

分类号: F272

密 级: 公开

学校代码: 10363

学 号: 2220720124



安徽工程大学

Anhui Polytechnic University

硕士学位论文

题 目 政府干预下家庭废弃药品回收双渠
道演化博弈及仿真研究

论 文 作 者 杨倩

指 导 教 师 刘长义 教授

学 科 (专 业) 管理科学与工程

研 究 方 向 物流与供应链管理

论文提交日期: 2025 年 5 月 14 日

分类号: F272

密 级: 公开

单位代码: 10363

学 号: 2220720124

题 目 政府干预下家庭废弃药品回收双渠道演化博弈及仿真研究

英文并列

题 目 **EVOLUTIONARY GAME AND SIMULATION STUDY**
OF DUAL-CHANNEL HOUSEHOLD
PHARMACEUTICAL WASTE RECYCLING UNDER
GOVERNMENT INTERVENTION

学生姓名: 杨倩

指导教师: 刘长义 教授

专 业: 管理科学与工程

研究方向: 物流与供应链管理

论文答辩日期: 2025 年 5 月 14 日

安徽工程大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：我恪守学术道德，崇尚严谨学风。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。除文中已明确注明和引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品及成果的内容。论文为本人亲自撰写，我对所写的内容负责，并完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：杨倩

日期：2025 年 05 月 14 日

安徽工程大学学位论文版权使用授权书

学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅或借阅。本人授权安徽工程大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

保密 ☐，在 _____ 年解密后适用本版权书。

本学位论文属于

不保密 ☒。

学位论文作者签名：杨倩

日期：2025 年 05 月 14 日

指导教师签名：刘长

日期：2025 年 05 月 14 日

政府干预下家庭废弃药品回收双渠道演化博弈及仿真研究

摘 要

随着居民健康意识的增强,居民在家中储备药品进行自我药疗的现象越来越普遍。然而,这一现象会导致家庭废弃药品数量呈现显著增长的趋势。家庭废弃药品如果没有得到妥善的处理,不仅对环境造成危害,还会威胁到居民身体健康。废弃药品中的化学成分可能渗透到土壤及水源系统,进而干扰生态系统的平衡状态,甚至通过食物链传递至人体,增加患病的风险。家庭废弃药品回收市场存在双渠道,一种是正规渠道即具备回收资质的机构,它们能够按照规范流程对废弃药品进行安全处理;另一种是非正规渠道即不具备回收资质的机构,它们将回收的药品重新流入市场,带来巨大的安全隐患。因此,加强正规渠道的建设,打击非正规渠道的非法回收活动,是确保家庭废弃药品回收工作有效开展的关键。

本研究使用演化博弈及系统动力学理论等分析工具,深入探讨家庭废弃药品回收过程中主要参与主体即政府、正规渠道和非正规渠道的动态演化关系,并且进一步分析政府不同激励策略对家庭废弃药品回收双渠道的影响。本研究的核心内容涵盖以下几个方面:

首先,明确家庭废弃药品回收内涵,梳理国内、外家庭废弃药品回收情况,将国内、外家庭废弃药品回收现状结合进行对比分析,明

确家庭废弃药品回收过程中存在的问题，分析家庭废弃药品回收影响因素，为后续的研究奠定基础。

其次，运用演化博弈理论，深入分析家庭废弃药品回收过程中的三个主要参与主体即政府、正规渠道及非正规渠道随时间演化的行为策略选择，并探讨影响各参与主体决策的因素。研究结果表明，政府行为策略选择受政府积极干预回收获得的社会收益、政府积极回收付出的成本、政府消极回收付出的成本、政府对回收渠道的奖惩措施等因素影响。正规渠道行为策略选择不仅受自身因素影响，还受政府奖惩措施影响，包括正规渠道积极或消极回收付出的成本、正规渠道积极或消极回收获得的收益、政府对回收渠道的奖惩措施。非正规渠道行为策略选择不仅受自身因素影响，也受政府奖惩措施的影响，包括非正规渠道参与回收获得的收益、非正规渠道参与回收需付出的成本、政府对回收渠道的奖惩措施。

最后，为探究政府激励策略对家庭废弃药品回收双渠道的影响，使用系统动力学方法构建家庭废弃药品回收体系的系统动力学模型。研究结果显示，政府采取增加正规渠道回收价格这一激励策略，始终是推动正规渠道发展的有效手段，并且还能在一定程度上抑制非正规渠道的发展。政府采取增设正规回收点数量这一激励策略，对促进正规渠道回收始终有效；这一激励策略实施较短时间内能够有效遏制非正规渠道的发展，但该策略实施时间较长时非正规渠道的发展不再受到影响。此外，政府采取增加环保宣传费用和服务费用这两种激励策略在策略实施初期能够有效促进正规回收和抑制非正规回收，但策略

实施较长时间时对正规渠道回收和非正规渠道回收的影响不大。

本研究构建了一个政府、正规渠道和非正规渠道的三方演化博弈模型，深入分析了政府奖惩机制的非线性影响规律。此外，还通过系统梳理居民、正规渠道、非正规渠道与政府之间的复杂关系，建立了一个家庭废弃药品回收体系的系统动力学模型，有效量化了不同政府激励策略的时间效应差异。本研究对推动家庭废弃药品回收行业的健康发展具有重要的理论和实践意义。

关键词：家庭废弃药品回收，非正规渠道，三方演化博弈，系统动力学，仿真分析

EVOLUTIONARY GAME AND SIMULATION STUDY OF DUAL-CHANNEL HOUSEHOLD PHARMACEUTICAL WASTE RECYCLING UNDER GOVERNMENT INTERVENTION

ABSTRACT

With the enhancement of residents' health awareness, the phenomenon of storing medicines at home for self-medication has become increasingly common. However, this phenomenon leads to a significant increase in the amount of household pharmaceutical waste. If these pharmaceutical wastes are not properly handled, they not only pose a threat to the environment but also endanger the health of residents.

The household pharmaceutical waste recycling market has two channels. One is the formal channel, which consists of institutions with recycling qualifications that can safely process pharmaceutical waste according to standard procedures; the other is the informal channel, which involves institutions without recycling qualifications that reintroduce the recycled pharmaceutical waste into the market, posing significant safety hazards. Strengthening the construction of formal channels and combating informal channels is crucial for ensuring the

effective implementation of household pharmaceutical waste recycling.

This study employs analytical tools such as evolutionary game and system dynamics to delve deeply into the dynamic evolutionary relationships among the primary participants in the process of household pharmaceutical waste recycling. Furthermore, the study analyzes the impact of different government incentive strategies on the dual-channel of household pharmaceutical waste recycling.

This section clarifies the connotation of household pharmaceutical waste recycling, reviews the current status of household pharmaceutical waste recycling both domestically and internationally, and conducts a comparative analysis of the domestic and international recycling practices. It identifies key issues in the recycling process and analyzes the influencing factors of household pharmaceutical waste recycling, thereby laying the foundation for subsequent research.

Using evolutionary game theory, this study conducts a thorough analysis of the dynamic strategy choices over time of the three participants, the government, formal channels and informal channels. It also explores the factors influencing the decision-making of each participant. The research findings indicate that the government's behavioral strategy choices are affected by factors such as the social benefits, the costs, and the government's reward and punishment measures. The behavioral strategy choices of formal channels are

influenced not only by their own factors but also by the government's reward and punishment measures, including the costs and benefits associated with formal channels' active or inactive recycling and the government's reward and punishment measures for recycling channels. The behavioral strategy choices of informal channels are influenced not only by their own factors but also by the government's reward and punishment measures, including the benefits obtained and the costs incurred by informal channels for participating in recycling and the government's reward and punishment measures for recycling channels.

To further investigate the impact of government incentive strategies on the dual-channel system of household pharmaceutical waste recycling, a system dynamics model of household pharmaceutical waste recycling was constructed using the system dynamics method. The research results show that the government's strategy of increasing the recycling price for formal channels is always an effective means of promoting the development of formal channels and can also, to some extent, suppress the development of informal channels. The government's strategy of increasing the number of formal recycling points is always effective in promoting formal channel recycling; this strategy can effectively curb the development of informal channels in the short term after its implementation, but the development of informal channels is no longer affected after a longer period of implementation. Additionally, the

government's strategies of increasing environmental publicity expenses and service fees both effectively promote formal recycling and suppress informal recycling in the initial stages of implementation, but these strategies have little impact on formal and informal channel recycling after a longer period of implementation.

This study constructs a tripartite evolutionary game model involving the government, formal recycling channels, and informal recycling channels, providing an analysis of the nonlinear effects of governmental reward-penalty mechanisms. Furthermore, by systematically investigating the complex interrelationships among residents, formal/informal channels, and governmental entities, a system dynamics model for household pharmaceutical waste recycling systems was developed to effectively quantify temporal effect variations under different government incentive strategies. The research offers significant theoretical and practical implications for promoting the healthy development of the household pharmaceutical waste recycling industry.

Author: Yang Qian (school of economics and management)

Supervised by: Professor Liu Changyi

KEY WORDS: household pharmaceutical waste recycling, informal channels, triple evolution game, system dynamics, simulation analysis

目 录

摘 要.....	I
ABSTRACT.....	IV
第 1 章 绪 论.....	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.1.1 研究背景.....	1
1.1.2 研究意义.....	2
1.2 研究内容和创新点.....	3
1.2.1 研究内容.....	3
1.2.2 创新点.....	4
1.3 研究方法与技术路线.....	5
1.3.1 研究方法.....	5
1.3.2 技术路线.....	5
第 2 章 理论基础与文献综述.....	7
2.1 理论基础.....	7
2.1.1 演化博弈理论.....	7
2.1.2 系统动力学方法.....	8
2.2 文献综述.....	10
2.2.1 废弃药品回收相关研究.....	10
2.2.2 演化博弈在废品回收中的应用.....	12
2.2.3 系统动力学在废品回收中的应用.....	14
2.2.4 文献评述.....	15
第 3 章 家庭废弃药品回收现状及问题分析.....	17
3.1 家庭废弃药品回收内涵.....	17
3.2 家庭废弃药品回收现状.....	17
3.2.1 国外家庭废弃药品回收现状.....	17
3.2.2 国内家庭废弃药品回收现状.....	19
3.2.3 国内外家庭废弃药品回收现状比较.....	21
3.3 家庭废弃药品回收存在的问题及其影响因素分析.....	22
3.4 本章小结.....	23
第 4 章 政府干预下家庭废弃药品回收双渠道演化博弈分析.....	24
4.1 问题描述.....	24
4.2 研究假设及模型构建.....	25
4.2.1 研究假设.....	25
4.2.2 模型构建.....	27
4.3 模型分析.....	29
4.3.1 政府的策略稳定性分析.....	29
4.3.2 正规渠道的策略稳定性分析.....	31
4.3.3 非正规渠道的策略稳定性分析.....	33
4.3.4 三方演化博弈系统均衡点的稳定性分析.....	35
4.4 仿真分析.....	36

4.4.1 策略选择随时间变化结果.....	36
4.4.2 政府奖惩措施对各参与主体的影响.....	38
4.5 本章小结.....	40
第 5 章 政府干预下家庭废弃药品回收双渠道 SD 仿真研究	41
5.1 问题描述.....	41
5.2 系统动力学模型.....	42
5.2.1 确定系统边界及模型假设.....	42
5.2.2 因果图.....	42
5.2.3 流量存量图.....	44
5.2.4 数据来源与方程设置.....	45
5.3 模型检验.....	47
5.3.1 现实测试.....	47
5.3.2 极端测试.....	48
5.4 仿真分析.....	49
5.4.1 单一政府激励策略仿真分析.....	49
5.4.2 组合政府激励策略仿真分析.....	53
5.5 本章小结.....	59
第 6 章 总结与展望.....	61
6.1 研究结论与建议.....	61
6.2 研究展望.....	62
参考文献.....	64
攻读硕士学位期间发表或录用的学术论文与科研项目经历.....	76
致 谢.....	77

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景及意义

1.1.1 研究背景

随着人们健康意识的提高和医药技术的进步,家庭常备药品的数量日益增多,随之而来的家庭废弃药品问题也日益凸显^[1]。药品超过使用期限,会发生复杂的物理或化学变化,这不仅会导致药品失效,甚至可能产生额外的毒性,所以即便药品的外观与气味未发生明显变化,亦不可继续使用^[2]。美国地质调查局在 30 个州的河流中检测到 80%的样本含有抗生素、止痛药等药品残留,其中布洛芬浓度最高达 1.2 $\mu\text{g/L}$;世界卫生组织统计显示,全球每年约 70 万人死于耐药菌感染,其中 15%-20%的耐药基因传播与环境中药品残留相关;这些都表明了若家庭废弃药品处置不当,将对环境和人体健康造成严重危害^[3]。

家庭废弃药品回收是一个全球性的挑战,全球每年产生的家庭废弃药品数量呈现持续增长趋势。发达国家普遍从法律法规、回收渠道、宣传教育等方面建立了较为完善的家庭废弃药品回收体系^[4]。澳大利亚在社区药店、医院、超市等场所设置废弃药品回收箱,方便居民就近投放废弃药品。加拿大推行“药品回收计划”,居民可将废弃药品邮寄至指定回收点,无需支付邮费。日本在社区设置“药品回收站”,居民可将废弃药品投放至指定回收箱,并由专人定期收集处理。发展中国家由于人口基数大,药品消费增长迅速,家庭废弃药品产生量呈上升趋势,但是由于经济水平、环保意识等因素限制,家庭废弃药品回收体系尚不完善,回收率普遍较低。

家庭废弃药品回收渠道可分为正规回收渠道和非正规回收渠道^[5]。一些正规回收渠道为促进家庭废弃药品回收积极开展相应的回收活动。例如,广州白云山医药企业率先提出并且实施家庭废弃药品回收^[6]。安徽省药品监督管理局为促进家庭废弃药品回收工作,举办家庭废弃药品回收活动^[7]。京金象大药房以“关爱健康、安全用药”为主题组织了家庭废弃药品回收活动^[8]。非正规渠道回收家庭

废弃药品的现象在全球范围内普遍存在,不少非正规渠道将回收来的家庭废弃药品进行改装后再进行二次销售,这给公共卫生安全埋下了巨大隐患,对公众生命健康构成严重威胁。

随着家庭废弃药品问题的日益突出,我国政府逐渐认识到其危害性,在政策制定、体系建设、宣传教育等方面采取了一系列措施,旨在推动家庭废弃药品回收工作的开展^[9]。《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》等相关政策的出台明确规定了废弃药品的分类、回收和处理要求。部分城市开展了家庭废弃药品回收试点,探索建立回收模式。中央和地方财政设立专项资金,支持家庭废弃药品回收体系的建设和运营。通过电视、广播、网络等媒体平台,宣传家庭废弃药品的危害和回收的重要性。

尽管我国政府在家庭废弃药品回收方面做出了一系列努力,但整体回收现状仍不容乐观,回收率低、覆盖面有限、公众参与度不高等问题依然突出。非正规渠道的存在对正规渠道回收家庭废弃药品影响,政府及家庭废弃药品回收双渠道之间的关系值得关注,并且政府对家庭废弃药品回收的影响值得进一步研究,这一研究能够为构建一个合理的家庭废弃药品回收体系提供参考建议。

1.1.2 研究意义

本研究将演化博弈理论和系统动力学理论应用于家庭废弃药品回收的研究中,具有较强的理论意义和现实意义。

(1) 理论意义

关于家庭废弃药品回收的演化博弈研究,大多集中于探讨政府、医药企业、消费者等参与主体之间的演化关系,很少考虑非正规渠道。因此,本研究聚焦于政府、正规回收渠道和非正规回收渠道三者之间的演化博弈关系,可以从理论上深入分析各主体的行为策略及其演化规律,丰富了相关研究。

关于家庭废弃药品回收的系统动力学研究中,大多侧重于讨论政府补贴、奖惩、税收等直接经济激励措施对家庭废弃药品回收影响,本课题探究增加环保宣传、增强回收点的服务质量、增设回收点等间接经济激励措施对家庭废弃药品回收回收效果的影响,丰富了相关研究。

(2) 现实意义

我国政府虽然已经关注到家庭废弃药品回收这一问题，但是重视程度不高，家庭废弃药品回收中仍然存在很多问题有待解决，如回收渠道不够畅通、居民参与度不高、政府激励措施效果有限等。这些问题的存在严重制约了家庭废弃药品回收行业的健康发展。本研究通过构建三方演化博弈模型和系统动力学模型，深入分析了政府、正规渠道、非正规渠道以及居民之间的互动关系，并量化了不同政府激励策略的时间效应差异。这些研究成果为完善我国的家庭废弃药品回收政策提供了科学依据和具体指导，有助于制定更加有效、合理的政策措施，从而提高回收效率，减少环境污染，保障公众健康。因此，本研究对于推动我国家庭废弃药品回收政策的优化和完善具有重要的指导意义。

1.2 研究内容和创新点

1.2.1 研究内容

本课题以家庭废弃药品回收为对象展开研究，具体研究内容如下：

(1) 阐述家庭废弃药品回收内涵，对比国内外家庭废弃药品回收行为现状，明确家庭废弃药品回收过程中存在的问题，分析家庭废弃药品回收的影响因素，为后续的家庭废弃药品回收的相关研究奠定基础。

(2) 为探究家庭废弃药品回收过程中政府、正规渠道、非正规渠道之间的关系，构建政府、正规渠道与非正规渠道的三方演化博弈模型。政府的行为策略选择为积极干预/消极干预、正规渠道的行为策略选择为积极回收/消极回收、非正规渠道的行为策略选择为不参与回收/参与回收。分析各参与主体在家庭废弃药品回收过程中的行为策略选择及演化稳定策略，并且进一步讨论家庭废弃药品回收过程中各参与主体行为策略的影响因素。

(3) 为进一步研究政府回收激励策略对家庭废弃药品回收的影响，构建一个关于家庭废弃药品回收体系的系统动力学模型。该系统动力学模型根据回收参与主体、回收影响因素绘制出相应的因果回路图和存量流量图，并且使用芜湖市家庭废弃药品回收相关数据对各变量进行方程设置，利用该模型模拟不同政府回收激励策略对家庭废弃药品回收的影响。

论文各章安排如下：

第一章：绪论。详细阐述本课题的研究背景、研究意义、研究内容、论文创新点、研究方法和技术路线。通过分析研究背景、明确研究意义，进而确定研究内容。

第二章：理论基础与文献综述。首先，阐述演化博弈和系统动力学等相关理论基础。其次，从三个方面对家庭废弃药品回收的相关研究展开进行综述。

第三章：家庭废弃药品回收现状及问题分析。说明家庭废弃药品回收内涵，梳理国外家庭废弃药品回收情况，分析国内家庭废弃药品回收情况，对比分析国内、外家庭废弃药品回收情况，明确家庭废弃药品回收过程中存在的问题，分析家庭废弃药品回收影响因素。

第四章：政府干预下家庭废弃药品回收双渠道演化博弈分析。构建一个政府、正规渠道和非正规渠道的三方演化博弈模型，探究三者之间的演化关系和行为策略选择，并且对各参与主体行为策略选择的影响因素进行分析。

第五章：政府干预下家庭废弃药品回收双渠道 SD 仿真研究。构建一个关于家庭废弃药品回收体系的系统动力学模型，模拟不同政府回收激励策略对家庭废弃药品回收的影响。

第六章：总结和展望。根据各部分研究内容对论文所做的工作进行总结，并且给出相应的政策建议。在此基础上，指出研究的不足以及未来的研究方向。

1.2.2 创新点

本研究的创新点主要体现在两个方面：

(1) 构建政府、正规渠道和非正规渠道的三方演化博弈模型，分析三者之间的策略选择及其演化规律。传统的双主体或三主体的演化博弈模型主要关注正式参与主体之间的互动，而本研究通过引入非正规渠道，更全面地反映了实际社会经济系统的复杂性，丰富了家庭废弃药品回收的演化博弈理论。展示了非正规渠道在回收过程中的实际影响，为政策制定者提供了更全面的视角，帮助他们设计出能够同时考虑正规和非正规渠道的综合政策提供了依据。

(2) 探究政府间接经济激励策略对家庭废弃药品回收的影响，构建关于家庭废弃药品回收体系的系统动力学模型，聚焦于增强环保宣传、提升回收点服务质量、增设回收点等政府间接经济激励策略对家庭废弃药品回收的影响，为政府制

定回收激励策略提供参考。

以上两个创新点不仅能进一步拓展家庭废弃药品在演化博弈、系统动力学的相关研究，还能为建立家庭废弃药品回收体系提供参考建议。

1.3 研究方法与技术路线

1.3.1 研究方法

(1) 文献研究法

通过阅读大量国内外关于家庭废弃药品回收的研究文献，对相关研究进行一个较全面的文献综述，这能够系统地、正确地了解和掌握该项研究的动态发展趋势，将新的研究成果引入到本研究当中，为本文的研究提供了有效的理论指导。

(2) 演化博弈建模法

根据演化博弈理论，构建一个关于政府、正规渠道、非正规渠道的三方演化博弈模型，分析家庭废弃药品回收过程中各参与主体的行为策略选择、策略组合稳定性及其影响因素分析。

(3) 系统动力学建模法

利用系统动力学理论，构建家庭废弃药品回收体系的系统动力学模型，使用定性分析和定量分析相结合的方法探究不同政府回收激励策略对家庭废弃药品回收的影响。

(4) 数值仿真法

在家庭废弃药品回收体系的系统动力学模型的基础上，收集芜湖市家庭废弃药品回收相关数据，验证模型的有效性，运用 Vensim 软件对模型中的变量进行数值仿真分析，并且预测不同政府回收激励策略对家庭废弃药品回收的影响。

(5) 对比分析法

使用系统动力学模型模拟家庭废弃药品回收体系，分析并且对比不同政府回收激励策略对家庭废弃药品回收的影响。

1.3.2 技术路线

梳理研究内容，明确各部分研究内容之间的内在联系，绘制本研究的技术路

线图，如图 1-1 所示。

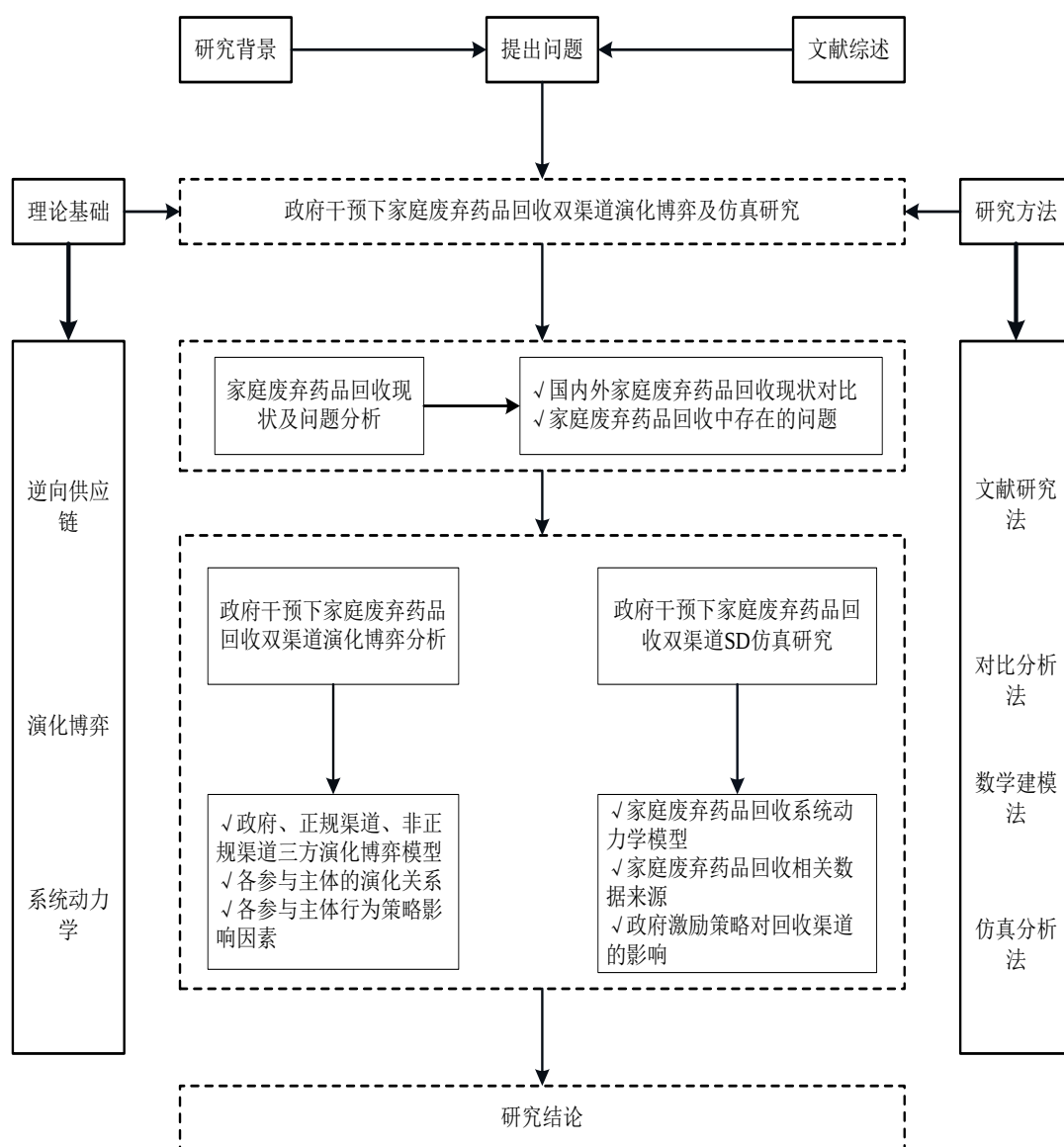


图 1-1 技术路线图

第 2 章 理论基础与文献综述

2.1 理论基础

2.1.1 演化博弈理论

演化博弈是一种探讨在自然选择和个体互动过程中策略如何演变的理论，该理论最初源自生物学领域，其主要目的是阐释人类行为的演化机制，探讨在特定环境和互动情况、不同策略如何逐渐形成、演变并最终稳定下来^[10]。该理论提出个体的策略选择是一个受经验、环境和其他个体行为影响的动态过程，揭示了策略在竞争和合作中的演化及稳定性，并且还强调了学习机制在决策中的作用，个体通过试错和学习调整策略来适应环境，这种非完全理性的决策模式更符合现实^[11]。

经典博弈理论主要关注博弈主体、利益、策略及信息等要素^[12]。经典博弈理论假设所有参与主体都是完全理性的，所有参与主体能够准确地评估各种策略的收益和成本，并据此作出最优决策。此外，该理论还假设所有参与主体都拥有完全的信息，即每个参与主体都能准确地知道其他参与主体的策略选择和收益情况。在此基础上，构建数学模型，分析个体和群体在不同博弈情境下的行为策略，并预测各参与主体在长期互动中最终会达到的稳定状态，如图 2-1 所示。

		参与人B	
		L	R
参与人A	U	A/B	C/D
	D	E/F	G/H

图 2-1 经典博弈图

演化博弈理论在经典博弈理论的基础上引入了有限理性和信息不完全^[13]。演化博弈理论将参与主体的策略选择视为一个动态的过程,并且这个动态过程受个体经验、环境变化和其他参与主体行为等因素影响。演化博弈模型的核心是稳定性分析,复制动态方程是关键的行为选择机制,指导模型的构建与分析^[14]。该理论通过描述参与主体间的演化关系,构建收益函数并推导出相应的复制动态方程,来模拟参与主体之间相互学习、追求收益最大化的决策过程。在此过程中,参与主体的策略选择呈现出非理性与动态性特征,可能涉及纯策略或混合策略的组合运用,各策略的使用比例在 0 至 1 之间灵活调整^[15]。三方演化博弈行为策略选择图,如图 2-2 所示。

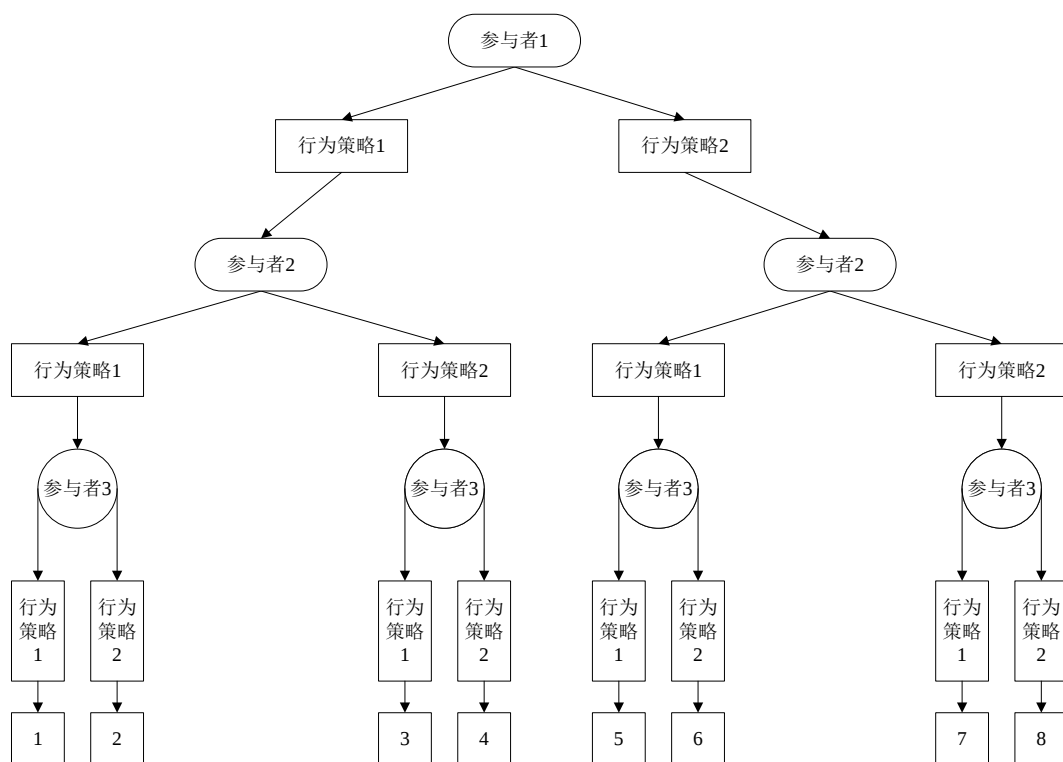


图 2-2 演化博弈图

2.1.2 系统动力学方法

系统动力学是一门研究信息反馈系统的交叉综合学科,旨在解决企业运营中出现的系统仿真问题,在经济、管理、生态等多个领域得到广泛应用^[16]。该理论的核心思想是系统结构决定系统功能,强调因果关系包括正反馈和负反馈、时间延迟在系统行为中的重要性^[17]。通过因果图和流量存量图等分析工具,描述系统中的因果关系、反馈机制以及物质、能量或信息的流动。

系统动力学模型的构建主要包括四个步骤：首先，确定系统边界，根据研究内容收集资料，选取关键变量并初步确定系统及其边界；其次，绘制因果图和流量存量图，探讨系统内各变量之间的反馈机制；再次，根据相关信息对各变量进行方程设置，构造系统内各变量相互作用的结构方程，反映各变量间的动态作用机制；最后，进行模型检验，确保系统动力学模型的准确性、科学性和可靠性^[18]。

在系统动力学模型中，因果图是一种用于描述系统中各要素之间相互关系的图形工具^[19]。因果图由下面三个部分组成：(a) 因果关系：明确各要素之间的因果关系是构建系统动力学模型的基础，它能够清晰地展现系统的复杂关系；(b) 因果键：用于表示两个要素之间的因果关系，这种关系通过箭头来表示，“+”表示正因果键，说明一方增加会导致另一方也增加；“—”表示负因果键，表明一方增加会导致另一方减少；(c) 反馈回路：两个以上的因果键首尾相接形成的环状结构，反馈回路分为正反馈回路和负反馈回路；正反馈回路由偶数个负因果关系形成，如图 2-3(a)所示，负反馈回路由奇数个负因果关系形成，如图 2-3(b)所示。

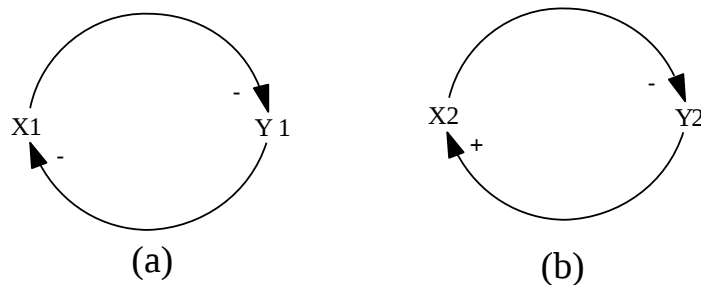


图 2-3 正、负反馈回路图

系统动力学模型中，流量存量图是一种用于清晰展示系统整体结构及各变量性质的图形工具^[20]。它不仅反映系统各要素之间的复杂关系，还能表现出系统在某个时间段内的状态。流量存量图主要由以下元素构成：(a) 存量：用矩形框表示，标注存量的名称和单位；(b) 流量：用箭头表示，箭头的起点和终点分别连接着相关的存量，流量上方通常标注流量的名称和单位；(c) 辅助变量：用椭圆表示，代表影响流量或存量的其他变量，但本身不是存量或流量；(d) 连接线：用实线表示，连接存量、流量、调节器和辅助变量，显示它们之间的关系；流量存量图有助于理解系统中各要素的动态变化及其相互作用，是系统动力学分

析中的重要工具，如图 2-4 所示。

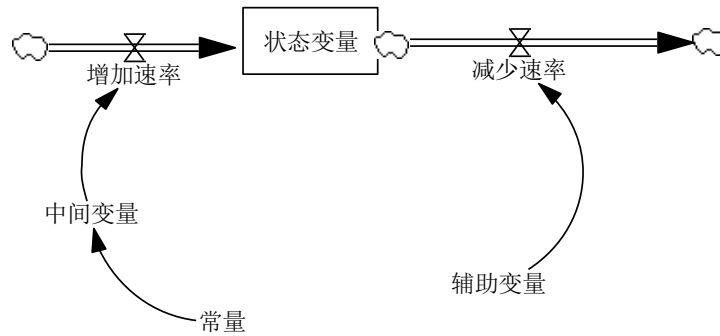


图 2-4 流量存量图

2.2 文献综述

本研究从废弃药品回收相关研究、演化博弈在废品回收中的应用、系统动力学在废品回收中的应用三个方面展开分析。

2.2.1 废弃药品回收相关研究

家庭废弃药品若处理不当，不仅会对环境构成严重威胁，还会对公共健康造成严重的影响^[21]。Yang 等人^[22]用色谱-质谱技术分析了对阿拉菲亚河农村和城市子流域收集的河流沉积物，发现将没有处理过的制药厂污水排入河流或湖泊，会对水源造成永久性伤害。Aydin 等人^[23]在 16 个医院排污口采集水样，并对水样中的抗生素含量进行比较分析，发现如果不对废弃药品产生的污水进行专业的无害化处理，将严重破坏自然生态系统平衡。Musson 等人^[24]研究发现随意丢弃的废弃药品会对土壤造成不良影响，因为废弃药品中的化学成分经分解后渗透入土壤，会损害土壤的质量。在公共健康层面，家庭废弃药品的危害同样不容忽视，未经妥善处理的过期药品若被误食，可能引发急性中毒，危及生命^[25]。此外，大量过期药品若未能及时回收处理，还可能被不法分子回收利用，经过重新包装后流入非法市场，对人类健康构成长期且严重的威胁^[26]。Tanoue 等人^[27]进一步证实，废弃药品不仅污染环境，还对人类生命健康构成重大风险，每年都有因服用被非法改装或再利用的废弃药品而导致健康受损的案例发生，严重时甚至危及

生命。因此，应该回收和妥善处理家庭废弃药品，以减少其带来的危害。

家庭废弃药品回收渠道存在正规回收渠道和非正规回收渠道。正规渠道指有资格从事家庭废弃药品回收活动的机构，通过正规渠道回收到的家庭废弃药品由专业运输公司运送到统一处理中心，并通过高温焚烧和化学分解等技术进行处理，处理后的废物按照环境保护标准进行处置^[28]。非正规渠道指没有资格从事家庭废弃药品回收的机构，非正规渠道会随意处置或非法出售回收到的废弃药品，这将对环境和公共健康构成极大威胁^[29]。在瑞典^[30]、美国^[31]和德国^[32]，废弃药品回收活动通常是在政府指导下由第三方专业企业建立的。在日本^[33]，有专门的政府机构每月都会从居民家中回收家庭废弃药品。在中国，家庭废弃药品的回收通常由政府或第三方回收机构开展。在一些发展中国家，如达卡和孟加拉国非法回收现象普遍存在，甚至非正规渠道比正规渠道具有更强的竞争力，这对家庭废弃药品回收市场的健康发展构成了挑战^[34]。

家庭废弃药品回收机制有政府主导、企业参与、社区和公众参与、第三方服务机构参与等形式。政府通过立法和政策引导，建立家庭废弃药品回收的法律框架和标准流程，并设立专门的回收点，同时组织定期的回收活动，以鼓励公众参与。制药企业通过生产者责任延伸制度承担回收责任，与零售商合作在药店设置回收点，并开展公益活动以提高公众意识。社区和公众参与包括志愿者参与回收和宣传工作，公众通过社区活动等途径了解正确的药品回收方法，将过期药品送到指定的回收点。市场化运作的回收机制引入第三方服务机构，负责废弃药品的收集、运输和处理，并通过市场化手段激励公众和企业参与回收。Tong 等人^[35]研究发现，导致废弃药品回收活动难以实施的主要原因是公众对废弃药品潜在危害的了解不足，政府应该加大宣传废弃药品的危害。邵鹏等人^[36]对比了国内外过期药品回收的现状，指出我国过期药品回收销毁服务尚未成体系，难以为广大居民提供持续长效的过期药品回收服务，并且介绍了我国一些地区在过期药品回收方面的探索，如深圳市的“互联网+社工”回收模式。鲁圣鹏^[37]在对相关文献研究的基础上，明晰当前家庭药品废弃物处置路径，阐述其不当处置的潜在危害；重点探讨欧洲、美国等区域和中国家庭药品废弃物管理现状、发展历程、相关做法与经验。李玉民等人^[38]在界定“互联网+”药品供应链药品回收新机制的基础上，运用 Stackelberg 博弈理论，构建了三种主导情况下的药品回收新机制模型，旨

在分析不同主导力量在回收机制中的行为和策略。王高玲^[39]从过期药品回收的现状入手，引入宣传教育成本、健康收益和绿色收益的概念，构建了政府和医药零售企业博弈模型，从政府、企业和消费者层面提出了解决过期药品回收过程中现存问题的具体策略。

尽管国家将废弃药品定性为危险废物，并要求按照相关规定进行处理，但具体的处理流程和操作步骤缺乏详细的指导^[40]。《药品流通监督管理办法》虽涵盖了药品的销售和购买等内容，却未涉及废弃药品的具体规定，《药品召回管理办法》对存在安全隐患的药品召回程序进行了规定，但是并未明确说明召回范围是否涵盖废弃药品^[41]。我国关于药事的法律法规覆盖领域广泛，包括药品监管、药品生产与经营管理、药品不良反应报告与监测等^[42]，但在诸多规定中，针对废弃药品的规定仍显不足，仅有少量模糊或相关条款可供参考^[43]。

政府通过补贴、奖惩、税收等直接经济激励来促进家庭废弃药品回收。刘帅^[44]构建一个由药品制造商和药品零售商构成的过期药品回收供应链系统，该系统在信息对称和政府提供回收补贴的条件下运作，得到在合作模式与非合作模式下，药品制造商和药品零售商各自的最优决策。张慧颖^[45]通过实证研究找出了影响居民参与家庭过期药品回收活动的关键因素，针对上述关键因素，文献提出了政府主导下的家庭过期药品回收激励策略，引入了系统动力学模型对过期药品回收系统进行动态仿真，观察在不同的策略下系统的动态变化。胡亚平^[46]通过问卷调查等方式，分析积分激励变量对消费者参与回收行为的影响，进一步构建基于积分激励的废弃药品逆向供应链模型，该模型以积分激励为核心，涉及政府、制造商、零售商等多个主体，为废弃药品回收工作的实施提供了具体的指导。

2.2.2 演化博弈在废品回收中的应用

为了适应环境和群体内部的交互影响，个体在群体中的行为策略会随着时间的变化而不断变化。演化博弈理论能够有效地模拟和分析在回收系统中多个利益相关者之间的动态交互和策略选择^[47]。

演化博弈理论在废品回收的研究中被广泛使用，如快递包装回收、电子废弃物回收、废旧动力电池回收、废旧共享单车回收、废旧家电回收、过期食品回收等。成灶平等人^[48]针对快递包装废弃物增加和消费者参与回收积极性低的问题，

构建了政府监管部门与消费者之间的演化博弈模型,分析政府静态及动态奖惩措施对消费者参与回收行为的影响。喻可欣等人^[49]构建了消费者、逆向物流电商企业、政府三方演化博弈模型,研究快递包装回收的市场化运作模式,通过演化博弈理论,分析消费者、企业和政府的策略选择及其稳定性,为快递包装回收管理提供理论支持。刘永清^[50]分析电子废弃物回收产业链中政府、企业和消费者的行为特征及影响因素,构建一个三方演化博弈模型来模拟三者演化过程中的策略选择和动态变化。王文宾^[51]构建政府、制造商和回收商之间的三方演化博弈模型,通过分析不同参与者在 WEEE 回收过程中的策略选择和相互影响。李潇芮^[52]聚焦于废弃电器电子产品回收处理商在奖惩机制下的合作研发决策问题,建立了在有、无奖惩机制情况下,回收商进行独立研发与合作研发的决策模型,并分析了奖惩机制对回收商创新研发决策的影响。杜冰冰^[53]从演化博弈的视角出发,深入分析中国废铅蓄电池回收利用过程中的主要问题,并提出了相应的对策。许礼刚^[54]结合前景理论与演化博弈论,构建政府、企业和公众的三方博弈模型,研究废旧动力电池回收问题,通过数值仿真分析初始意愿、罚款、风险态度和损失规避系数的影响。刘阳^[55]构建由政府、供应商、共享单车运营平台和消费者组成的四方演化博弈模型,深入探讨了各方在废旧共享单车回收过程中的策略选择和动态演化。倪霖^[56]构建了回收商、电商平台、政府三方演化博弈模型,考虑了合同罚金、政府奖惩、佣金率、推广费用等因素。刘永清^[57]基于消费者对回收渠道的偏向,对废旧家电回收决策进行了博弈分析。

学者们将演化博弈理论用于家庭废弃药品回收相关研究中,探讨家庭废弃药品回收过程中的各参与主体之间的行为策略选择及策略组合稳定性。李君妍^[58]针对药品回收物流中的三方演化博弈行为进行了深入探讨,构建政府、医药生产企业和消费者之间的非对称三方博弈支付矩阵,分析各参与主体在不同条件下的稳定性策略和渐进趋势。张晓东^[59]结合行为理论和博弈理论,对过期药品回收系统的演化进行了深入探讨,构建一个政府、企业、消费者的三方演化博弈模型,分析各参与主体在过期药品回收中的策略选择和动态变化,还考虑了不同因素对过期药品回收系统的影响。鹿秋晨^[60]以我国家庭过期药品回收为背景,锁定逆向供应链的各方参与者之间的合作关系,为实现对各方参与者参与回收的激励,构建博弈模型,探讨其中的各方回收策略,探索稳定有效的家庭过期药品回收模式。段

翼杨^[61]基于演化博弈视角,探讨区块链技术在过期药品回收处理中的应用,构建了消费者与经销商之间的演化博弈模型,分析了双方在过期药品回收处理中的策略选择和动态变化。

2.2.3 系统动力学在废品回收中的应用

美国麻省理工学院 Forrester 教授创立的系统动力学方法被广泛应用于人类、自然资源、生态、经济和社会研究等各个领域,通过定性分析和定量动态模拟揭示特定系统的演化趋势^[62]。

系统动力学模型被广泛应用于废品回收相关研究中,如电池回收、垃圾回收、汽车回收、电子产品回收、快递包装回收等。王文宾等人^[63]构建电池商和汽车商的演化博弈模型,分析政府不干预与补贴-惩罚政策下废旧动力电池回收决策的影响因素及回收条件,并通过系统动力学模型进行仿真。田立平^[64]以北京市废旧家电回收为例进行调研,绘制了废旧家电回收处理体系的存量流量图,给出了存量流量图的方程式,数值验证了模型的正确性,分析了政府实行政策调控并加强与家电品牌官方制造商、专业的回收处理企业的合作的策略。付跃强^[65]基于系统动力学理论和方法,分析了新能源电动汽车发展的影响因素,通过 Vensim PLE 软件绘制电动汽车保有量因果关系模型、存量流量模型,建立系统动力学方程和确定参数值,通过运行检验和历史检验来进行模型有效性验证。在检验了模型的科学性之后,进行系统仿真分析,探究了废弃电池回收处理以及电池以旧换新对电动汽车发展的影响。Joshi 等人^[66]通过构建系统动力学模型,分析印度正规与非正规商在铅酸电池回收和再制造中的竞争,并利用实际数据测试模型,探讨不同政策对减少铅酸电池回收中铅污染的影响。危浪^[67]构建“车企-消费者-政府”三方演化博弈模型,运用系统动力学动态仿真与反馈结构分析方法,模拟各博弈主体策略的动态演化过程,分析导致演化趋势的反馈结构机制。周叶^[68]构建了居民垃圾分类行为监管机制的演化博弈和系统动力学模型,通过对演化博弈模型计算,得出垃圾分类过程主要参与方—政府和居民不同行为策略下的收益;再对政府方和居民方博弈行为策略进行稳定性分析,并运用系统动力学 Vensim 软件仿真确定了系统的稳定均衡点;最后探讨了参数变化时系统演化的敏感性,并提出了相应的政策建议。陈雪萍^[69]提出包含垃圾分类收集和资源化利用在内

的城市生活垃圾处理子系统,通过系统动力学因果关系图揭示了各个子系统以及子系统内部各要素之间的联系。Cai 等人^[70]采用系统动力学方法构建城市生活垃圾管理系统的动力学模型,分析垃圾产生、收集、运输和处理等环节的动态关系,预测不同政策情景下城市生活垃圾管理系统的动态变化。王耕^[71]以大连市为例,运用系统动力学方法建立了城市生活垃圾资源化处理的系统动力学仿真模型,并进行情景分析,对大连市各种垃圾处理方式的处理量进行了预测。唐睿^[72]运用系统动力学方法,以厦门市为例,利用 VENSIM 软件绘制城市生活垃圾的因果回路图,建立系统动力学的存量流量模型,最后进行仿真模拟及量化分析。郎玲玲^[73]基于政府采取的静态措施、动态惩罚和补贴措施,构建政府与电子产品回收企业之间的演化博弈模型,探讨双方在回收渠道选择中的策略互动,通过系统动力学方法,分析政府政策对企业行为的影响。祁子怡^[74]基于系统动力学模型,分析政府、企业、消费者等主体行为对可循环快递包装行业的影响。通过构建因果回路图和系统流图,从外部环境角度定性研究行业发展的动态机制,揭示主体行为的相互作用及长期影响。Yang 等人^[75]基于调查数据建立了系统动力学模型,揭示了快递包装垃圾的回收行为趋势,为政府制定有效的垃圾管理政策提供了参考。

学者们也将系统动力学方法用于废弃药品回收中,展开了一系列研究。Narayana 等人^[76]对制药行业逆向物流的运作机制进行系统性研究,通过构建系统动力学模型,分析逆向物流的关键环节和影响因素,评估不同政策和技术方案对逆向物流效率的影响。Orhan 等人^[77]采用系统动力学方法,构建家庭药品废弃物处理的因果回路图,分析药品废弃物处理系统中各要素之间的相互作用和反馈机制,探讨不同政策干预如宣传教育、回收设施建设、政策法规对系统行为的影响。Bhushan 等人^[78]使用系统动力学模型研究药品供应链生态系统中具有循环因果关系的关键因素的相互作用,对家庭过期药品回收体系中的政府作用进行深入分析。

2.2.4 文献评述

现有文献已对家庭废弃药品回收多个方面展开进行研究,并取得显著性成果。学者们将演化博弈理论用于研究家庭废弃药品回收中各主体的策略选择和动态

变化,揭示各参与主体在回收系统中的行为演化规律。学者们将系统动力学方法进行家庭废弃药品回收相关研究,通过构建因果回路图和流量存量图,揭示回收系统的动态行为和反馈机制。但是,关于家庭废弃药品回收的研究仍有进一步深入和扩展的空间。具体如下:

(1) 之前关于家庭废弃药品回收的演化博弈研究中,学者们大多关注政府、药品销售企业、药品回收企业、消费者等参与主体之间的演化博弈,很少考虑非正规渠道,非正规渠道作为家庭废弃药品回收中的重要参与主体应该将其考虑进来。本研究构建一个政府、正规渠道、非正规渠道的三方演化博弈模型,分析各参与主体的行为策略选择、策略组合稳定性及其影响因素,在一定程度上丰富相关研究。

(2) 之前的研究中,学者们用系统动力学方法,建立家庭废弃药品回收体系的系统动力学模型,并用该模型对政府补贴、罚款、税收等奖惩措施进行仿真分析。本研究构建家庭废弃药品回收的系统动力学模型,探究不同的政府激励策略对家庭废弃药品回收的影响,这能够为政府制定相应的家庭废弃药品激励策略提供理论支持。

综上所述,本研究旨在通过运用演化博弈模型和系统动力学模型,探究政府、正规渠道和非正规渠道三者之间的演化关系,以及不同政府激励策略对家庭废弃药品回收的影响,为制定科学的家庭废弃药品回收体系提供理论支持和实践指导。这不仅有助于推动家庭废弃药品回收工作的开展,还有助于保障公众健康和生态环境的可持续发展。

第3章 家庭废弃药品回收现状及问题分析

我国政府已经采取了一系列措施来促进家庭废弃药品回收,但是回收效果仍有待提高。本章阐述家庭废弃药品回收内涵,对比国内、外回收现状找到家庭废弃药品回收中存在的问题,并且进行家庭废弃药品回收影响因素分析,为下面的研究奠定基础。

3.1 家庭废弃药品回收内涵

药品是指用于预防、治疗、诊断人类疾病,调节人体生理机能,并明确规定了适应症、功能主治、用法和用量的物质,包括中药、化学药和生物制品等。废弃药品指的是过期药品、淘汰药品、变质药品、被污染的药品以及不再使用的药品,这些药品由于各种原因失去了其效用,甚至还会造成安全隐患^[79]。

家庭废弃药品即居民家中储备的药品已经变质、超出有效性或者超出使用范围的药品^[60],居民家中常备的药品,一般有感冒药、消化系统类药物、呼吸系统类药物、外用药、皮肤用药、五官用药以及儿科药等。

家庭废弃药品回收是指由专业机构对家庭中已经超过保质期的药品或不再适宜使用的药品进行回收,再统一进行专业化销毁的制度^[61]。旨在提高公众对正确使用、合理储存药品的认识,以及了解和随意丢弃过期药品的危害。回收家庭废弃药品,可以有效防止过期药品被随意丢弃而对环境造成污染,也可以避免过期药品被不法分子重新包装后回流市场,从而保护公众的健康和安全。

3.2 家庭废弃药品回收现状

3.2.1 国外家庭废弃药品回收现状

国外在家庭废弃药品回收方面已经形成了较为成熟的体系,许多国家通过法律法规、经济激励和公众教育等手段,建立了高效的回收机制。

(1) 瑞典

瑞典主要通过药店和社区回收点进行回收,居民可将过期或不用的药品送至

药店或社区回收点，由专业处理公司进行无害化处理^[80]。政府通过立法和经济激励措施，推动第三方企业参与回收，负责药品的收集、运输和处理，通过《废弃物框架指令》等法规明确了药品生产商、销售商和消费者的回收责任，并提供经济补贴鼓励企业参与；政府还通过媒体宣传和社区活动，增强公众对废弃药品危害的认识。社区通过组织回收活动和宣传教育，提升居民的环保意识和参与度。

(2) 美国

美国居民可通过药店回收和邮寄回收两种方式处理废弃药品^[81]。药店作为主要回收渠道，负责收集过期或不用的药品，并交由专业处理公司进行无害化处理。此外，美国推行了药品邮寄回收计划，居民可通过邮寄方式将废弃药品送至指定回收中心，进一步提升了回收便利性。政府发挥主导作用，通过立法和政策引导，推动回收体系的建立与完善。药品生产商和零售商承担重要责任，与政府合作建立回收点并提供回收服务，形成了政府主导、企业参与的回收机制。通过《资源保护和回收法》等法规，将药品废弃物纳入危险废物管理范畴，并制定了严格的回收和处理标准。政府对参与回收的企业提供税收优惠和补贴，鼓励其积极参与回收活动。同时，政府通过媒体宣传和社区活动，提高公众对废弃药品危害的认识，增强环保意识。

(3) 德国

德国主要通过药店和社区回收点进行回收^[82]。居民可将过期或不用的药品送至药店或社区回收点，由专业处理公司进行无害化处理。通过立法明确药品生产商和零售商的回收责任，要求其建立回收点并提供回收服务。社区通过组织回收活动和宣传教育，提升了居民的环保意识和参与度。通过《废弃物管理法》等法规，明确了药品生产商、销售商和消费者的回收责任，并提供经济补贴鼓励企业参与。政府还通过媒体宣传和社区活动，增强公众对废弃药品危害的认识。

(4) 日本

日本通过政府机构和药店进行回收^[83]。专门的政府机构每月定期从居民家中回收废弃药品，确保药品得到妥善处理。药店也参与回收，居民可将过期或不用的药品送至药店，由专业处理公司进行处理。政府发挥主导作用，通过立法和政策引导，推动回收体系的建立与完善。药品生产商和零售商承担重要责任，与政府合作建立回收点并提供回收服务，形成了政府主导、企业参与的回收机制。

通过《废弃物处理法》等法规，明确药品生产商、销售商和消费者的回收责任，并提供税收优惠和补贴鼓励企业参与。政府还通过媒体宣传和社区活动，提高公众对废弃药品危害的认识，增强环保意识。

(5) 其他国家

还有一些其他国家也开展了家庭废弃药品回收相关工作^[84]，对它们的回收现状进行归纳总结，如表 3-1 所示。

表 3-1 其他国家废弃药品回收现状

国家	家庭废弃药品回收现状
法国	政府将药品回收责任赋予企业，政府主要负责对回收和后续处理过程的监管，并对未能履行责任的企业实施处罚
澳大利亚	政府设立专门负责药品回收的非营利性组织，在全国范围内进行废弃药品回收
加拿大	部分省份颁布相关法律条约，由政府 and 药企共同开展废弃药品回收活动
英国	通过药店和社区回收点回收家庭废弃药品，居民可将过期药品送至药店或回收点，由专业公司处理。政府通过立法明确回收责任，并提供经济激励

3.2.2 国内家庭废弃药品回收现状

(1) 家庭废弃药品回收流程

我国家庭废弃药品回收流程大致可概括为以下三个阶段：

第一阶段：准备阶段

政府选择并确定符合标准的药品零售企业、医疗机构等单位作为定点回收单位，建立一套系统化的回收制度，定点回收单位配备专用的回收设施，并接受统一的标识管理，方便公众识别和参与。

第二阶段：回收阶段

正规渠道会指派专门人员负责回收工作。在回收过程中，这些人员需在回收登记簿上仔细记录各项信息，以便于药品监管部门进行后续追踪与确认。同时要妥善保管废弃药品，防止药品流入市场进行二次销售。

非正规渠道因为经济利益驱动、监管不足等原因参与家庭废弃药品回收活动。一些个人由于缺乏对药品回收法规的了解，或者为了方便，而选择将家庭废弃药品交给非正规渠道。然而，这种做法忽略了药品回收的法律和健康风险。政府为促进居民参与正规家庭废弃药品回收活动会采取相关措施。

第三阶段：处理阶段

正规渠道将回收到的废弃药品交给药品销毁部门，对废弃药品进行集中统一销毁；非正规渠道为了谋取经济利益将回收到的废弃药品进行二次包装后又重新将其投入市场进行售卖。家庭废弃药品回收流程图，如图 3-1 所示。

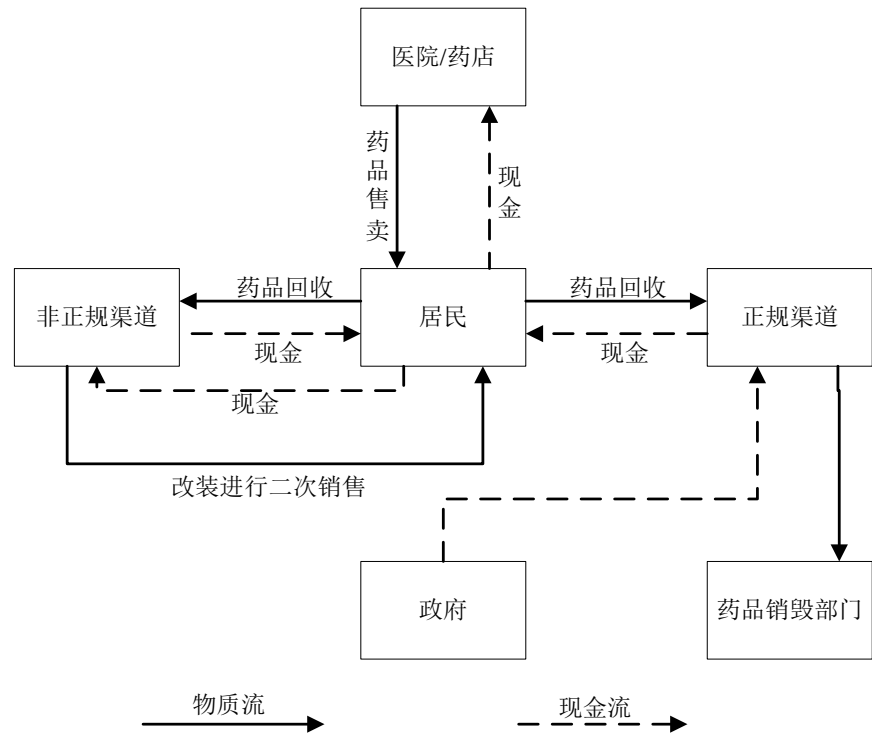


图 3-1 家庭废弃药品回收流程图

我国部分省市家庭废弃药品回收的数据，如表 3-2 所示，通过数据能直观显示我国家庭废弃药品的回收现状。

表 3-2 部分省市家庭废弃药品回收相关数据

地区	回收模式	公开数据
北京	社区定点+药店回收	2022 年回收超 8 吨，覆盖 90%社区
浙江	数字化平台	2021-2023 年累计回收 15.2 吨
广东	药企合作	年均回收超 20 吨
云南	农村地区流动回收车	2023 年试点县回收量同比增长 150%

(2) 利益主体分析

家庭废弃药品回收的利益主体包括政府、正规渠道、非正规渠道、居民。

政府在家庭废弃药品回收中的作用分析：政府在家庭废弃药品回收中扮演着至关重要的角色，负责制定和执行相关政策和法规，提供必要的资金和支持，建立和维护回收基础设施，以及开展公众教育和宣传活动。政府的参与旨在确保回收过程的安全性、环保性和高效性，同时保护公共健康和环境。

居民在家庭废弃药品回收中的作用分析：居民作为药品的最终使用者，其参与对家庭废弃药品回收的成功至关重要。居民需要了解如何正确分类和处理过期或不再使用的药品，并将它们投放到指定的回收点。此外，居民还应提高对药品回收重要性的认识，积极参与回收活动，避免将药品随意丢弃或通过非正规渠道处理。

正规渠道在家庭废弃药品回收中的作用分析：正规渠道指的是那些获得政府授权或认可，按照规定标准和程序进行药品回收和处理的机构或企业，如药店、医疗机构、专业回收和处理公司等。正规渠道的参与确保了药品回收过程的规范化和专业化，减少了对环境和健康的潜在危害。

非正规渠道在家庭废弃药品回收中的作用分析：非正规渠道是指那些未经授权或不符合规定标准的回收和处理方式，可能包括非法回收、倒卖废弃药品等行为。非正规渠道的存在给环境和公共健康带来了风险，因为它们往往缺乏必要的安全和环保措施，可能导致药品的不当处理和潜在的滥用。

3.2.3 国内外家庭废弃药品回收现状比较

与国外一些国家的家庭废弃药品回收情况比较，我国家庭废弃药品回收工作还存在一定差距，从法律法规、回收模式、参与主体和回收效果四个方面对国内、外家庭废弃药品回收情况进行比较，如表 3-3 所示。

发达国家在家庭废弃药品回收各个方面如法律法规、回收模式、参与主体和回收效果都较为先进，形成了高效的回收体系。我国在家庭废弃药品回收方面取得了一定进展，但仍存在诸多不足。

表 3-3 国内、外家庭废弃药品回收情况对比

国家	法律法规	回收模式	参与主体	回收效果
瑞典	全国	国家回收	政府、居民	好
美国	部分地区有	多种回收模式	政府、企业、居民	较好
日本	有	企业上面回收	企业、居民	较好
法国	有	零售商回收	居民、药店	好
澳大利亚	无	非营利性组织回收	企业、居民	较好
加拿大	有	政府、药企联合回收	政府、药企、居民	好
英国	无	民众主动上交	居民	好
中国	极少地区	政府、少数药企联合回收	政府、企业、居民	较差

3.3 家庭废弃药品回收存在的问题及其影响因素分析

我国家庭废弃药品回收中存在两大问题：

(1) 我国家庭废弃药品回收正规渠道的覆盖率较低，尤其在农村和偏远地区。与此同时，非正规渠道在部分地区占据了较大市场份额，但是其回收行为并不规范，不仅会对环境造成污染，还会对人体健康造成威胁。正规渠道和非正规渠道之间存在竞争关系，如何通过政府引导，促进正规渠道的发展，同时减少非正规渠道的市场份额，是当前面临的关键问题之一。

(2) 居民在家庭废弃药品正规回收活动中参与度较低，作为家庭废弃药品回收的源头，这直接影响了废弃药品回收效率，导致大量废弃药品没有得到妥善解决，如何通过政府激励策略来提高居民的参与度，是当前面临的另一个关键问题。

针对我国家庭废弃药品回收中存在的问题，从政府、回收渠道、公众层面分析家庭废弃药品回收影响因素，具体如下：

政府层面：我国目前缺乏专门的法律法规和具体的操作指导，导致回收责任不明确，回收行为缺乏规范性。尽管政府提供了一定的政策支持，但覆盖范围和力度有限，难以有效激励企业和公众参与回收。政府对回收的监管力度不足，部分地区存在监管漏洞，导致回收行为缺乏规范性。

回收渠道层面：回收成本较高制约了回收体系的建立和完善，而现有的经济激励措施效果有限，未能充分调动各方积极性。尽管国内在回收技术和资源化利

用方面取得了一定进展，但技术成本较高且资源化利用率较低，限制了回收体系的可持续发展。正规渠道的覆盖率较低，尤其是在农村和偏远地区，而非正规渠道的市场份额较大，其不规范回收行为可能对环境与公共健康构成威胁。

公众层面：公众对家庭废弃药品危害的认识不足，环保意识薄弱，导致参与度较低；同时，社区在回收中的作用尚未充分发挥，进一步影响了回收效率。

3.4 本章小结

本章阐述了家庭废弃药品回收内涵、分析并对比了国内、外家庭废弃药品回收现状，国外发达国家如瑞典、美国、德国和日本通过完善的法律法规、多元化的回收模式和有效的政策支持，建立了高效的家庭废弃药品回收体系。相比之下，我国家庭废弃药品回收体系尚不完善，尽管政府通过政策引导推动回收工作，但是仍然存在一系列问题，进一步分析了家庭废弃药品回收影响因素，为接下来的研究奠定了基础。

第4章 政府干预下家庭废弃药品回收双渠道演化博弈分析

针对如何通过政府引导，促进正规渠道的发展，同时减少非正规渠道的市场份额这一问题，本章构建了一个政府、正规渠道、非正规渠道的三方演化博弈模型，探讨家庭废弃药品回收过程中政府、正规渠道、非正规渠道的行为策略选择、策略组合的稳定性及其影响因素分析。

4.1 问题描述

家庭废弃药品回收过程中涉及到的三个参与主体政府、正规渠道、非正规渠道存在以下博弈关系：(1) 政府与正规渠道：政府积极干预下，政府对正规渠道实施一定的奖惩措施来促进正规渠道参与回收。政府消极干预下，不会对正规渠道采取奖惩措施。(2) 政府与非正规渠道：非正规渠道参与回收的行为对环境和人的身体健康都会造成一定的危害，政府积极干预会对非正规渠道进行罚款使得非正规渠道不参与回收。政府消极干预不会对非正规渠道采取奖惩措施。(3) 正规渠道与非正规渠道：正规渠道和非正规渠道进行废弃药品回收的过程中存在竞争关系，非正规渠道选择参与回收会对正规渠道选择不同行为策略造成不同的影响。三方演化博弈主体的逻辑关系如图 4-1 所示。

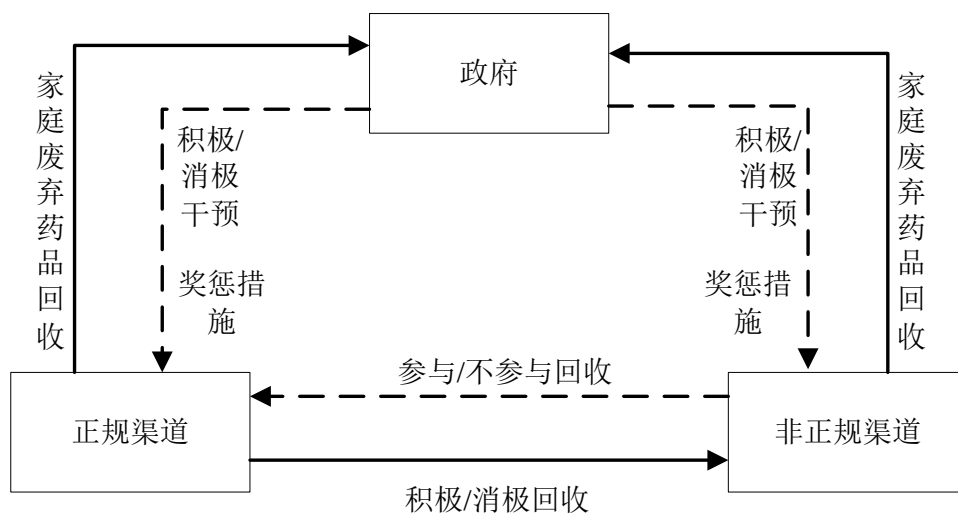


图 4-1 三方演化博弈关系图

4.2 研究假设及模型构建

4.2.1 研究假设

为构建演化博弈模型，分析各参与主体的行为策略、策略组合稳定性及要素间关系，现作出如下假设，参数说明如表 4-1 所示：

假设 1. 家庭废弃药品回收过程中，政府为参与人 1、正规渠道为参与人 2、非正规渠道为参与人 3，三方均被视为有限理性的参与主体。各方的策略选择会随着时间的推移逐渐演化，并最终稳定于最优策略。

假设 2. 政府的策略空间 $\delta = (\delta_1, \delta_2) = (\text{积极干预}, \text{消极干预})$ ，政府选择积极干预家庭废弃药品回收的概率为 x ，选择消极干预家庭废弃药品回收的概率为 $1-x$ ；正规渠道的策略空间 $\beta = (\beta_1, \beta_2) = (\text{积极回收}, \text{消极回收})$ ，正规渠道选择积极回收家庭废弃药品的概率为 y ，选择消极回收家庭废弃药品的概率为 $1-y$ ；非正规渠道的策略空间 $\gamma = (\gamma_1, \gamma_2) = (\text{参与回收}, \text{不参与回收})$ ，非正规渠道选择参与家庭废弃药品回收的概率为 z ，选择不参与家庭废弃药品回收的概率为 $1-z$ 。
 $x, y, z \in [0, 1]$ 。

假设 3. 正规渠道不同行为策略的收益和成本不同^[85]。正规渠道进行家庭废弃药品回收获得收益，如社会收益、政府给予的奖励等，积极回收和消极回收获得的收益不同，积极回收获得收入 R_1 ，消极回收获得收入 R_2 ，正规渠道积极回收产生成本 C_1 ，消极回收产生成本 C_2 ， $R_1 - C_1 > R_2 - C_2$ 。正规渠道选择积极回收获得政府给予的奖励 T_1 ，正规渠道选择消极回收被政府进行罚款 F_1 。

假设 4. 非正规渠道不同行为策略的收益和成本不同^[86]。非正规渠道为了谋取利益回收家庭废弃药品，将回收的家庭废弃药品进行改装再进行二次销售。非正规渠道参与回收获得的收入为 R_3 ，非正规渠道参与回收产生成本 C_3 ；不参与回收就不会产生收入和成本；非正规渠道参与回收会被政府进行罚款 F_2 ， $R_3 - C_3 > 0$ 。

假设 5. 政府不同行为策略的收益和成本不同^[58]。政府对家庭废弃药品回收进行积极干预会获得一定的社会收入 R_4 ，政府对家庭废弃药品回收进行积极干预产生成本 C_4 ； $R_4 - C_4 > 0$ ；政府消极干预家庭废弃药品回收，会对环境造成危害，需对环境进行治理产生治理成本 C_5 ； $C_5 > C_4$ ；政府对正规渠道和非正规渠道不同行为策略的奖惩措施不同^[59]。政府积极干预家庭废弃药品回收会采取奖励和惩罚措施，正规渠道积极回收家庭废弃药品，政府就对其进行奖励以激励回收，奖励金额为 T_1 ；正规渠道消极回收家庭废弃药品，政府就对它进行一定惩罚，罚款金额为 F_1 ；非正规渠道参与家庭废弃药品回收，政府对非正规渠道进行罚款来打击其进行家庭废弃药品回收，罚款金额为 F_2 ； $F_1 < F_2$ ；政府消极干预家庭废弃药品回收不会采取奖惩措施。

假设 6. 正规渠道和非正规渠道都进行家庭废弃药品回收，它们之间存在竞争，非正规渠道参与回收会对正规渠道进行回收造成影响^[87]。 S_1 是非正规渠道参与回收对正规渠道积极回收造成的损失， S_2 是非正规渠道参与回收对正规渠道消极回收造成的损失， $S_1 > S_2$ 。

表 4-1 参数说明

参数	参数说明	参数	参数说明
R_1	正规渠道积极回收收益	C_3	非正规渠道参与回收成本
R_2	正规渠道消极回收收益	C_4	政府积极干预成本
R_3	非正规渠道参与回收收益	C_5	政府消极回收环境治理成本
R_4	政府积极干预收益	T_1	正规渠道积极回收补贴
C_1	正规渠道积极回收成本	F_1	正规渠道消极回收罚款
C_2	正规渠道消极回收成本	F_2	非正规渠道参与回收罚款
S_1	非正规渠道对正规渠道积极回收造成的损失	S_2	非正规渠道对正规渠道消极回收造成的损失

4.2.2 模型构建

三方混合策略博弈矩阵，如表 4-2 和表 4-3 所示。

表 4-2 政府积极干预下混合策略博弈矩阵

		非正规渠道	
		参与回收	不参与回收
正规渠道	积极	$R_4 - C_4 - T_1 + F_2$	$R_4 - C_4 - T_1$
	回收	$R_1 - C_1 + T_1 - S_1$	$R_1 - C_1 + T_1$
		$R_3 - C_3 - F_2$	0
	消极	$R_4 - C_4 + F_1 + F_2$	$R_4 - C_4 + F_1$
	回收	$R_2 - C_2 - F_1 - S_2$	$R_2 - C_2 - F_1$
		$R_3 - C_3 - F_2$	0

表 4-3 政府消极干预下混合策略博弈矩阵

		非正规渠道	
		参与回收	不参与
正规渠道	积极	$-C_5$	$-C_5$
	回收	$R_1 - C_1 - S_1$	$R_1 - C_1$
		$R_3 - C_3$	0
	消极	$-C_5$	$-C_5$
	回收	$R_2 - C_2 - S_2$	$R_2 - C_2$
		$R_3 - C_3$	0

政府积极干预、正规渠道积极回收、非正规渠道参与回收时，政府积极干预会产生相应的收入和成本，并且政府会对正规渠道的积极回收行为进行奖励，同时对非正规渠道的参与回收行为进行惩罚，收益为 $R_4 - C_4 - T_1 + F_2$ ；正规渠道积极回收会产生相应的收入、成本及政府奖励，且非正规渠道参与回收对正规渠道积极回收有影响，收益为 $R_1 - C_1 + T_1 - S_1$ ；非正规渠道参与回收会产生一定的收入和成本，且受到政府的惩罚，收益为 $R_3 - C_3 - F_2$ 。

政府积极干预、正规渠道积极回收、非正规渠道不参与回收时，政府积极干预会产生相应的收入和成本，并且政府会对正规渠道积极回收进行奖励，收益为

$R_4 - C_4 - T_1$ ；正规渠道积极回收会产生相应的收入和成本，且获得政府的奖励，收益为 $R_1 - C_1 + T_1$ ；非正规渠道不参与回收的收益为 0。

政府积极干预、正规渠道消极回收、非正规渠道参与回收时，政府积极干预会产生相应的收入和成本，并且对正规渠道消极回收和非正规渠道参与回收进行惩罚，收益为 $R_4 - C_4 + F_1 + F_2$ ；正规渠道消极回收产生相应的收入和成本 and 政府的罚款，且非正规渠道参与回收对其产生影响，收益为 $R_2 - C_2 - F_1 - S_2$ ；非正规渠道参与回收产生相应的收入和成本，且受到政府的惩罚，收益为 $R_3 - C_3 - F_2$ 。

政府积极干预、正规渠道消极回收、非正规渠道不参与回收时，政府积极干预会产生相应的收入和成本，并且对正规渠道消极回收进行惩罚，收益为 $R_4 - C_4 + F_1$ ；正规渠道消极回收获得相应的收入和成本，且被政府惩罚，收益为 $R_2 - C_2 - F_1$ ；非正规渠道不参与回收的收益为 0。

政府消极干预、正规渠道积极回收、非正规渠道参与回收时，政府消极干预需支付环境治理成本，收益为 $-C_5$ ；正规渠道积极回收产生相应的收入和成本，且非正规渠道回收对其产生影响，收益为 $R_1 - C_1 - S_1$ ；非正规渠道参与回收产生相应的收入和成本，收益为 $R_3 - C_3$ 。

政府消极干预、正规渠道积极回收、非正规渠道不参与回收时，政府消极干预需支付环境治理成本，收益为 $-C_5$ ；正规渠道积极回收产生相应的收入和成本，收益为 $R_1 - C_1$ ；非正规渠道不参与回收的收益为 0。

政府消极干预、正规渠道消极回收、非正规渠道参与回收时，政府消极干预需支付环境治理成本，收益为 $-C_5$ ；正规渠道消极回收产生相应的收入和成本，且非正规渠道参与回收对其有影响，收益为 $R_2 - C_2 - S_2$ ；非正规渠道参与回收产生相应的收入和成本，收益为 $R_3 - C_3$ 。

政府消极干预、正规渠道消极回收、非正规渠道不参与回收时，政府消极干预需支付环境成本，收益为 $-C_5$ ；正规渠道消极回收产生相应的收入和成本，收

益为 $R_2 - C_2$ ；非正规渠道不参与回收的收益为 0。

4.3 模型分析

4.3.1 政府的策略稳定性分析

政府采取积极干预和消极干预策略的期望收益分别为 E_{11} 和 E_{12} ：

$$E_{11} = yz(R_4 - C_4 - T_1 + F_2) + y(1-z)(R_4 - C_4 - T_1) + (1-y)z(R_4 - C_4 + F_1 + F_2) + (1-y)(1-z)(R_4 - C_4 + F_1) \quad (4-1)$$

$$E_{12} = yz(-C_5) + y(1-z)(-C_5) + (1-y)z(-C_5) + (1-y)(1-z)(-C_5) \quad (4-2)$$

政府策略选择的复制动态方程为：

$$F(x) = x(1-x)(E_{11} - E_{12}) = -x(x-1)(C_5 - C_4 + F_1 + R_4 - yF_1 + zF_2 - yT_1) \quad (4-3)$$

x 的一阶导和设定的 $H(y)$ 分别为：

$$\frac{d(F(x))}{dx} = (1-2x)(C_5 - C_4 + F_1 + R_4 - yF_1 + zF_2 - yT_1) \quad (4-4)$$

$$H(y) = C_5 - C_4 + F_1 + R_4 - yF_1 + zF_2 - yT_1 \quad (4-5)$$

根据微分方程稳定性定理，政府选择积极干预的概率达到稳定状态需要满足以下特定条件： $F(x)=0$ 且 $d(F(x))/dx < 0$ 。因为 $\partial H(y)/\partial y < 0$ ，所以 $H(y)$ 关于 y 为减函数。故 $y = (C_5 - C_4 + F_1 + R_4 + zF_2)/(F_1 + T_1) = y^*$ 时，政府不能确定稳定策略； $y < (C_5 - C_4 + F_1 + R_4 + zF_2)/(F_1 + T_1)$ 时，政府的演化稳定策略为 $x=1$ ，即政府积极干预； $y > (C_5 - C_4 + F_1 + R_4 + zF_2)/(F_1 + T_1)$ 时，政府的演化稳定策略为 $x=0$ ，即政府消极干预。政府的策略演化相位图，如图 4-2 所示。

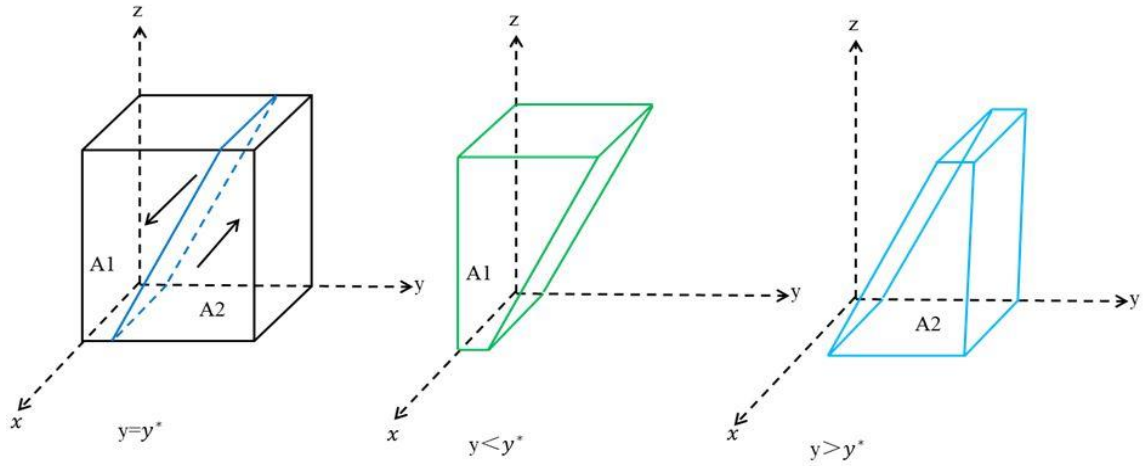


图 4-2 政府演化趋势相位图

图 4-2 表明，政府积极干预的概率为 A_1 的体积 V_{A1} ，消极干预的概率为 A_2 的体积 V_{A2} ，如下所示：

$$V_{A1} = \int_0^1 \int_0^1 \frac{C_5 - C_4 + F_1 + R_4 + zF_2}{F_1 + T_1} dz dx = \frac{2(C_5 - C_4 + F_1 + R_4) + F_2}{2(F_1 + T_1)} \quad (4-6)$$

$$V_{A2} = 1 - V_{A1} = \frac{2(T_1 + C_4 - C_5 - R_4) - F_2}{2(F_1 + T_1)} \quad (4-7)$$

推论 4.1. 政府积极干预家庭废弃药品回收的概率与政府积极干预获得的社会收益、政府消极干预付出成本、政府对非正规渠道参与回收的罚款成正相关，与政府积极干预付出的成本成负相关。

推论 4.1 表明，保障政府回收的社会收益能够有效的避免政府采取消极干预家庭废弃药品回收这一策略。政府还可以通过实施奖惩机制、控制回收成本来促进政府积极干预家庭废弃药品回收。

推论 4.1 证明：

政府积极干预家庭废弃药品回收的概率为 V_{A1} ，求各要素的一阶偏导：

$\partial V_{A1} / \partial C_5 = 1 / (F_1 + T_1)$ ，且 F_1 、 T_1 都是正数，所以 $\partial V_{A1} / \partial C_5 > 0$ ；

$\partial V_{A1} / \partial C_4 = -1 / (F_1 + T_1)$ ，且 F_1 、 T_1 都是正数，所以 $\partial V_{A1} / \partial C_4 < 0$ ；

$\partial V_{A1} / \partial R_4 = 1 / (F_1 + T_1)$ ，且 F_1 、 T_1 都是正数，所以 $\partial V_{A1} / \partial R_4 > 0$ ；

$\partial V_{A1} / \partial F_2 = 1 / 2 * (F_1 + T_1)$ ，且 F_1 、 T_1 都是正数，所以 $\partial V_{A1} / \partial F_2 > 0$ 。

4.3.2 正规渠道的策略稳定性分析

正规渠道采取积极回收和消极回收策略的期望收益分别为 E_{21} 和 E_{22} ：

$$E_{21} = xz(R_1 - C_1 + T_1 - S_1) + x(1-z)(R_1 - C_1 + T_1) + (1-x)z(R_1 - C_1 - S_1) + (1-x)(1-z)(R_1 - C_1) \quad (4-8)$$

$$E_{22} = xz(R_2 - C_2 - F_1 - S_2) + x(1-z)(R_2 - C_2 - F_1) + (1-x)z(R_2 - C_2 - S_2) + (1-x)(1-z)(R_2 - C_2) \quad (4-9)$$

正规渠道策略选择的复制动态方程为：

$$\begin{aligned} F(y) &= y(1-y)(E_{21} - E_{22}) \\ &= -y(y-1)(C_2 - C_1 + R_1 - R_2 + xF_1 + xT_1 - zS_1 + zS_2) \end{aligned} \quad (4-10)$$

$F(y)$ 的一阶导和设定的 $L(x)$ 分别为：

$$\frac{d(F(y))}{dy} = (1-2y)(C_2 - C_1 + R_1 - R_2 + xF_1 + xT_1 - zS_1 + zS_2) \quad (4-11)$$

$$L(x) = C_2 - C_1 + R_1 - R_2 + xF_1 + xT_1 - zS_1 + zS_2 \quad (4-12)$$

根据微分方程稳定性定理，正规渠道选择积极回收的概率达到稳定状态需要满足以下特定条件： $F(y)=0$ 且 $d(F(y))/dy < 0$ 。因为 $\partial L(x)/\partial x > 0$ ，所以 $L(x)$ 关于 x 的增函数。故 $x = [z(S_1 - S_2) - C_2 + C_1 - R_1 + R_2] / (F_1 + T_1) = x^*$ 时，正规渠道不能确定稳定策略； $x < [z(S_1 - S_2) - C_2 + C_1 - R_1 + R_2] / (F_1 + T_1)$ 时，正规渠道的稳定策略为 $y=0$ ，即正规渠道消极回收； $x > [z(S_1 - S_2) - C_2 + C_1 - R_1 + R_2] / (F_1 + T_1)$ 时，正规渠道的稳定策略为 $y=1$ ，即正规渠道积极回收。正规渠道的策略演化相位图，如图 4-3 所示。

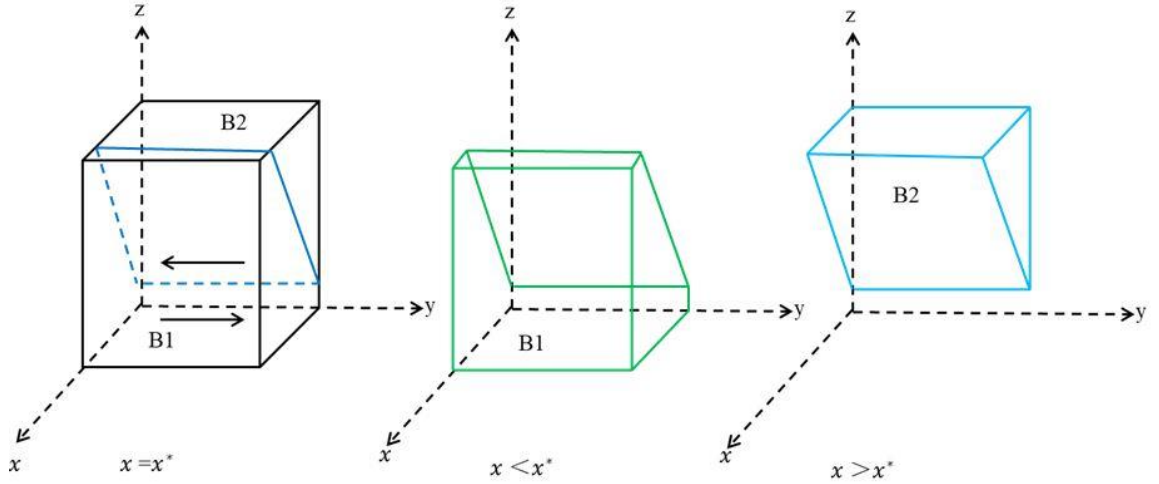


图 4-3 正规渠道演化趋势相位图

图 4-3 表明, 正规渠道消极回收的概率为 B_1 的体积 V_{B1} , 积极回收的概率为 B_2 的体积 V_{B2} , 如下所示:

$$\begin{aligned} V_{B1} &= 1 - V_{B2} \\ &= 1 - \frac{(S_1 - S_2)^2 + 2(C_1 - C_2)(S_1 - S_2) + C_2 - C_1 + R_1 - R_2}{2(F_1 + T_1)(S_1 - S_2)} \end{aligned} \quad (4-13)$$

$$\begin{aligned} V_{B2} &= \int_0^1 \int_{\frac{C_2 - C_1 + R_1 - R_2}{S_1 - S_2}}^1 \frac{z(S_1 - S_2) - C_2 + C_1 - R_1 + R_2}{F_1 + T_1} dz dy \\ &= \frac{(S_1 - S_2)^2 + 2(C_1 - C_2)(S_1 - S_2) + C_2 - C_1 + R_1 - R_2}{2(F_1 + T_1)(S_1 - S_2)} \end{aligned} \quad (4-14)$$

推论 4.2. 正规渠道积极回收的概率与正规渠道积极回收获得的收益、正规渠道消极回收付出的成本成正相关, 与正规渠道消极回收获得的收益、正规渠道积极回收付出的成本成负相关。

推论 4.2 表明, 正规渠道积极回收获得的收益增加、正规渠道积极回收付出的成本减少、正规渠道消极回收获得的收益下降、正规渠道消极回收付出的成本上升都能促进正规渠道选择积极回收。

推论 4.2 证明:

正规渠道积极回收家庭废弃药品的概率为 V_{B2} , 求各要素的一阶偏导:

$\partial V_{B2} / \partial R_1 = 1/2 * (F_1 + T_1)(S_1 - S_2)$, 且 F_1 、 T_1 、 S_1 、 S_2 都是正数, 所以

$$\partial V_{B2} / \partial R_1 > 0;$$

$\partial V_{B2} / \partial R_2 = -1/2 * (F_1 + T_1)(S_1 - S_2)$ ，且 F_1 、 T_1 、 S_1 、 S_2 都是正数，所以
 $\partial V_{B2} / \partial R_2 < 0$ ；

$\partial V_{B2} / \partial C_1 = 1 / (F_1 + T_1)$ ，且 F_1 、 T_1 都是正数，所以 $\partial V_{B2} / \partial C_1 > 0$ ；

$\partial V_{B2} / \partial C_2 = (2 * S_2 - 2 * S_1 - 1) / (F_1 + T_1) * (S_1 - S_2)$ ，且 F_1 、 T_1 、 S_1 、 S_2 都是正数，
 所以 $\partial V_{B2} / \partial C_2 > 0$ 。

4.3.3 非正规渠道的策略稳定性分析

非正规渠道采取参与回收和不参与回收策略的期望收益分别为 E_{31} 和 E_{32} ：

$$\begin{aligned} E_{31} = & xy(R_3 - C_3 - F_2) + x(1-y)(R_3 - C_3 - F_2) \\ & + (1-x)y(R_3 - C_3) + (1-x)(1-y)(R_3 - C_3) \end{aligned} \quad (4-15)$$

$$E_{32} = 0 \quad (4-16)$$

非正规渠道策略选择的复制动态方程为：

$$F(z) = z(1-z)(E_{31} - E_{32}) = z(z-1)(C_3 - R_3 + xF_2) \quad (4-17)$$

$F(z)$ 的一阶导和设定的 $W(x)$ 分别为：

$$d(F(z)) / dz = (2z-1)(C_3 - R_3 + xF_2) \quad (4-18)$$

$$W(x) = C_3 - R_3 + xF_2 \quad (4-19)$$

根据微分方程稳定性定理，正规渠道选择参与回收的概率达到稳定状态需要满足以下特定条件： $F(z)=0$ 且 $d(F(z))/dz < 0$ 。因为 $\partial W(x) / \partial x > 0$ ，所以 $W(x)$ 关于 x 的增函数。故 $x = (R_3 - C_3) / F_2 = x^{**}$ 时，非正规渠道不能确定稳定策略；
 $x < (R_3 - C_3) / F_2$ 时，非正规渠道的稳定策略为 $z=1$ ，即非正规渠道参与回收；
 $x > (R_3 - C_3) / F_2$ 时，非正规渠道的稳定策略为 $z=0$ ，即非正规渠道不参与回收。
 非正规渠道的策略演化相位图，如图 4-4 所示。

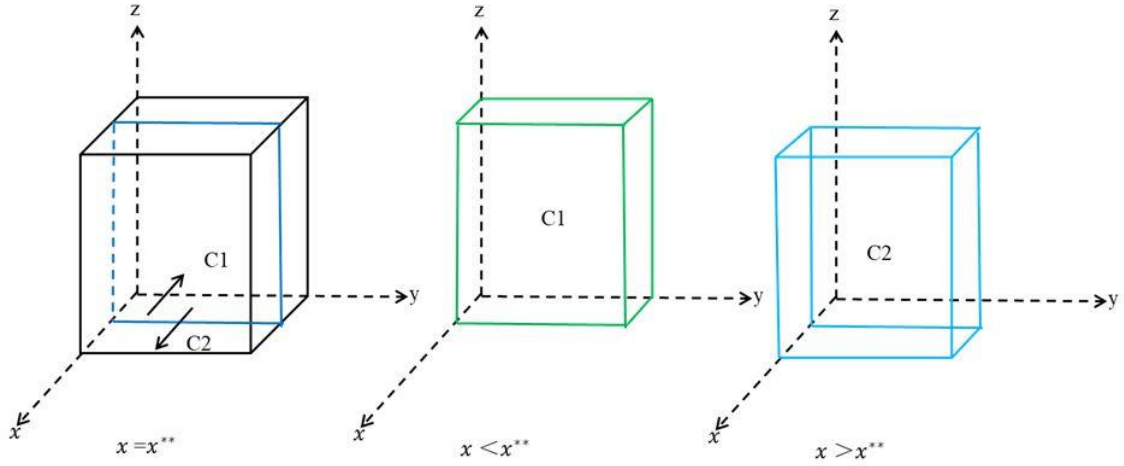


图 4-4 非正规渠道演化趋势相位图

图 4-4 表明，非正规渠道参与回收的概率为 C_1 的体积 V_{C1} ，不参与回收的概率为 C_2 的体积 V_{C2} ，如下所示：

$$V_{C1} = \int_0^1 \int_0^1 \frac{R_3 - C_3}{F_2} dy dz = \frac{R_3 - C_3}{F_2} \quad (4-20)$$

$$V_{C2} = 1 - V_{C1} = \frac{F_2 + C_3 - R_3}{F_2} \quad (4-21)$$

推论 4.3. 非正规渠道不参与回收的概率与非正规渠道参与回收产生的成本、政府对非正规渠道参与回收的罚款成正相关，与非正规渠道参与回收获得的收入成负相关。

推论 4.3 表明，当非正规渠道从家庭废弃药品回收活动中获得的收入较低时，其参与回收的积极性会相应降低，从而选择不参与回收的概率增大。同样，当非正规渠道参与回收的成本较高时，其选择退出回收市场的概率会增加。为加强对非正规渠道的干预，政府可提高对非正规渠道参与回收活动的罚款力度来实现。

推论 4.3 证明：

非正规渠道不参与家庭废弃药品回收的概率为 V_{C2} ，求各要素的一阶偏导：

$$\partial V_{C2} / \partial R_3 = -1 / F_2, \text{ 且 } F_2 \text{ 是正数, 所以 } \partial V_{C2} / \partial R_3 < 0;$$

$$\partial V_{C2} / \partial C_3 = 1 / F_2, \text{ 且 } F_2 \text{ 是正数, 所以 } \partial V_{C2} / \partial C_3 > 0;$$

$$\partial V_{C2} / \partial F_2 = (R_3 - C_3) / F_2^2, \text{ 且 } F_2、R_3、C_3 \text{ 是正数, 所以 } \partial V_{C2} / \partial F_2 > 0。$$

4.3.4 三方演化博弈系统均衡点的稳定性分析

令 $F(x) = F(y) = F(z) = 0$ 可得该系统的纯策略均衡点： $E_1(0,0,0)$ 、 $E_2(0,1,0)$ 、 $E_3(0,0,1)$ 、 $E_4(0,1,1)$ 、 $E_5(1,0,0)$ 、 $E_6(1,1,0)$ 、 $E_7(1,0,1)$ 、 $E_8(1,1,1)$ 。微分方程系统的演化稳定策略可通过对该系统雅可比矩阵的局部稳定性分析得出。对政府、正规渠道和非正规渠道的复制动态方程分别求导，可得相应的雅可比矩阵。

$$J = \begin{pmatrix} j_{11} & j_{12} & j_{13} \\ j_{21} & j_{22} & j_{23} \\ j_{31} & j_{32} & j_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \partial F(x)/\partial x & \partial F(x)/\partial y & \partial F(x)/\partial z \\ \partial F(y)/\partial x & \partial F(y)/\partial y & \partial F(y)/\partial z \\ \partial F(z)/\partial x & \partial F(z)/\partial y & \partial F(z)/\partial z \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} (1-2x)\begin{pmatrix} C_5 - C_4 + F_1 + R_4 \\ -yF_1 + zF_2 - yT_1 \end{pmatrix} & x(x-1)(F_1 + T_1) & x(x-1)(-F_2) \\ y(1-y)(F_1 + T_1) & (1-2y)\begin{pmatrix} C_2 - C_1 + R_1 - R_2 + xF_1 \\ + xT_1 - zS_1 + zS_2 \end{pmatrix} & y(y-1)(S_1 - S_2) \\ z(z-1)F_2 & 0 & (2z-1)(C_3 - R_3 + xF_2) \end{pmatrix} \quad (4-22)$$

根据李雅普诺夫第一稳定性判据^[88]，可对均衡点的稳定性进行如下分析：当均衡点对应的雅可比矩阵的所有特征值均是负实部时，该均衡点被视为渐进稳定；当雅可比矩阵的特征值中至少存在一个具有正实部的特征值，则该均衡点被判定为不稳定；当雅可比矩阵的特征值中除了具有实部为零的特征值外，其余特征值均呈现负实部，则该均衡点处于临界稳定状态，其稳定性不能仅通过特征值的正负符号来确定。各纯策略均衡点对应雅可比矩阵的特征值，如表 4-4 所示。

表 4-4 雅可比矩阵特征值

均衡点	λ_1	λ_2	λ_3
$E_1(0,0,0)$	$C_5 - C_4 + F_1 + R_4$	$C_2 - C_1 + R_1 - R_2$	$R_3 - C_3$
$E_2(0,1,0)$	$C_5 - C_4 + R_4 - T_1$	$C_1 - C_2 - R_1 + R_2$	$R_3 - C_3$
$E_3(0,0,1)$	$C_5 - C_4 + F_1 + F_2 + R_4$	$C_2 - C_1 + R_1 - R_2 - S_1 + S_2$	$C_3 - R_3$
$E_4(0,1,1)$	$C_5 - C_4 + F_2 + R_4 - T_1$	$C_1 - C_2 - R_1 + R_2 + S_1 - S_2$	$C_3 - R_3$
$E_5(1,0,0)$	$C_4 - C_5 - F_1 - R_4$	$C_2 - C_1 + F_1 + R_1 - R_2 + T_1$	$R_3 - F_2 - C_3$
$E_6(1,1,0)$	$C_4 - C_5 - R_4 + T_1$	$C_1 - C_2 - F_1 - R_1 + R_2 - T_1$	$R_3 - F_2 - C_3$
$E_7(1,0,1)$	$C_4 - C_5 - F_1 - F_2 - R_4$	$C_2 - C_1 + F_1 + R_1 - R_2 - S_1 + S_2 + T_1$	$C_3 + F_2 - R_3$
$E_8(1,1,1)$	$C_4 - C_5 - F_2 - R_4 + T_1$	$C_1 - C_2 - F_1 - R_1 + R_2 + S_1 - S_2 - T_1$	$C_3 + F_2 - R_3$

根据表 4-4 可知, 纯策略均衡点 $E_1(0,0,0)$ 、 $E_2(0,1,0)$ 、 $E_3(0,0,1)$ 、 $E_5(1,0,0)$ 这四个纯策略均衡点中存在正特征值, 所以均不是该演化博弈模型的稳定点。该系统中可能存在 4 个演化稳定点, 稳定条件如表 4-5 所示。

表 4-5 演化稳定点及渐进稳定条件

稳定点	渐进稳定条件
$E_4(0,1,1)$	$C_5 - C_4 + F_2 + R_4 - T_1 < 0$; $C_1 - C_2 - R_1 + R_2 + S_1 - S_2 < 0$
$E_6(1,1,0)$	$C_4 - C_5 - R_4 + T_1 < 0$; $R_3 - F_2 - C_3 < 0$
$E_7(1,0,1)$	$C_2 - C_1 + F_1 + R_1 - R_2 - S_1 + S_2 + T_1 < 0$; $C_3 + F_2 - R_3 < 0$
$E_8(1,1,1)$	$C_4 - C_5 - F_2 - R_4 + T_1 < 0$; $C_1 - C_2 - F_1 - R_1 + R_2 + S_1 - S_2 - T_1 < 0$; $C_3 + F_2 - R_3 < 0$

上述四种情形中, 稳定点 $E_6(1,1,0)$ 为理想稳定点, 对应三方主体的行为策略为{积极干预, 积极回收, 不参与回收}。

4.4 仿真分析

4.4.1 策略选择随时间变化结果

借鉴相关文献^[59]并且结合 $E_6(1,1,0)$ 的渐近稳定条件对该模型中的各参数进行赋值: $R_1=10$, $C_1=6$, $R_2=4$, $C_2=2$, $R_3=8$, $C_3=4$, $R_4=15$, $C_4=12$, $C_5=14$, $T_1=2$, $F_1=1$, $F_2=5$, $S_1=3$, $S_2=1$ (单位: 万)。将这一数组分别从不同初始策略组合出发随时间演化 50 次, 结果如图 4-5 所示。

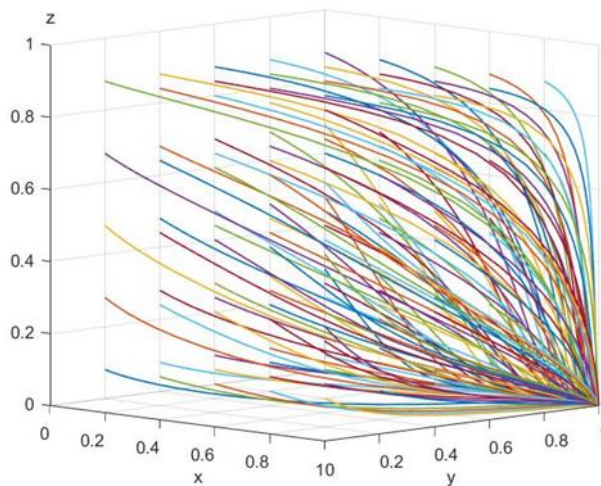


图 4-5 数组演化 50 次

图 4-5 是均衡点 $E_6(1,1,0)$ 下系统策略与时间之间的动态演化关系，表明三方主体的行为策略最后稳定在{积极干预，积极回收，不参与回收}。

探究政府、正规渠道、非正规渠道初始概率的不同对演化稳定策略的影响，如图 4-6、4-7、4-8 所示。

由图 4-6、4-7、4-8 可知，政府选择积极干预的概率越高，其演化至稳定策略的速度越快；正规渠道选择积极回收的概率越高，其演化至稳定策略的速度越快；非正规渠道选择参与回收的概率越低，其演化至稳定策略的速度越快。

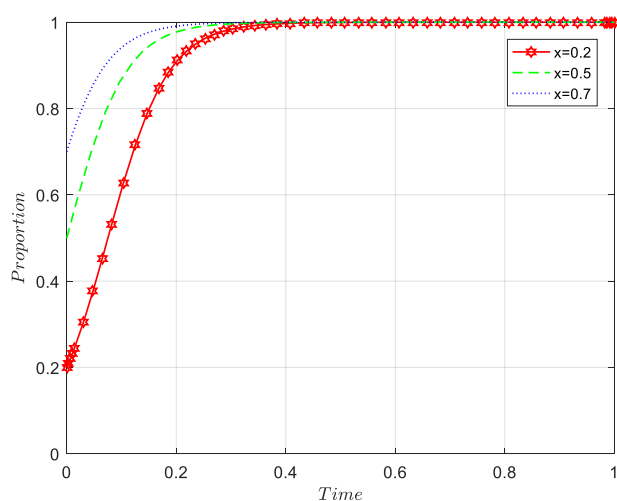


图 4-6 政府初始概率不同对行为策略选择的影响

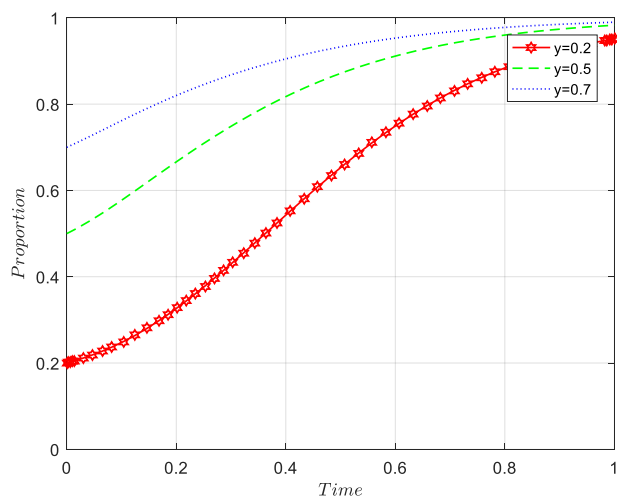


图 4-7 正规渠道初始概率不同对行为策略选择的影响

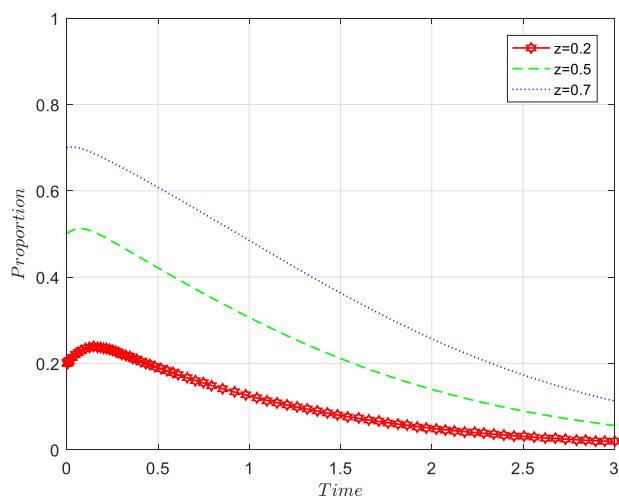
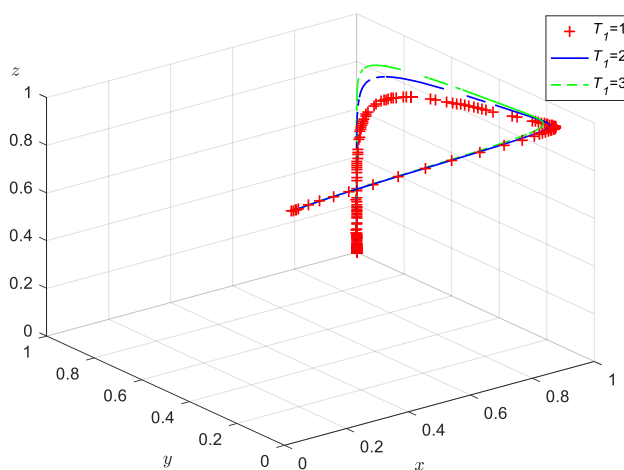
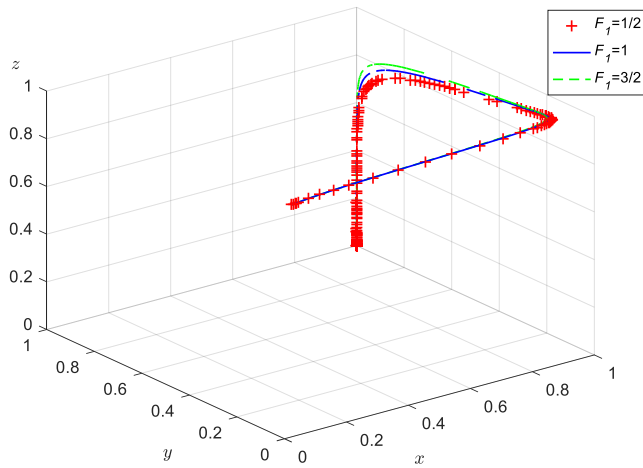
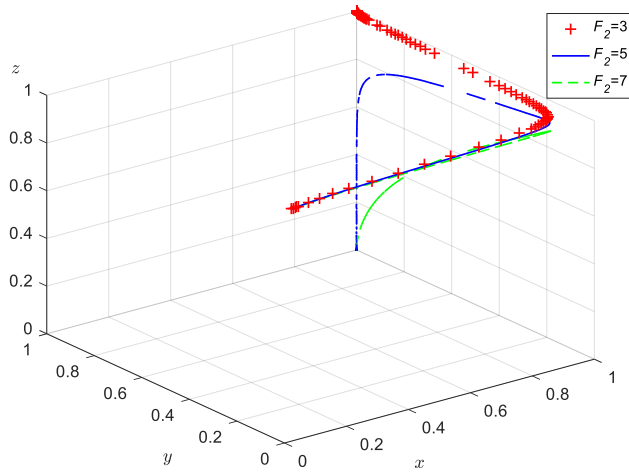


图 4-8 非正规渠道初始概率不同对行为策略选择的影响

4.4.2 政府奖惩措施对各参与主体的影响

进一步分析政府奖惩措施涉及到的参数 T_1 、 F_1 、 F_2 的变化对各参与主体行为策略的影响, 将 T_1 分别赋予 $T_1=1, 2, 3$, 将 F_1 分别赋予 $F_1=1/2, 1, 3/2$, 将 F_2 分别赋予 $F_2=3, 5, 7$; 复制动态方程组随时间演化 50 次的结果如图 4-9、4-10、4-11 所示。

图 4-9 T_1 变化对各参与主体的影响

图 4-10 F_1 变化对各参与主体的影响图 4-11 F_2 变化对各参与主体的影响

由图 4-9 可知，随着 T_1 增加，正规渠道演化至稳定策略速度越快，更高的奖励意味着正规渠道通过积极回收可以获得更多利益，这将促进其向积极回收策略演化。随着 T_1 增加，非正规渠道演化至稳定策略的速度越快，正规渠道因奖励增加其在回收市场的竞争力而显著增强，非正规渠道则会面临更大的市场压力，从而加速向不参与回收策略的方向演化。

由图 4-10 可知，随着 F_1 增加，正规渠道演化至稳定策略的速度越快，更高的罚款意味着正规渠道通过消极回收获得的短期利益将被更高的经济成本所抵消，甚至可能面临亏损，为了避免罚款，正规渠道可能会更倾向于选择积极回收

策略；随着 F_1 增加，非正规渠道演化至稳定策略速度不明显。

由图 4-11 可知，随着 F_2 增加，正规渠道演化至稳定策略的速度越快，这是因为高额罚款减少了非正规渠道的竞争压力，增加了正规渠道的市场份额和收益，同时通过政策导向和成本效益分析进一步激励了正规渠道积极参与回收；随着 F_2 增加，非正规渠道演化至稳定策略的速度越快，更高的罚款意味着非正规渠道通过参与回收获得的短期利益将被更高的经济成本所抵消，甚至可能面临严重的经济损失，为了避免罚款和经济损失，非正规渠道可能会更倾向于选择不参与回收策略。

4.5 本章小结

构建政府、正规渠道、非正规渠道的三方演化博弈模型，并对各参与主体的行为策略选择、策略组合的稳定性及其影响因素分析，得到以下结论：

(1) 政府策略选择受政府收益、成本、奖惩措施等因素的影响。政府积极干预的概率与政府积极干预获得的收益、政府消极干预付出的成本及政府对非正规渠道参与回收的罚款成正相关，与政府积极干预的成本成负相关。

(2) 正规渠道策略选择不仅受自身收益、成本影响，还受政府奖惩措施等因素影响。正规渠道积极回收的概率与正规渠道积极回收获得的收益、正规渠道消极回收付出的成本、政府对正规渠道积极回收的奖罚以及政府对非正规渠道参与回收的罚款成正相关，与正规渠道消极回收获得的收益、正规渠道积极回收付出的成本成负相关。

(3) 非正规渠道行为策略选择不仅受自身收益、成本影响，还受政府奖惩措施等因素影响。非正规渠道不参与回收的概率与非正规渠道参与回收产生的成本、政府对正规渠道积极回收的奖励及政府对非正规渠道参与回收的罚款成正相关，与非正规渠道参与回收获得的收入成负相关。

第5章 政府干预下家庭废弃药品回收双渠道 SD 仿真研究

针对如何通过政府激励策略来提高居民的参与度这一问题,本章利用系统动力学方法构建一个家庭废弃药品回收体系的系统动力学模型,绘制因果图和流量存量图,模型中包括政府、正规渠道、非正规渠道、居民以及影响家庭废弃药品回收的因素,通过仿真来预测不同的政府激励策略对家庭废弃药品回收渠道回收效果的影响。

5.1 问题描述

政府通常采用税收、补贴和罚款等政策来促进正规回收并遏制非正规回收。此外,一些地方政府还会采用间接经济激励策略促进家庭废弃药品回收。例如,上海政府利用互联网开发一个 APP,让居民能够找到附近的正规回收点并进行预约回收家庭废弃药品。天津政府通过发布警告和其他措施,来提高居民对药品安全使用和环境保护的意识。这些激励策略鼓励居民参与正规回收,从而推动建立规范的家庭废弃药品回收市场。本研究关注以下四种政府激励策略:(1) 提高正规渠道的回收价格;(2) 加强环境保护宣传,即增加正规渠道的环境保护费用;(3) 增加正规回收点的数量,即增加正规渠道的数量;(4) 加强服务质量,即增加正规渠道的服务费用。

家庭废弃药品回收系统中囊括了众多相互关联的要素,这些要素间形成的复杂网络导致了多重反馈机制的存在,进而使得系统结构趋于复杂化;政府采取的各种激励策略对废弃药品回收产生的影响往往呈现出非线性特征,这些非线性关系难以通过传统数学手段精确量化描述;家庭废弃药品回收激励策略的实施与其成效显现之间存在显著的时间间隔,即存在滞后性;系统内部及外部环境因素均随时间变化而变化,导致系统输出结果具有显著的时间依赖性。

系统动力学方法该能基于系统内各因素间的因果链,构建出能够捕捉非线性关系、多重反馈机制以及时间延迟的动态模型。通过仿真技术,可以重现系统行为,进而深入剖析。此外,通过调整系统参数及决策变量,可以动态观察系统行为的变化,从而更为直观地评估不同政府激励策略的实际效果。因此,本研究构

建系统动力学模型来模拟家庭废弃药品回收系统,利用该系统动力学模型探讨不同政府激励策略对家庭废弃药品回收渠道的影响。

5.2 系统动力学模型

5.2.1 确定系统边界及模型假设

系统动力学模型的边界并非真实存在的物理范围,而是基于实际情况确定的抽象概念,其目的是涵盖真实系统中的所有相关问题,并将其与系统无关的因素区分开来。因此,本文将影响家庭废弃药品回收的主、客观因素界定为系统的边界,并将影响家庭废弃药品回收的主要因素作为模型中的关键变量,来构建系统动力学模型。

模型的有关假设如下:

假设 1. 平均每户家庭每年产生的废弃药品数量一定,即只研究家庭废弃药品的回收过程,不讨论每户家庭废弃药品产生的影响因素。

假设 2. 所有正规渠道回收的废弃药品都被完全销毁,没有再流入市场。

假设 3. 经政府审核设立的废弃药品正规渠道均持续参与、规范经营,不存在主动退出回收活动的情况。

假设 4. 居民家中每年产生的、未被正规或非正规渠道回收的废弃药品,都会暂时存放在家里,一段时间后随生活垃圾丢弃。

假设 5. 其他相关激励策略对回收价格没有影响。

5.2.2 因果图

因果图是一种用于定性描述系统结构的方法,它通过图示形式揭示系统的动态形成原因及其要素间的反馈关系,是系统动力学研究系统反馈结构的重要工具^[89]。家庭废弃药品回收体系的因果图,如图 5-1 所示。

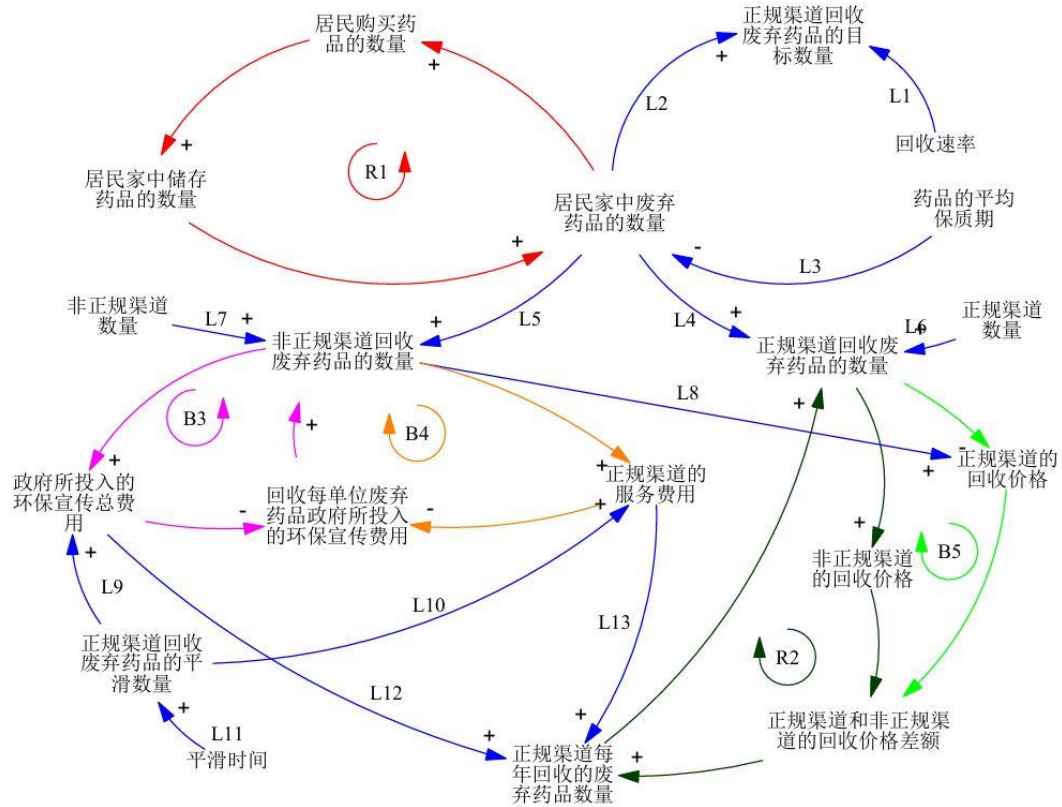


图 5-1 因果图

因果图中有 5 个反馈回路和 13 条因果链。每条因果链都有一个极性，正极 (+) 或负极 (-)，分别表示变量的增加或减少与箭头变量一致或相反。“R”代表正反馈回路；“B”代表负反馈回路；“L”代表因果链。

反馈回路是一个由一系列因果关联与相互作用链组成的闭环系统，旨在阐释系统中的核心反馈机制。这一机制涵盖了正、负两种反馈回路。具体而言，正反馈回路会加剧回路内变量的偏离程度，起到放大的作用；负反馈回路则具备一种自我调整的能力，能够有效抑制变量的波动，促使系统趋向于稳定状态。

居民购买的药品数量增加会导致家中储存的药品数量增加。超过保质期的药品会成为废弃药品，废弃药品的数量也会增加。家庭废弃药品的增加代表着家庭药品储备数量的减少，因此居民会继续购买药品，构成一个正反馈回路 R1。

正规渠道回收的家庭废弃药品越多，非正规渠道就越要提高回收价格，以增加家庭废弃药品的回收数量。非正规渠道的回收价格会影响不同回收渠道的回收价格差额。回收价格差额对正规渠道回收有一定的影响。正规渠道的回收价格高于非正规渠道时，正规渠道废弃药品回收数量会增加，构成一个正反馈回路 R2。

当非正规渠道回收的家庭废弃药品数量增加时,正规渠道会提高环保意识和服务质量来促进回收。当正规渠道在环保宣传费用和服务费用上投入更多资金时,非正规渠道在回收家庭废弃药品方面的效果就会降低,构成两个负反馈回路 B3 和 B4。

正规渠道回收家庭废弃药品的数量与正规渠道的回收价格呈负相关。正规渠道的回收价格影响着两种渠道回收价格差额。如果正规渠道的回收价格上涨,它们就会回收更多的家庭废弃药品,形成一个负反馈回路 B5。

因果图中还存在一些参数并不构成反馈回路,但它们之间的相互作用可以构成因果链。L1 表明回收速率与正规渠道回收废弃药品的目标数量成正比。L2 表明居民家中废弃药品的数量与正规渠道回收废弃药品的目标数量成正比。L3 表明药品的平均保质期与居民家中废弃药品的数量成反比。L4 和 L5 表明,居民家中的废弃药品数量与正规渠道/非正规渠道回收的家庭废弃药品数量成正比。L6 和 L7 表明,正规渠道/非正规渠道的数量与正规渠道/非正规渠道的废弃药品回收数量成正比。L8 表明从非正规渠道回收的废弃药品与正规渠道的回收价格成反比。L9 表明正规渠道回收废弃药品的平滑数量与政府所投入的环保宣传总费用成正比。L10 表明正规渠道回收废弃药品的平滑数量与正规渠道的服务费用成正比。L11 表明平滑时间与正规渠道回收废弃药品的平滑数量成正比。L12 和 L13 表明,政府为促进正规回收而投入的环保宣传费用和服务费用与正规渠道回收的废弃药品数量成正比。

5.2.3 流量存量图

因果图表明了各要素之间的逻辑关系和反馈机制,但无法区分不同的变量。在流量存量图中,状态变量反映累积效应,速率变量随时间改变状态变量,常量和辅助变量可用来描述各要素之间的数学关系,从而加深对系统反馈和控制过程的理解^[90]。在家庭废弃药品回收流程的因果图的基础上绘制家庭废弃药品回收的流量存量图,如图 5-2 所示。

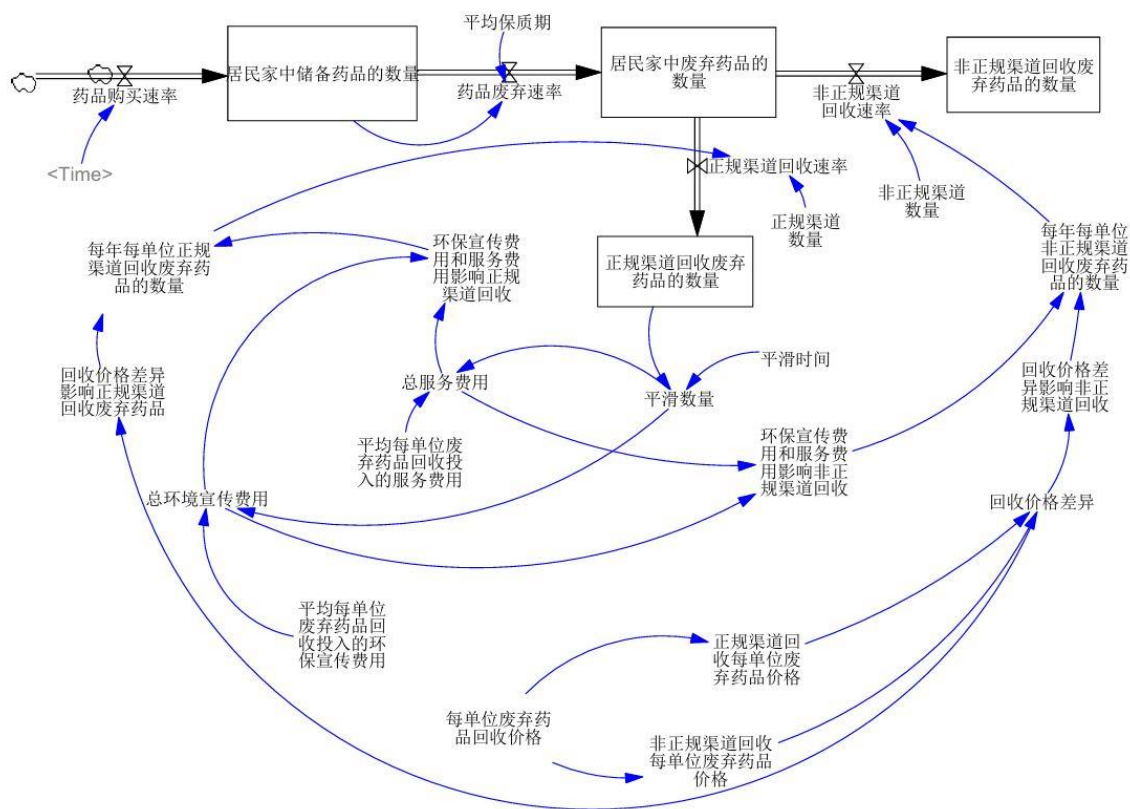


图 5-2 流量存量图

模型在 Vensim PLE 软件中构建和运行。在流量存量图中，矩形框代表状态变量，速率控制着状态变量的变化率，用带阀门的箭头表示，因果关系由连接箭头控制。该系统动力学模型有 4 个状态变量、4 个速率变量、14 个辅助变量和 5 个常量。对各变量进行定义，见附录 1。

5.2.4 数据来源与方程设置

系统动力学模型的仿真，关键在于明确并量化各变量之间的数学关系，根据流量存量图构建系统动力学方程来实现。这些方程对于精确描绘系统的反馈结构及其动态行为模式至关重要，是定量分析和理解系统运作机制的基础。

该模型使用中国芜湖家庭废弃药品回收市场的相关数据进行仿真分析，研究时间步长设置为 1 年，模型运行时间为 20 年。市场上大多数药品的保质期在 0.5 至 3 年之间，假设药品的有效期为 2 年。正规渠道包括医院、药店和社区卫生部门，据《人民日报》报道，芜湖市正规回收点的数量约 920 个。根据相关政府部门打击非正规回收废弃药品的案例，估计有 1625 个非正规回收点。据《中国家

庭废弃药品回收白皮书》数据显示，每个家庭年均产生废弃药品量约 500 克，假设芜湖市每户每年废弃药品量为 500 克。考虑到市场上售卖的药品单盒重量普遍介于 20 克至 250 克之间，取中间值 150 克作为每盒药品的估算重量，芜湖市平均每个家庭每年所产生的废弃药品量大约相当于 3.33 盒药品。根据《芜湖统计年鉴》，2018 年、2019 年和 2020 年芜湖市户籍人口分别为 512736 户、533867 户和 56377 户。

本节将讨论关键变量的方程设置，全部变量的方程设置见附录 2。

$$L1 = INTEG(R1 - R2, 1336219.75) \quad (5-1)$$

根据《中国家庭废弃药品回收白皮书》相关数据显示，78.26%的市民有储存药品的习惯，芜湖年鉴数据表明 2018 年芜湖市有 512736 户家庭，每户家庭每年至少贮存 3.33 盒废弃药品，因此本研究中芜湖市居民每年贮存的家庭药品数量为 1336219.75 盒。

$$L2 = INTEG(R2 - R3 - R4, 953032) \quad (5-2)$$

根据《中国家庭废弃药品回收白皮书》相关数据表明，居民家庭中 68.58% 的药品会被废弃。芜湖居民家中每年的药品储备数量为 1336219.75 盒，因此芜湖居民家中每年的废弃药品数量为 953032 盒。

$$R1 = WITH\ LOOKUP\ (Time, ([(2017, 0) - (2037, 600000)], (2018, 401267), (2019, 417804), (2020, 442464))) \quad (5-3)$$

2018 年、2019 年和 2020 年芜湖市户籍人口分别为 512736 户、533867 户和 56377 户，因此，2018 年、2019 年、2020 年芜湖居民家庭药品储备量分别为 1336219.75 盒、139288.37 盒、1468193.14 盒。

$$R2 = L1 / C5 \quad (5-4)$$

药品废弃速率与居民家中储存药品的数量成正相关，与药品平均保质期成负相关。

$$R3 = C2 * A2 \quad (5-5)$$

非正规渠道的回收速率与非正规渠道的数量和每单位非正规渠道每年回收废弃药品的数量成正相关。

$$A1 = A3 + A4 \quad (5-6)$$

回收渠道每年回收的家庭废弃药品数量受回收价格差额、环保宣传费和服务

费等相关因素影响。

$$A5 = A9 * A11 \quad (5-7)$$

服务总费用与平均服务费、正规渠道回收的家庭废弃药品的平滑数量成正相关。

$$A8 = A9 * A12 \quad (5-8)$$

环保宣传总费用与平均环保宣传费用、正规渠道回收的家庭废弃药品的平滑数量成正相关。

$$A9 = \text{SMOOTH}(A1, C3) \quad (5-9)$$

正规渠道回收的家庭废弃药品数量会在一段时间内波动并且逐渐趋于平稳。

$$A10 = A13 - A14 \quad (5-10)$$

两种家庭废弃药品回收渠道的回收价格之差，就是回收价格差额。

$$A13 = C4 + \text{RANDOMNORMAL}(0, 20, 5, 5) \quad (5-11)$$

非正规渠道的回收价格以市场上的废弃药品的回收价格为基准来制定，非正规渠道为促进居民参与非正规回收，通常会在该基础的一定范围内增加一个随机数。

5.3 模型检验

5.3.1 现实测试

将非正规渠道回收价格从“非正规渠道回收价格+ $\text{RANDOM NORMAL}(0, 20, 10, 5, 5)$ ”提高到“非正规渠道回收价格+ $\text{RANDOM NORMAL}(0, 40, 20, 10, 10)$ ”，这意味着将非正规渠道平均回收价格上涨 10 元，仿真结果如图 5-3 所示。

由图 5-3 可知，非正规渠道提高回收价格后，家庭废弃药品的回收数量明显高于初始状态，这符合实际情况，通过了现实测试。

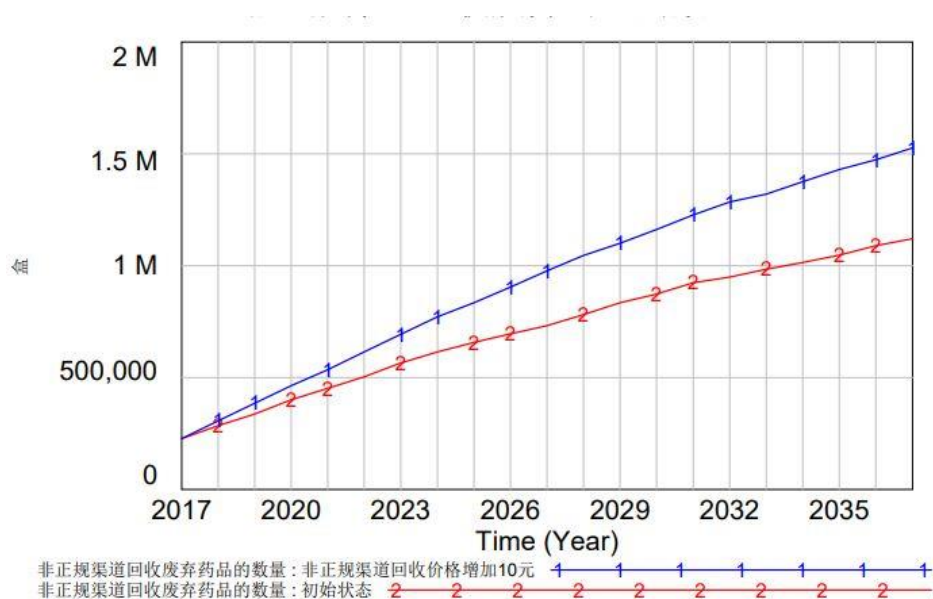


图 5-3 现实性测试 1

正规渠道和非正规渠道回收价格差额为 0 元时，模拟结果如图 5-4 所示。

由图 5-4 可知，当回收价格差额为 0 元时，非正规渠道回收的家庭废弃药品数量减少，低于初始状态，符合实际情况，通过了现实测试。

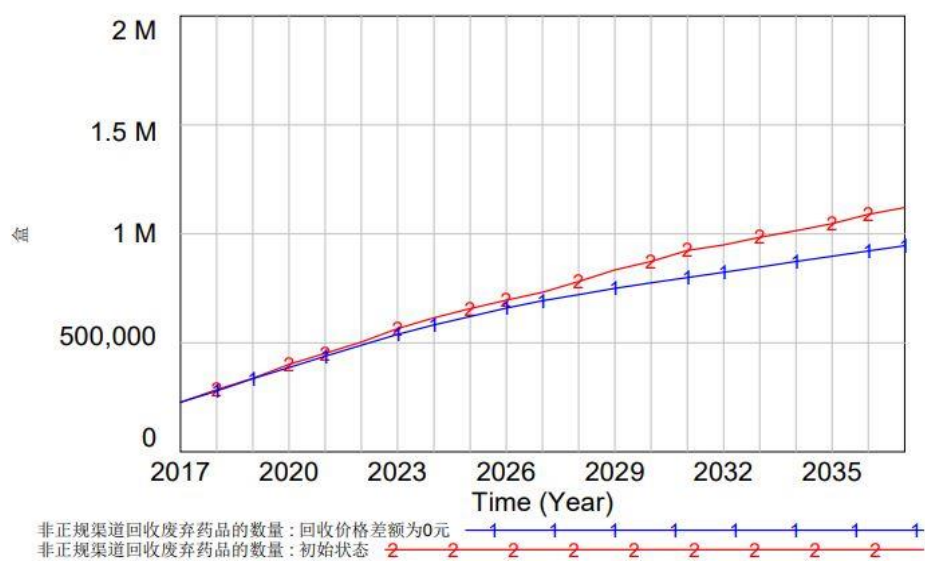


图 5-4 现实性测试 2

5.3.2 极端测试

假设药品平均保质期分别为 1 年和 10 年。当平均保质期为 1 年时，药品废弃速率增加，居民的药品购买速率保持不变，居民家中储存的药品数量会减少。

当平均保质期为 10 年时，药品废弃速率降低，居民的药品购买率保持不变，居民家中储存的药品数量增加，模拟结果如图 5-5 所示。

由图 5-5 可以看出这一行为规律，药品平均保质期为 1 年时，居民家中储存的药品数量会减少，药品平均保质期为 10 年时，居民家中储存的药品数量会增加，因此极限测试通过。

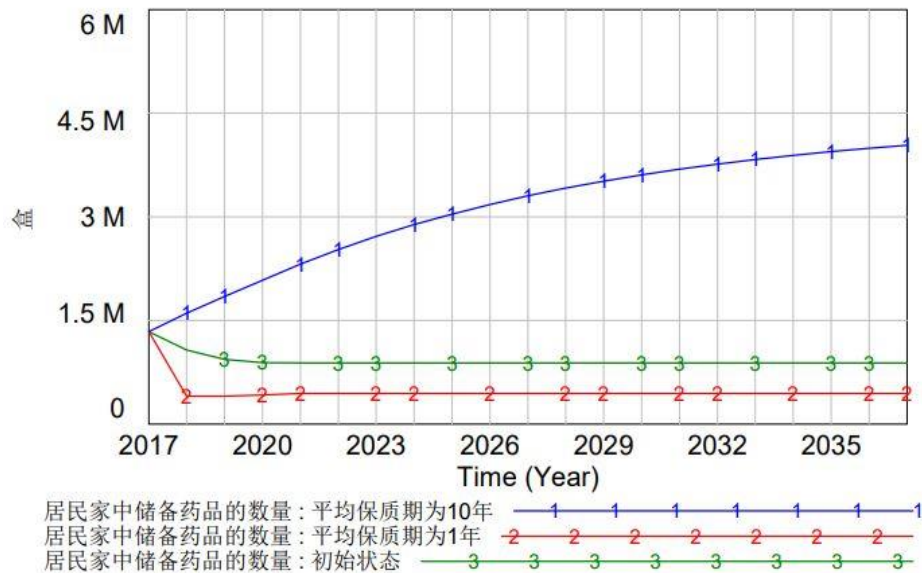


图 5-5 极端性测试

5.4 仿真分析

5.4.1 单一政府激励策略仿真分析

单一政府激励策略 1：提高正规渠道回收价格

将正规渠道回收价格分别提高 10 元和 20 元，模拟结果如图 5-6 所示。正规渠道回收价格的上涨始终能够促进正规渠道回收家庭废弃药品，并且能抑制非正规渠道回收家庭废弃药品。当正规渠道回收价格提高 10 元时，家庭废弃药品回收率在 10%至 25%区间波动；当正规渠道回收价格提高 20 元时，家庭废弃药品回收率波动范围扩大至 12%至 28%。

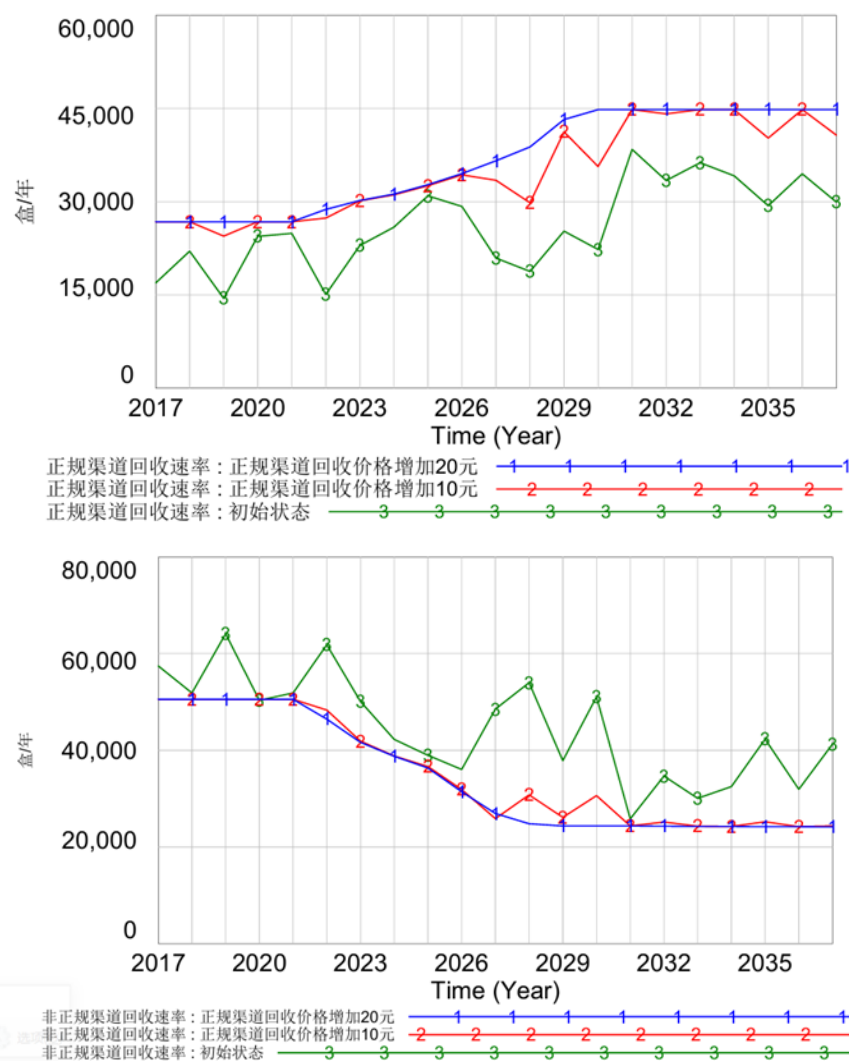


图 5-6 单一政府激励策略 1 对正规渠道和非正规渠道的影响

单一政府激励策略 2：提高正规渠道服务质量

提高正规渠道服务质量即提高正规渠道服务费用，将正规渠道的服务费用分别提高 5 元和 10 元，模拟结果如图 5-7 所示，具体影响呈现阶段性特征。2025 年前，服务费提高 5 元可使正规渠道回收率提升 10%-15%；提高 10 元正规渠道回收率增长 15%-20%；2025-2032 年，服务费提高 5 元与 10 元对正规渠道发展的促进效果差异不显著，但是两者回收效果比不增加服务费用好；2032 年后，提高服务费对正规渠道发展不再具有促进作用。2024 年前，服务费提高 5 元可使非正规渠道回收率降低 5%-15%；提高 10 元回收率下降 12%-25%；2024-2029 年，服务费提高 5 元与 10 元对非正规渠道发展的抑制效果差异不显著；2029 年后，提高服务费对非正规渠道发展不再具有抑制作用。

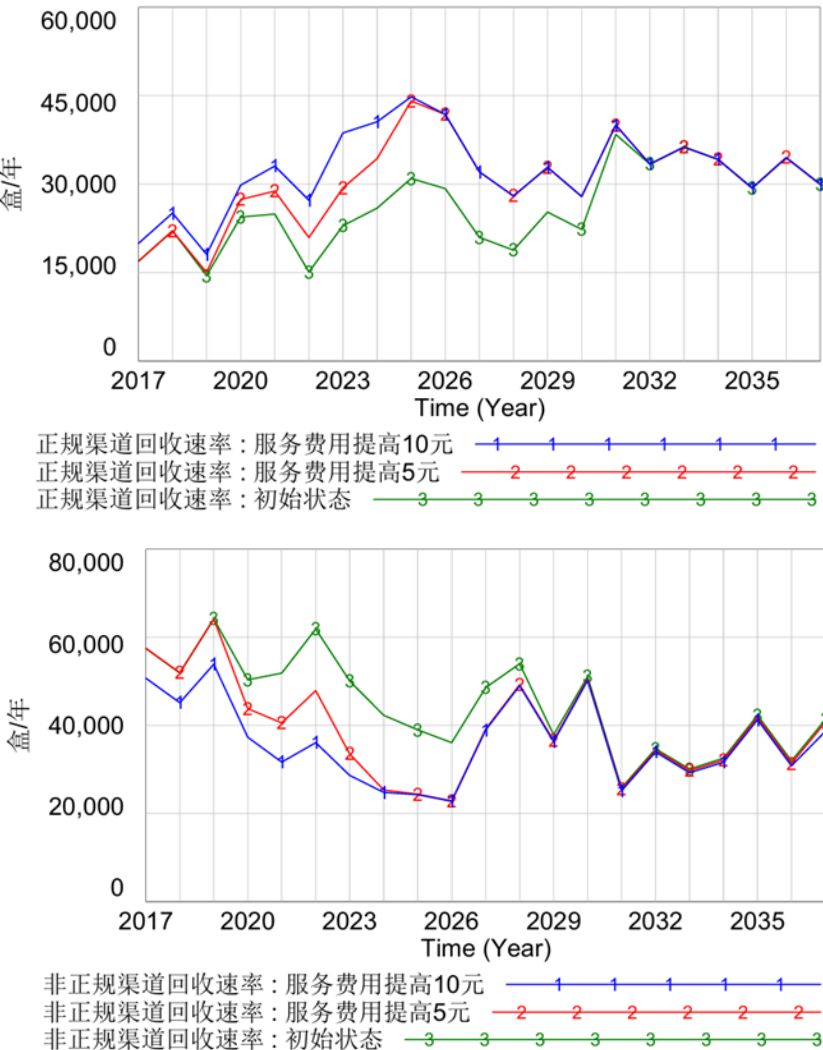


图 5-7 单一政府激励策略 2 对正规渠道和非正规渠道的影响

单一政府激励策略 3: 增加正规渠道回收点数量

将正规渠道回收点的数量增加300和600个回收点,模拟结果如图5-8所示。对正规渠道而言,每增加100个单位,其回收速率会提高2%至4%,呈现稳定的正相关关系。对非正规渠道而言,2029年之前,正规渠道每增加100个回收点,非正规渠道的回收速率下降1%至2%;2029年以后,这一激励策略对非正规渠道回收效果不再产生影响。

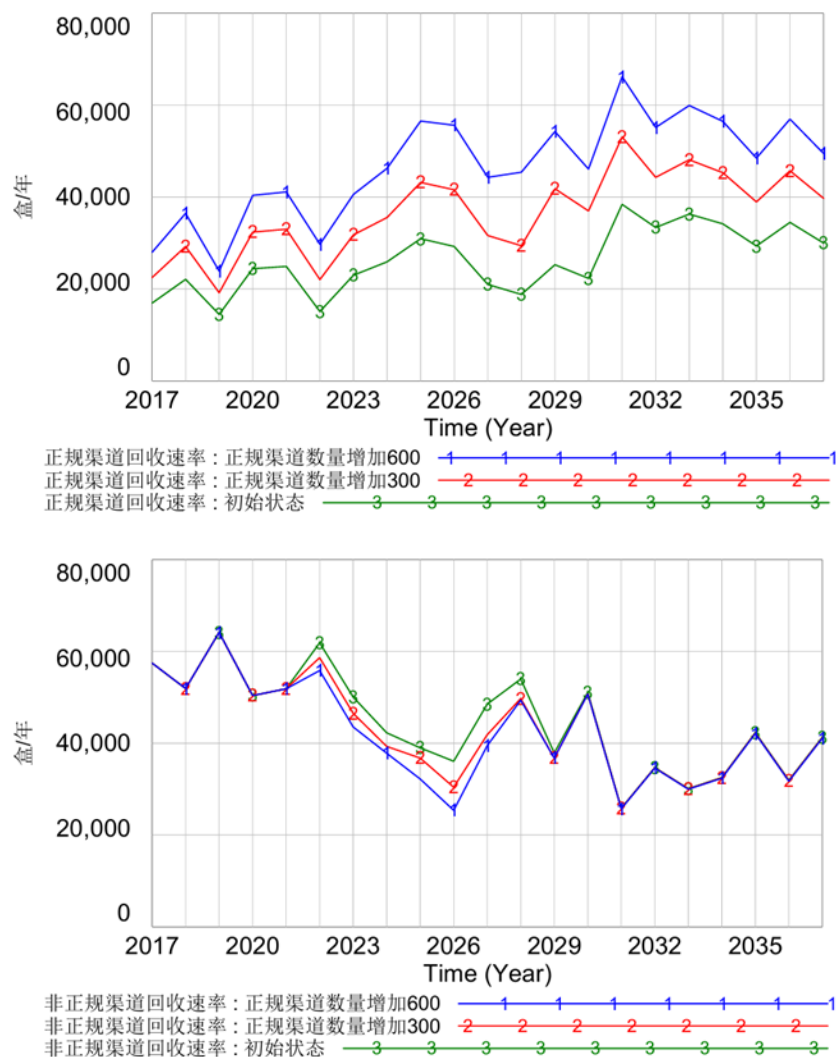


图 5-8 单一政府激励策略 3 对正规渠道和非正规渠道的影响

单一政府激励策略 4：增强环保宣传

增强环保宣传即增加环保宣传费用，环保宣传费用分别增加 2 元和 5 元，模拟结果如图 5-9 所示。2029 年前，环保宣传费用增加 2 元，家庭废弃药品回收速率在 2%至 10%左右波动；环保宣传费用增加 5 元，家庭废弃药品回收速率在 5%至 18%左右波动。2029 年到 2032 年，环保宣传费提高 2 元与 5 元对促进正规渠道发展仅有微弱影响差异，但是对抑制非正规渠道回收没有效果；2032 年后，环保宣传费用的调整对促进正规渠道和抑制非正规渠道都没有效果。

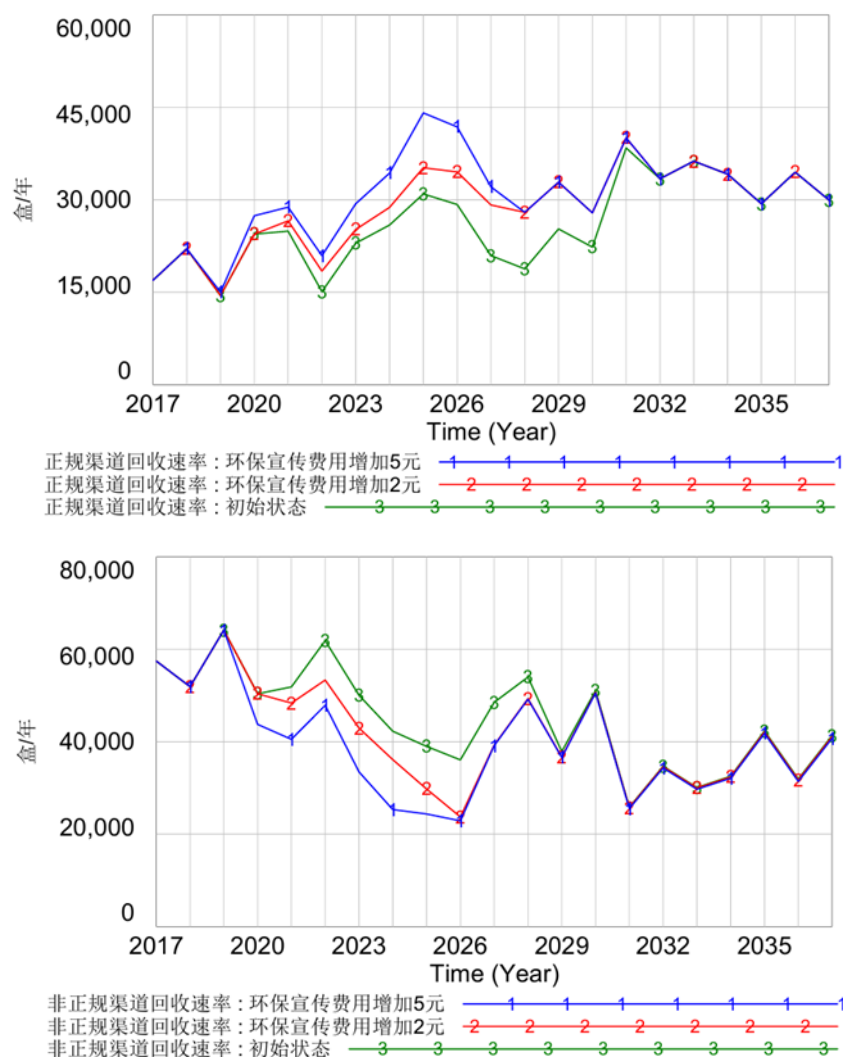


图 5-9 单一政府激励策略 4 对正规渠道和非正规渠道的影响

5.4.2 组合政府激励策略仿真分析

在上一节中,模拟了四种不同的单一政府激励策略对正规渠道和非正规渠道的影响。在现实情境中,家庭废弃药品回收问题不只采取单一政府激励策略来促进回收,还依赖组合政府激励策略。本节以四种不同的单一政府激励策略为基础,设计了六种组合政府激励策略。组合激励策略 1: 提高正规渠道回收价格+增强服务质量;组合激励策略 2: 提高正规渠道回收价格+增加正规回收点数量;组合激励策略 3: 提高正规渠道回收价格+加强环保宣传;组合激励策略 4: 增强服务质量+增加正规回收点数量;组合激励策略 5: 增强服务质量+加强环保宣传;组合激励策略 6: 增加正规回收点数量+加强环保宣传。探究这 6 种组合政府激励策略对正规渠道和非正规渠道的影响。

组合激励策略 1、2、3、4、5、6 的仿真结果，模拟结果如图 5-10、图 5-11 所示、图 5-12、图 5-13、图 5-14、图 5-15 所示。

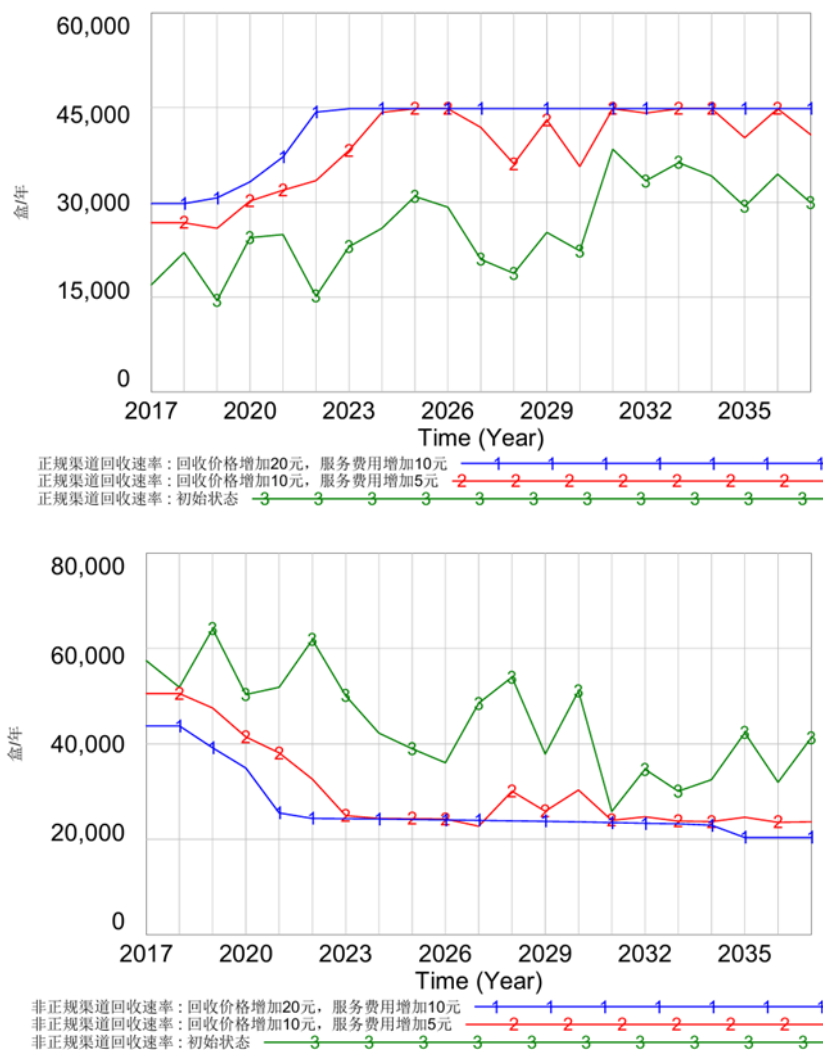


图 5-10 组合政府激励策略 1 对正规渠道和非正规渠道的影响

组合激励策略 1：提高正规渠道回收价格+增强服务质量

如图 5-10 所示，随着回收价格和服务费用的增加，正规渠道的回收速率在不同时间段内有所提升，特别是在回收价格和服务费用增加较多的情况下，提升更为显著，这表明提高回收价格和服务费用可以有效激励正规渠道的回收行为，从而提升整体的回收效率。与此同时，非正规渠道的回收速率在不同时间段内有所变化，特别是在回收价格和服务费用增加较多的情况下，回收速率下降更为显著，这表明提高回收价格和服务费用可以有效抑制非正规渠道的回收行为。

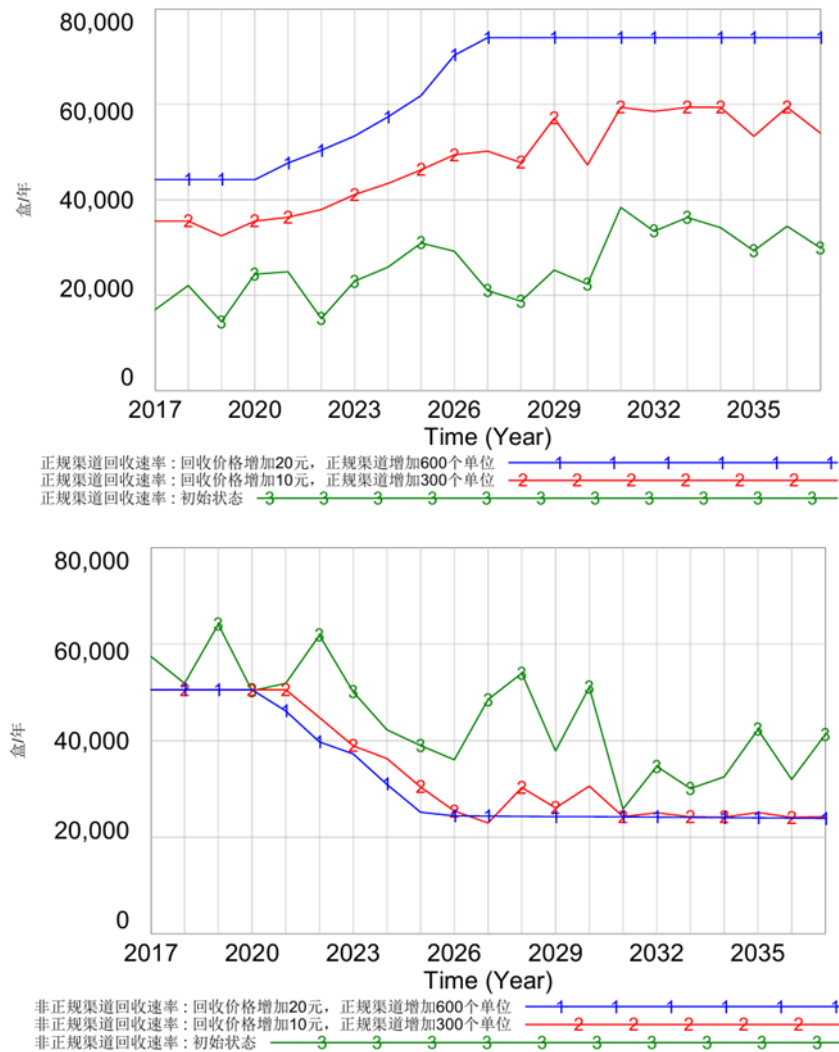


图 5-11 组合政府激励策略 2 对正规渠道和非正规渠道的影响

组合激励策略 2: 提高正规渠道回收价格+增加正规回收点数量

如图 5-11 所示,对正规渠道而言,回收价格增加且正规渠道数量增加可以有效促进正规渠道回收速率,特别是在回收价格和正规渠道数量增加较多的情况下,回收速率提升更为显著。对非正规渠道而言,回收价格增加且正规渠道数量增加的情况下,回收速率有所下降,但是回收价格和正规渠道数量增加数额不同时回收速率的差异不显著。

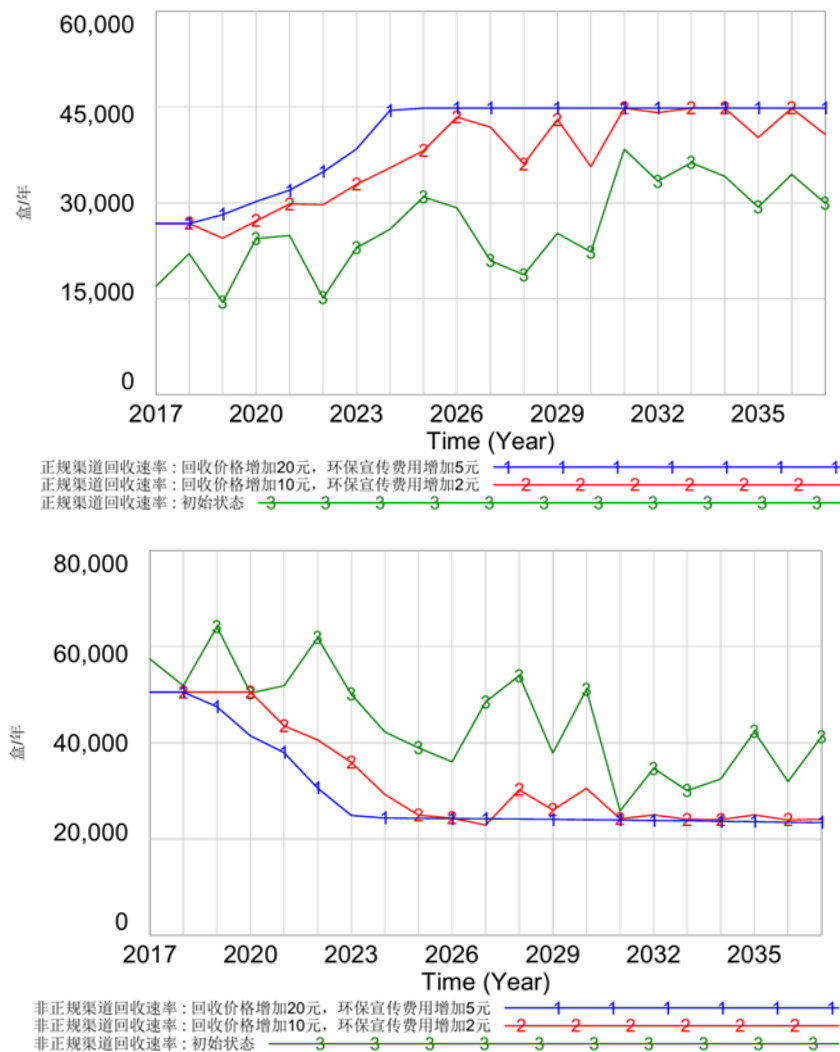


图 5-12 组合政府激励策略 3 对正规渠道和非正规渠道的影响

组合激励策略 3：提高正规渠道回收价格+加强环保宣传

如图 5-12 所示，随着回收价格和环保宣传费用的增加，正规渠道的回收速率在不同时间段内有所提升，特别是在回收价格和环保宣传费用增加较多的情况下，提升更为显著，这表明提高回收价格和环保宣传费用可以有效激励正规渠道的回收行为，从而提升整体的回收效率。与此同时，非正规渠道的回收速率在不同时间段内有所变化，特别是在回收价格和环保宣传费用增加较多的情况下，回收速率下降更为显著，这表明提高回收价格和环保宣传费用可以有效抑制非正规渠道的回收行为。

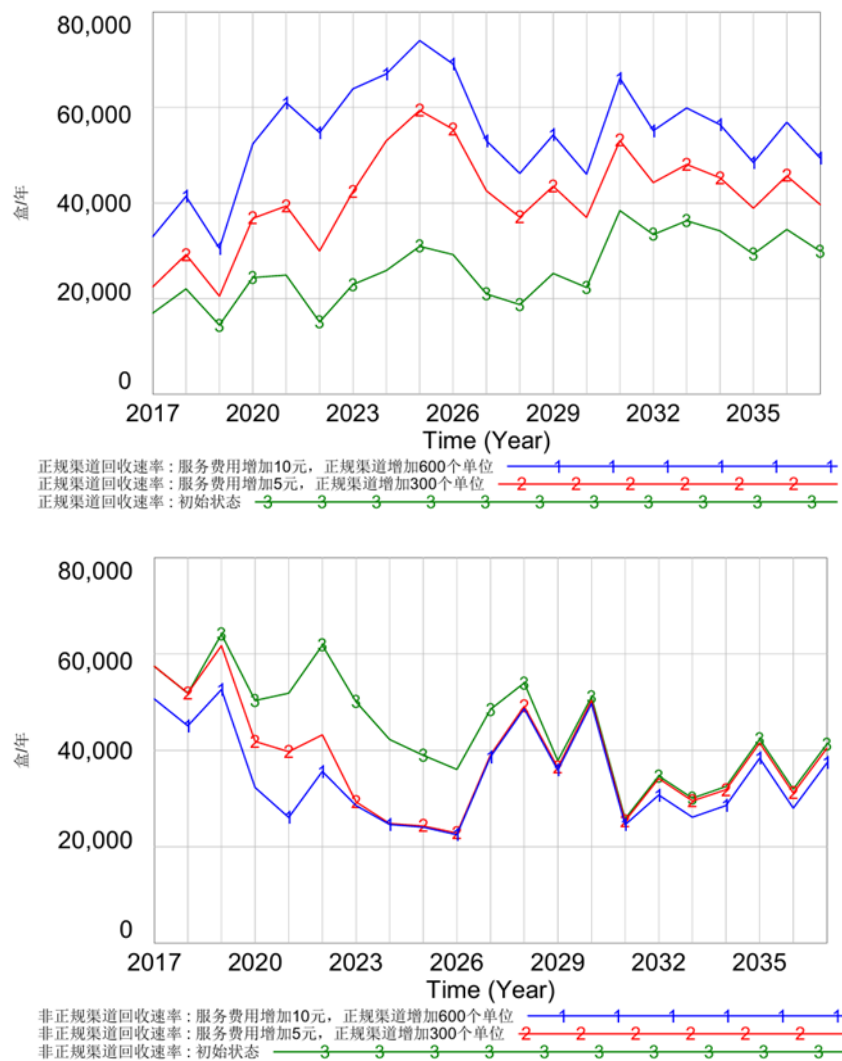


图 5-13 组合激励策略 4 对正规渠道和非正规渠道的影响

组合激励策略 4：增强服务质量+增加正规回收点数量

如图 5-13 所示，对正规渠道而言，服务费用增加且正规渠道数量增加可以有效促进正规渠道回收速率，特别是在服务费用和正规渠道数量增加较多的情况下，回收速率提升更为显著。对非正规渠道而言，服务费用增加且正规渠道数量增加的情况下，回收速率有所下降，但是服务费用和正规渠道数量增加数额不同时回收速率的差异不显著。

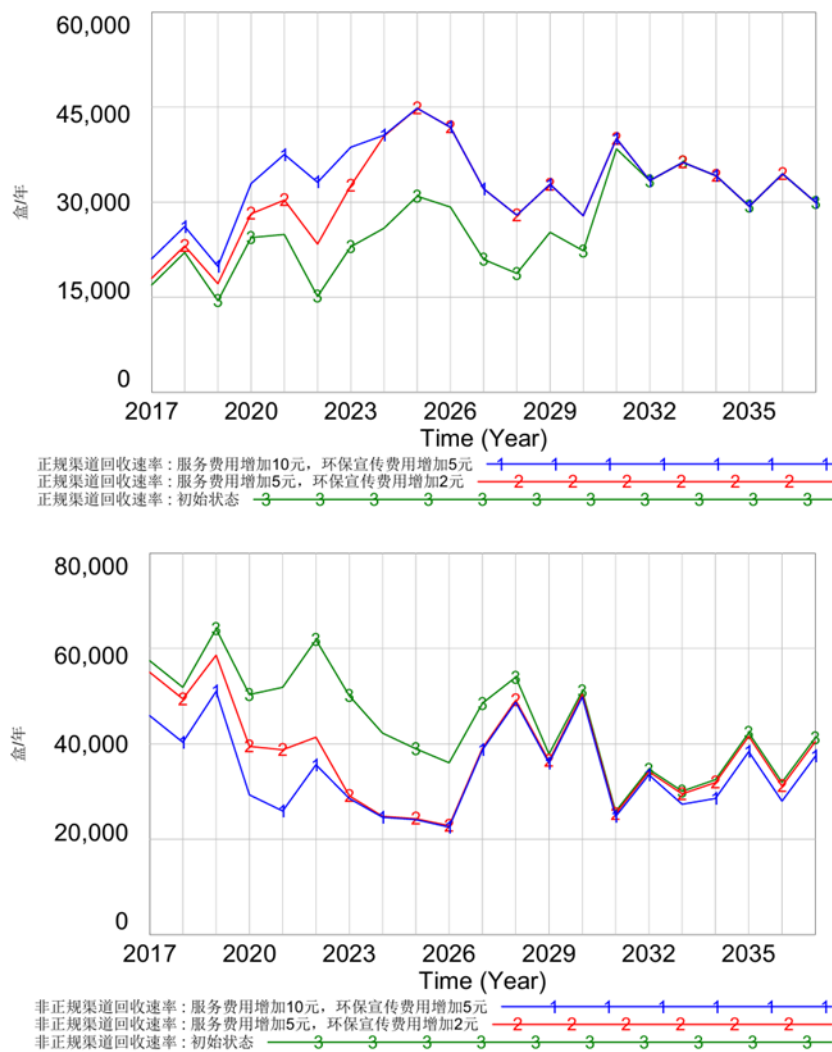


图 5-14 组合激励策略 5 对正规渠道和非正规渠道的影响

组合激励策略 5: 增强服务质量+加强环保宣传

如图 5-14 所示, 增加服务费用和环保宣传费用这一组合激励策略实施前期, 能够有效促进正规渠道回收, 特别是服务费用和环保宣传费用增加较多的情况下, 回收效果更好。与此同时, 能够有效抑制非正规渠道回收, 但是服务费用和环保宣传费用增加数额不同回收效率差异不显著。这一组合激励策略实施一段时间后, 对促进正规回收和抑制非正规回收的效果不显著。

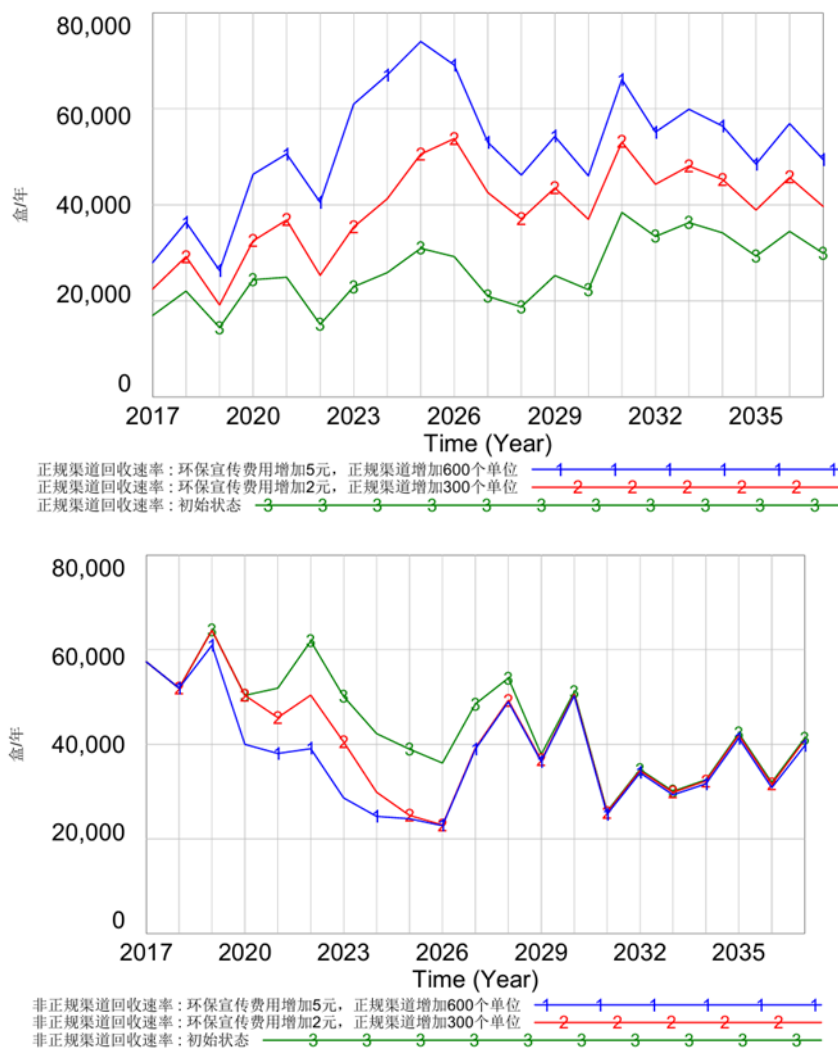


图 5-15 组合激励策略 6 对正规渠道和非正规渠道的影响

组合激励策略 6：增加正规回收点数量+加强环保宣传

如图 5-15 所示，对正规渠道而言，环保宣传费用增加且正规渠道数量增加可以有效促进正规渠道回收速率，特别是环保宣传费用和正规渠道数量增加较多的情况下，回收速率提升更为显著。对非正规渠道而言，环保宣传费用增加且正规渠道数量增加的情况下，回收速率有所下降，但是回收价格和正规渠道数量增加数额不同时回收速率的差异不显著。

5.5 本章小结

构建家庭废弃药品回收系统的系统动力学模型，模拟不同政府激励策略对正规渠道和非正规渠道回收效果的影响，研究得到的结果如下：

(1) 政府实施提高正规渠道回收价格这一激励策略初期，正规渠道回收价格

的高低对促进正规回收和打击非正规回收均具有显著影响。较高的回收价格能够有效吸引居民将废弃药品交给正规渠道，同时降低非正规渠道的竞争力。然而，随着该策略的持续实施，居民对正规回收渠道的信任度和依赖性逐渐增强，此时正规渠道回收价格的高低对正规渠道和非正规渠道的回收效果影响逐渐减弱。这表明，初期的价格激励在引导市场行为方面发挥重要作用，但长期效果则取决于居民行为习惯的养成和对正规渠道的认可。

(2) 对于正规渠道而言，政府实施增加正规渠道数量这一激励策略始终能够促进正规回收，且正规渠道的数量与回收效果成正比关系。对于非正规渠道而言，该策略在实施初期能够有效抑制非正规回收，但随着策略的持续实施，其对非正规回收效果的影响逐渐减弱。这表明，增加正规渠道数量在短期内对规范市场具有显著效果，但长期效果还需结合其他激励措施。

(3) 提高环保宣传费用和服务费用这两种激励策略实施初期，能够有效促进正规渠道的药品回收，并打击非正规回收。这是因为初期阶段，增加的费用可以用于加强宣传教育和提升服务质量，从而增强居民对正规回收渠道的信任和依赖。然而，随着激励策略的持续实施，居民对正规回收渠道的认知和习惯逐渐形成，此时提高环保费用和服务费用对正规回收和非正规回收的效果影响不大。

第6章 总结与展望

6.1 研究结论与建议

本研究以家庭废弃药品回收为主题,结合演化博弈理论和系统动力学理论等方法,探讨政府、正规渠道、非正规渠道的三方演化关系以及不同政府激励策略对家庭废弃药品回收的影响,旨在为构建家庭废弃药品回收体系提供一定的理论依据。

首先,阐述家庭废弃药品回收内涵,对比国内外家庭废弃药品回收行为现状,明确家庭废弃药品回收过程中存在的问题,分析家庭废弃药品回收的影响因素,为后续的家庭废弃药品回收相关研究奠定基础。

其次,构建政府、正规渠道和非正规渠道的三方演化博弈模型,并对各参与主体的行为策略选择、策略组合的稳定性及其影响因素进行分析,得到以下结论:(1) 政府行为策略受政府积极干预回收获得的社会收益、政府积极回收付出的成本、政府消极回收付出的成本以及政府对回收渠道的奖惩措施等因素影响。(2) 正规渠道行为策略选择受正规渠道积极或消极回收付出的成本、正规渠道积极或消极回收获得的收益以及政府对回收渠道的奖惩措施等因素影响。(3) 非正规渠道行为策略选择受非正规渠道参与回收获得的收益、非正规渠道参与回收付出的成本以及政府对回收渠道的奖惩措施等因素影响。

最后,构建家庭废弃药品回收系统的系统动力学模型,并使用芜湖市家庭废弃药品回收的相关数据对各变量进行方程设置,利用该模型模拟不同政府激励策略对正规渠道和非正规渠道的影响,研究结果如下:(1) 提高正规渠道回收价格这一激励策略实施初期,正规渠道回收价格的高低对促进正规回收和打击非正规回收有一定影响;但是该策略实施一段时间后,正规渠道回收价格的高低几乎不影响正规渠道和非正规渠道的回收效果。(2) 对正规渠道而言,增加正规回收点数量这一激励策略始终可以促进正规回收,正规回收点数量越多,回收效果越好。增加正规回收点数量这一策略实施初期能有效抑制非正规回收,但是实施一段时

间后对非正规回收效果影响不大。(3) 提高环保宣传费用和服务费用, 实施这两种激励策略初期, 可以有效促进正规回收和打击非正规回收。但是策略实施一段时间后, 促进正规回收和打击非正规回收几乎没有影响。

根据上面的结论, 为政府建设合理的家庭废弃药品回收体系提供参考建议, 具体如下:

(1) 政府在家庭废弃药品回收过程中应发挥主导作用, 通过合理的激励和监管措施, 引导正规渠道积极参与, 打击非正规渠道, 从而构建一个高效、安全、可持续的废弃药品回收体系。政府通过宣传教育、媒体推广等方式, 提高公众对家庭废弃药品危害性的认识, 优化回收流程, 提高回收效率, 减少政府在回收过程中的资源投入; 政府通过补贴、税收等方式, 降低正规渠道参与回收的成本, 提高其积极性, 建立健全的监管机制, 确保正规渠道按照规范操作, 提高回收效率和质量; 对非法回收渠道的违法行为进行严厉打击, 提高罚款金额, 增加其违法成本, 从而有效遏制非法回收行为, 建立完善的市场监管体系, 加强对药品回收市场的巡查和监督, 及时发现并打击非法回收行为。

(2) 政府设立专门的家用废弃药品回收基金, 通过征收环境税或实施生产者责任延伸制度, 让药品生产商承担部分回收费用, 以确保基金的可持续性。此外, 政府不应鼓励正规渠道大幅提高家庭废弃药品回收价格。政府可以通过提供更多补贴或引导药店、医院、社区卫生中心等医疗机构合作, 帮助正规渠道设立更多回收点。政府应在可承受的财政范围内广泛开展环保宣传活动, 并提高服务质量, 否则会给政府带来财政压力。

6.2 研究展望

基于家庭废弃药品回收这一主题展开, 并得到相应的结论和管理启示。但是本研究仍存在一些不足之处, 需要进一步完善。

首先, 本研究建立了一个政府、正规渠道和非正规渠道的三方演化博弈模型, 分析了各参与主体的策略选择、策略组合的稳定性以及政府奖惩措施对各参与主体的影响。以往关于家庭废弃药品回收的演化博弈研究大多基于政府、回收商和消费者等参与主体展开, 但是本研究构建了一个政府、正规渠道、非正规渠道的三方演化博弈模型。家庭废弃药品回收过程中涉及到多个参与主体, 未来的研究

中应该将更多的参与主体纳入进来考虑。

其次,使用系统动力学方法构建一个关于家庭废弃药品回收系统的系统动力学模型,利用芜湖市家庭废弃药品回收相关数据对模型中的各变量进行方程设置,通过系统动力学模型来量化政府回收激励策略对正规渠道和非正规渠道的影响。之前家庭废弃药品回收系统动力学的研究中,大多考虑政府政策如税收、补贴、罚款对废弃药品回收的影响,本研究考虑不同政府激励策略对回收的影响。但是,本研究仅考虑了四种不同的政府激励策略,未来可以继续探究其他政府激励策略对回收的影响。

参考文献

- [1] 杨梦欢, 吴文字, 张东枚, 等. 深圳市自我药疗居民用药安全的 KAP 现况调查[J]. 暨南大学学报(自然科学与医学版), 2024, 45(4): 428-437.
- [2] Gamba S, Jakobsson N, Svensson M. The impact of cost-sharing on prescription drug demand: evidence from a double-difference regression kink design[J]. The European Journal of Health Economics, 2022, 23(9): 1591-1599.
- [3] Campos E A R, Paula I C, Pagani R N, et al. Reverse logistics for the end-of-life and end-of-use products in the pharmaceutical industry: a systematic literature review[J]. Supply Chain Management: An International Journal, 2017, 22(4): 375-392.
- [4] Dhawande A, Moon S, Kale V, et al. Pharmaceutical waste: an emerging threat to the ecosystem[M]//360-Degree Waste Management, Volume 2. Elsevier, 2023: 3-37.
- [5] Han J. Barcoding drug information to recycle unwanted household pharmaceuticals: a review[J]. Environmental Chemistry Letters, 2022, 20(5): 2989-3003.
- [6] 澎湃新闻. 2024 年“广药白云山 3.13 家庭过期药品回收活动”开启[EB/OL]. (2024.3.14)[2025.2.12]. https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_26676946.
- [7] 中华人民共和国安徽省药品监督管理局. 安徽省居民家庭过期失效药品定点回收管理暂行规定 [EB/OL]. (2016.6.6)[2024-12-09]. https://wenku.baidu.com/view/b943acdd9a8fcc22bcd126fff705cc1755275fc9.html?_wks_=1742695545756.
- [8] 新浪财经. 联动数百家药店提供用药指导[EB/OL]. (2023.2.8)[2024-12-09]. <https://finance.sina.com.cn/jjxw/2023-02-08/doc-imyeynxu3191337.shtml>.
- [9] 段然. 过期药的生态危害和回收机制[J]. 生态经济, 2023, 39(05): 5-8.
- [10] 路世昌, 仪宣彤, 李丹. 协同视角下中小型制造企业数字化转型三群体演化博弈分析[J]. 运筹与管理, 2024, 33(03): 49-55.
- [11] 张婧思, 綦良群. 基于前景理论的装备制造企业服务化演化博弈分析——基

- 于客户视角[J]. 运筹与管理, 2023, 32(12): 43-49.
- [12] 吕洋, 刘忠轶, 张振源, 等. 小餐饮商户接入食品安全溯源体系策略博弈研究[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2024, 21(01): 145-151.
- [13] 刘翠莲, 刘娜, 梁晶, 等. 基于前景理论的港口降碳路径演化博弈分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2025, 44(02): 25-33.
- [14] 孙淑慧, 苏强. 医联体环境下患者情绪影响的分级诊疗策略演化博弈分析[J]. 中国管理科学, 2023, 31(11): 288-299.
- [15] 曹路苹, 丁小洲, 郭韬. 数字经济背景下科技型在位企业商业模式演化策略研究[J]. 运筹与管理, 2023, 32(11): 40-47.
- [16] 蒋含明, 胡灵芝, 陈洪章, 等. 突发扰动事件下原油供应链风险模拟与调控研究——基于系统动力学方法[J]. 系统工程理论与实践, 2025, 45(01): 326-344.
- [17] 季廷炜, 王亮, 谢芳芳, 等. 基于非线性动力学稀疏辨识的涡致振动系统建模[J]. 浙江大学学报(工学版), 2025, 59(02): 402-412+432.
- [18] 肖艳玲, 于扬, 崔明欣, 等. 基于系统动力学模型的绿色建筑利益相关者决策行为演化博弈分析[J]. 系统科学学报, 2024, 32(02): 54-59.
- [19] 段玮, 齐舆, 巩芳, 等. 系统动力学与经济管理理论及方法结合研究综述[J]. 统计与决策, 2022, 38(02): 41-46.
- [20] 李利华, 黄佳平, 李莉娟, 等. 基于协同网络的物流集群系统模型及仿真[J]. 系统工程, 2022, 40(02): 98-108.
- [21] Ugoeze K, Alalor C, Ibezim C, et al. Environmental and human health impact of antibiotics waste mismanagement: a review[J]. Advances in Environmental and Engineering Research, 2024, 5(1): 1-21.
- [22] Yang Y Y, Toor G S, Williams C F. Pharmaceuticals and organochlorine pesticides in sediments of an urban river in Florida, USA[J]. Journal of Soils and Sediments, 2015, 15: 993-1004.
- [23] Aydin S, Aydin M E, Ulvi A, et al. Antibiotics in hospital effluents: occurrence, contribution to urban wastewater, removal in a wastewater treatment plant, and environmental risk assessment[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26: 544-558.

- [24]Musson S E, Townsend T G. Pharmaceutical compound content of municipal solid waste[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 162(2-3): 730-735.
- [25]Sapkota B, Pariatamby A. Pharmaceutical waste management system–Are the current techniques sustainable, eco-friendly and circular? A review[J]. *Waste Management*, 2023, 168: 83-97.
- [26]Castiello C, Junghanns P, Mergel A, et al. GreenMedChem: the challenge in the next decade toward eco-friendly compounds and processes in drug design[J]. *Green Chemistry*, 2023, 25(6): 2109-2169.
- [27]Tanoue R, Sato Y, Motoyama M, et al. Plant uptake of pharmaceutical chemicals detected in recycled organic manure and reclaimed wastewater[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2012, 60(41): 10203-10211.
- [28]Cao J, Chen Y, Shi B, et al. WEEE recycling in Zhejiang Province, China: generation, treatment, and public awareness[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 127: 311-324.
- [29]Jaffe K, Dong H, Godefroy A, et al. Informal recycling, income generation and risk: Health and social harms among people who use drugs[J]. *International Journal of Drug Policy*, 2018, 60: 40-46.
- [30]Ehrhart A L, Granek E F, Nielsen-Pincus M, et al. Leftover drug disposal: customer behavior, pharmacist recommendations, and obstacles to drug take-back box implementation[J]. *Waste Management*, 2020, 118: 416-425.
- [31]Kadam A, Patil S, Patil S, et al. Pharmaceutical waste management an overview[J]. *Indian Journal of Pharmacy Practice*, 2016, 9(1),1-8.
- [32]Li Y, Wang M G, Duan J X. Classification and collection of foreign domestic waste[J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 864: 1899-1903.
- [33]Pereira A L, de Vasconcelos Barros R T, Pereira S R. Pharmacopollution and household waste medicine: how reverse logistics is environmentally important to Brazil[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(31): 24061-24075.
- [34]Patwary M A, O'Hare W T, Sarker M H. An illicit economy: Scavenging and recycling of medical waste[J]. *Journal of Environmental Management*, 2011,

- 92(11): 2900-2906.
- [35] Tong A Y C, Peake B M, Braund R. Disposal practices for unused medications around the world[J]. *Environment International*, 2021, 37(1): 292-298.
- [36] 邵鹏, 张亚雯, 翟展鹏. 过期药品回收模式与数字化回收策略——基于媒体报道的量化分析[J]. *情报工程*, 2024, 10(2): 117-127.
- [37] 鲁圣鹏, 廖岚, 韩凯敏, 等. 典型国家家庭药品废弃物治理实践及对中国的启示[J]. *东华理工大学学报(社会科学版)*, 2021, 40(03): 230-236.
- [38] 李玉民, 冯亚雄. “互联网+”药品供应链回收过期药品新机制研究[J]. *价格理论与实践*, 2023, (11): 124-128.
- [39] 王高玲, 汤少梁, 沈爱琴, 等. 基于政府和医药零售企业博弈的促进过期药品回收的策略研究[J]. *预测*, 2011, 30(05): 54-58.
- [40] 赵新奇, 陈晓春, 陈垚彤. 考虑消费者绿色行为的药品回收供应链协调研究[J]. *科学决策*, 2022, (03): 101-111.
- [41] 赵利. 我国药品专利强制许可制度探析[J]. *政法论坛*, 2017, 35(02): 146-151.
- [42] 李双元, 李欢. 公共健康危机所引起的药品可及性问题研究[J]. *中国法学*, 2004, (06): 84-91.
- [43] 沈雷. 社区医疗废物控制的法律机制研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2011.
- [44] 刘帅. 政府补贴视角下过期药品逆向供应链激励机制研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
- [45] 张慧颖. 政府主导下的家庭过期药品回收激励策略研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
- [46] 胡亚平. 基于积分激励的废弃药品逆向供应链模型研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
- [47] 朱立龙, 荣俊美, 张思意. 政府奖惩机制下药品安全质量监管三方演化博弈及仿真分析[J]. *中国管理科学*, 2021, 29(11): 55-67.
- [48] 成灶平, 丛培栋, 马良. 政府不同奖惩措施下消费者参与快递包装回收行为演化研究[J]. *运筹与管理*, 2024, 33(03): 218-225.
- [49] 喻可欣, 朱婷. 快递包装回收逆向物流三方主体博弈分析[J]. *中国储运*, 2023, (07): 51-52.

- [50]刘永清, 刘文浩, 陈爱妩. 基于演化博弈的电子废弃物回收产业链协同治理[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2024, 39(01): 104-114.
- [51]王文宾, 戚金钰, 张萌欣, 等. 三方演化博弈下政府奖惩机制对 WEEE 回收的影响[J/OL]. 中国管理科学, 1-13[2024-12-09].
- [52]李潇芮, 张黎明, 钟永光. 奖惩机制下废弃电器电子产品回收处理商合作研发决策研究[J]. 科技管理研究, 2018, 38(14): 200-209.
- [53]杜冰冰, 侯慧敏, 侯琼, 等. 基于演化博弈视角的中国废铅蓄电池回收利用过程主要问题分析和对策研究[J]. 环境工程学报, 2023, 17(12): 3832-3842.
- [54]许礼刚, 刘荣福, 陈磊, 等. 前景理论视角下废旧动力电池回收监管演化博弈分析[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2024, 38(01): 290-297.
- [55]刘阳, 张桂涛, 王志远, 等. 废旧共享单车回收策略的四方演化博弈分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2023, 33(08): 180-192.
- [56]倪霖, 贾宇楠, 王森, 等. 基于演化博弈的废旧家电回收商与电商平台协作回收投资机制研究[J]. 机械工程学报, 2023, 59(05): 247-258.
- [57]刘永清, 刘文浩, 丁文彬. 基于消费者回收偏向的废旧家电回收决策博弈分析[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2021, 36(04): 113-124.
- [58]李君妍, 杨家其. 药品回收物流三方演化博弈行为研究[J]. 武汉: 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2017, 41(05): 859-863+870.
- [59]张晓东. 结合行为和博弈理论的过期药品回收系统演化研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2023.
- [60]鹿秋晨. 家庭过期药品回收的逆向供应链激励策略博弈研究[D]. 济南: 山东财经大学, 2022.
- [61]段翼杨, 温宗良, 谢佳煜, 等. 区块链技术下过期药品回收处理研究——基于演化博弈视角[J]. 中国储运, 2023, (04): 159-160.
- [62]陈国卫, 金家善, 耿俊豹. 系统动力学应用研究综述[J]. 控制工程, 2012, 19(06): 921-928.
- [63]王文宾, 刘业, 钟罗升, 等. 补贴-惩罚政策下废旧动力电池的回收决策研究[J]. 中国管理科学, 2023, 31(11): 90-102.
- [64]田立平, 孙群, 李文龙. 基于系统动力学的促进废旧家电环保化回收的策略模型

- [J].中国管理科学,2020,28(05):167-175.
- [65]付跃强, 夏天添. 基于系统动力学的废弃电池处理对电动汽车发展影响研究[J]. 生态经济, 2020, 36(04): 56-61.
- [66]Joshi B V, Vipin B, Ramkumar J, et al. Impact of policy instruments on lead-acid battery recycling: A system dynamics approach[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2021, 169: 528-542.
- [67]危浪, 王翠霞. 基于 SD 演化博弈的新能源车动力电池回收监管策略研究[J]. 系统科学与数学, 2023, 43(05): 1314-1330.
- [68]周叶, 许莹, 何慧. 居民垃圾分类行为监管演化博弈的系统动力学仿真[J]. 系统科学学报, 2022, 30(02): 69-74.
- [69]陈雪萍. 基于垃圾分类的城市生活垃圾处理系统动力学[J]. 再生资源与循环经济, 2020, 13(05): 31-34.
- [70]Cai L. System dynamics approach for study on municipal domestic waste problems[J]. Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control, 2006, 7(5): 65-69.
- [71]王耕, 李优. 基于 SD 模型的城市生活垃圾资源化处理模拟研究——以大连市为例[J]. 环境工程技术学报, 2016, 6(05): 493-500.
- [72]唐睿, 王晨, 陈雅萌, 等. 厦门市城市生活垃圾的系统动力学预测管控体系[J]. 环境科学学报, 2019, 39(06): 2071-2078.
- [73]郎玲玲, 刘峥, 徐琪, 等. 动态奖惩措施下政府与电子产品回收企业的演化博弈分析[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2022, 48(4): 116-125.
- [74]祁子怡, 程红莉, 王佳雪, 等. 基于系统动力学的可循环快递包装发展的影响因素分析[J]. 中国储运, 2022, (6): 79-80.
- [75]Yang J, Long R, Chen H. Decision-making dynamic evolution among groups regarding express packaging waste recycling under different reference dependence and information policy[J]. Waste Management, 2022, 138: 262-273.
- [76]Narayana S, A. Elias A, K. Pati R. Reverse logistics in the pharmaceuticals industry: a systemic analysis[J]. The International Journal of Logistics Management, 2014, 25(2): 379-398.
- [77]Orhan M A, Uca N C. Modeling the disposal of domestic drug waste through

- causal loop diagram[J]. *International Journal of Commerce and Finance*, 2020, 6(1): 194-203.
- [78] Bhushan S, Tirupati D, Suresh D N. System dynamics modeling based analysis to combat counterfeit drugs supply chain in India[J]. *IIM Bangalore Research Paper*, 2013 (417): 425-463.
- [79] 王雁凤, 黄有方. 考虑居民选择行为的过期药品逆向物流网络设计[J]. *华中师范大学学报(自然科学版)*, 2015, 49(01): 52-59.
- [80] Hjalte F, Olofsson S, Persson U, et al. Burden and costs of migraine in a Swedish defined patient population—a questionnaire-based study[J]. *The Journal of Headache and Pain*, 2019, 20: 1-9.
- [81] Nahin R L, Sayer B, Stussman B J, et al. Eighteen-year trends in the prevalence of, and health care use for, noncancer pain in the United States: data from the medical expenditure panel survey[J]. *The Journal of Pain*, 2019, 20(7): 796-809.
- [82] Hedenmalm K, Quinten C, Kurz X, et al. A collaborative study of the impact of N-nitrosamines presence and ARB recall on ARB utilization—results from IQVIA™ Disease Analyzer Germany[J]. *European Journal of Clinical Pharmacology*, 2023, 79(6): 849-858.
- [83] Yamamoto C, Ishida T, Osawa T, et al. Trends in Non-prescription Drug Recalls in Japan[J]. *Yakugaku Zasshi: Journal of the Pharmaceutical Society of Japan*, 2016, 136(9): 1307-1312.
- [84] Otieno G A, Maru S M, Ongarora D S B, et al. Comparative analysis of pharmaceutical product recall guidelines followed by East African regulatory authorities[J]. *East and Central African Journal of Pharmaceutical Sciences*, 2023, 26(1-3): 3-11.
- [85] 王磊, 胡子璇, 张嘉欣, 等. 政府奖惩机制下考虑学习效应的废弃电器电子产品回收演化博弈[J/OL]. *青岛大学学报(自然科学版)*, 1-11[2025-03-18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/37.1245.n.20250314.1629.006.html>.
- [86] 许礼刚, 刘荣福, 陈磊, 等. 基于前景理论的废旧动力电池非正规回收渠道研究[J]. *绿色矿冶*, 2024, 40(05): 7-14.

- [87]卢志平, 张赫. 基于演化博弈的动力电池正规回收与非正规回收研究[J]. 价值工程, 2023, 42(15): 40-42.
- [88]徐乐, 马永刚, 王小飞. 基于演化博弈的绿色技术创新环境政策选择研究: 政府行为 VS. 公众参与[J]. 中国管理科学, 2022, 30(3): 30-42.
- [89]刘树良, 李烁烁. “双碳”背景下共享储能电站经济性影响因素研究——基于系统动力学的分析[J]. 价格理论与实践, 2024, (06): 78-83+226.
- [90]陈国卫, 金家善, 耿俊豹. 系统动力学应用研究综述[J]. 控制工程, 2012, 19(06): 921-928.

附 录

附 录 1

各变量定义表

变量类型	变量名称	变量定义	单位
状态变量	L1:居民家中储备药品的数量	家中囤积的药品累积量	盒
	L2:居民家中废弃药品的数量	废弃药品累积量	盒
	L3:正规渠道回收废弃药品的数量	正规渠道回收废弃药品累积量	盒
	L4:非正规渠道回收废弃药品的数量	非正规渠道回收废弃药品累积量	盒
速率变量	R1:药品购买速率	居民每年购买药品数量	盒/年
	R2:药品废弃速率	居民每年废弃药品数量	盒/年
	R3:非正规渠道回收速率	非正规渠道每年回收废弃药品数量	盒/年
	R4:正规渠道回收速率	正规渠道每年回收废弃药品数量	盒/年
辅助变量	A1:每年每单位正规渠道回收的废弃药品的数量	每个正规回收点每年回收废弃药品累积量	盒/(年*单位)
	A2:每年每单位非正规渠道回收废弃药品的数量	每个非正规回收点每年回收废弃药品累积量	盒/(年*单位)
	A3:回收价格差额影响正规渠道回收废弃药品	每个正规回收点受回收价格差额影响废弃药品回收累积量	盒/(年*单位)
	A4:环保宣传费用与服务费用影响正规渠道回收	每个正规回收点受环保宣传与服务费用影响废弃药品回收累积量	盒/(年*单位)
	A5:服务总费用	回收废弃药品所投入的服务费用	元
	A6:环保宣传费用与服务费用影响非正规渠道回收	每个非正规回收点受环保宣传与服务费用影响废弃药品回收累积量	盒/(年*单位)

续表-各变量定义表

	A7:回收价格差额影响非正规渠道回收废弃药品	每个非正规回收点受价格差额影响废弃药品回收累积量	盒/(年*单位)
	A8:总环保宣传费用	投入的用于环保宣传累积费用	元
	A9:平滑数量	正规渠道进行废弃药品回收的数量的平滑量	盒
	A10:回收价格差额	非正规渠道回收价格与正规渠道回收价格差额	元
	A11:平均每单位废弃药品回收投入的服务费用	回收每单位废弃药品所投入的服务费用	元/盒
	A12:平均每单位废弃药品回收投入的环保宣传费用	回收每单位废弃药品所投入的环保宣传费用	元/盒
	A13:非正规渠道回收每单位废弃药品价格	非正规回收渠道回收每单位废弃药品愿意支付的价格	元
	A14:正规渠道回收每单位废弃药品价格	正规回收渠道回收每单位废弃药品愿意支付的价格	元
常量	C1:正规渠道数量	具有资格进行废弃药品回收的医院、药店、社区诊所等	单位
	C2:非正规渠道数量	不具备资格进行药品回收的个人或机构	单位
	C3:平滑时间	正规回收渠道从事废弃药品回收活动的時間间隔	年
	C4:每单位废弃药品回收价格	废弃药品回收价格根据药品的零售价格制定	元/盒
	C5:零售药品的平均保质期限	不同类型的药品在一定存储条件下能够保持质量的平均期限	年

附录 2

各变量方程设置表

变量	方程
L1	INTEG (R1-R2, 1336219.75)
L2	INTEG (R2-R3-R4, 953032)
L3	INTEG (R4, 9000)
L4	INTEG (R3, 226822)
R1	WITH LOOKUP (Time, ([(2017, 0)-(2037, 600000)], (2018, 401267), (2019, 417804), (2020, 442464))
R2	L1/C5
R3	C2*A2
R4	C1*A1
A1	A3+A4
A2	A6+A7
A3	WITH LOOKUP(A10, ([(0, 5)-(20, 25)], (1.3, 24.1), (2, 22.9), (3.7, 21.4), (5.2, 19.9), (6.7, 18.6), (7.9, 17.4), (8.7, 15.1), (9.8, 13.2), (11.5, 11.8), (14.9, 9.9), (15.6, 7.6), (17.8, 6.2), (19.2, 5.7))
A4	WITH LOOKUP (A5+A8, ([(80000, 5)-(500000, 25)], (80000, 5), (95000, 6.7), (110000, 8.1), (160000, 9.4), (250000, 12.8), (290000, 14.7), (340000, 16.5), (400000, 19.2), (430000, 22.6), (470000, 23.9), (490000, 24.6))
A5	A9*A11
A6	WITH LOOKUP (A5+A8, ([(80000, 5)-(500000, 25)], (87000, 24.7), (90000, 23.2), (110000, 21.1), (150000, 17.8), (19 0000, 17.1), (220000, 15.7), (280000, 11.8), (340000, 9.1), (410000, 8.6), (450000, 7.8), (490000, 6.12))
A7	WITH LOOKUP (A10, ([(0, 5)-(20, 25)], (1.2, 6.4), (2.6, 7.8), (4.1, 5.4), (6.1, 7), (8, 9.2), (10.8, 11.6), (12.4, 13.6), (15.5, 16.9), (17.1, 18.4), (18.9, 21.5), (19.6, 23.8))

续表-各变量方程设置表

A8	$A9 \cdot A12$
A9	SMOOTH (A1, C3)
A10	A13-A14
A11	$C4 + \text{RANDOM NORMAL}(0, 20, 10, 5, 5)$
A12	C4
A13	2
A14	1
C1	920
C2	1625
C3	10
C4	3
C5	2
INITIAL TIME	2017
FINAL TIME	2037
TIME STEP	1

攻读硕士学位期间发表或录用的学术论文与科研项目经历

已发表或录用的学术论文

- [1] 杨倩,刘长义,刘志,等.政府奖惩下家庭废弃药品回收演化博弈研究[J].宿州学院学报,2025,40(02):39-43.
- [2] Liu C Y, Yang Q, Liu Z, et al. The impact of government incentive strategies on household pharmaceutical waste recycling: A system dynamics approach[J]. Waste Management, 2025, 202: 114823.

参加项目情况

安徽省高等学校科学研究项目《基于多种群多策略动态协作的分布式装配绿色调度》(项目编号: 2023AH050932, 参与)

致 谢

这三年时间的学习让我成长了很多，我的成长离不开老师、同学和家人的鼓励与帮助。在毕业论文完成之际，我想在这里向一直陪我成长的各位表示由衷的感谢！

首先，感谢安徽工程大学给我这个学习的机会。其次，感谢我的导师刘长义教授。刘老师严谨的治学态度、正直豁达的处事风格都在潜移默化的影响着我，感谢您一直以来给予我的帮助。此外，我要感谢刘志老师、唐娟老师在学习上给予我的帮助，我还要感谢经管学院的各位老师，经管学院各位老师的言传身教，让我明白了学术诚信的重要性，也培养了我独立思考和解决问题的能力。这些品质将伴随我一生。

感谢我的家人，谢谢你们一直陪伴我、支持我、鼓励我，我才会有力量一直走下去。

这三年的时间，我有幸结识了课题组的师兄、师姐、师弟、师妹还有同门，有幸遇见经管研 22 的同学们，相遇即是有缘，在这里我想祝大家各自都能拥有美好的人生。

感谢所有帮助过我的人，未来不管在哪，我都会带着这份感激，继续前行。