和存储能力有限，有限个数的行为规则集合决定了仿真模型的可计算性，没有这样的假设，我们就将对建立实际可计算的模型无能为力。后续可以仔细斟酌，进一步完善这些初始参数的设置。

如前所述，当前周期参与回收的小商贩，若其利润率低于 18%或电子废弃物回收数量少于 3 个，下一周期退出回收，否则，将继续回收；当前周期未参与回收的，若其观察到小商贩的利润率高于 25%，即有利可图，下一周期进入回收，否则，他不改变当前状态。

若正规回收企业的利润率高于 20%，说明他的处理技术、处理能力已经很高，足够让他持续获利，便不需要再投入研发；若其利润率低于 5%，说明他的利润是很低的，没有能力投入研发；当企业的利润率在 5%-20%之间时，企业会进行一定的研发投入。

当小商贩的数量过多、对环境造成的污染严重时，政府会对小商贩采取管制打压措施，进而小商贩的数量减少，小商贩回收到的电子废弃物的数量也随之减少，正规企业的回收数量增加，环境污染程度有所下降。同时，由于正规回收企业的处理设备先进、处理成本高、所获收益低，政府为激励正规回收企业参与电子废弃物回收处理的积极性，会适当对他们进行财政补贴。政府采取行为主要会考虑小商贩的个数、企业的利润率、时间周期，这 3 个参考因素。

4.3 仿真实验及结果分析

4.3.1 实验运行

在 EwasteModel 的编辑区，按照如下的顺序进行操作：右击—>Run As—>Java Application，就能进入模型的运行界面，如图 4.8 所示。

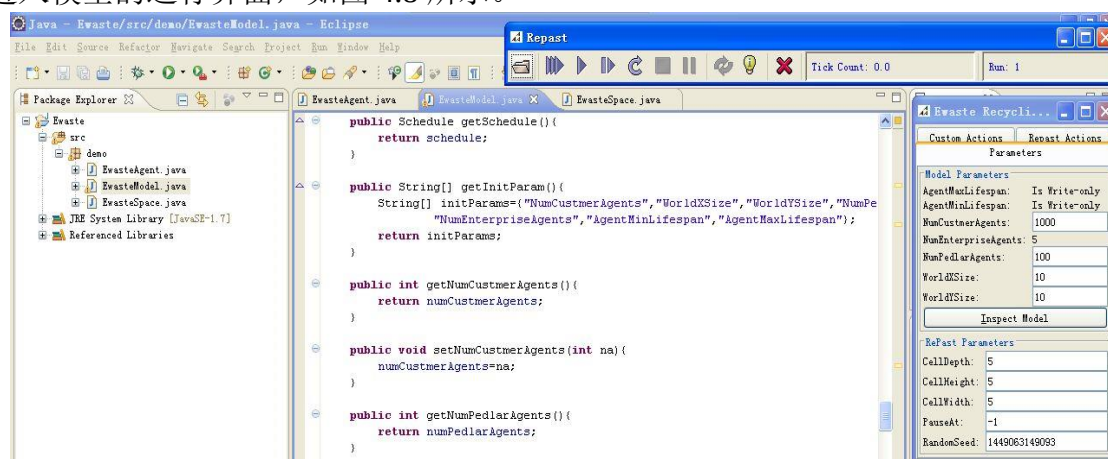


图 4.8 模型运行界面

再单击工具条中的第 3 个图标，就可以运行了。

仿真模型中几个主要方法的调用顺序为：

main()->setup()->begin()->buildModel()->buildSchedule()-> buildDisplay()->Step()。

main()方法装载模型，启动整个程序，然后调用程序中的其他方法。接着执行 setup(), begin(), 然后是 bulldModel(), buildschedule(), buildDisplay()——完成模型的初始化。

接下来就是选择 Step()方法的执行方式。Step()主要规定系统每一步运行什么，具体规定了系统如何进行统计、采样。它可以逐步执行，这样方便观察变化比较快的参量，也可以循环执行，这样设置是为了方便观察变化比较慢的参量。在这个模型中，使用的是循环执行 Step()方法。

模型中仿真参数的值可以在 Parameters 面板中反复修改，如图 4.9 所示，以便达到重复实验的目的，方便我们观测系统的动态演化过程。

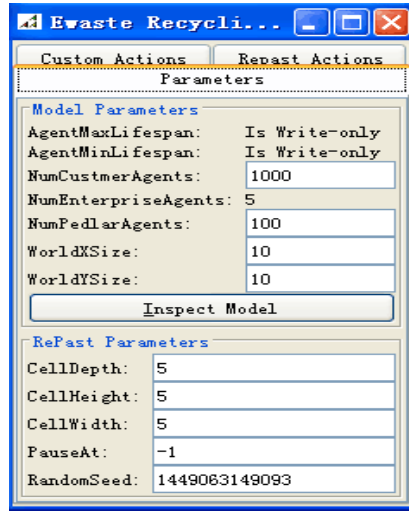


图 4.9 Parameters 面板

4.3.2 仿真实验

模型中微观个体的主动学习能力、适应能力、与外界环境的交互活动是最终形成系统动态演化的直接驱动力。我们将计算实验的研究方法运用在探究电子废弃物的回收处理渠道演化问题中，是一个创新。多种因素的影响、参数值设置的不同，最终会产生不同的实验结果，我们需要进行多次的重复实验，来剖析仿真模型动态演化的规律。下面根据 4.2.2 参数初始值的讨论，我们分别设置不同的参数值来观测电子废弃物回收处理渠道演化的过程。几次实验中，我们设置的参数比例是相同的，参数的数量不断增大，以此来逐步观测系统演化。进一步的研究可以考虑不同的参数比例、主体的数量更大等情况，来观测不同的实验结果。

(1) 仿真实验 1

实验 1 中，设置 $\text{numCustmerAgents}=2000$, $\text{numPedlarAgents}=250$, $\text{numEnterpriseAgents}=1$ 。

模型开始时、运行中、运行结束时的各个主体在二维世界中的分布图分别如图 4.10a, 图 4.10b, 图 4.10c 所示。绿色代表消费者 Agent, 蓝色代表小商贩 Agent, 红色的点象征着正规回收企业 Agent。正规回收企业的数量和位置一开始就随机地分散在模型中, 在运行过程中保持不变。小商贩在模型运行一开始也随机地分散在模型中, 在运行过程中, 小商贩走街串巷, 不断游走, 并且不断地有小商贩退出回收、进入回收, 因此小商贩的数量和位置是不断发生变化的。

由于小商贩的价格优势, 即回收价格高、处理成本低, 小商贩的利润丰厚, 因此, 会不断有潜在的小商贩进入系统进行电子废弃物的回收。随着小商贩数量的增加, 对环境和正规回收企业的发展产生一定的威胁, 政府开始管制、打压小商贩, 小商贩的数量继而减少。最终维持在一个比较低的平衡状态, 3 个左右。

小商贩在运行的不同周期的数量变化, 如图 4.10d 所示。

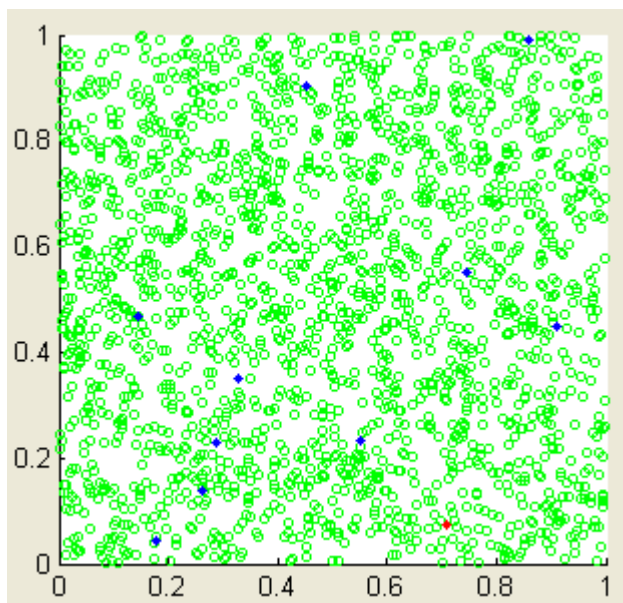


图 4.10a 模型开始时的主体分布

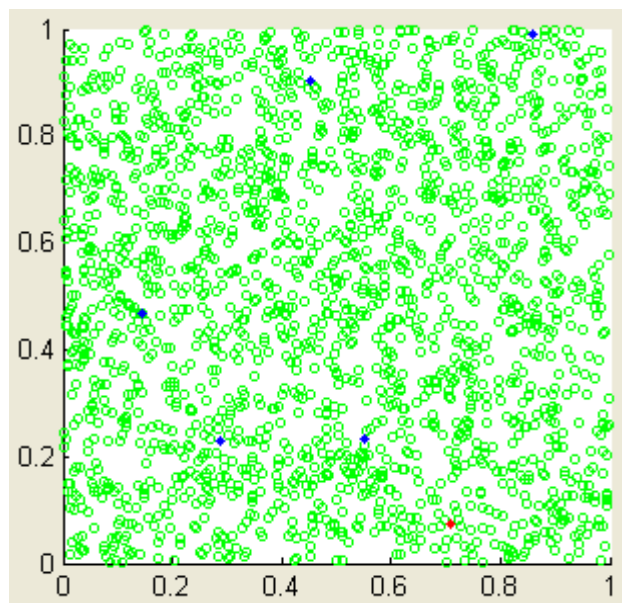


图 4.10b 模型运行中的主体分布

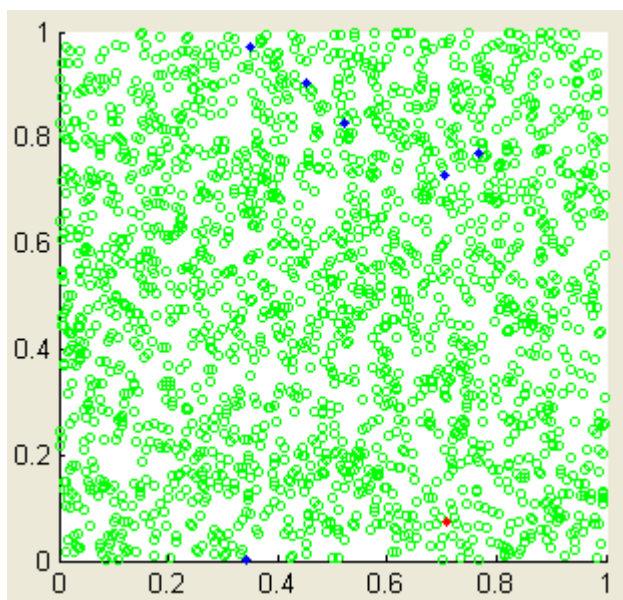


图 4.10c 模型结束时的主体分布

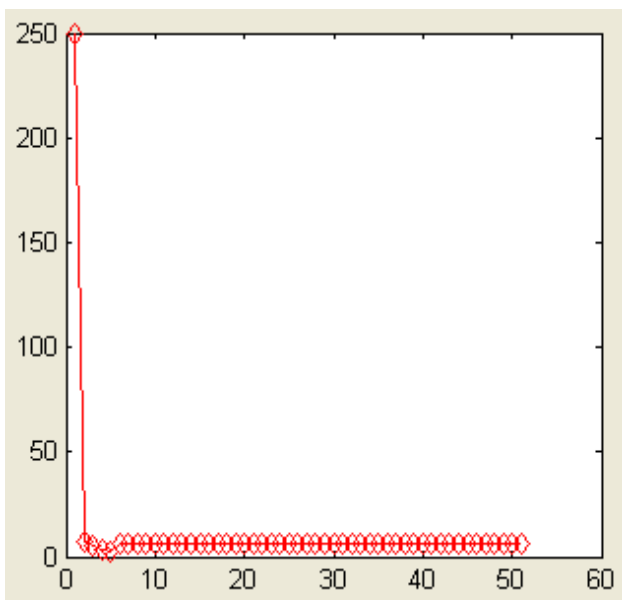


图 4.10d 小商贩的数量变化

正规回收企业在运行的不同周期中，所付出的研发投入的变化趋势如图 4.11 所示。模型刚开始运行时，由于小商贩在电子废弃物回收中占据主导地位，正规企业回收到的电子废弃物数量较少，但对其进行拆解、处理时，还是需要启动大型的处理设备及高端的处理技术，成本巨大，入不敷出，难以盈利。因此，正规回收企业会从降低成本入手，将利润的一部分作为研发投入，开发更先进的处理设备和处理技术，以降低其处理成本。

一开始正规回收企业的利润小，研发投入也自然比较少，随着利润的增加，研发投入也在增加。当其通过研发投入，带来处理成本下降或处理后的废物价值提升，企业便会相应地减少研发投入。在利润和处理能力达到一定水平，不需再投入研发，最终达到稳定状态。

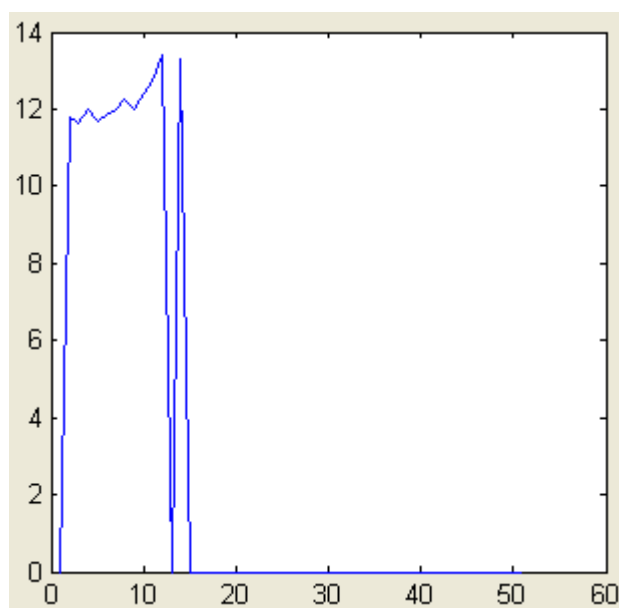


图 4.11 企业的研发投入

(2) 仿真实验 2

实验 2 中, 设置 $\text{numCustmerAgents}=4000$, $\text{numPedlarAgents}=500$, $\text{numEnterpriseAgents}=2$ 。

模型刚开始、运行中、运行结束时, 主体在二维世界中的分布, 分别如图 4.12a, 图 4.12b, 图 4.12c 所示。实验 2 相比于实验 1 来说, 3 类主体的数量都有增多。尤其是消费者的数量增加了 2000, 因此, 周围人对消费者行为的影响便比较缓慢, 模型的演化也需要更多时间。

在模型运行过程中, 小商贩不同时间周期的数量变化如图 4.12d 所示, 最终小商贩的数量维持在 4 个以下。

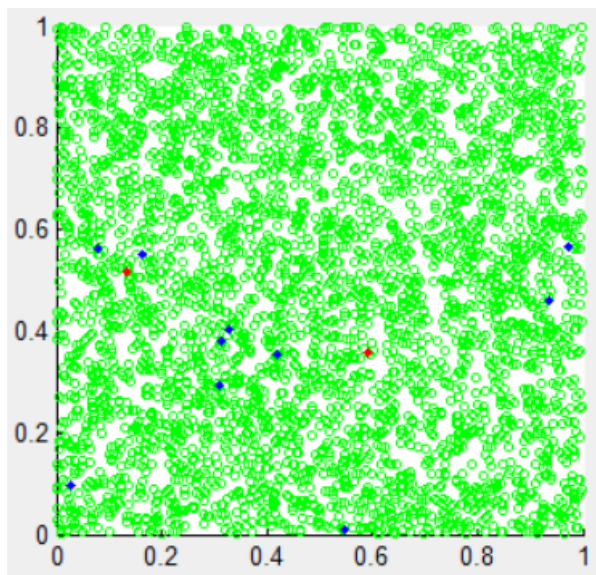


图 4.12a 模型开始时的主体分布

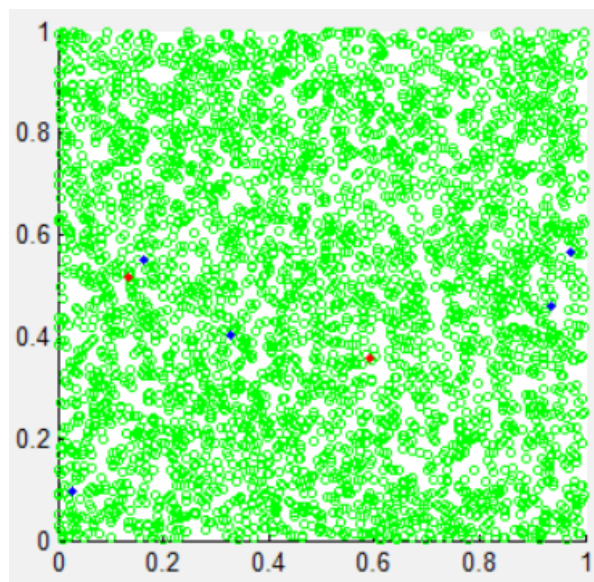


图 4.12b 模型运行中的主体分布

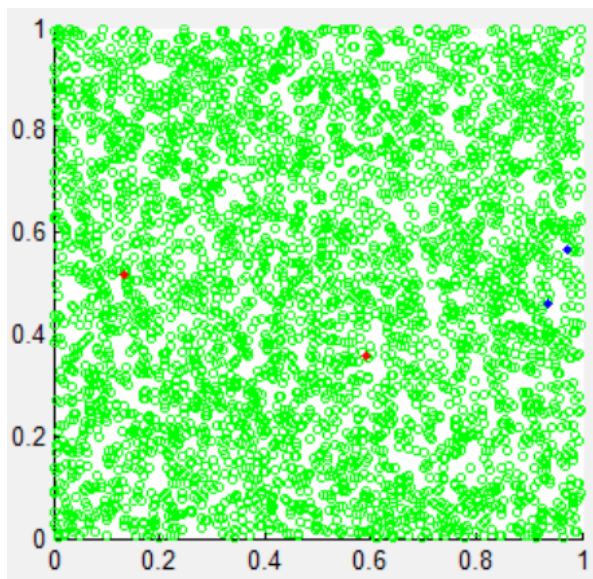


图 4.12c 模型结束时的主体分布

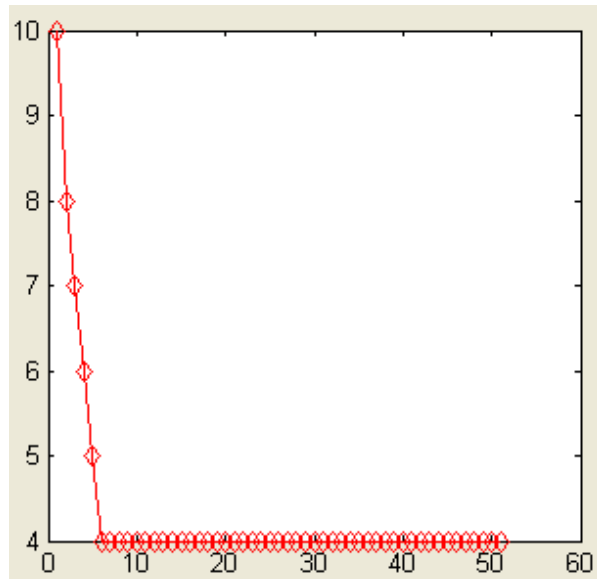


图 4.12d 小商贩的数量变化

正规回收企业在运行的不同周期中，所支付的研发投入的变化趋势如图 4.13 所示。红色的线表示企业研发投入的最大值的走势，绿色的线是企业研发投入的最小值的走势。大约前 3 个时间周期，正规企业的研发投入持续增长，其处理技术已经达到一定的水平。第 3~25 个周期，投入便缓慢增长与间断降低。第 25 个周期之后，正规企业的处理技术和设备水平已经达到理想的状态，因此企业就不需要再投入研发了。

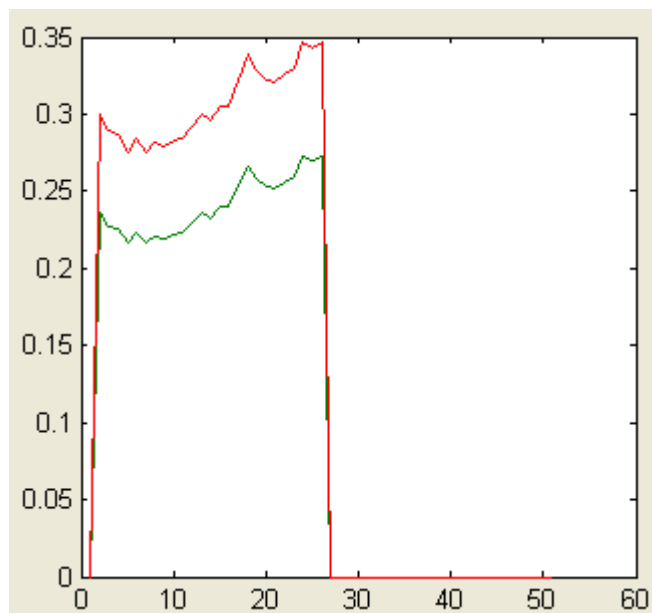


图 4.13 企业的研发投入

(3) 仿真实验 3

实验 3 中，设置 $\text{numCustmerAgents}=9000$, $\text{numPedlarAgents}=1250$, $\text{numEnterpriseAgents}=5$ 。

模型刚开始、运行中、运行结束时，3 类主体在二维世界中的分布图分别如图 4.14a，图 4.14b，图 4.14c 所示。相比于实验 2，消费者 Agent 的数量增加了 5000，小商贩 Agent 的数

量增加了 750。

小商贩在模型运行的不同周期的数量变化，如图 4.14d 所示。小商贩在政府的管制和打压下，数量迅速减少，最终稳定在十几个左右。

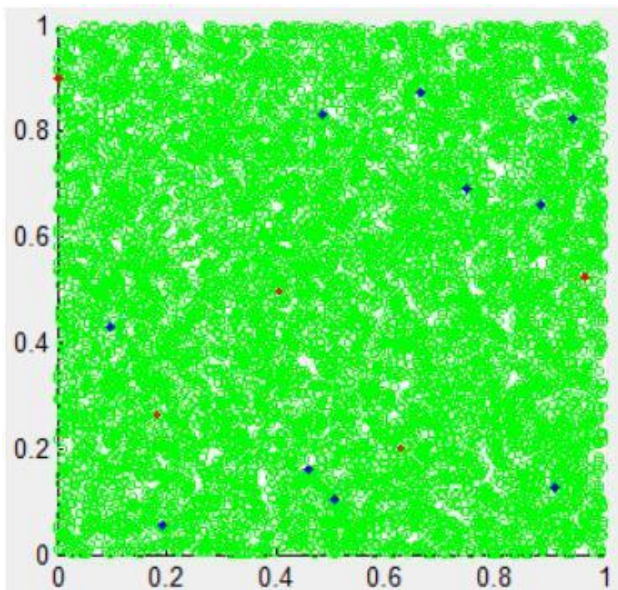


图 4.14a 模型开始时的主体分布

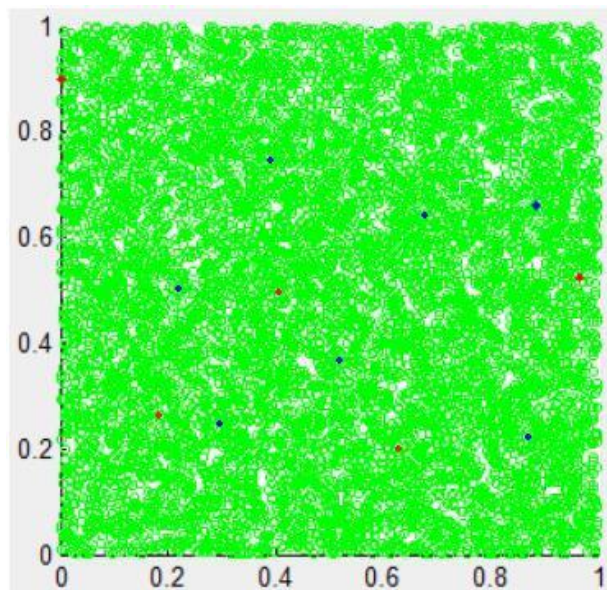


图 4.14b 模型运行中的主体分布

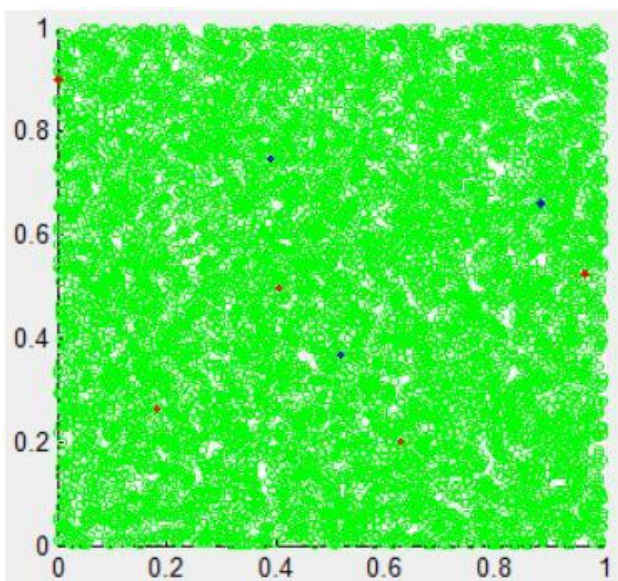


图 4.14c 模型结束时的主体分布

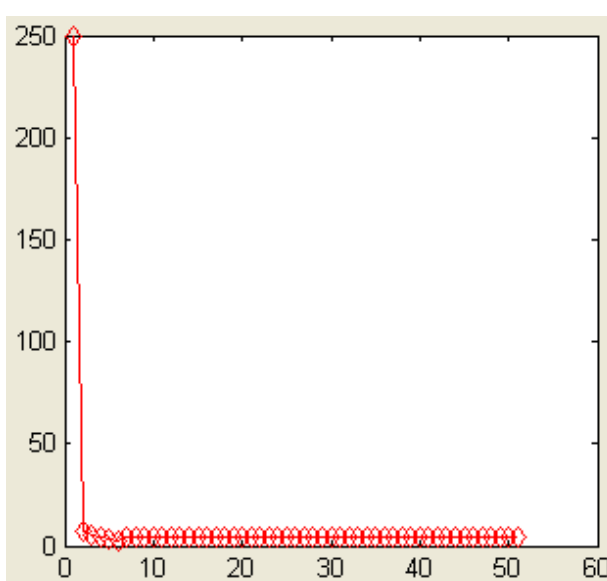


图 4.14d 小商贩的数量变化

正规回收企业在运行的不同周期中，所支付的研发投入的变化趋势如图 4.15 所示。蓝色的线代表正规企业研发投入的最小值走势，绿色的线代表正规企业研发投入的均值走势。图中没有出现红色的，表示最大值走势的线。因为小商贩数量很多，正规企业要想提升自身的竞争能力，必须支付更多的研发投入，其最大值超出了模型设置的阈值。这说明小商贩的数量越多，对正规回收企业的威胁越大，企业为降低威胁程度，会投入大量资金进行研发。但由于大量的小商贩回收了绝大部分的电子废弃物，正规回收企业难为“无米之炊”，其研发投入大部分是来源于政府的财政补贴。因此，政府等管理部门在电子废弃物的回收处置管理中

的意义，至关重要。

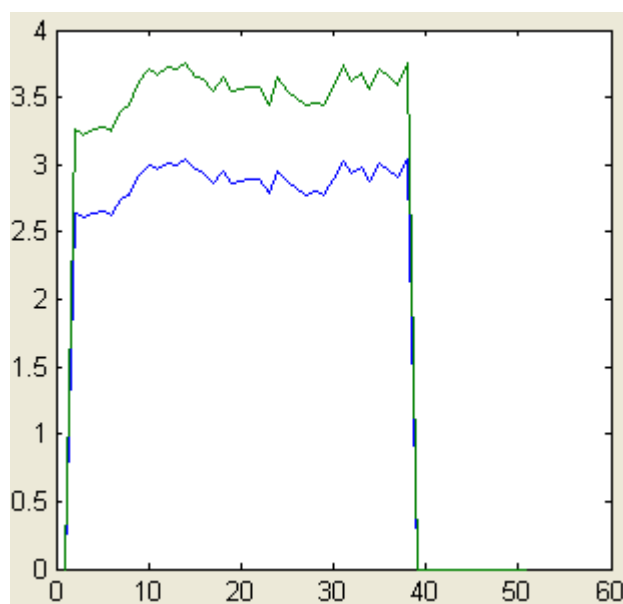


图 4.15 企业的研发投入

3 次的演化实验的结果都表明，在非正规回收的小商贩大批普遍存在时，正规回收企业竞争力小，盈利困难，迫切需要政府等管理部门的财政支持。等到正规回收企业有足够的竞争力、处理技术和处理设备时，便可以回报社会，实现电子废弃物的低污染处理。同时，我们不能轻视消费者的舆论影响力。消费者生活在社会这个群体当中，其行为方式都会在一定程度上受到周围人的影响，消费者人数越多，这种影响力的完全转化就越缓慢。

4.3.3 政策建议

要想解决好电子废弃物的回收处理中繁杂而艰难的问题，我们必须付出长期的努力，为了加快电子废弃物回收处理渠道的正规化、生态化进程，联系上述电子废弃物的回收处理渠道演化仿真实验得到的结论，得出以下政策建议。

（1）激励正规回收企业

为了让正规回收渠道回收更多的电子废弃物，政府部门需要建立正规回收处理企业的激励机制和财政补贴机制，让正规回收、拆解有利可图。政府应鼓励和支持正规回收企业对电子废弃物回收处理和资源再利用方面的技术创新，并将新技术推广到电子废弃物正规回收渠道中的企业。此外，政府等相关管理部门还需要加强对正规回收处理企业的扶持力度，可以在运营资金、管理费用、税收等方面激励这些企业，或者实施低利率贷款等政策。

正规回收企业面对激烈的回收竞争时，可以通过新技术的引进，大幅提升其回收处理的有效利用率，进而扩大企业的规模。与此同时，由于在环境保护方面做出贡献，企业的社会形象也会因此有所提升，这样也会取得额外的竞争优势，为企业带来长远的经济收益和社会效益。

（2）管制小商贩的发展

当今时代，电子废弃物的回收处理必将往正规化、生态化的方向不断成长。政府等有关部门应该根据法定条件，对进行电子废物回收处理企业的技术水平、处理设备等资格进行严格的审查。尤其是要管制和打压那些电子废弃物处理技术和设备条件并不符合正规标准的小商贩、小作坊，防止他们使用危害环境的方式进行处理，严重破坏人类的生存环境。

若要长期立足于该行业并获的一定的竞争优势，非正规回收的小商贩可以“转型”为合法正规的回收商，不仅可以避免政府的管制，还可以通过政府相关的扶持保证自身的收益，同时还能为整个社会的和谐、生态发展奉献自己的一份力。

（3）推动回收体系建设

完善市场准入制度，构造良好的市场环境，特别是需要强化对小商贩的监督、引导。小商贩群体的日益壮大，无疑是正规回收处理渠道良心发展的障碍；但从另一种角度看，小商贩走街串巷上门回收在很大程度上能够方便消费者对电子废弃物的处置。因此，如果能够引导小商贩转向正规化发展，或者激励吸收、归并小商贩的正规回收企业，对整个行业的发展是非常有利的。在这种情势下，正规企业可以创办专门的回收团队，打破其“食不果腹”的僵局。另外，严格按照行业的准入机制，约束处理技术不达标的小商贩进入市场。这样，一举两得，既合理利用了小商贩回收的灵活性，不会降低消费者参与回收活动的积极性，又避免了小商贩面临失业，对正规渠道的成长非常关键。

（4）创建更完整的法规体系，并加强对行业的管理

企业管理者是否具备强烈的回收意识，对企业的回收实践有深切的影响。而消费者的态度会在一定程度上影响企业的决策，同时，很多企业会认真分析相关回收法律法规对企业回收行为的内在影响，斟酌是否要进行回收。

因此，迫切需要建设完整的法律法规来规范电子废弃物的回收处理，可以出台一些关于企业管理者、消费者行为的法律规范，鼓励企业、消费者之间相互支持和监督。

（5）拓宽信息传播渠道。

周围人的回收行为会在一定程度上影响消费者的选择，所以应该加强环保宣传，提升所有消费者的生态意识、循环经济意识。使用传统媒体与新媒体相结合的形式进行宣传，融入每一个社会人生活的方方面面，倡导全民参与电子废弃物的回收；还可以多组织一些公益志愿者活动，扩大宣传范围，另外，中小学生正处在各种观念的培养时期，可以增强对青少年的环保教育，引导他们从小养成合理的回收习性，同时带动其家长的参与。简而言之，我们要使用一切力量，帮助消费者有效地实现回收意识向回收行为的转化。

4.4 本章小结

本章依托 Eclipse 作为开发环境，选择面向对象的编程语言——Java 作为开发语言，实现了电子废弃物回收处理渠道演化的仿真模型。通过不断改变模型的参数值，动态观测电子废弃物回收处理渠道的演化进程。研究发现，政府、消费者对电子废弃物回收处理渠道的正规

化发展意义重大：当小商贩大量存在时，正规回收企业竞争力小，盈利困难，需要政府等相关部门的财政支持和对小商贩的管制打压。等到小商贩的数量减少，正规回收企业有足够的竞争力、处理技术和处理设备时，便可以回报社会，实现电子废弃物的低污染处理。同时，我们不能轻视消费者的舆论影响力。消费者生活在这个社会群体当中，其行为方式都会在一定程度上受到周围人的影响，消费者人数越多，这种影响力的完全转化就越缓慢。因此，强化对消费者的环保宣传，也能够从一定程度上促进电子废弃物回收处理渠道的正规化进程。

5 结论与展望

5.1 研究结论

随着电子废弃物数量的迅速增加和环境的日益恶化,循环经济和可持续发展早已成为时代发展的主题,而我国电子废弃物的种类和数量的迅速增加,以及海外大量电子废弃物的非法入境,给我们带来越来越沉重的处置压力。面对数量巨大的电子废弃物,我国的回收处理却效率低、环境污染重。正规回收处理企业的处理成本高、提供的回收价格低,经常入不敷出,难以在电子废弃物的回收处理中占据主导地位。非正规回收处理渠道的小商贩、个体户走街串巷,上门回收,回收价格高,处理成本低,容易使消费者的利益得到满足。但其一般都是盲目寻求最大化自身经济利益的途径,较少地考虑环境承载能力,在自家的小作坊非法处理,严重地污染了环境,破坏了人们的生存家园。与此同时,计算实验方法越来越广泛地应用到社会科学的研究领域,而电子废弃物回收处理系统作为一个典型的多主体参与的复杂系统,非常适合使用计算实验方法来进行探索。

基于上述背景,本文基于文献研究、实地调研的研究结果,以 CAS 理论为理论基础,使用自下而上的 ABMS 建模方法,建立了电子废弃物回收处理渠道的仿真模型。设置了不同的主体行为规则和主体交互规则,通过可重复的实验,不断进行实验结果与现实系统的对比分析,从微观上深入地观测各个利益相关主体的行为规律及电子废弃物的回收处理渠道的动态演化,最终为政府等相关管理部门提供建设性的政策建议。所做的主要工作如下所示。

(1) 对电子废弃物回收处理相关的国内外研究进行分类整理,主要从相关法律法规、回收处理渠道决策优化和各利益相关主体的行为进行研究,剖析了电子废弃物回收处理渠道发展的结构特点,为后续工作奠定了理论上的基础。并对计算实验方法及其在政策研究中的现状做出详细介绍,为研究提供方法基础。

(2) 以 CAS 理论的角度出发,从多主体行为形成的、系统层次性形成的、系统开放性形成的复杂性 3 个方面,详细地分析电子废弃物回收处理渠道的复杂性。在此基础上,建立 Agent 模型的基本假设、行为规则、交互规则等,以此作为电子废弃物回收处理渠道演化模型的计算实验框架。

(3) 选取 RePast 作为 Agent 建模工具,依托 Eclipse 作为开发环境,以 Java 为开发语言,实现了电子废弃物回收处理渠道的演化模型。以实地调研的数据和理论作为参考依据,不断调整参数,实现重复实验,从微观上各主体的行为变化观测宏观上回收处理渠道的动态演化。最终得出结论:①政府对电子废弃物回收处理渠道的监管必不可少。政府对正规回收企业实施激励,为其提供财政补贴或技术支持,鼓励正规企业进行处理技术的研发投入,有助于回收渠道的净化;政府管制打压非正规回收处理的小商贩,帮助小商贩转向正规渠道,小商贩

的数量越来越少，最终稳定在一个较少的数量，有利于回收渠道的正规化发展。②消费者消费电子产品，不再使用的产品成为电子废弃物，要重视周围人的回收行为的影响。随着小商贩数量的减少，非正规回收渠道无法再向消费者提供很强的回收便利，继而消费者便会转向正规企业。从废物产生源头采取措施，彼此之间互相影响，最终，消费者都将倾向于电子废弃物的正规回收。

在这些研究的基础上，为政府等管理部门提出建议：①激励正规回收企业②管制小商贩的发展③推动回收体系建设④建立完善的法规体系，并加强对行业的管理⑤拓展信息的宣传途径，为加快电子废弃物回收处理渠道的正规化、生态化发展进程贡献一份力量。

5.2 未来研究建议

本研究作为一个阶段性成果即将付梓，但笔者深深觉得，由于影响因素众多，电子废弃物回收处理渠道演化仿真模型的整体化、全面化，是一项长期而艰巨的课题，对其研究不仅关系到电子废弃物回收处理渠道的演变，还与生态环境的可持续发展问题息息相关，意义和难度同等重大。使用基于 Agent 的计算实验建模方法研究电子废弃物回收处理渠道的动态演化是一个新兴的研究领域，发展空间无限，但也需克服重重困难、迎接更多挑战。作为一个跨学科较强的前沿性课题，本文虽然对电子废弃物回收处理渠道的复杂决策模型的研究取得了一定的成果，然而，由于时间、资料与分析方式等多方面要素的限制，加上作者水平的局限，必然有一些问题的研究和分析不够完整，日后可以进行更深远的探究：

（1）电子废弃物回收处理渠道的复杂适应系统仿真模型的 Agent 学习与设置的完善。

本文使用计算实验建模方法，建立了基于复杂适应系统的电子废弃物回收处理渠道演化的简化模型，模拟了两种回收渠道的演化趋势，为加快电子废弃物回收处理渠道的正规化、生态化发展进程提供了建设性意见。同时，本文的研究尚待进一步深入，需要进一步完成所有的 Agent 及其整体仿真模型的设计，如将本文没有考虑到的相关参与主体列入仿真模型，增大计算机模型与现实系统的相似性，更有利于为政府和相关部门提供建设性的政策建议，最终达到电子垃圾减量及电子废弃物再生循环使用的两重目标。

（2）调研工作的深入及模型扩展性的提升。

本文相关数据设置参考了有关文献和浙江省台州路桥实地调研的结果，电子废弃物数量变化巨大，且局部地区的数据难以完全代表全国的数据，后续研究可以收集更多不同地区的数据，来增强模型对现实系统的解释程度。当然，引用的数据，需要高度完整和真实。同时，本模型设置的主体数量（如 9000 个消费者，1250 个小商贩，5 个正规回收企业）有一定的局限性，且相比于我国庞大的人群基数来说，微乎其微，进一步的研究可以增加主体数量，建立更贴合现实的演化模型，扩展到更长的时间周期，考虑更多类型的消费者，应用到更广泛的地域，更有效地帮助不同的管理者、领导者做出差异化的选择。

（3）进一步融合多学科、多决策方法综合研究。

电子废弃物回收处理渠道涉及技术、环境、经济、社会、管理等多学科知识，人们需要进行多学科的交叉研究，才有可能对复杂的电子废弃物回收处理渠道有更加深入和全面的认识，才有可能为最终设计整体、全面的电子废弃物回收处理渠道演化的决策模型提供理论基础。在此过程中，以复杂系统模型为中心，结合多目标优化方法、多准则决策分析方法、环境损失评价等方法为电子废弃物回收处理渠道演化系统提供决策支持的研究，还有待深入研究。

致 谢

时光飞逝，值此论文成稿之际，研究生的学习生涯就要结束了。转眼间，在杭州电子科技大学度过了两年半的学习和生活，这里有我最亲爱的老师、同学和朋友，心中对这段历程充满无限感激，在这里，我要向他们表示我最诚挚的谢意。

首先，感谢我的导师余福茂教授，并感谢魏洁副教授的指导。本论文是在余老师和魏老师的悉心指导下完成的，从文献选读、论文选题、开题到具体内容的写作，直至最终修改并完成，两位老师都付出了大量的时间和心血，给予了耐心的指导。后期遇到一些困难，他们都耐心地帮我讲解，老师们的很多想法和点播，对本论文的写作有重大的启示。两位老师严谨、务实的治学态度，让我受益匪浅。在此，谨向恩师致以崇高的敬意和衷心的感谢！同时感谢师母在生活中给予的关爱和帮助！

感谢给我们上过课的老师。陈畴镛教授、王晓耘教授、卜心怡教授、钱昇教授、刘大为副教授、俞武扬副教授、柳毅副教授等老师的认真授课，让我学习到了各种管理理论知识及其应用，更使我深刻感受到老师们渊博的学识和严谨的治学态度。还要感谢我们的辅导员聂雪林老师，感谢她在研究生日常学习和生活中对我们的关怀和帮助，让我们的学习和生活充满温暖。

感谢师兄徐玉军、苏程浩，师姐何柳琬，同门王聪颖、易骁翔，师妹王希娟、黄卢杏，师弟曹建在我的论文写作和发表过程中无私的帮助。感谢 13 级的研究生同学们，尤其是李真真、黄超、杨星、张志辉、汪波涛、杨领，你们的陪伴，使我的学习生涯充实快乐、丰富多彩。感谢我的研究生数学建模队友王平和潘勇，一起建立各种模型，暑期培训后，在全国竞赛时，并肩作战，共同努力，熬夜完成任务，最终拿到国家二等奖，并收获了真挚的友谊。感谢所有关心和帮助过我的老师、同学和朋友们。

感谢我的父母和姐姐姐夫。感谢他们对我的关怀，感谢他们在我遇到困难时的支持和鼓励，感谢姐姐姐夫在学习和求职上给我的建议、指导和帮助。感谢我的朋友张志辉，在我遇到困难时，开导我、鼓励我、帮我找资料，理解我、包容我。是他们，让我有了克服困难、迎难而上的勇气和动力。

最后，谨向百忙之中审阅我的论文和参加答辩的各位专家、学者，表示由衷地感谢！

参考文献

- [1] 张伟, 蒋洪强, 王金南等. 我国主要电子废弃物产生量预测及特征分析[J]. 环境科学与技术, 2013, 06:195-199.
- [2] 付小勇. 废旧电子产品回收处理中的博弈模型研究[D]. 大连理工大学, 2012.
- [3] 孙钰, 于淼, 蒲敏等. 浅析我国电子垃圾回收处理体系[J]. 天津经济, 2012, 06:33-36.
- [4] 任鸣鸣, 祝九月. 消费者投交电子废弃物行为实证研究[J]. 环境科学与技术, 2014, 10:189-194.
- [5] 陶双双. 废旧电子电器产品再利用物流网络及其成本控制模型研究[D]. 华东交通大学, 2013.
- [6] 唐爱军, 万玲. 废弃电器电子产品拆解行业发展透析及趋势分析[J]. 再生资源与循环经济, 2014, 03:21-24.
- [7] 徐正虹. 推动拆解业的深度变革助力产业良性发展[J]. 资源再生, 2014, 12:12.
- [8] 魏岩, 唐爱军, 万玲. 废弃电器电子产品拆解行业发展透析及趋势分析[J]. 资源再生, 2014, 04:17-20.
- [9] 钟永光, 孔丽娟, 尹凤福. 激励回收小商贩参与环保拆解的系统动力学仿真[J]. 系统管理学报, 2010, 04:469-475.
- [10] 饶龙泉. 我国电子废弃物回收、处理现状分析[J]. 中国金属通报, 2013, 06:20-21.
- [11] Yang J X, Lu B, Xu C. WEEE flow and mitigating measures in China[J]. Waste Management, 2008, 28(9):1589-1597.
- [12] Savaskan R C, Wassenhove L V. Reverse Channel Design:The Case of Competing Retailers[J]. Management Science, 2006, 5: 14-21.
- [13] Webster S, Mitra S. Competitive strategy in remanufacturing and the impact of take back laws[J]. Journal of Operations Management, 2007, 25(6):1123-1140.
- [14] Toyasaki F, Boyaci T, Verter V. An analysis of monopolistic and competitive take-back schemes for WEEE recycling[J]. Production and Operations Management, 2010, 20(6):805-823.
- [15] 倪明, 莫露骅. 两种回收模式下废旧电子产品再制造闭环供应链模型比较研究[J]. 中国软科学. 2013(08): 170-175.
- [16] 徐红. 不同渠道和信息条件下闭环供应链的协调与激励研究[D]. 江苏大学, 2014.
- [17] 易余胤. 具竞争零售商的再制造闭环供应链模型研究[J]. 管理科学学报. 2009(06): 45-54.
- [18] 孙多青, 马晓英. 基于博弈论的多零售商参与下逆向供应链定价策略及利润分配[J]. 计算机集成制造系统, 2012, 04:867-874.
- [19] Gu Q L, Ji J H, Gao T G. Pricing management for a closed-loop supply chain[J]. Journal of Revenue & Pricing Managemtn, 2008, 7(1):45-60.
- [20] 王文宾, 达庆利. 零售商与第三方回收下闭环供应链回收与定价研究[J]. 管理工程学报. 2010(02): 130-134.
- [21] 聂佳佳, 熊中楷. 信息分享模式对第三方负责回收闭环供应链的影响[J]. 管理工程学报. 2011(02):

74-81.

- [22] 周小双. 第三方回收模式下的逆向供应链协调研究[D]. 武汉理工大学, 2012.
- [23] Hong I H, Yeh J S. Modeling closed-loop supply chains in the electronics industry: A retailer collection application[J]. *Transportation Research*, 2012, 48(4):817-829.
- [24] 郭军华, 李帮义, 倪明. WTP差异下再制造闭环供应链的回收模式选择[J]. *管理学报*, 2015, 01:142-147.
- [25] 邵小伟. 不同回收主体模式下废弃电子产品再制造闭环供应链定价与协调[D]. 华东交通大学, 2015.
- [26] 余福茂, 钟永光, 沈祖志. 考虑政府引导激励的电子废弃物回收处理决策模型研究[J]. *中国管理科学*, 2014, 05:131-137.
- [27] Wee H M, Lee M C, Yu C P, et al. Optimal replenishment policy for a deteriorating green product: life cycling costing analysis[J]. *International Journal of Production Economics*, 2011, 133(2):603-611.
- [28] Dat L Q, Linh D T T, Chou S Y, ET AL. Optimizing reverse logistic costs for recycling end-of-life electrical and electronic products[J]. *Expert Systems with Applications*, 2012, 39:6380-6387.
- [29] Carter C R, Ellram L M. Reverse logistics: a review of the literature and framework for future investigation[J]. *Journal of Business Logistics*, 1998, 19(1):85-102.
- [30] Mitra S, Webster S. Competition in remanufacturing and the effects of government subsidies[J]. *International Journal of Production Economics*. 2008, 111(2): 287-298.
- [31] Lau K, Wang Y. Reverse logistics in the electronic industry of China: a case study[J]. *Supply Chain Management: An International Journal*. 2009, 14(6): 447-465.
- [32] Aksen D, Aras N, Karaarslan A. Design and analysis of government subsidized collection systems for incentive-dependent returns[J]. *International Journal of Production Economics*. 2009, 119(2): 308-327.
- [33] 王兆华, 尹建华. 我国家电企业电子废弃物回收行为影响因素及特征分析[J]. *管理世界*. 2008(04): 175-176.
- [34] 黄祖庆, 易荣华, 达庆利. 第三方负责回收的再制造闭环供应链决策结构的效率分析[J]. *中国管理科学*. 2008(03): 73-77.
- [35] 陶建格, 薛惠锋, 韩建新等. 环境治理博弈复杂性与演化均衡稳定性分析[J]. *环境科学与技术*. 2009(07): 89-93.
- [36] 翁孙哲. 企业环境责任的经济分析[J]. *生态经济*, 2014, 05:106-110.
- [37] 周旭, 张斌, 王兆华. 企业履行废弃产品回收责任影响因素研究[J]. *北京理工大学学报(社会科学版)*, 2014, 02:24-32.
- [38] Klausner M, Hendrickson C, Venue. Reverse-Logistics Strategy for Product Take-Back[J]. *Interfaces*. 2000, 30(3): 156-168.
- [39] 何文胜. EPR制度下废旧家电回收主体的利益博弈与激励机制研究[D]. 西南交通大学, 2009.
- [40] 胡李妹, 余福茂. 消费者电子废弃物回收行为意向研究[J]. *杭州电子科技大学学报(社会科学版)*, 2012, 03:19-24.
- [41] Jacob H, Joseph C, Michelle M, et al. Determinants of recycling behavior: a synthesis of research results[J].

The Journal of Socio-economics, 1995, 24(1):105-127.

- [42] Chan K. Mass communication and pro-environmental behavior: waste recycling in Hong Kong [J]. Journal of Environmental Management, 1998, 52: 317-325.
- [43] Stern P C. Toward a coherent theory of environmentally significant behavior [J]. Journal of Social Issues, 2000, 56(3):407-424.
- [44] Bamberg S. How does environmental concern influence specific environmentally related behaviors? A new answer to an old question[J]. Journal of Environmental Psychology, 2003(23): 21-32.
- [45] Tonglet M, Phillips P S, Read A D. Using the theory of planned behavior to investigate the determinants of recycling behavior: a case study from Brixworth, UK [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2004, (41): 191-214.
- [46] Nixon H, Saphores J D. Financing electronic waste recycling Californian households' willingness to pay advanced recycling fees[J]. Journal of Environment Management, 2007, 84:547-559.
- [47] 陆莹莹, 赵旭. 基于TPB理论的居民废旧家电及电子产品回收行为研究: 以上海为例[J]. 管理评论. 2009(08): 85-94.
- [48] Seunghae L, Hac S P. Korean household waste management and recycling behavior[J]. Building and Environment, 2011, 46:1159-1166.
- [49] Wang Z, Zhang B, Yin J. Willingness and behavior towards e-waste recycling for residents in Beijing city[J]. Journal of Cleaner Production. 2011(19): 977-984.
- [50] Saphores J M, Ogunseitan O, Shapiro A. Willingness to engage in a pro-environmental behavior: An analysis of e-waste recycling based on a national survey of U.S. households[J]. Resources, Conservation and Recycling. 2012(60): 49-63.
- [51] Song Q, Wang Z, Li J. Residents' behaviors, attitudes, and willingness to pay for recycling e-waste in Macau[J]. Journal of Environmental Management. 2012(106): 8-16.
- [52] Li J, Liu L, Ren J. Behavior of urban residents toward the discarding of waste electrical and electronic equipment: a case study in Baoding, China[J]. Waste Management and Research. 2012, 30(11): 1187-1197.
- [53] 蓝英, 朱庆华. 用户废旧家电处置行为意向影响因素分析及实证研究[J]. 预测. 2009(01): 65-70.
- [54] 余福茂, 段显明, 梁慧娟. 居民电子废物回收行为影响因素的实证研究[J]. 中国环境科学. 2011(12): 2083-2090.
- [55] 余福茂. 情境因素对城市居民废旧家电回收行为的影响[J]. 生态经济, 2012, 02:137-141+177.
- [56] 陈占锋, 陈纪琰, 张斌等. 电子废弃物回收行为的影响因素分析——以北京市居民为调研对象[J]. 生态经济. 2013(02): 178-183.
- [57] Lindhqvist T, Lifset R. Can we take the concept of individual producer responsibility from theory to practice[J]. Journal of industrial ecology. 2003, 7(2): 3-6.
- [58] 张曦. 论电子垃圾污染政府防治责任[J]. 东岳论丛, 2007, 03:156-158.
- [59] Aksent D, et al. Design and analysis of government subsidized collection systems for incentive-dependent

- returns[J]. International Journal of Production Economics, 2009, 119:308-327.
- [60] 汪翼, 孙林岩, 李刚等. 闭环供应链的回收责任分担决策[J]. 系统管理学报, 2009, 04:378-384.
- [61] Yabar H, Michinori Uwasu, Keishiro Hara. Tracking environmental innovations and policy regulations in Japan: Case studies on dioxin emissions and electric home appliances recycling[J]. Journal of Cleaner Production, 2013, 44:152-158.
- [62] 张汉江, 李聪颖, 姚琴等. 闭环供应链上的最优回收激励契约与政府补贴再制造政策的最优化[J]. 系统工程, 2014, 08:74-79.
- [63] 任鸣鸣, 刘丛, 杨雪, 鲁梦昕. 电子废弃物源头污染治理的激励与监督[J]. 系统管理学报, 2015, 03:405-412.
- [64] 曹束, 胡强, 吴晓波等. 基于EPR制度的政府与制造商激励契约设计[J]. 系统工程理论与实践, 2013, 03:610-621.
- [65] 张军. 研究社会系统演化的计算实验方法[J]. 实验室研究与探索, 2008, 10:40-43+75.
- [66] 盛昭涵, 张 维. 管理科学研究中的计算实验方法[J]. 管理科学学报, 2011, 14(5):1-10.
- [67] 钱学森, 于景元, 戴汝为. 一个新科学领域——开放复杂巨系统及其方法论[J]. 自然杂志, 1990, 13(1):3-10.
- [68] 霍兰. 隐秩序——适应性造就复杂性[M]. 周晓牧等,译. 上海: 上海科技出版社, 2000.
- [69] 黄欣荣. 复杂性科学与哲学[M]. 北京:中央编译出版社, 2007.
- [70] 邢丽卿, 孙绍荣. 基于Agent的计算实验金融学: 原理、方法和挑战[J]. 广西师范大学学报(自然科学版), 2008, 01:129-133.
- [71] 张维, 武自强, 张永杰等. 基于复杂金融系统视角的计算实验金融: 进展与展望[J]. 管理科学学报, 2013, 06:85-94.
- [72] Parunak H, Savit R , Riolo R. Agent-Based Modeling vs. Equation-Based Modeling: A Case Study and Users' Guide[C]. Proceedings of Multi-agent Systems and Agent-based Simulation, Paris, France, 1998.
- [73] 廖守亿. 复杂系统基于Agent的建模与仿真方法研究及应用[D]. 国防科学技术大学, 2005.
- [74] Gerd W, Florin T. Agent-Oriented Modeling and Agent-Based Simulation [C]. Proceedings of 5th International Workshop on Agent Oriented Information Systems(AOIS-2003), Springer-Verlag, 2003.
- [75] Macal C M, North M J. Tutorial on Agent-based modeling and simulation[C]. Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference, Orlando, USA, 2005.
- [76] 张江, 李学伟. 人工社会——基于Agent的社会学仿真[J]. 系统工程, 2005, 01:13-20.
- [77] 毕贵红. 固体废物综合管理系统演化与调控模型研究[D]. 昆明理工大学, 2008.
- [78] 赵秀美. 基于Repast仿真平台的水资源优化配置研究[D]. 天津大学, 2008.
- [79] 王继荣. 废旧家电回收再利用系统若干关键问题研究[D]. 中国海洋大学, 2009.
- [80] 朱江艳. 基于Repast仿真平台的发电商演化博弈竞价策略研究[D]. 华北电力大学(北京), 2010.
- [81] 赵剑冬. 基于Agent的产业集群企业竞争模型与仿真研究[D]. 华南理工大学, 2010.
- [82] 潘理虎, 黄河清. 农业土地利用变化的人工社会模型研究[J]. 系统仿真学报, 2010, 08:1965-1969.

- [83] 金帅. 基于计算实验的排污权交易研究[D]. 南京大学, 2011.
- [84] Zhang B, Zhang Y, Bi J. An adaptive agent-based modeling approach for analyzing the influence of transaction costs on emissions trading markets [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2011, 26(4): 482-491.
- [85] 李真. 基于计算实验的工程供应链协调优化研究[D]. 南京大学, 2012.
- [86] 龚承柱, 李兰兰, 柯晓玲等. 基于multi-agent 的煤矿水害演化模型[J]. *煤炭学报*, 2012, 37(6): 1005-1009.
- [87] 刘闯, 肖条军, 田晨. 基于计算实验的制造商外包策略分析[J]. *软科学*, 2015, 09:49-53+67.
- [88] 李大宇, 米加宁, 徐磊. 公共政策仿真方法: 原理、应用与前景[J]. *公共管理学报*, 2011, 8(4): 8-20.
- [89] 盛昭瀚, 张军, 杜建国. 社会科学计算实验理论应用[M]. 上海: 上海三联书店, 2009.
- [90] 张维, 张永杰, 熊熊. 计算实验金融研究[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [91] 刘恩东. 不确定组合系统的若干控制问题研究[D]. 东北大学, 2005.
- [92] 辛玉红, 江炳辉. 基于Agent的供应链演化及Repast S仿真[J]. *科技管理研究*, 2011, 08:80-84+89.
- [93] Lee C Y, Sung T. Schumpeter's legacy: A new perspective on the relationship between firm size and R&D[J]. *Research Policy*, 2005 (6).
- [94] 盛昭瀚, 张军, 杜建国. 社会科学计算实验理论应用[M]. 上海: 上海三联书店, 2009.
- [95] Ding H, Yang X P. SWARM-An Object-Oriented Platform to Construct Artificial Life Modal [J]. *Journal of System Simulation*, 2002, 14(5).
- [96] Gupta M, Jin L, Homma N. Static and dynamic neural networks, from fundamentals to advanced theory[J]. IEEE press, Wiley, 2003.
- [97] North M J, Collier N T, Vos J R. Experiences Creating Three Implementations of the Repast Agent Modeling Toolkit[C]. *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation*, 2006, 16(1):1-25.
- [98] 余福茂. 电子废弃物回收管理理论与政策:利益相关主体回收行为分析的视角[M]. 浙江: 浙江大学出版社, 2014.
- [99] 姜昌华, 韩伟, 胡幼华. REPAST——一个多Agent仿真平台[J]. *系统仿真学报*, 2006, 08:2319-2322.
- [100] 方美琪, 张树人. 复杂系统仿真与建模 (第二版) [M]. 中国人民大学出版社, 2011.

附录：攻读硕士学位期间发表学术论文及参加科研项目情况

A.已经发表的学术论文

[1] 基于 Agent 建模的电子废弃物回收处理渠道研究[J].科技创新与应用,2015

B.参加的科研项目

1. 国家自然科学基金 “电子废弃物回收处理系统的多主体协同演化机理及政策研究”（项目编号：71373064） 2013.09-2015.12.
2. 2014 浙江省大学生科技创新活动（新苗人才计划）项目 “电子废弃物回收处理系统中非正规渠道上主体行及激励机制研究”（项目编号：ZX150701304068，KYZ031614068） 2013.12-2015.10.
3. 2014“管理科学与工程”省高校人文社科重点研究基地优秀硕士论文培育 “电子废弃物回收处理系统演化的计算实验模型研究”（项目编号：GK130202204004/017） 2014.02-2015.12.
4. 2015 年杭州电子科技大学“挑战杯”大学生课外学术科技作品竞赛 “浙江省台州市电子废弃物回收处理现状调研” 2014.10-2015.05.

C. 获得的其他奖项：

2014 年 9 月，全国研究生数学建模竞赛国家二等奖。

2015 年 6 月，杭州电子科技大学“挑战杯”大学生课外学术科技作品竞赛，校级二等奖。

2015 年 10 月，杭州电子科技大学研究生三等奖学金。