

分类号	<u>F223</u>	密级	<u>公开</u>
UDC	<u>517.9</u>	学位论文编号	<u>D-10167-343-(2018)</u>

重庆邮电大学硕士学位论文

中文题目	<u>政府监管下冷链质量投入的</u> <u>演化博弈研究</u>
英文题目	<u>An Evolutionary Game Study on</u> <u>the Quality Investment of Cold Chain</u> <u>under Government Supervision</u>
学 号	<u>S150732017</u>
姓 名	<u>汪尔晶</u>
学位类别	<u>工程硕士</u>
学科专业	<u>物流工程</u>
指导教师	<u>李昌兵 教授</u>
完成日期	<u>2018 年 4 月 10 日</u>

独 创 性 声 明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的科研成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得重庆邮电大学或其他单位的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的人员对本文研究做出的贡献均已在论文中作了明确的说明并致以谢意。

作者签名：

日期： 年 月 日

学位论文版权使用授权书

本人完全了解重庆邮电大学有权保留、使用学位论文纸质版和电子版的规定，即学校有权向国家有关部门或机构送交论文，允许论文被查阅和借阅等。本人授权重庆邮电大学可以公布本学位论文的全部或部分内容，可编入有关数据库或信息系统进行检索、分析或评价，可以采用影印、缩印、扫描或拷贝等复制手段保存、汇编本学位论文。

（注：保密的学位论文在解密后适用本授权书。）

作者签名：

导师签名：

日期： 年 月 日

日期： 年 月 日

摘要

随着我国经济发展和物质水平的提高，人民对生鲜食品的要求已从数量的需求转化为对品质的追求，对低温储藏的冷藏药品需求不断加大，但近年来生鲜食品流通损耗严重、冷藏药品安全事件频发。针对此问题，冷链上节点企业应加强资源投入保障冷链质量。

本文采用演化博弈的方法研究冷链质量投入问题，构建了无政府参与下供应商与加工商冷链质量投入的演化博弈模型，并进行求解分析。分析结果显示：供应商与加工商的冷链质量投入策略选择与各自投入所带来的收益密切相关，当双方质量投入产出不断变化时，可以得到多种演化稳定策略。

在此基础上，针对冷链质量投入带来的“搭便车”问题，构建“惩罚与契约机制下”冷链上供应商和加工商的演化博弈模型，分析双方的行为策略，并进行模型仿真分析，定量的确定了政府惩罚的有效范围，同时减少政府监管成本。针对冷链上节点企业进行质量投入的收益小于成本问题，政府应采取补贴机制鼓励供应商和加工商进行冷链质量投入，先构建相同补贴额度机制下演化博弈模型，求解模型得到补贴力度的有效范围，并对模型进行仿真分析，考虑到现实中供应商和加工商运营状况不同，需要补贴的额度也不同，为得出更加合适的补贴力度，构建了不相同补贴下的演化博弈模型，求解模型分别得到对供应商和加工商的具体有效补贴范围。最后针对同类冷链节点企业内部间质量投入博弈问题，以供应商为例，为促使其进行冷链质量投入，对搭便车行为进行惩罚、质量投入行为进行补贴，构建了政府监管下供应商群体内部间的演化博弈模型，进行求解分析，并采取措施促使其进行质量投入，保障冷链上生鲜食品和冷藏药品的安全。为政府相关部门监管、食品和药品冷链节点企业的物流运作提供理论参考，为今后我国冷链物流的更快更好发展提供帮助。

关键词：冷链质量投入，演化博弈，生鲜食品，冷藏药品

Abstract

With the development of china's economy and the improvement of the material level, people's requirement for fresh food have changed from the demand of quantity to the pursuit of quality. The demand for cold-stored drugs at low temperature storage has been increasing. But in recent years, the circulation of fresh food has been seriously depleted. Cold-stored drug safety incidents are frequent. To address this issue, cold-chain-node enterprises should strengthen resource input to ensure the quality of the cold chain.

The method of evolutionary game is adopted to study the quality investment of cold chain, constructing an evolutionary game model of cold chain quality input of suppliers and processors under the participation of no government, and carrying out solution analysis. The analysis results show that the choice of cold chain quality investment strategies of suppliers and processors is closely related to the benefits of their respective inputs. When the quality inputs and outputs of the two parties are changing constantly, multiple evolutionary stability strategies can be obtained.

On this basis, aiming at the problem of “free-rider” brought about by the quality investment of cold chain, an evolutionary game model of suppliers and processors on the cold chain under “punishment and contract mechanism” is constructed to analyze the behavioral strategies of both parties and perform model simulation. Quantitatively determine the effective scope of the government's punishment, while reducing government supervision costs. For the benefits of quality investment for node companies on the cold chain are less than the cost, the government should adopt a subsidy mechanism to encourage suppliers and processors to invest in the quality of the cold chain. An evolutionary game model under the same subsidy quota mechanism is built, and the effective scope of the subsidy is obtained by solving the model, and the model is simulated and analyzed. Considering that in reality the operation status of suppliers and processors is different and the amount of subsidies required is also different. In order to arrive at a more appropriate subsidy, an evolutionary game model under different subsidies is constructed, to obtain specific and effective scope of subsidies for suppliers and processors respectively. Finally, aiming at the game of quality investment among similar cold-chain node enterprises, taking suppliers as an

example, in order to encourage them to invest in the quality of cold chain, it will punish the behavior of free-rider and the subsidize behavior of quality investment. Constructed the evolutionary game model between supplier group under the supervision of the government, and to solve the analysis. And measures are taken to promote its quality investment and ensure the safety of fresh food and refrigerated drugs on the cold chain. It provides a theoretical reference for the supervision of relevant government departments, and the logistics operation of food and pharmaceutical cold chain node enterprises, to provide help for the faster and better development of China's cold chain logistics in the future.

Keywords: Quality investment of cold chain, Evolutionary game, Fresh food, cold medicine

目录

摘要 I

Abstract III

第 1 章 绪论 1

 1.1 研究背景 1

 1.2 研究目的、意义、方法、创新之处 2

 1.2.1 研究目的 2

 1.2.2 研究意义 3

 1.2.3 研究方法 3

 1.2.4 创新之处 4

 1.3 主要内容安排及技术框架 4

 1.3.1 主要内容安排 4

 1.3.2 技术框架 5

 1.4 本章小结 6

第 2 章 相关理论概述及研究现状 7

 2.1 冷链物流相关概述及研究现状 7

 2.1.1 冷链物流 7

 2.1.2 食品冷链物流研究现状 8

 2.1.3 药品冷链物流研究现状 10

 2.2 演化博弈论相关概述及研究现状 11

 2.2.1 演化博弈论 11

 2.2.2 演化博弈论研究现状 12

 2.3 政府监管相关概述及研究现状 13

 2.3.1 政府监管 13

 2.3.2 政府监管研究现状 14

 2.4 研究现状小结 15

 2.5 本章小结 16

第 3 章 政府不监管下冷链质量投入的演化博弈研究 17

3.1 演化博弈模型的建立.....	17
3.2 演化博弈模型的求解.....	19
3.2.1 演化过程的平衡点.....	20
3.2.2 平衡点稳定性分析.....	21
3.2.3 演化结果分析.....	25
3.2.4 第四种情况下系统演化稳定均衡结果分析.....	28
3.3 本章小结.....	32
第4章 政府惩罚契约下冷链质量投入的演化博弈研究.....	33
4.1 惩罚契约下的模型建立.....	33
4.2 惩罚契约下的演化分析.....	34
4.3 数值仿真.....	37
4.4 本章小结.....	40
第5章 政府补贴机制下冷链质量投入的演化博弈研究.....	41
5.1 相同补贴额下的演化分析.....	41
5.1.1 模型的建立.....	41
5.1.2 模型的求解与分析.....	41
5.1.3 数值仿真.....	44
5.2 不相同补贴下的演化分析.....	48
5.2.1 模型的建立.....	48
5.2.2 模型的求解与分析.....	48
5.2.3 不同补贴额对演化稳定性影响分析.....	50
5.3 本章小结.....	51
第6章 政府监管下同类企业间冷链质量投入的演化博弈研究.....	53
6.1 演化博弈模型假设与建立.....	53
6.1.1 演化博弈模型的假设.....	53
6.1.2 演化博弈模型的建立.....	54
6.2 演化博弈模型的求解与分析.....	54
6.3 本章小结.....	56
第7章 研究结论与展望.....	57

7.1 主要研究结论	57
7.2 研究展望	58
参考文献	59
致谢	64
攻读硕士学位期间从事的科研工作及取得的成果	65

第1章 绪论

1.1 研究背景

随着我国经济的快速发展，人民生活物质水平和健康意识也相对提高了，对生鲜食品的需求也从数量的需求转变为对新鲜度、营养价值保存等质的追求，互联网快速发展促进了生鲜电子商务的快速发展，生鲜食品的需求大幅增长，推动了我国冷链物流行业的发展。根据《2018-2024年中国冷链物流产业园行业深度调研及投资前景分析报告》统计，从2011年到2017年，我国冷链物流行业规模一直稳步上升，2017年时达到约2000亿，此后发展速度将更快，预计2020年，冷链规模将达到4000亿元。随着我国医疗水平不断提高，人民对需要低温储藏的疫苗、血液制品、球蛋白等冷藏药品需求不断加大，冷藏药品在前一百种最畅销药品中所占比例已经达到45%。

但与发达国家相比，我国冷藏运输车数量比例低、冷库基础设施落后、信息管理技术水平相对落后，政府监管不到位，导致大量生鲜农产品、水产品等在运输、仓储过程中损耗严重。2016年山东5.7亿元毒疫苗事件发生的本质原因是未按专业要求冷藏疫苗，导致疫苗失活成为毒疫苗，引起人们对冷链物流中冷藏药品存储运输的重视，国务院总理李克强主持召开了国务院常务会议，对疫苗系列案件进行了重要批示，对相关责任人实施问责，并且修改了《疫苗流通和预防接种管理条例》，加强监管制度，投入资源保障冷链质量。

冷藏药品由于本身的特殊性，其生产、流通和零售都要在合适的低温下进行，对冷链也提出了更高要求，冷藏药品从生产到最终消费，包括了采购、存储、运输、销售和使用等一系列环节，任何一个环节出现疏漏都会导致严重的人体损害和社会危害。生鲜食品从产地到餐桌，涉及到原料的采购、预冷、运输、储存、加工及成品运输和陈列销售等环节，由于生鲜食品自身的易腐易变质特性，温度的升高会增加其变质的风险。每种类型的生鲜食品都有最低的安全储存温度，在合适温度下，生鲜食品的储存成本将大大降低^{[1]-[2]}。冷链上供应商对原材料预冷和冷藏是加工商获得质量好的原材料的基础保障，原材料好坏最终会影响到产品的安全度。冷链上加工商应对上游提供的原材料进行安全检测，完善加工方式，以

冷藏保鲜(cool)、清洁(clean)和小心(care)的3C原则为重要指标^[3],对产品的运输、储存等环节重要因素进行记录,是产品安全到达消费终端的重要保障。

由以上分析可以得到冷链上各个节点企业共同投入资源保护冷链质量,加强对冷链设备设施等硬件建设,加强射频识别等先进技术的使用对冷藏药品的储存和运输过程进行连续精确的温度监控,可以防止冷链发生断链,保障冷链上产品的安全。但冷链上的节点企业都是有限理性的经济人,当冷链质量投入收益小于成本或“搭便车”行为带来的收益时,需要政府介入通过合适措施进行调控,促使冷链上重要的节点企业进行资源投入,有效的保障冷链上生鲜食品和冷藏药品的质量,便于政府保护人民的健康安全,维护经济良性发展和社会的稳定。

1.2 研究目的、意义、方法、创新之处

1.2.1 研究目的

本文主要有如下的研究目的:

(1) 找到无外界干涉的条件下冷链节点企业均愿意采取冷链质量投入策略实现途径;

(2) 通过企业间签订惩罚契约和政府补贴,促使冷链上节点企业均采取冷链质量投入策略;

(3) 减少冷链各环节节点断链事故发生,确保整个冷链安全运行;

(4) 保证冷链上生鲜食品和冷藏药品质量。

从生产的源头开始,并对存储、运输、销售等环节进行冷链质量投入,确保冷链安全,降低冷链上生鲜食品和冷藏药品的损失量,提高冷链上产品的安全性,满足人们对安全生鲜产品及冷藏药品的需求,更好地保障人们的身体健康和生活品质。为政府相关部门、食品和药品冷链节点企业的物流运作提供参考,为我国生鲜食品和冷藏药品物流的今后发展提供帮助。

1.2.2 研究意义

(1) 理论意义

本文运用演化博弈理论对冷链质量投入问题展开研究，从政府监督和管理视角出发，针对通过“搭便车”获得额外收益的行为，构建企业间的惩罚契约模型，不投入资源保护冷链质量的一方将被惩罚，并且罚金交给投入资源的一方，以此来提高冷链上相关企业互相监督的积极性，提高冷链上企业选择冷链质量投入策略的概率。当冷链质量投入所获得收益小于投入成本时，构建补贴机制下的演化博弈模型，求解模型并进行相关仿真分析定量的确定了补贴力度的有效范围，为冷链质量安全保障理论方面的研究做出了有益补充。

(2) 现实意义

在中国，冷链体系尚不完整，目前完善和具体可实施的冷链物流标准尚未建立起来，冷链标准的缺失一定程度上也制约了冷链物流技术和管理水平的提高，因此需要政府和冷链节点企业共同努力，合理的政府惩罚和激励政策是冷链顺利发展的重要条件。本文建立了政府监管下冷链质量投入的演化均衡模型，引入契约和惩罚机制，减少冷链节点企业“搭便车”行为，引入补贴策略激励冷链节点企业进行质量投入，维护企业利益的同时，有效的保障了冷链上食品和药品的安全，便于政府保护人民的安全健康，维护经济的发展和社会的稳定。

1.2.3 研究方法

(1) 文献分析法：通过对国内外有关冷链物流文献资料收集和研究分析，了解我国冷链的发展现状和研究现状，总结出目前还存在的问题，明确选题背景与意义。对演化博弈理论在食品安全、政府监管、质量投入等领域的运用进行分析和总结，归纳了当前研究的侧重点和局限性，为全文的研究内容和思路奠定基础。

(2) 演化博弈理论方法：演化博弈论假设博弈主体是不完全理性的，认为博弈主体间可以通过观察、思考对方行为等方式实现动态平衡，现实中，冷链上的相关主体都是有限理性经济人，使用演化博弈更符合实际情况，弥补了传统博弈中的许多缺陷，通过设定条件假设和参数，分别构建不同情况下的演化博弈模型，对相应的模型进行求解，分析演化结果，提出相关建议。

(3) 数值仿真：采用数值模拟对所建模型加以验证及仿真。

1.2.4 创新之处

本文主要有如下的创新之处：

(1) 针对冷链质量投入中存在的“搭便车”问题，构建“惩罚契约机制下”冷链上供应商和加工商的演化博弈模型，分析双方的行为策略，定量地确定了政府惩罚的有效范围；

(2) 针对投入收益小于投入成本问题，构建“补贴机制下”双方的演化博弈模型，确定补贴力度的有效范围；为得出更加一般性结论，还构建了不同补贴额度机制下的演化博弈模型，并进行求解分析；

(3) 针对同类冷链节点企业内部间的冷链质量投入博弈问题，以供应商为例，对选择资源投入的供应商进行补贴，对不选择资源投入的供应商进行惩罚，分析模型得出结论，并据此提出建议。

1.3 主要内容安排及技术框架

1.3.1 主要内容安排

第一章主要说明研究背景。分别从生鲜食品和冷藏药品两个角度分析进行冷链质量投入的必要性，接着点明本文的研究目的、理论及现实意义，然后给出本文的研究方法与技术框架。

第二章论述相关理论基础及研究现状。对冷链物流概念、演化博弈理论、复制动态方程组及政府监管都作了理论介绍，在现有文献资料的基础上，分析生鲜食品和药品冷链的研究现状与存在的问题，接着分析演化博弈方法在供应链、政府监管、质量投入等方面相关运用现状，为本文研究开展打好基础。

第三章构建政府不监管下冷链上供应商和加工商间质量投入的演化博弈模型，运用复制动态方程求解出演化博弈的平衡点，并判断平衡点稳定性，得到五种情况下系统的演化结果，分析供应商和加工商策略选择与冷链质量投入产出比间的关系。

第四章为针对供应商或加工商不进行冷链质量投入，采取“搭便车”获取额外收益的行为，构建了惩罚契约下的演化博弈模型，求解模型得到具体惩罚额度，并对模型进行数值仿真分析。

第五章为针对冷链上节点企业进行质量投入的收益小于成本的情况，政府应采取补贴机制鼓励供应商和加工商进行冷链质量投入，首先构建相同补贴额度机制下演化博弈模型，求解模型得到具体补贴额度，并对模型进行仿真分析。考虑到现实中供应商和加工商运营状况不同，需要补贴的额度也不同，为了得出更加合适的补贴额度，构建了不相同补贴下的演化博弈模型，求解模型分别得到对供应商和加工商的具体有效补贴额。

第六章为针对同类冷链节点企业内部间质量投入博弈问题，以供应商为例，为促使其进行冷链质量投入，对搭便车行为进行惩罚、质量投入行为补贴，构建了政府监管下供应商群体内部间的演化博弈模型，并进行求解分析。

第七章主要是总结全文，对前文得到的基本结论进行梳理，并提出相关建议，再次点明本文研究意义及未来展望。

1.3.2 技术框架

在现有文献资料的基础上，首先分析了冷链物流快速发展及其背后存在的问题，了解本文的研究背景，明确选题目的和意义，接着介绍了冷链物流、演化博弈论和政府监管相关概念，及其在相关领域的运用和发展；其次针对“搭便车”行为及质量投入受益小于成本这两种情况，分别设计了惩罚契约和补贴机制两种演化博弈模型，并对模型进行求解分析。最后还设计了同类节点企业内部间冷链质量投入的博弈模型，并进行求解分析。

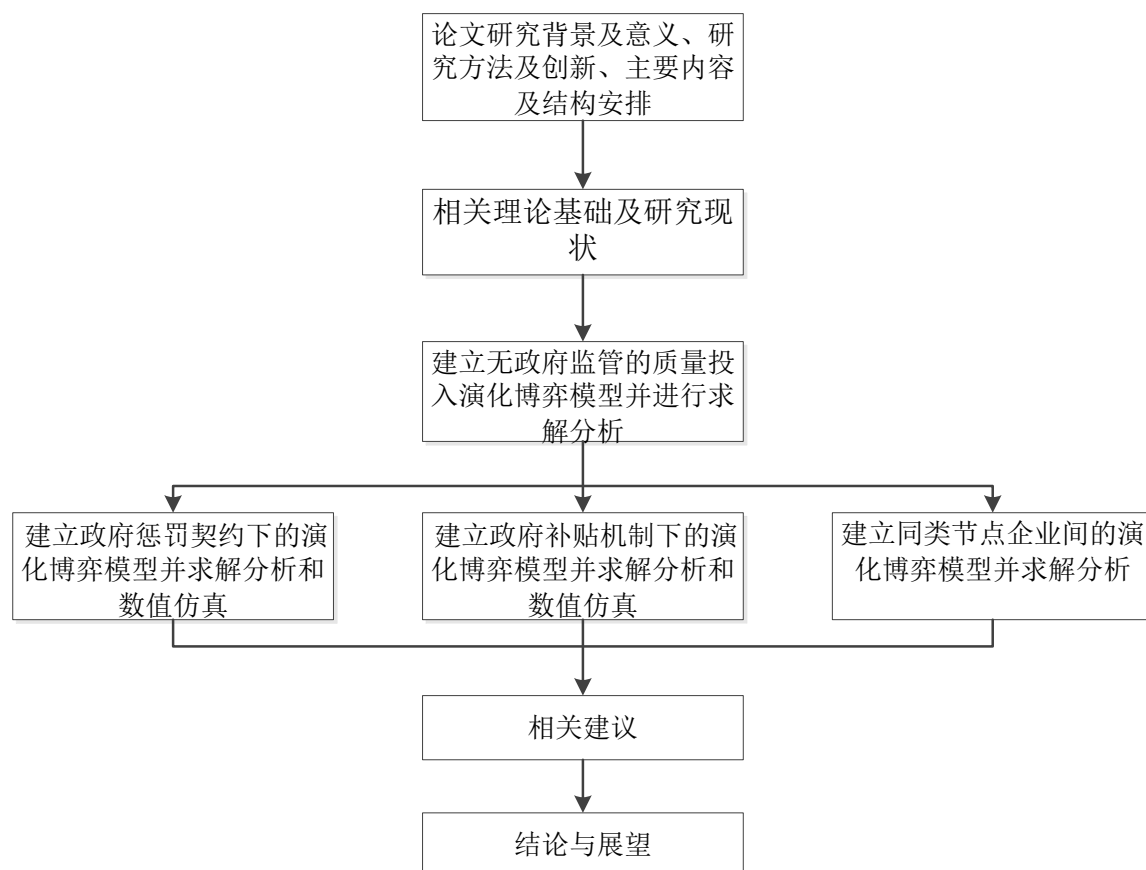


图 1.1 论文技术框架

1.4 本章小结

本章首先介绍了研究背景，针对我国冷链流通中产品损耗严重、安全事情频发的现状，分析了进行冷链质量投入的必要性，总结了本文研究目的、理论及现实意义，接着介绍了研究方法和创新之处。最后，为了便于清晰了解论文主要结构、内容和研究思路，给出了本文的主要内容的章节安排和技术框架。

第2章 相关理论概述及研究现状

2.1 冷链物流相关概述及研究现状

2.1.1 冷链物流

冷链物流是指冷藏冷冻类物品在生产、储存、运输、再加工以及销售的每一个环节始终保持在规定低温环境下，以保证产品质量和性能，减少损耗的一项系统工程^{[4]-[5]}。冷链物流的一个核心要求就是保持需要冷藏或冷冻类产品分别在相应的低温的环境下，因此冷链物流的每个环节都要有配套的设施设备来保障产品，在存储环节，长期存储要有相应的冷库、冷藏箱，运输环节中要有专门的冷藏冷冻运输车，销售时有专门的冷藏陈列柜，保障冷链任何一个环节都在低温环境下，防止冷链发生断链影响产品的质量。

目前冷链使用范围主要有初级生鲜产品、加工食品以及需冷藏药品等。生鲜产品的冷链质量投入的目的是减少产品损耗，保证产品质量，从而保障消费者安全。冷藏药品是指用于治理、预防疾病的并需要在一定温度下冷藏保存的药品，冻干粉针剂、生物制品、血液制品、疫苗等都属于冷藏药品范畴^[6]。与生鲜食品对冷链的硬件标准和流通过程信息管理要求相比，冷藏药品的要求更高，不合适的温度会导致药物的化学性质发生改变，降低冷藏药品原有疗效功能，甚至使疫苗一类的冷藏药品成为毒药品，危害到人类的健康。冷藏药品的验收、存储、拆零、装箱、发货等作业活动应当在冷库内完成。冷链对于保证冷藏药品质量、保障用药安全至关重要。冷藏药品需要以低温的方式保管与运输，不同冷藏药品需要的温度条件也是各异的，高温会导致疫苗失效，甚至成为毒疫苗，在温度零下时，又会造成疫苗意外的冻结，对冷藏药品储存和运输过程进行连续温度检测，是一个有效的预防措施^[7]。

从冷链物流行业整体规模和增长速度两个角度看，生鲜食品一直以来都是重要主体，并且随着物质生活水平和冷链物流成熟度的提高，人们对生鲜食品的需求量增加速度也在逐渐大幅提升。冷藏类药品的增长同样不容被忽略和轻视，目前冷藏药品所占比例不大，但其所占权重与价值相对较大，现在已采用冷链物流

的医药类产品主要有疫苗、血液制品和胰岛素等，未来诊断试剂市场将会进一步放开，近年来的冷藏药品事件发生，已引起人们对冷藏药品物流的重视，政府对冷藏药品的生产流通监管力度不断加大和完善，严格审查企业基础设施设备、技术水平是否符合相关规定，医药产品在冷链流通运输中的占比将持续稳步上升，因此从长期来看冷藏药品发展潜力大，值得重视。因此，接下来将主要从生鲜食品和冷藏药品两个方面来体现冷链物流的发展现状与研究现状。

2.1.2 食品冷链物流研究现状

为了提高冷链物流质量水平，保障冷链上生鲜食品质量安全，首先要分析和总结国内外有关于冷链物流的研究，了解生鲜食品冷链的发展过程，发现冷链物流特性和发展过程存在的问题，总结相关研究给出的解决措施及不足。欧美等国外发达国家对运用冷链保障生鲜食品的安全流通相对较早，关于冷链的标准、运用范围等方面的研究也相对系统完善和领先。S. Amir 等认为供应链管理（SCM）对有保质期限限制的以及需要特殊储存和配送的设备、设施的生鲜食品重视度不够，为此冷链管理（CCM）的概念应运而生^[8]。J. Rohit 等基于方法论德尔菲方法，通过构建一个基准框架，将整个冷链研究的基准结构划分成三个阶段，来评估冷链发展的状况^[9]。E. M. Yahia 通过分析中国、印度、巴西等发展中国家冷链能力的增长率，认为冷链是发展中国家能快速发展的有力保障之一^[10]。但是发展中国家易腐农产品冷链仍存在基础设施建设与应用不够，冷链相关人才缺乏及投资回报率较低等问题。C.W. Shih^[11]等提出了一种以时间和温度为指示器的冷链系统，利用无线传感器采集温度数据并以关键节点为基础制定整个流通过程的标准。S. G. Gwanpua^[12]等从冷链食品质量、能源使用和全球变暖影响是评估冷链可持续性的三个关键方面，并提出一个专门用于优化冷冻食品的质量，能源使用和制冷技术的全球变暖影响的 FRISBEE 工具。E. Gogou^[13]等基于冷链数据库（CCD）的冷链预测（CCP）软件计算不同冷链阶段的产品货架期状态，运用真实的冷链数据进行仿真，有助于有效的冷链改进和管理，为消费者提供新鲜度和安全性高的食品。S. Mercier^[14]等为改善全球范围内的冷链质量，提出了关于预冷均匀性、响应性食品库存管理系统和发展中国家冷链的前瞻性实验和模拟研究。

我国冷链物流发展还处于初级阶段,但随着经济持续发展,物质水平的提高,人们对生鲜食品需求的增大,冷链物流的发展速度不断提升,与之对应的冷链物流研究也不断增多,主要包括冷链信息化建设、冷链基础设施建设、冷链运营等。李洁针对农产品冷链管理初级阶段存在运作效率差,管理水平落后等问题,提出将新兴技术物联网与供应链管理相结合,并对物联网技术在农产品冷链物流中的应用提出了相关建议^[15]。为了实现对生鲜的食品质量进行追踪溯源,保障生鲜食品安全有品质的到达消费者端。马婷等提出了基于物联网技术的物流解决方案,通过结合无线射频识别技术和无线传感网络技术,构建了一个冷链物流跟踪及追溯系统^[16]。张琳芳对我国冷链物流现状进行了分析,并将物流网技术运用到冷链物流系统的建设每个环节当中去,加速了我国冷链物流系统的发展^[17]。汪旭晖等从政府监管部门、冷链相关企业和消费者的功能需求出发,构建了包含多个物联网系统和信息平台在内的生鲜农产品冷链物流体系框架,并从生鲜农产品冷链物流过程视角分析了该体系的运行机理^[18]。生鲜食品自身具有易腐易变质的特性,当生鲜食品周围环境温度升高时,生鲜食品的在流通过程中的损耗会加剧,质量安全也下降。因此构建以无线射频识别等技术为核心的冷链信息管理系统,实现对生鲜食品所处冷链的全过程进行精准持续检测,并进行智能的温度调节,有利于保障冷链安全运营,减少冷链“断链”现象的发生,使冷链上生鲜食品安全到达消费手中。通过对中国冷链的现状的综述, Hongxia Zhao^[19] 等认为冷链设施不完善是中国食品损耗的主要原因,应加大资源投入保护冷链质量,并介绍了制冷剂 R22 和 R141b 在冷链中消耗的配额。根据生鲜农产品冷链物流的“断链”点和“断链”内涵分析,总结“断链”的成因,杨路明等^[20]提出规避“断链”的途径。熊峰等构建两种供应链组织模式下的利润模型,确定合适冷链设施补贴模式提升农产品生鲜度、农户盈利水平及供应链关系契约的稳定性^[21]。为优化生鲜食品配送的运营组织模式,伍景琼等对当前生鲜食品配送相关研究进展进行深入分析与系统评述^[22]。YuChu Li 等^[23]构建了基于能量守恒定律的导热模型,非常精确地估计出基本的设计参数,大大降低新冷库物流系统的设计和开发成本。王淑云等研究了需求率为时变函数、产品价格既定、系统利润最大情况下,供应链上各成员的最佳订购策略,并提出了利润的分配机制,确保一体化决策的有效实施^[24]。唐

润等建立单个供应商和零售商之间的收益共享契约模型,并求解出最优保鲜温度对应的契约参数取值,在保证生鲜农产品质量的同时实现供应链效用的改进^[25]。

由此可看出,国内外学者运用定性及定量的方法对食品冷链进行了研究,主要体现在以下三个方面:

- (1) 冷链信息化建设,加强物联网等先进信息技术应用。
- (2) 冷链基础设施建设,设备完善。
- (3) 冷链的流通运营。

2.1.3 药品冷链物流研究现状

药品安全与否直接关系到人民的健康安全、经济的良性发展和社会的稳定。随着生活水平与健康意识的提高,人民对一些疾病的预防更加重视,进而对疫苗、血液制品等冷藏药品需求也增大,但有关冷藏药品安全问题在我国却频频发生,其中一个重要安全隐患就出在冷藏药品流通过程中,冷藏药品在存储、包装、运输配送等环节都有严格温度要求,一旦任意环节出现差错就会导致药品安全问题,所以冷链对于保证冷藏药品质量、保障用药安全至关重要。

目前有关药品冷链物流研究的文献大多从定性角度展开,主要集中在药品冷链物流现状、问题及对策。钟秀英从预防、诊断、治疗三类冷藏药品出发分析现有问题原因,并提出相应策略^[26]。师绘敏指出医药冷链物流存在相关企业投入不足、规范标准缺失、监管体系落实不到位、信息化程度滞后等问题,并针对问题提出现代药品冷链物流的发展战略^[27]。R. Hatchett^[28]详述了药品冰箱的功能和医疗保健从业人员所需的检查,概述了相关冷藏药物制冷程序,来确保药品保持安全存放并保持其有效性。冷藏药品市场需求快速增加,推动了药品冷链物流体系的建设,赵贤将我国药品冷链物流体系与美国的对比,找出目前体系不足,并提出建议^[29]。蒋思维指出药品冷链是以保证易变质药品品质为目的,以保持低温环境为核心要求的供应链系统,其运作始终和能耗成本相关联的,但冷链缺乏上下游的整体规划和协调^[30]。冷藏药品的运输和存储管理不当会造成虚假药品的声誉,损害人民健康,影响制药部门利益和发展,对此,M. Subzwari^[31]等明确了不同冷藏药品在流通过程中所需温度,并对销售端提出更高要求。S. Ringo^[32]等开展了一项评估药物冷链储存符合世界卫生组织公共卫生设施要求的研究,确定了资源投入和应急

计划的缺少是冷藏药品安全流通面临的主要挑战。雍佳松等^[33]针对冷链体系中“冷冻过度”和“中药冷链”不受重视等问题，从企业和政府两方面共同投入资源和加强人员培训角度，为我国医药冷链体系的发展与规范提供建议。N. Markmann^[34]认为靶向治疗和专业药物商业化带动了冷藏药品的发展，对冷链温度控制提出更高要求，传统的冷链（2-8℃的范围）不足以满足所有产品的需要。舒彤在现有配送中心选址一库存模型基础上，结合医药冷链行业特点，建立了医药冷链配送中心选址一库存模型，并采用遗传算法求解模型，确定最优选址、配送及库存方案^[35]。2016年“山东疫苗事件”显示了药品冷链物流之重，药品冷链规范化已经成为一项刻不容缓需要解决的问题。颜晓乐、杨芸从“疫苗”事件分析我国药品冷链物流还存在冷链体系不健全、硬件设施落后等问题，提出要促进药品冷链物流发展，需要加强政府宏观调控力度，加强我国药品冷链的基础设施建设和技术创新^{[36]-[37]}。

目前冷藏药品的相关研究大都从完善标准体系方面提出对策，定性描述要完善基础设施建设等方面，但在如何完善方面缺少定量的分析，缺少相关方法和模型仿真支持。

2.2 演化博弈论相关概述及研究现状

2.2.1 演化博弈论

演化博弈论假设参与主体是有限理性的，对信息要求不是完全的，从系统动态角度研究对象，观察影响群体策略选择的因素。主要涉及演化稳定策略和复制动态两个重要内容，Fisher, Hamilton, 和 T five 等学者在演化博弈理论形成的过程中都做过相关的重要贡献，纳什对有关演化博弈的论述想法系统地进行了相关分析研究，提出了“群体行为解释”。但是演化博弈理论重要的内容之一，演化稳定策略这个重要的概念，是 Smith 和 Price 在 1973 年首次提出，演化稳定策略将人们从传统博弈的局限中解放出来，对演化博弈的发展及在不同领域中运用发挥了至关重要的作用。Taylor 和 Jonker 于 1978 年提出的复制动态方程在演化博弈中运用最广泛，复制者动态方程可以体现群体行为系统动态的收敛过程，弥补了演化稳定策略不能够体现策略选择演化过程的不足。演化博弈主要研究的是群体

演化的动态过程，最初主要用在生物领域，群体主体之间主要进化力量来自选择和变异，不断改变和模仿，以此获得最高的适应度，解释生物进化过程中习惯及特征改变的原因。后来经济学家把演化博弈论运用到经济学中，主要是构建演化博弈模型，分析系统动态演化过程，研究博弈主体的策略选择。从实际运用角度来看，演化博弈理论假设博弈主体不是完全理性的，博弈主体得到的最优策略是在不断调整中得到的，此外还可以通过构建多群体的演化博弈模型，来研究非同质群体间的博弈行为，能便于更加精确地观察博弈过程中各因素对策略选择的影响，为相关措施的制定提供理论基础。

传统博弈要求博弈主体是完全理性的，并且其平衡点求解过程一般来说是静态的，但现实生活中，博弈主体是有限理性的，是在相互学习、适应的过程中对外部刺激做出回应的，双方获取的信息也不是完全对称的，因此最优决策是在互相不断博弈和调整中得到的。对比可得，演化博弈论是在传统博弈上的进一步发展，通过对演化过程分析能进一步让人们清晰得到策略选择的演化路径，使得演化博弈的结论更有说服力，更贴近生活。

2.2.2 演化博弈论研究现状

在共同行动中，一方不做贡献却能分享另一方投入成本创造的正外部性，这种现象就被称为搭便车或搭便车行为^[38]。冷链质量投入具有外部正效应，给冷链上的行为主体提供了很强的“搭便车”动机^[39]。演化博弈论以有限理性的博弈作为分析框架，认为参与者之间是可以互相学习、观察等行为实现动态的平衡，弥补了传统博弈的许多不足，更能代表现实中博弈者的策略选择。

良好的合作机制是推进行业发展的重要保证，强化合作者之间的伙伴关系，一般可以用演化博弈理论分析博弈双方的行为演变趋势，找到合作和不合作两种决策过程的影响因素，再采取相应的措施。T. Feng 等运用演化博弈方法建立供应生产者之间的合作机制模式，并基于惩罚和激励机制提出相关措施^[40]。杜军等运用演化博弈论的方法，建立了由制造商群体与零售商群体组成的两级供应链中企业合作广告的博弈模型，研究了合作广告机制及合作中的监督惩罚机制并分析了其中的主要影响因素，并验证了惩罚机制的有效性^[41]。李美苓等建立了食品供应商与第三方电子商务平台关于企业社会责任的博弈模型，根据实际情况做了相应

的参数设置和变量假设并进行了演化结果分析^[42]。张国兴等建立了制造商和零售商合作机制的演化博弈模型,动态地分析了供应链协调成本和收益对系统演化路径的影响,为促使供应链成员采取合作策略,进一步地分析了政府的补贴策略和惩罚策略对演化结果的影响^[43]。许利民等(2012)提出解决食品安全问题的根本解决方法就是对供应链进行质量投入,建立供应商与制造商食品质量投入的演化博弈模型,并进行求解分析^[44]。刘子昂等(2016)以食品供应链上各个主体为博弈对象,针对质量投入、检查成本以及最终收益进行博弈分析,并求得质量投入带来不同效益变化时的多种博弈均衡解^[45]。张彦楠^[46] 许芳芳^[47]吴晶妹^[48]等将演化博弈论用于食品供应链中的研究,主要探讨的是食品安全监管和治理问题。于淼构建了一个由制造商与零售商同时回收废旧电子产品的闭环供应链模型,运用演化博弈分析新产品与再制品差别定价销售行为的市场运营模式^[49]。霍良安等运用演化博弈理论探讨不同制造商之间博弈关系,得到闭环供应链的总成本最小的动态演化最优策略,并验证了最优策略的有效性^[50]。

目前,将演化博弈论用于供应链中的文献研究颇多,但主要探讨的是供应链渠道协调和合作机制分析、特定类型供应链的研究及食品安全监管和治理问题。近年来,政府为保护人民的饮食健康,越来越重视与鼓励冷链上重要节点企业投入资源保护冷链质量,但鲜有文献在政府监管的视角下运用演化博弈理论研究冷链质量投入问题。

2.3 政府监管相关概述及研究现状

2.3.1 政府监管

政府监管,学术界一般称之为政府规制或管制,是市场经济条件下政府为实现某些公共政策目标,对微观经济主体进行的规范与制约,对涉及国家人民健康、生命安全、可持续发展等进行监督、管理来实现。目前我国相关推荐性冷链标准已超过二百多项,但很多都是在试点宣传进行,真正被企业落实执行的相对较少,而政府对冷链标准监管也相对缺乏,欧洲发达国家已对冷链相关设备设施进行了严格详细规定,冷链流通标准已上升到法律层面,一旦违反将被严格惩处。除了经济发展原因,本质还是政府及人民冷链意识薄弱,对冷链重视度不够,只重视

生产环节，而对冷藏品的流通等环节却相对不够重视，直到山西毒疫苗、江西博雅免疫蛋白等冷链安全事件发生，才引起人们对冷链物流中冷藏药品存储运输的重视。

冷链的运营过程中存在大量的信息不对称，且冷链上的各节点企业又都是有限理性的经济人，当企业投入资源保护冷链质量获得的收益小于成本，或通过“搭便车”行为获得收益大于投入资源所获得的收益，那么企业没有动机去投入资源，进而影响冷链上生鲜食品及冷藏药品的质量安全。这时需要政府参与干涉，通过相关宏观调控政策引导冷链上的节点企业进行冷链质量投入，从根本上确保生鲜食品和药品的质量安全，保障人民的健康安全、促进社会的和谐稳定发展。目前，政府已重视此问题，着力构建从生产到消费、从田间到餐桌的全过程监管体系^[51]。政府监管，不仅要体现在监督，更要注重管理规制，政府应制定和完善冷链物流行业标准，提高相关利益主体的冷链物流意识，引导冷链节点企业进行冷库基础设施的建设，完善信息管理系统实现对冷链产品全程运营的监控，保障冷链产品安全地从生产端到达消费端。

2.3.2 政府监管研究现状

目前，政府监管已涉及到科技资源共享、生态环境和食品安全等领域，一般来说政府监管运用于公共产品或服务领域比较多，公共产品或服务的特有属性，导致“搭便车”行为常有发生，而目前研究群体间博弈的主要方法是演化博弈，因此现在很多文献研究都是将政府监管和演化博弈结合起来，通过建立相关问题的演化博弈模型，求解分析模型得到相关结论，并提出解决相关问题的建议。

戚湧等建立了政府监管与科技资源共享群体之间的演化博弈模型，对演化博弈结果进行了探讨，并提出了相关建议^[52]。巫强等研究了政府研发补贴方式对战略性新兴产业创新产生的不同影响，提出比率补贴在原始创新方面比定额补贴更有效^[53]。近年来温室气体排放导致全球变暖，进而带来的相关环境问题，已是最重要和最具挑战性的一个问题了，政府在这场危机处理中扮演重要的角色，可以通过实施相关措施激励或约束相关主体的污染环境行为，小到农村秸秆焚烧，大到工业污染。曹海旺等在分析政府激励的重要性后，构建了政府激励下秸秆发电供应链上发电厂与中间商之间演化博弈模型，并以某地区秸秆发电供应为例，验

证模型的正确性^[54]。政府在调控发电厂与中间商合作关系时，以相关研究成果为决策理论基础，合理运用秸秆，不仅避免了焚烧秸秆带来环境污染，还促进了电行业发展。R. Mahmoudi^[55]等运用演化博弈方法构建不同情况下政府目标和生产者目标之间对比的模型，帮助政府确定对生产者征收最优的关税，在最小化影响环境基础上实现可持续发展。伍晓茜等运用演化博弈的基本原理分析了政府补贴机制下逆向供应链中制造商与回收商合作的充要条件，并就政府如何加强两者的合作提出了相关政策建议^[56]。为促使农产品供应商进行质量投入，高阔建立了供应商之间的非对称演化博弈，并通过供应商之间的行为策略演化路径来反推政府补贴力度及惩罚力度^[57]。当政府补贴能弥补农产品质量安全投入收益与成本之间的差额，供应商就会有动机去投入资源保护农产品质量。于涛和刘长玉构建了政府与第三方的演化博弈模型，用 Matlab 软件仿真演示了不同参数变化时模型的演化均衡策略，并提出了政府保障第三方履行职责的措施^[58]。Yanli Zhang^[59]等构建了基于 Stackelberg 博弈论的绿色供应链决策模型，并考虑了政府监管下双渠道绿色供应链决策模型，研究表明当政府设定绿色阈值较低时，由零售商承担研发成本，当设定的绿色阈值较高时，由制造商承担研发成本，这样有利于整体供应链盈利。

由以上研究可以看出，企业都是有限理性的经济人，其行为都与各自的利益密切相关，“搭便车”行为带来的收益将决定企业的策略采取，但为了让企业采取合作、投入资源等积极策略，需要政府介入来保障积极策略被实施。以保护冷链质量为例，如果企业的“搭便车”行为带来的收益大于企业自身进行冷链质量投入所获得的收益，或者冷链质量投入带来的收益小于成本，那么该企业有可能选择不进行冷链质量投入。此时只有借助政府的宏观调控措施促使冷链节点企业进行冷链质量投入，才能从根本上保障生鲜食品和药品的质量安全，保障人民的安全健康、促进社会的和谐稳定发展。

2.4 研究现状小结

通过系统地梳理和总结冷链物流研究的相关文献，可以知道冷链对生鲜食品、冷藏药品质量安全保障至关重要，但我国冷链发展方面存在基础设施薄弱、冷链安全标准化建设滞后和政府监管体制混乱等问题，目前冷链相关研究大都从完善标准体系方面提出对策，定性描述要完善基础设施建设等方面，但在如何完善方

面缺少定量分析，缺少相关方法和模型仿真支持。将演化博弈论用于供应链中的文献研究颇多，但主要探讨的是供应链渠道协调和合作机制分析、特定类型供应链研究及食品安全监管问题，鲜有文献在政府监管的视角下运用演化博弈理论研究冷链质量投入问题。本文以政府监管为视角，在已有研究基础上，运用演化博弈方法研究供应商和加工商之间的冷链质量投入问题，分析双方的行为策略，接着分析政府监管下的演化结果，并进行数值仿真，来支持结论的正确性，为政府监管提出相关政策建议。

2.5 本章小结

本章主要介绍了三个方面的相关理论概述和研究现状，为后文研究展开提供理论依据和支撑。第一个方面介绍冷链概念和应用范围，通过相关文献研究分析冷链的发展现状和研究现状。第二方面主要介绍了演化博弈论的内容概念，演化博弈论在现实运用中相比于传统博弈存在的优越性，在供应链中应用的范围及解决的问题。第三方面主要介绍了政府监管内涵、应用领域及研究现状。

第3章 政府不监管下冷链质量投入的演化博弈研究

本文将冷链上节点企业为保护冷链质量而进行资源投入的行为称作“冷链质量投入”，比如供应商根据需求建设冷库基础等设施，对原材料进行预冷与冷藏，为加工商提供安全高质量的原材料，加工商对原材料进行安全检测，高标准加工产品，引进先进冷藏运输车，完善信息管理系统等，保障产品安全到达消费端。冷链上产品质量的提升，一定程度上会提高产品销量和价格，给整个冷链上的节点企业带来额外的收益，因此冷链质量投入具体有“外正部效应”，即一方进行冷链质量投入而另外一方什么都没做却能获得额外收益，此时冷链节点企业间会产生博弈的行为，针对此情况，首先建立无政府参与情况下冷链节点企业关于投入资源保障冷链质量的演化博弈模型，计算求解演化模型，并对结果进行分析得到企业策略选择与各自冷链质量投入所带来收益之间的关系，找到企业愿意进行冷链质量投入的情况和存在的问题。

3.1 演化博弈模型的建立

冷链上生鲜食品与冷藏药品的安全隐患存在于冷链的各个环节，但涉及到问题主要还是集中于冷链最重要的两个环节，即供冷链上游的供应商和处于核心位置的加工商，供应商和加工商均有进行冷链质量投入和不进行冷链质量投入两种策略可供选择。

此时，相关假设如下：

① 当冷链上供应商和加工商均不投入资源保护冷链质量时，冷链产品需求量为 q ，供应商提供每单位冷链产品原材料需要花费成本 C_s ，以每单位 P_s 价格销售冷链产品，且 $P_s > C_s$ ；加工商生产每单位冷链产成品需要花费成本 C_m ，以每单位 P_m 价格销售冷链产成品，且 $P_m > C_m + P_s$ 。此时，冷链上供应商通过销售产品原材料获得的收益是 $R_s = (P_s - C_s)q$ ，加工商通过销售产成品获得的收益是 $R_m = (P_m - P_s - C_m)q$ ，其中 $R_s > 0$ ， $R_m > 0$ 。

② 当冷链上供应商和加工商均投入资源保护冷链质量时，冷链产品在流通过程中的损耗量将减少，同时，随着产品品质得到保障，产品的需求量也会变大。

产品减少的损耗量和需求增加的量之和，就是通过冷链质量投入策略所获得的增加收益，用 $\alpha \in (0, 1)$ 表示冷链上供应商选择冷链质量投入策略获得的收益增加率，用 $\beta \in (0, 1)$ 表示冷链上加工商选择冷链质量投入策略获得的收益增加率， T_1 、 T_2 分别是供应商和加工商进行冷链质量投入所花费的成本，且 $T_1 > 0$ ， $T_2 > 0$ 。此时，冷链上供应商通过销售产品原材料获得的收益是 $\pi_{s0} = (P_s - C_s)(q + \alpha q) - T_1$ ，加工商通过销售产成品获得的收益是 $\pi_{m0} = (P_m - P_s - C_m)(q + \beta q) - T_2$ 。

③ 当冷链上供应商投入资源保护冷链质量，而加工商不投入资源保护冷链质量时，供应商选择冷链质量投入策略带来的增加收益是 αq ，进行冷链质量投入耗费的成本是 T_1 ，那么供应商通过销售产品原材料获得的收益是 $\pi_{s0} = (P_s - C_s)(q + \alpha q) - T_1$ 。此时，加工商虽然没有投入资源冷链质量，却通过供应商的冷链质量投入获得了额外增加收益，设加工商获得的额外收益增加率为 $\eta \in (0, \alpha)$ ，那么加工商通过销售产成品获得的收益是 $\pi_{m1} = (P_m - P_s - C_m)(q + \eta q)$ 。

④ 当冷链上加工商投入资源保护冷链质量，而供应商不投入资源保护冷链质量时，加工商选择冷链质量投入策略带来的增加收益是 βq ，进行冷链质量投入耗费的成本是 T_2 ，那么加工商通过销售产成品获得的收益是 $\pi_{m0} = (P_m - P_s - C_m)(q + \beta q) - T_2$ 。与此同时，供应商虽然没有投入资源冷链质量，却通过加工商的冷链质量投入获得了额外增加收益，设供应商获得的额外收益增加率为 $\lambda \in (0, \beta)$ ，那么供应商通过销售产成品获得的收益是 $\pi_{m1} = (P_m - P_s - C_m)(q + \eta q)$ 。此时供应商和加工商进行冷链质量投入的收益矩阵如表 3.1 所示。

表 3.1 供应商和加工商的收益矩阵

收益		加工商	
		进行冷链质量投入	不进行冷链质量投入
供应商	进行冷链质量投入	π_{s0} , π_{m0}	π_{s0} , π_{m1}
	不进行冷链质量投入	π_{s1} , π_{m0}	R_s , R_m

3.2 演化博弈模型的求解

已知冷链上供应商和加工商投入或不投入资源保护冷链质量两种策略是随机独立的，假设供应商投入资源保护冷链质量的概率为 x ($0 \leq x \leq 1$)，那么其不投入资源保护冷链质量的概率为 $1-x$ ；加工商投入资源保护冷链质量的概率为 y ($0 \leq y \leq 1$)，那么其投入资源保护冷链质量的概率为 $1-y$ 。

那么，当供应商进行冷链质量投入时，其期望收益为：

$$U_{A1} = y\pi_{s0} + (1-y)\pi_{s1} = \left[(1-y)[(q+q\alpha)(-C_s + P_s) - T_1] \right] + y[(q+q\alpha)(-C_s + P_s) - T_1] \quad (3.1)$$

供应商不进行冷链质量投入的期望收益为：

$$U_{A2} = y\pi_{s1} + (1-y)R_s = y(P_s - C_s)(q + \lambda q) + (1-y)(P_s - C_s)q \quad (3.2)$$

供应商的混合策略，即进行冷链质量投入与不进行冷链质量投入的平均期望收益为：

$$\overline{U_A} = xU_{A1} + (1-x)U_{A2} \quad (3.3)$$

则供应商的复制动态方程为：

$$\frac{dx}{dt} = x(U_{A1} - \overline{U_A}) = x(1-x)[\alpha q(P_s - C_s) - y\lambda q(P_s - C_s) - T_1] \quad (3.4)$$

同理，加工商的复制动态方程为：

$$\frac{dy}{dt} = y(U_{B1} - \overline{U_B}) = (1-y)y[\beta q(P_m - P_s - C_m) - \eta q x(P_m - P_s - C_m) - T_2] \quad (3.5)$$

复制动态方程 (3.4) 和 (3.5) 组合可构建一个二维动力系统 (I)，即

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= x(U_{A1} - \overline{U_A}) = x(1-x)[\alpha q(P_s - C_s) - y\lambda q(P_s - C_s) - T_1] \\ \frac{dy}{dt} &= y(U_{B1} - \overline{U_B}) = (1-y)y[\beta q(P_m - P_s - C_m) - \eta q x(P_m - P_s - C_m) - T_2] \end{aligned} \quad (3.6)$$

为了下面便于分析问题，令 $x_d = \frac{\beta q(P_s - P_m - C_m) - T_2}{\eta q(P_s - P_m - C_m)}$ ， $y_d = \frac{\alpha q(P_s - C_s) - T_1}{\lambda q(P_s - C_s)}$

$$\alpha_1 = \frac{T_1}{q(P_s - C_s)}, \quad \alpha_2 = \frac{\lambda q(P_s - C_s) + T_1}{q(P_s - C_s)}$$

$$\beta_1 = \frac{T_2}{q(P_m - P_s - C_m)}, \quad \beta_2 = \frac{T_2 + \eta q(P_m - P_s - C_m)}{q(P_m - P_s - C_m)}$$

3.2.1 演化过程的平衡点

命题 1: 系统 (I) 的平衡点为 $(0, 0)$, $(0, 1)$, $(1, 0)$, $(1, 1)$ 。

当 $\frac{T_1}{q(P_s - C_s)} < \alpha < \frac{\lambda q(P_s - C_s) + T_1}{q(P_s - C_s)}$, $\frac{T_2}{q(P_m - P_s - C_m)} < \beta < \frac{T_2 + \eta q(P_m - P_s - C_m)}{q(P_m - P_s - C_m)}$ 时,

点 (x_d, y_d) 也为该系统的平衡点。

证明: 对于系统 (I), 当令: $d_x/d_t = 0$, $d_y/d_t = 0$, 求解可以得到点 $(0, 0)$ 、 $(0, 1)$ 、 $(1, 0)$ 、 $(1, 1)$ 为系统 (I) 的平衡点为:。

若 (x_d, y_d) 为该系统的平衡点, 则 $0 < x_d < 1$, $0 < y_d < 1$ 。则

$$\begin{cases} 0 < \frac{\beta q(P_s - P_m - C_m) - T_2}{\eta q(P_s - P_m - C_m)} < 1 \\ 0 < \frac{\alpha q(P_s - C_s) - T_1}{\lambda q(P_s - C_s)} < 1 \end{cases}$$

当 $0 < \frac{\beta q(P_s - P_m - C_m) - T_2}{\eta q(P_s - P_m - C_m)}$, 由假设可知 $P_s - P_m - C_m > 0$, 则可得到

$$\beta q(P_s - P_m - C_m) - T_2 > 0, \text{ 即: } \beta > \frac{T_2}{q(P_m - P_s - C_m)}。$$

当 $\frac{\beta q(P_s - P_m - C_m) - T_2}{\eta q(P_s - P_m - C_m)} < 1$, 由假设可知 $P_s - P_m - C_m > 0$, 则可得到

$$\beta < \frac{T_2 + \eta q(P_m - P_s - C_s)}{q(P_m - P_s - C_s)}。$$

所以当 x_d 为系统平衡点横坐标, $\frac{T_2}{q(P_m - P_s - C_m)} < \beta < \frac{T_2 + \eta q(P_m - P_s - C_m)}{q(P_m - P_s - C_m)}$ 。

当 $0 < \frac{\alpha q(P_s - C_s) - T_1}{\lambda q(P_s - C_s)}$, 由假设可知 $P_s - C_s > 0$, 则可以得到

$$0 < \alpha q(P_s - C_s) - T_1, \text{ 即: } \alpha > \frac{T_1}{q(P_s - C_s)}。$$

当 $\frac{\alpha q(P_s - C_s) - T_1}{\lambda q(P_s - C_s)} < 1$, 由假设可知 $P_s - C_s > 0$, 则可以得到

$$\alpha q(P_s - C_s) - T_1 < \lambda q(P_s - C_s)。 \text{ 即: } \alpha < \frac{\lambda q(P_s - C_s) + T_1}{q(P_s - C_s)}$$

所以当 y_d 为系统平衡点纵坐标, $\frac{T_1}{q(P_s - C_s)} < \alpha < \frac{\lambda q(P_s - C_s) + T_1}{q(P_s - C_s)}。$

综合以上 4 点可得: 当供应商和加工商投入资源保护冷链质量所获得收益率满足下列条件, 即

$$\frac{T_1}{q(P_s - C_s)} < \alpha < \frac{\lambda q(P_s - C_s) + T_1}{q(P_s - C_s)}, \quad \frac{T_2}{q(P_m - P_s - C_m)} < \beta < \frac{T_2 + \eta q(P_m - P_s - C_m)}{q(P_m - P_s - C_m)} \text{ 时,}$$

点 (x_d, y_d) 也为系统 (I) 的平衡点。

3.2.2 平衡点稳定性分析

由复制动态方程求出的平衡点不一定是系统的演化稳定策略 (ESS), 根据 Friedman 提出的方法, 演化平衡点的稳定性可以从该系统的雅可比矩阵 (记为 J) 的局部稳定分析导出。对二维动力系统 (I) 依次求解关于 x 和 y 的偏导, 由此得出的雅克比矩阵可表示为:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial X}{\partial x} & \frac{\partial X}{\partial y} \\ \frac{\partial Y}{\partial x} & \frac{\partial Y}{\partial y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

雅可比矩阵中:

$$\alpha_{11} = (1 - 2x) [\alpha q(P_s - C_s) - y \lambda q(P_s - C_s) - T_1]$$

$$\alpha_{12} = x(1 - x) [-\lambda q(P_s - C_s)]$$

$$\alpha_{21} = y(1-y)[- \eta q(P_m - P_s - C_m)]$$

$$\alpha_{22} = (1-2y)[\beta q(P_m - P_s - C_m) - x\eta q(P_m - P_s - C_m) - T_2]$$

雅可比矩阵 (J) 的迹为: $trJ = \alpha_{11} + \alpha_{22}$, 雅可比行列式为:

$\det J = \alpha_{11}\alpha_{22} - \alpha_{12}\alpha_{21}$; 当满足条件 $trJ < 0$, $\det J > 0$ 时, 则复制动态方程的平衡点就是演化稳定策略 (ESS); 当 $trJ > 0$, $\det J > 0$ 时, 该平衡点为系统的不稳定点; 当 $\det J < 0$ 时, 该平衡点为系统的鞍点。

命题 2:

当冷链上供应商和加工商的收益增加比率 α 和 β 依次变化增大时, 会有以下五种演化情况:

- (1) 当 $\alpha < \alpha_1$, $\beta < \beta_1$ 时, 系统 (I) 的演化稳定策略 (ESS) 为 (N, N);
- (2) 当 $\alpha < \alpha_1$, $\beta_1 < \beta < \beta_2$ 时, 系统 (I) 的演化稳定策略 (ESS) 为 (N, E);
- (3) 当 $\alpha_1 < \alpha < \alpha_2$, $\beta < \beta_1$ 时, 系统 (I) 的演化稳定策略 (ESS) 为 (E, N);
- (4) 当 $\alpha_1 < \alpha < \alpha_2$, $\beta_1 < \beta < \beta_2$ 时, 系统 (I) 的演化稳定策略 (ESS) 为 (E, N) 和 (N, E);
- (5) 当 $\alpha_2 < \alpha$, $\beta_2 < \beta$ 时, 系统 (I) 的演化稳定策略 (ESS) 为 (E, E)。

证明: 根据上述的判断方法, 可以求出雅可比矩阵 J 在各个平衡点时的迹和行列式值, 根据符号方向, 判断其局部稳定性。具体证明过程如下:

由上述可得:

$$J = \begin{bmatrix} (1-2x)[(\alpha q - y\lambda q)(P_s - C_s) - T_1] & x(1-x)[-y\lambda q(P_s - C_s)] \\ y(1-y)[-x\eta q(P_m - P_s - C_m)] & (1-2y)[(\beta q - x\eta q)(P_m - P_s - C_m) - T_2] \end{bmatrix}$$

$$trJ = \alpha_{11} + \alpha_{22} = (1-2x)[(\alpha q - y\lambda q)(P_s - C_s) - T_1] + (1-2y)[(\beta q - x\eta q)(P_m - P_s - C_m) - T_2]$$

$$\det J = \alpha_{11}\alpha_{22} - \alpha_{12}\alpha_{21} = \begin{bmatrix} (1-2y)(1-2x)[(\alpha q - y\lambda q)(P_s - C_s) - T_1][(\beta q - x\eta q)(P_m - P_s - C_m) - T_2] \\ -x(1-x)y(1-y)[\lambda q(P_s - C_s)][\eta q(P_m - P_s - C_m)] \end{bmatrix}$$

情形 (一):

- ① 当 $x=0$, $y=0$ 时, 有:

$$trJ = [\alpha q(P_s - C_s) - T_1] + [\beta q(P_m - P_s - C_m) - T_2]$$

$$\det J = [\alpha q(P_s - C_s) - T_1][\beta q(P_m - P_s - C_m) - T_2]$$

情形(一)条件下: $\alpha < \alpha_1$, $\beta < \beta_1$, 可得: $\alpha < T_1 / q(P_s - C_s)$, 即 $\alpha q(P_s - C_s) < T_1$; $\beta < \beta_1 = T_2 / q(P_m - P_s - C_s)$, 即 $\beta q(P_m - P_s - C_s) < T_2$ 。由此可判断出 $trJ < 0$ 、 $\det J > 0$ 。

② 当 $x=1$, $y=0$ 时, 有:

$$trJ = [-\alpha q(P_s - C_s) + T_1] + [(\beta q - \eta q)(P_m - P_s - C_m) - T_2]$$

$$\det J = [-\alpha q(P_s - C_s) + T_1][(\beta q - \eta q)(P_m - P_s - C_m) - T_2]$$

情形(一)条件下: $\alpha < \alpha_1$, $\beta < \beta_1 < \beta_2$,

则 $\alpha q(P_s - C_s) < T_1$, $\beta < \beta_1 < \beta_2 = [T_2 + \eta q(P_m - P_s - C_m)] / q(P_m - P_s - C_m)$, 即 $(\beta q - \eta q)(P_m - P_s - C_m) < T_2$ 。由此可判断出 $\det J < 0$ 。

③ 当 $x=0$, $y=1$ 时, 有:

$$trJ = [(\alpha q - \lambda q)(P_s - C_s) - T_1] + [-\beta q(P_m - P_s - C_m) + T_2]$$

$$\det J = [-(\alpha q - \lambda q)(P_s - C_s) + T_1][\beta q(P_m - P_s - C_m) - T_2]$$

情形(一)条件下: $\alpha < \alpha_1$, $\beta < \beta_1$, 可得: $\alpha < T_1 / q(P_s - C_s)$, 即 $\alpha q(P_s - C_s) < T_1$; $\beta < \beta_1 = T_2 / q(P_m - P_s - C_s)$, 即 $\beta q(P_m - P_s - C_s) < T_2$ 。由此可判断出 $\det J < 0$ 。

④ 当 $x=1$, $y=1$ 时, 有:

$$trJ = [-(\alpha q - \lambda q)(P_s - C_s) + T_1] + [-(\beta q - \eta q)(P_m - P_s - C_m) + T_2]$$

$$\det J = [(\alpha q - \lambda q)(P_s - C_s) - T_1][(\beta q - \eta q)(P_m - P_s - C_m) - T_2]$$

情形(一)条件下: 由 $\alpha < \alpha_1 < \alpha_2$, $\beta < \beta_1 < \beta_2$, 可得: $(\alpha q - \lambda q)(P_s - C_m) < T_1$,

$(\beta q - \eta q)(P_m - P_s - C_m) < T_2$, 即可判断 $trJ > 0$, $\det J > 0$ 。

通过以上 4 点可以判断情形(一)各平衡点的稳定性, 得到系统的演化稳定策略, 具体情形如表 3.2 所示。同理, 可以得到情形(二)、情形(三)、情形(四)、情形(五)下各平衡点的局部稳定性分析结果, 具体情形如表 3.3、表 3.4、表 3.5 和表 3.6 所示。

表 3.2 情形（一）的局部稳定性分析结果

均衡点	trJ	detJ	结果
$x=0, y=0$	-	+	ESS
$x=1, y=0$	-	-	鞍点
$x=0, y=1$	-	-	鞍点
$x=1, y=1$	-	+	不稳定点

表 3.3 情形（二）的局部稳定性分析结果

均衡点	trJ	detJ	结果
$x=0, y=0$	-	-	鞍点
$x=1, y=0$	-	-	鞍点
$x=0, y=1$	-	+	ESS
$x=1, y=1$	+	+	不稳定点

表 3.4 情形（三）的局部稳定性分析结果

均衡点	trJ	detJ	结果
$x=0, y=0$	+	+	不稳定点
$x=1, y=0$	-	+	ESS
$x=0, y=1$	-	-	鞍点
$x=1, y=1$	+	+	不稳定点

表 3.5 情形（四）的局部稳定性分析结果

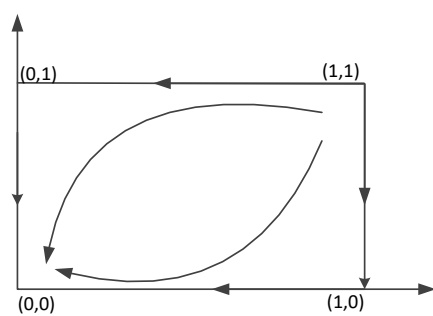
均衡点	trJ	detJ	结果
$x=0, y=0$	+	+	不稳定点
$x=1, y=0$	-	+	ESS
$x=0, y=1$	-	+	ESS
$x=1, y=1$	-	-	鞍点
$x=x_d, y=y_d$	+	+	不稳定点

表 3.6 情形（五）的局部稳定性分析结果

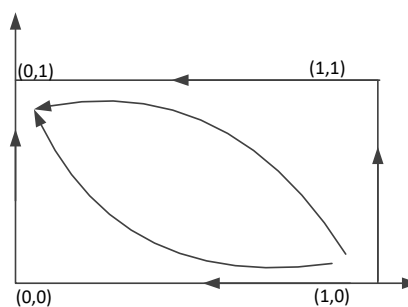
均衡点	$\text{tr}J$	$\text{det}J$	结果
$x=0, y=0$	+	+	不稳定点
$x=1, y=0$	-	-	鞍点
$x=0, y=1$	-	-	鞍点
$x=1, y=1$	-	+	ESS

3.2.3 演化结果分析

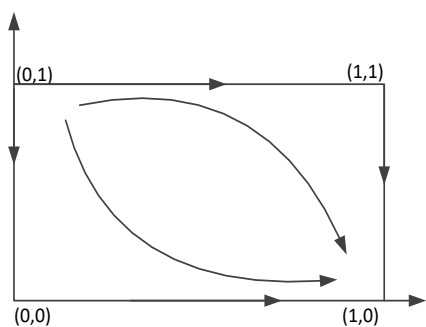
由命题 2 可以知道供应商和加工商之间关于冷链质量投入的演化博弈过程有五种，经计算分析可以得到五种情况对应的相位图，具体如图 1 所示，可以更加直观的观察演化稳定策略的选择。



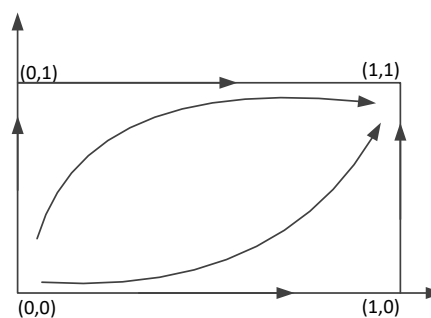
(a)



(b)



(c)



(e)

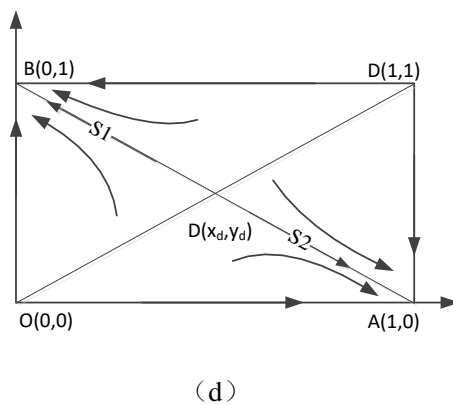


图 3.1 五种情况下冷链质量投入演化博弈相位图

(1) 当冷链上供应商的收益增加比率小于 α_1 ，加工商的收益增加比率小于 β_1 ，此时无论是单方还是双方进行冷链质量投入，收益增加比率所带来的收益增额都小于他们付出的成本。由图 1(a) 可以看出，双方在博弈演化过程的演化稳定策略是选择平衡点 $(0, 0)$ ，又由表 3.2 情形（一）可以看出，在这个时候，平衡点 $(1, 0)$ 和 $(0, 1)$ 是系统 (I) 的鞍点，平衡点 $(1, 1)$ 是系统 (I) 的不稳定点，那么双方演化稳定策略就是供应商没有意愿进行冷链质量投入，加工商也没有意愿进行冷链质量投入。冷链上的产品在流通过程中涉及多个环节，基础冷库设施的建设、运输存储设备的购买和先进信息管理系统的构建都需要大量资本的投入，运营过程中冷藏运输设备的油耗和护养也是高于普通运输备，当冷链上的供应商或加工商又是该行业的新兴企业时，产品市场占有率和品牌知名度不高，不具有对应的规模效益，此时，冷链质量投入带来的收益小于成本，反而带来资金断链、企业负担加重等风险。因此，在这种情况下冷链上的供应商和加工商的演化稳定策略是均不选择投入资源保护冷链质量。

(2) 当冷链上加工商通过选择冷链质量投入策略所获得的收益增加率 β 提升到一定程度时，即 $\beta_1 < \beta < \beta_2$ ，此时加工商通过资源保护冷链质量获得的额外增加收益大于其投入资源所花费的成本，但其除去投入成本的净收益小于通过“搭便车”获得的收益，即净收益小于 ηq 。此时，若供应商的收益增加比率 α 不变，则供应商投入资源保护冷链所获得的收益仍然小于投入资源所花费的成本，那么供应商将不投入资源保护冷链质量，加工商为获得额外收益将投入资源保护冷链质量。由图 1(b) 可以看出，双方最终选择的演化稳定策略是选择平衡点 $(0, 1)$ ，

又由表 3.3 情形（二）可以看出，在这个时候，平衡点（0，0）和（1，0）是系统（I）的鞍点，平衡点（1，1）是系统（I）的不稳定点，那么双方最终采取的策略就是供应商不选择投入资源保护冷链质量，加工商为获得额外收益而选择投入资源保护冷链质量。冷链上企业投入资源保护冷链质量，能减少生鲜食品或冷藏药品在流通过程中的损耗，并保障其品质。此时，若冷链上的加工商已达到一定市场规模时，并建立起相应的品牌效应，那么加工商愿意进行冷链质量投入，提升消费者对其品牌忠诚度，带来更大的规模收益，而供应商由于尚未建立规模，则没有动机去投入资源保护冷链质量。

（3）当供应商处于冷链核心位置时，其进行冷链质量投入所带来收益增加比率达到一定程度之后 $\alpha_1 < \alpha < \alpha_2$ ，其投入资源保护冷链质量带来的额外收益大于投入资源所花费的成本，但净收益（除去投入成本）却小于其通过“搭便车”所获得的额外收益。此时，加工商的投入收益增加率 β 不变，则供应商没有意愿投入资源保护冷链质量，供应商无法实施“搭便车”行为。由图 1（c）可以看出，双方最终选择的演化稳定策略是选择平衡点（1，0），又由表 3.4 情形（三）可以看出，平衡点（0，0）和（0，1）是系统（I）的鞍点，平衡点（1，1）是系统（I）的不稳定点，那么双方演化稳定策略就是供应商为获得额外收益选择投入资源保护冷链质量，加工商不选择投入资源保护冷链质量。当冷链上供应商具有一定规模，能花费较小成本提供较高原材料时，供应商愿意进行冷链质量投入，保障消费者良好的产品消费体验，提升消费者对产品的品牌忠诚度，而加工商由于尚未能形成规模获得更多收益，则不愿意进行冷链质量投入。

（4）当供应链和加工商进行冷链质量所带来的收益增长率分别满足不等式 $\alpha_1 < \alpha < \alpha_2$ 与 $\beta_1 < \beta < \beta_2$ 时，供应商和加工商选择投入资源保护冷链质量安全带来的收益比投入成本大，但相比于采取“搭便车”行为获得的额外收益，确是少了许多。在这个时候，由表 3.5 情形（四）可以看出，平衡点（0，1）和（1，0）是系统演化的稳定点，平衡点（1，1）是鞍点，平衡点（0，0）和（1，1）是不稳定的点，那么双方演化稳定策略就是供应商选择进行投入资源保护冷链质量而加工商不选择，或者供应商不选择投入资源保护冷链质量而加工商选择。但演化博弈稳定均衡点具体会随着哪条线路走，与供应商和加工商的初始概率有关。由图 1（e）可以看出，折线 OD 和 CD 是系统在演化过程中两个状态的临界线，如

果收敛于折线的上半部分（ODCB 部分），系统的演化稳定策略是（0，1），即供应商不选择投入资源保护冷链质量而加工商选择投入资源为系统的演化稳定策略；如果收敛于折线的下半部分（ACDO 部分），系统的演化稳定策略就是（1，0），即供应商选择投入资源保护冷链质量而加工商不选择投入资源。随着人们生活水平提高，对生鲜食品或冷藏药品等相关需要通过冷链进行流通的产品需求量不断加大，推动了冷链物流发展，供应商和加工商进行冷链质量投入带来的收益大于投入的成本，但小于“搭便车”获得的收益。此时，两者长期的博弈会形成两种结果：供应商选择投入资源保护冷链质量而加工商不选择投入资源保护冷链质量，或加工商选择投入资源保护冷链质量而供应商不选择投入资源。

（5）当冷链上供应商和加工商投入资源保护冷链质量所获得的收益增加率达到 $\alpha > \alpha_2$ 和 $\beta > \beta_2$ 时，双方选择冷链质量投入所获得的净收益不仅大于其投入资源所花费的成本，还大于其从对方资源投入获得额外收益。由图 1（d）可以看出，在这个时候，双方最终选择的演化稳定策略是选择平衡点（1，1），又由表 3.6 情形（五）可以看出平衡点（1，0）和（0，1）是系统（I）的鞍点，平衡点（0，0）是系统（I）的不稳定点，那么双方演化稳定策略就是供应商和加工商为获得额外收益均选择投入资源保护冷链质量。当冷链上供应商和加工商处于市场成熟期时，在行业中处于领导地位，获得的规模收益已超过“搭便车”带来的额外收益，那么供应商和加工商均愿意进行冷链质量投入保持行业长期可持续发展。

3.2.4 第四种情况下系统演化稳定均衡结果分析

前文提到，当冷链上供应商和加工商投入资源保护冷链质量安全所带来的收益大于成本但小于搭便车收益，即收益增加率 $\alpha_1 < \alpha < \alpha_2$ 与 $\beta_1 < \beta < \beta_2$ 时，供应商和加工商每次可以采取的演化稳定策略都有投入资源保护冷链质量安全和不投入资源保护冷链质量安全两种策略选择。

由图 1（e）可以看出，系统主要收敛于两块区域，相位图对角线 OC 的上半部分为区域 S1，对角线 OC 下半部分为区域 S2，二维系统的演化稳定策略收敛于哪个区域，决定了供应商和加工商的策略选择，因此两块区域面积大小决定了供应商和加工商对两种策略选择的概率大小。在区域 S1 面积大于区域 S2 面积的情况下，系统演化稳定策略是（1，0）的概率要高些，即供应商为了获得额外收益投

入资源保护冷链质量安全，而加工商不投入资源保护冷链质量安全。在区域 $S2$ 面积大于区域 $S1$ 面积的情况下，系统演化稳定策略是 $(0, 1)$ 的概率要高些，即加工商为了获得额外收益投入资源保护冷链质量安全，而供应商不投入资源保护冷链质量安全。

在区域 $S1$ 面积和区域 $S2$ 面积大小相等的情况下，可以通过对影响区域 $S1$ 和区域 $S2$ 面积大小因素的分析，得到影响系统演化稳定策略选择的因素及其力度，以分析区域 $S2$ 的面积为例，经计算可知系统收敛于 $(0, 1)$ 的概率为：

$$S2 = \frac{1}{2}(x_d + 1 - y_d) = \frac{1}{2} \left(\frac{\beta q(P_s - P_m - C_m) - T_2}{\eta q(P_m - P_s - C_m)} + \frac{q(\lambda - \alpha)(P_s - C_s) + T_1}{\lambda q(P_s - C_s)} \right) \quad (3.8)$$

由式(3.8)可知，影响区域 II 面积的参数有 11 个，经分析可得到如下命题：

命题 3: 当供应商投入资源保护冷链质量安全所花费的成本 T_1 越高，加工商投入资源保护冷链质量安全所花费的成本越低，那么供应商不选择冷链质量投入策略而加工商选择冷链质量投入的概率就越大，如果加工商投入资源所需成本 T_2 高于供应商的 T_1 ，那么供应商选择冷链质量投入策略的概率要高于加工商。

证明： 分别求解 $S2$ 关于投入资源所花成本 T_1 和 T_2 的偏导数，可得：

$$\frac{\partial S2}{\partial T_1} = \frac{1}{2\lambda q(P_s - C_s)}, \quad \frac{\partial S2}{\partial T_2} = -\frac{1}{2\eta q(P_m - P_s - C_s)},$$

根据前文的假设条件 $P_s > C_s$,

$$P_m > P_s + C_m, \text{ 可以判断出: } \frac{\partial S2}{\partial T_1} > 0, \quad \frac{\partial S2}{\partial T_2} < 0, \text{ 故 } S2 \text{ 是 } T_1 \text{ 的增函数, } S2 \text{ 是 } T_2 \text{ 的}$$

减函数。因此，在其他影响因素固定不变时，供应商投入资源保护冷链质量安全所需成本越高，制造商投入资源保护冷链质量安全所需成本越低，则 $(0, 1)$ 是演化稳定策略的概率越高，此时供应商倾向于不采取冷链质量投入策略，而加工商倾向于采取冷链质量投入策略；当制造商投入资源所需成本大于供应商所需成本时，那么 $(1, 0)$ 是演化稳定策略的概率就越高。在实际过程中，供应商应采取有效的管理策略降低冷链质量投入所需花费的成本，从而趋向于选择投入资源保护冷链质量安全。证毕。

命题 4: 当供应商通过“搭便车”获得对方带来的额外收益增加率 λ 越高，而加工商通过“搭便车”获得对方带来的额外收益增加率 η 越低，那么供应商不选择冷链质量投入策略而加工商选择冷链质量投入的概率就越大；如果加工商通过

“搭便车”获得的额外收益大于供应商，那么供应商选择冷链质量投入策略的概率要高于加工商。

证明：将 $S2$ 分别对收益增加率 λ 和 η 求偏导，可得：

$$\frac{\partial S2}{\partial \eta} = \frac{-\eta q(P_m - P_s - C_s) + T_2}{2\eta^2 q(P_m - P_s - C_s)}, \quad \frac{\partial S2}{\partial \lambda} = \frac{\alpha(P_s - C_s) - T_1}{2\lambda^2 q(P_s - C_s)},$$

当 $\alpha_1 < \alpha < \alpha_2$ ， $\beta_1 < \beta < \beta_2$ 时，可以得到不等式： $T_1 < \alpha q(P_s - C_s)$ ， $T_2 < \beta q(P_m - P_s - C_s)$ 。由此可判断出 $\frac{\partial S2}{\partial \eta} < 0$ ， $\frac{\partial S2}{\partial \lambda} > 0$ ，故 $S2$ 是 λ 的增函数， $S2$ 是 η 的减函数。

因此，在其他影响因素固定不变时，当供应商通过“搭便车”获得对方带来的收益越高，而加工商通过“搭便车”获得对方带来的收益越低，则 $(0, 1)$ 是演化稳定策略的概率越高，此时供应商倾向于不采取冷链质量投入策略，而加工商倾向于采取冷链质量投入策略；反之，那么 $(1, 0)$ 是演化稳定策略的概率就越高，即供应商选择冷链质量投入策略的概率要高于加工商。“搭便车”行为会降低冷链节点企业投入资源保护冷链质量的积极性，一般这种情况发生在供应商和加工商处在不同的市场发展期，一方处于成熟期，而另外一方处于成长期。处于成长期的企业，自身经济实力和抵御风险能力都相对较低，因此其不愿意投入资源保护冷链质量安全，倾向于选择“搭便车”获得额外收益，而处于成熟期的企业，为了巩固其市场地位，持续获得规模收益，愿意投入资源保护冷链质量安全。证毕。

命题 5:若供应商投入资源保护冷链质量安全带来的收益增加率 α 越高，而加工商投入资源保护冷链质量安全的收益增加率 β 越低，那么供应商选择冷链质量投入策略而加工商不选择冷链质量投入策略的概率就越高；如果情况相反，那么加工商选择冷链质量投入策略的概率就越高。

证明：将 $S2$ 分别对 α 和 β 求偏导，可得 $\frac{\partial S2}{\partial \alpha} = -\frac{1}{2\lambda} < 0$ ， $\frac{\partial S2}{\partial \beta} = \frac{1}{2\eta} > 0$ ，这表明 $S2$ 是 α 的减函数， $S2$ 是 β 的增函数。因此，在其他影响因素固定不变时，供应商投入资源保护冷链质量安全所带来的收益越低，制造商投入资源保护冷链质量安全所带来的收益越高，则 $(0, 1)$ 是演化稳定策略的概率越高，此时供应商

倾向于不采取冷链质量投入策略，而加工商倾向于采取冷链质量投入策略；当制造商投入资源所带来的收益大于供应商投入资源所带来的收益时，那么（1，0）是演化稳定策略的概率就越高。如果企业采取有效的管理策略可以提高冷链质量投入的收益增加率，相同单位的资源投入能带来更大收益，进而提高自身投入资源保护冷链质量安全的积极性。证毕。

命题 6: 当其他因素一定时，供应商单位产品价格 P_s 越低，单位产品成本 C_s 越高，加工商单位产品价格 P_m 越高，单位产品成本 C_m 越低，那么供应商投入资源保护冷链质量带来的收益就越低，加工商投入资源保护冷链质量带来的收益就越高，则加工商比供应商更愿意投入资源保护冷链质量；若情况相反，那么供应商投入资源保护冷链质量的概率将高于加工商。

证明: 当其他因素一定时，将 $S2$ 分别对 P_s 、 P_m 、 C_m 、 C_s 求偏导，可以得到：

$$\frac{\partial S2}{\partial P_s} = \frac{-T_2}{2\eta q(P_m - P_s - C_s)^2} + \frac{-T_1}{2\lambda q(P_s - C_s)^2} < 0;$$

$$\frac{\partial S2}{\partial P_m} = \frac{T_2}{2\eta q(P_m - P_s - C_s)^2} > 0;$$

$$\frac{\partial S2}{\partial C_m} = \frac{-T_2}{2\eta q(P_m - P_s - C_s)^2} < 0;$$

$$\frac{\partial S2}{\partial C_s} = \frac{T_1}{2\lambda q(P_s - C_s)^2} > 0;$$

$$\text{故 } \frac{\partial S2}{\partial P_s} < 0, \frac{\partial S2}{\partial P_m} > 0, \frac{\partial S2}{\partial C_m} < 0, \frac{\partial S2}{\partial C_s} > 0。$$

这表明 $S2$ 是供应商进行正常收益的减函数，是加工商进行正常收益的增函数。

因此，在其他影响因素固定不变时，供应商提供原材料所获得的净利润上升空间小，而加工商提供成品所获得利润上升空间大，则（0，1）是稳定策略的概率越高，此时供应商倾向于不投入资源保护冷链质量，而加工商倾向于投入资源保护冷链质量；当供应商提供原材料所获得的净利润上升空间大于加工商提供成品所获得利润上升空间时，那么（1，0）是演化稳定策略的概率就越高。证毕。

3.3 本章小结

本章构建政府不监管下，冷链上供应商和加工商间有关质量投入的演化博弈模型，运用复制动态方程求解出演化博弈的平衡点，并通过雅可比矩阵 J 在各个平衡点时的迹和行列式值的，来判断平衡点稳定性，得到五种情况下系统的演化结果，分析供应商和加工商策略选择与冷链质量投入产出比间的关系。

第4章 政府惩罚契约下冷链质量投入的演化博弈研究

供应商和加工商都不是完全理性的，双方关于进行冷链质量投入的策略集均为{投入，不投入}，当冷链上供应商和加工商投入资源获得收益大于投入资源所花费成本，却小于其从对方资源投入获得额外收益 π_{s1} 和 π_{m1} ，即当 $\alpha < \alpha_1 < \alpha_2$ 与 $\beta < \beta_1 < \beta_2$ 时，供应商和制造商均存在“搭便车”的动机，都有期望对方投入资源保护冷链质量，而自身不投入资源却获得额外的收益。冷链稳定运作的条件是供应商和加工商进行冷链质量投入策略达到协调状态，如果一方或双方选择不进行冷链质量投入，那么冷链运作就处于不稳定状态，对冷链上的生鲜食品来说，会增加其损耗量并降低其品质，对于冷链上的冷藏药品来说，不同的冷藏药品需要的温度条件也是不同的，冷链运作出现问题很可能使冷藏药品变成毒药品。此时需政府参与，让供应商和加工商签订惩罚契约，促使双方进行冷链质量投入，保障冷链不发生断链、稳定运行，保障冷链上生鲜食品与冷藏药品的质量安全。

4.1 惩罚契约下的模型建立

假定在政府监管下，供应商和加工商共同签署惩罚契约：为了约束冷链质量投入中“搭便车”行为，引入相应的惩罚措施，假定一方进行冷链质量投入，而另外一方未进行冷链质量投入，则未进行冷链质量投入的一方将受到惩罚，惩罚金额为 K ，并将惩罚金额支付给进行冷链质量投入的一方。此契约在政府的保护下执行，理论上应该是被完全执行，但在实际执法过程中的执行力度会受到效率、公关行为等因素影响，不能完全执行契约的规定，甚至会出现其中一方采取“搭便车”行为获得另外一方进行冷链质量投入所带来的外正部效应，而没被惩罚的情况。假设政府的惩罚契约的执行力度为 θ ($0 < \theta < 1$)，即 θ 表示其中一方采取“搭便车”行为获得另外一方进行冷链质量投入所带来的外正部效应而被惩罚的概率。此时在惩罚契约约束下，冷链上供应商和加工商的收益将发生变化。

在惩罚契约条件下，当供应商不投入资源而加工商投入资源保护冷链质量时，供应商所获得的收益为 $\pi_{s1} - \theta K$ ，加工商所获得的收益为 $\pi_{m0} + \theta K$ ；与之相反情况

是，当加工商不投入资源而供应商投入资源保护冷链质量时，加工商所获得的收益为 $\pi_{m1} - \theta K$ ，供应商所获得的收益为 $\pi_{s0} + \theta K$ 。由此可以看出，冷链上供应商和加工商获得收益大小受到惩罚力度和具体执行度影响，当惩罚力度和执行度之积的值较大时，供应商和加工商都不能从对方资源投入保护冷链质量获得额外收益，那么双方为了避免被惩罚，都会选择投入资源保护冷链质量。而当惩罚力度和执行度之积的值较小时，契约对供应商和加工商的约束力就不够强，此时，两者之间的博弈就趋同于第四种情况下的演化博弈。此时供应商和加工商进行冷链质量投入的收益矩阵，具体如表 4.1 所示。

表 4.1 契约约束下供应商和加工商的收益矩阵

收益		加工商	
		进行冷链质量投入	不进行冷链质量投入
供应商	进行冷链质量投入	π_{s0}, π_{m0}	$\pi_{s0} + \theta K, \pi_{m1} - \theta K$
	不进行冷链质量投入	$\pi_{s1} - \theta K, \pi_{m0} + \theta K$	R_s, R_m

4.2 惩罚契约下的演化分析

根据表 4.1 契约约束下供应商和加工商的收益矩阵提供的条件，经计算可以分别得到供应商和加工商的复制动态方程：

$$X_1 = \frac{d_x}{d_t} = x(U_{A1} - \overline{U_A}) = x(1-x)[\alpha q(P_s - C_s) - y\lambda q(P_s - C_s) - T_1 + \theta K] \quad (4.1)$$

$$Y_1 = \frac{d_y}{d_t} = y(U_{B1} - \overline{U_B}) = y(1-y)[\beta q(P_m - P_s - C_m) - \eta q x(P_m - P_s - C_m) - T_2 + \theta K] \quad (4.2)$$

复制动态方程（4.1）和（4.2）组合可构建一个二维动力系统（II）。

命题 7：系统（II）的平衡点为（0，0），（0，1），（1，0），（1，1）。

（ x_{d1}, y_{d1} ）也为该系统的平衡点，当且仅当下面的不等式成立：

$$\begin{aligned} & \text{Max} \left(\frac{T_2 - \beta q(P_s - P_m - C_m)}{\theta}, \frac{T_1 - \alpha q(P_s - C_s)}{\theta} \right) < K < \\ & \text{Min} \left(\frac{(\eta q - \beta q)(P_s - P_m - C_m) + T_2}{\theta}, \frac{(\lambda q - \alpha q)(P_s - C_s) + T_1}{\theta} \right) \end{aligned} \quad \text{其中,}$$

$$x_d = \frac{\beta q(P_s - P_m - C_m) - T_2 + \theta K}{\eta q(P_s - P_m - C_m)}, \quad y_d = \frac{\alpha q(P_s - C_s) - T_1 + \theta K}{\lambda q(P_s - C_s)}$$

证明：对于系统（II），分别令： $d_x/d_t=0$ ， $d_y/d_t=0$ ，可知该系统的平衡点为： $(0, 0)$ 、 $(0, 1)$ 、 $(1, 0)$ 、 $(1, 1)$ 。

若 (x_{d1}, y_{d1}) 为该系统的平衡点，则 $0 < x_{d1} < 1$ ， $0 < y_{d1} < 1$ 。

由 $0 < x_{d1} < 1$ ，可得：

$$0 < \frac{\beta q(P_s - P_m - C_m) - T_2 + \theta K}{\eta q(P_s - P_m - C_m)} < 1 \Leftrightarrow \frac{T_2 - \beta q(P_s - P_m - C_m)}{\theta} < K < \frac{(\eta q - \beta q)(P_s - P_m - C_m) + T_2}{\theta}$$

由 $0 < y_{d1} < 1$ ，可得：

$$0 < \frac{\alpha q(P_s - C_s) - T_1 + \theta K}{\lambda q(P_s - C_s)} < 1 \Leftrightarrow \frac{T_1 - \alpha q(P_s - C_s)}{\theta} < K < \frac{(\lambda q - \alpha q)(P_s - C_s) + T_1}{\theta}$$

$$\text{所以当时,} \quad \begin{aligned} & \text{Max} \left(\frac{T_2 - \beta q(P_s - P_m - C_m)}{\theta}, \frac{T_1 - \alpha q(P_s - C_s)}{\theta} \right) < K < \\ & \text{Min} \left(\frac{(\eta q - \beta q)(P_s - P_m - C_m) + T_2}{\theta}, \frac{(\lambda q - \alpha q)(P_s - C_s) + T_1}{\theta} \right) \end{aligned}$$

(x_{d1}, y_{d1}) 也为系统（II）的平衡点。

表 4.2 系统（II）的平衡点分析

均衡点	trJ	detJ
$x=0$ $y=0$	$\begin{bmatrix} \alpha q(P_s - C_s) - T_1 + 2\theta K \\ +[\beta q(P_m - P_s - C_m) - T_2] \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \alpha q(P_s - C_s) \\ -T_1 + \theta K \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta q(P_m - P_s - C_m) \\ -T_2 + \theta K \end{bmatrix}$
$x=1$ $y=0$	$\begin{bmatrix} -\alpha q(P_s - C_s) + T_1 \\ +[(\beta q - \eta q)(P_m - P_s - C_m) - T_2] \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -\alpha q(P_s - C_s) + T_1 - \theta K \\ (\beta q - \eta q) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (\beta q - \eta q) \\ (P_m - P_s - C_m) - T_2 + \theta K \end{bmatrix}$
$x=0$ $y=1$	$\begin{bmatrix} (\alpha q - \lambda q)(P_s - C_s) - T_1 \\ -[\beta q(P_m - P_s - C_m) - T_2] \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -(\alpha q - \lambda q) \\ (P_s - C_s) + T_1 - \theta K \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta q(P_m - P_s - C_m) \\ -T_2 + \theta K \end{bmatrix}$
$x=1$ $y=1$	$\begin{bmatrix} T_1 - (\alpha q - \lambda q)(P_s - C_s) - 2\theta K \\ [T_2 - (\beta q - \eta q)(P_m - P_s - C_m)] \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} (\alpha q - \lambda q) \\ (P_s - C_s) - T_1 + \theta K \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (\beta q - \eta q) \\ (P_m - P_s - C_m) - T_2 + \theta K \end{bmatrix}$

命题 8: $(1, 1)$ 是上述系统唯一的 ESS 的充要条件是:

$$K > \text{Max} \left\{ \frac{T_2 + (\alpha q - \lambda q)(P_s - C_s) - (\beta q - \eta q)(P_m - P_s - C_m) - T_1}{2\theta}, \frac{T_1 - (\alpha q - \lambda q)(P_s - C_s)}{\theta}, \frac{T_2 - (\beta q - \eta q)(P_m - P_s - C_m)}{\theta} \right\} \quad (4.3)$$

证明: 从平衡点的分析可知, $(1, 1)$ 是上述系统唯一的 ESS 的充要条件为 $\text{tr}J < 0$ 且 $\det J > 0$ 。即:

$$\begin{aligned} & -\left[(\alpha q - \lambda q)(P_s - C_s) - T_1 + 2\theta K\right] - \left[(\beta q - \eta q)(P_m - P_s - C_m) - T_2\right] < 0 \\ \Leftrightarrow & K > \frac{T_2 + (\alpha q - \lambda q)(P_s - C_s) - (\beta q - \eta q)(P_m - P_s - C_m) - T_1}{2\theta} \end{aligned}$$

且:

$$\begin{bmatrix} (\alpha q - \lambda q) \\ (P_s - C_s) - T_1 + \theta K \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (\beta q - \eta q) \\ (P_m - P_s - C_m) - T_2 + \theta K \end{bmatrix} > 0$$

综上所述, 当

$$K > \text{Max} \left\{ \frac{T_2 + (\alpha q - \lambda q)(P_s - C_s) - (\beta q - \eta q)(P_m - P_s - C_m) - T_1}{2\theta}, \frac{T_1 - (\alpha q - \lambda q)(P_s - C_s)}{\theta}, \frac{T_2 - (\beta q - \eta q)(P_m - P_s - C_m)}{\theta} \right\}$$

时, $\text{tr}J < 0$ 且 $\det J > 0$, 所以 $(1, 1)$ 是系统唯一的 ESS。

故得证。

当惩罚力度满足式 (4.4) 的条件时, 由表 4.2 可知 $(0, 0)$ 是系统的不稳定点, $(0, 1)$ 和 $(1, 0)$ 是系统的鞍点。

故得证。

当惩罚额度大于供应商和加工商通过“搭便车”行为获得的收益时, 冷链上的供应商和加工商趋向于选择投入资源保护冷链质量。因此, 冷链上的供应商和加工商可以通过建立惩罚契约, 互相监督对方是否投入资源保护冷链质量, 惩罚不投入资源而采取“搭便车”获得额外收益的行为, 以此提高双方冷链质量投入的概率, 保障冷链上的产品安全且有品质的到达消费端。

4.3 数值仿真

本节主要选取惩罚契约下相关模型变量，并设定初始值，具体如表 4.3 所示。运用 Matlab 软件对演化博弈过程进行数值仿真，得到系统动态演化图，并分析供应商和加工商进行冷链质量投入的演化轨迹，支撑惩罚契约模型下结论的正确性。

表 4.3 惩罚契约下演化博弈模型外生变量说明

符号	模型中的变量	初始值
q	产品需求量	5
C_s	供应商每单位产品成本	0.1
P_s	供应商每单位产品售价	0.2
C_m	加工商每单位产品成本	0.1
P_m	加工商每单位产品售价	0.35
α	供应商质量投入收益增加率	0.15
β	加工商质量投入收益增加率	0.15
T_1	供应商冷链质量投入的成本	0.03
T_2	加工商冷链质量投入的成本	0.03
λ	供应商“搭便车”的收益	0.1
η	加工商“搭便车”的收益	0.1
K	政府的惩罚力度	1
θ	政府的执行力度	0.8

当供应商和加工商进行冷链质量投入初始概率相同，即 (x, y) 初始值取 $(0.5, 0.5)$ 时，由小到大逐步提升惩罚力度 K 值，可以分别得到系统动态演化图 4.1、图 4.2、图 4.3 和图 4.4。

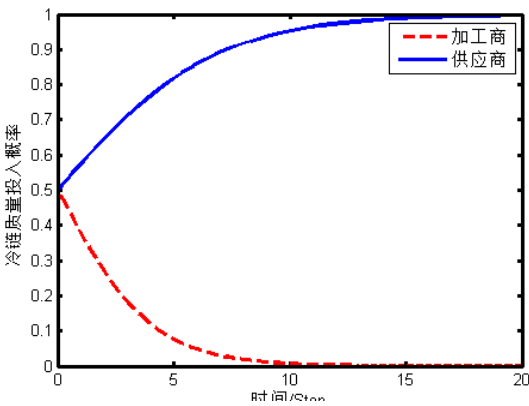


图 4.1 $K=0.8$ 时系统动态演化图

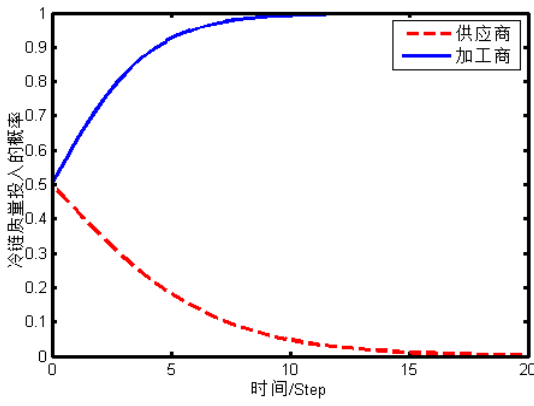
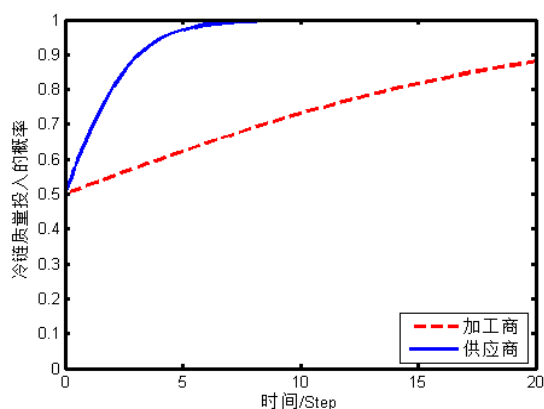
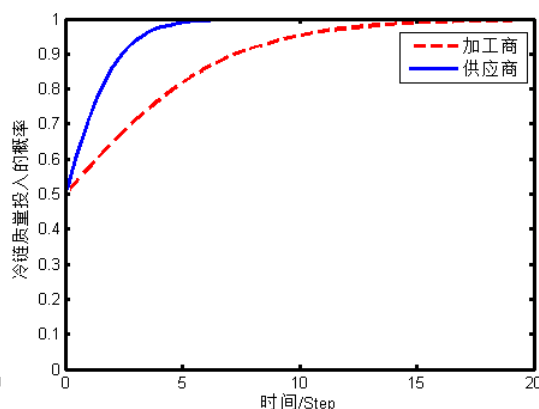
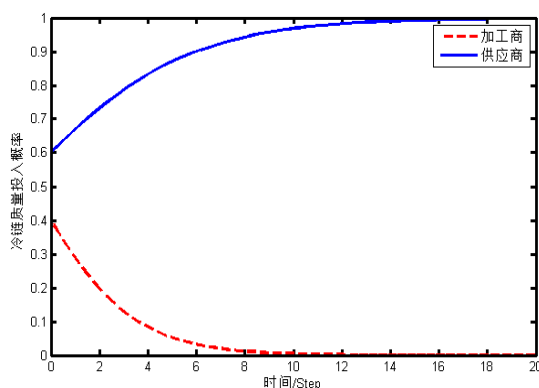
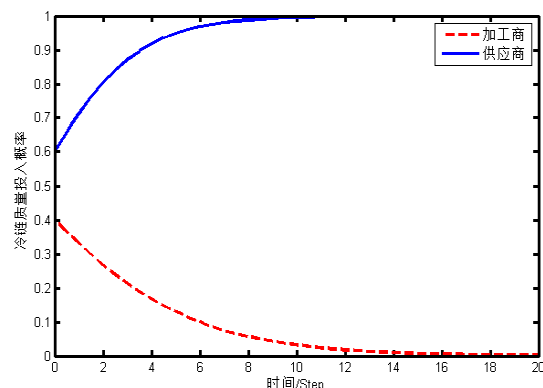
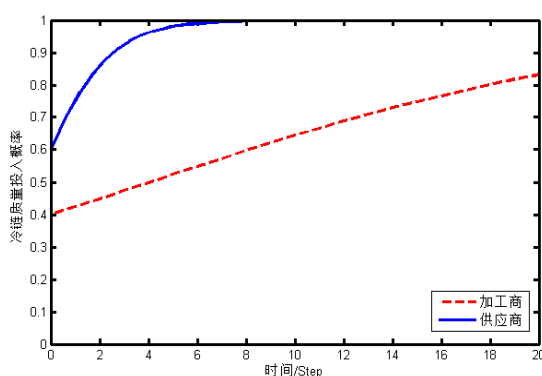
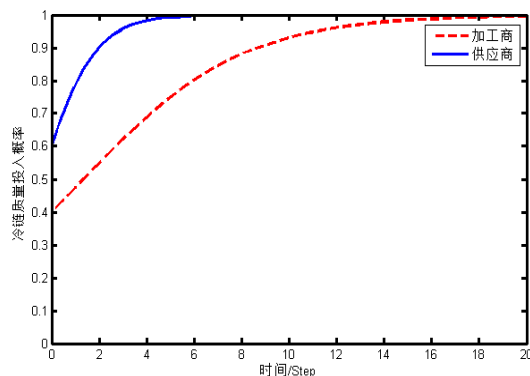


图 4.2 $K=1.6$ 时系统动态演化图

图 4.3 $K=2.4$ 时系统动态演化图图 4.4 $K=3.2$ 时系统动态演化图

图中横轴表示系统的演化时间，纵轴表示进行冷链质量投入的概率，蓝色实线表示供应商进行冷链质量投入的概率随时间变化的演化路径，红色虚线表示加工商进行冷链质量投入的概率随时间变化的演化路径。从图 4.1 可以看出，当 $K=0.8$ 时，在 Time step=15 时，供应商策略趋向是选择进行冷链质量投入，这可能与供应商注重品牌打造与形象等有关，但是其策略选择趋势缓慢且耗费时间长，在 Time step=10 时，加工商策略趋向是选择不进行冷链质量投入；从图 4.2 可以看出，随着惩罚力度的增大，当 $K=1.6$ 时供应商和加工商的策略选择仍然是 $(1, 0)$ ，但与 $K=0.8$ 时相比，其策略选择趋势与耗时发生了变化，供应商选择进行冷链质量投入趋势加快，从 Time step=15 变为 Time step=10，加工商不进行冷链质量投入趋势变缓由 Time step=10 变为 Time step=15；从图 4.3 可以看出，惩罚力度再增大时，即当 $K=2.4$ 时，供应商和加工商的策略选择趋向于 $(1, 1)$ ，即供应商和加工商都愿意投入资源保障冷链质量，但是此时供应商和加工商愿意进行冷链质量投入的时间并不相同，在 Time step=7 左右时，供应商选择演化稳定策略，而加工商选择演化稳定策略所需时间已经超过横轴的范围；从图 4.4 可以看出，当 $K=3.2$ 时，供应商和加工商的演化稳定策略选择趋向于 $(1, 1)$ ，但是两者选择进行冷链质量投入的时间加快了，并且在横轴范围内。从以上分析我们可以得到当惩罚力度较小时，并不能改变供应商和加工商的策略选择，只会改变演化趋势速度，并不能达到有效治理的效果，当惩罚力度超过供应商或加工商进行冷链质量投入临界值时，才会改变其策略的选择，此时虽然改变了选择，但是所需时间较长，因此还要适当加大惩罚力度找到合适时间，但是不能只追求演化稳定速度，因为过高惩罚力度会导致冷链上的节点企业退出市场。

当供应商和加工商中一方在市场中处于成熟期而另外一方处于成长期时，两者的经济实力和风险应对能力是不同的，冷链质量投入需要耗费资本，这种情况下，两者进行冷链质量投入初始概率是不相同的，当点 (x, y) 初始值为 $(0.6, 0.4)$ 时，由小到大逐步提升惩罚力度 K 值，可以分别得到系统动态演化图 4.5、图 4.6、图 4.7 和图 4.8。

图 4.5 $K=0.8$ 时系统动态演化图图 4.6 $K=1.6$ 时系统动态演化图图 4.7 $K=2.4$ 时系统动态演化图图 4.8 $K=3.2$ 时系统动态演化图

从图 4.5 可以看出，当 $K=0.8$ 时，在 $\text{Time step}=14$ 时，供应商策略趋向是选择进行冷链质量投入，但其策略选择趋势缓慢且耗费时间长，在 $\text{Time step}=9$ 时，加工商策略趋向是选择不进行冷链质量投入；从图 4.6 可以看出，随着惩罚力度的增大，当 $K=1.6$ 时供应商和加工商的策略选择仍然是 $(1, 0)$ ，但与 $K=0.8$ 时相比，其策略选择趋势与耗时发生了变化，供应商选择进行冷链质量投入趋势加快，从 $\text{Time step}=14$ 变为 $\text{Time step}=9$ ，加工商不进行冷链质量投入趋势变缓由 $\text{Time step}=9$ 变为 $\text{Time step}=14$ ；从图 4.7 可以看出，惩罚力度再增大时，即当 $K=2.4$ 时，

供应商和加工商的策略选择趋向于(1, 1)，即供应商和加工商都愿意投入资源保障冷链质量，但是此时供应商和加工商愿意进行冷链质量投入的时间并不相同，在 Time step=6 左右时，供应商选择演化稳定策略，而加工商选择演化稳定策略所需时间已经超过横轴给出的范围；从图 4.8 可以看出，当 $K=3.2$ 时，供应商和加工商的演化稳定策略选择趋向于(1, 1)，但是两者选择进行冷链质量投入的时间加快了，并且在横轴范围内。由此可知，当供应商和加工商进行冷链质量投入初始概率不相同，随着惩罚力度的改变，系统演化轨迹仍然符合演化分析结论，找到能促使供应商和加工商都愿意进行冷链质量投入的惩罚力度，避免惩罚力度偏小时起不到作用，过大时加重企业负担的情况发生，与供应商和加工商进行冷链质量投入初始概率相同的情况相比，两者的系统演化规律是相同的，但两者演化轨迹趋势变化快慢是不同的，当一方或双方冷链质量投入初始概率高于 0.5，此时其选择进行冷链质量投入的趋势加快，当一方或双方冷链质量投入初始概率低于 0.5，此时其选择不进行冷链质量投入的趋势加快，因此在对待供应商和加工商进行冷链质量投入初始概率不同时，与初始概率相同相比，在其他条件相同时，惩罚力度要更重些。

4.4 本章小结

本章针对供应商或加工商不进行冷链质量投入，采取“搭便车”获取额外收益的行为，构建了惩罚契约下的演化博弈模型，求解模型得到具体惩罚额度范围，并对模型进行数值仿真分析发现，当冷链质量投入初始概率相同时，在惩罚额度超过临界值后，双方趋向选择投入策略速度越来越快，当冷链质量投入初始概率不同时，为达到与初始概率相同的效果，惩罚额度应更大些。

第 5 章 政府补贴机制下冷链质量投入的演化博弈研究

5.1 相同补贴下的演化分析

5.1.1 模型的建立

当投入资源保护冷链质量带来的增加收益小于投入所花费的成本时，冷链上有限理性的供应商或加工商将没有意愿去投入资源保障冷链质量。针对这种情况，政府如果仍执行惩罚契约将导致冷链上一些节点企业逐渐退出市场。此时，政府应通过补贴机制鼓励冷链上的供应商和加工商选择冷链质量投入策略，对选择冷链质量投入的企业给予补贴，设政府的补贴额为 M ，那么当供应商和加工商进行冷链质量投入时，其对应的收益分别为 $\pi_{s0} + M$ 和 $\pi_{m0} + M$ 。此时，可以得到补贴政策约束下供应商和加工商的收益矩阵，如表 5.1 所示，并对模型进行求解，确定合适的补贴额，让冷链上的供应商和加工商都有意愿去投入资源保护冷链质量，保障冷链产品的流通安全。

表 5.1 相同补贴机制下供应商和加工商的收益矩阵

收益		加工商	
		进行冷链质量投入	不进行冷链质量投入
供应商	进行冷链质量投入	$\pi_{s0} + M, \pi_{m0} + M$	$\pi_{s0} + M, \pi_{m1}$
	不进行冷链质量投入	$\pi_{s1}, \pi_{m0} + M$	R_s, R_m

5.1.2 模型的求解与分析

根据表 5.1 相同补贴机制下供应商和加工商的收益矩阵提供的条件，经计算可以分别得到供应商和加工商的复制动态方程：

$$X_2 = \frac{d_x}{d_t} = x(U_{A1} - \overline{U_A}) = x(1-x)[\alpha q(P_s - C_s) - y\lambda q(P_s - C_s) - T_1 + M] \quad (5.1)$$

$$Y_2 = \frac{d_y}{d_t} = y(U_{B1} - \overline{U_B}) = (1-y)y[\beta q(P_m - P_s - C_m) - \eta q x(P_m - P_s - C_m) - T_2 + M] \quad (5.2)$$

复制动态方程 (5.1) 和 (5.2) 组合可构建一个二维动力系统 (III)。

命题 9: 系统 (III) 的平衡点为 (0, 0), (0, 1), (1, 0), (1, 1)。

且 (x_{d2}, y_{d2}) 也为该系统的平衡点, 当且仅当下面的不等式成立

$$\begin{aligned} & \text{Max}\{T_2 - \beta q(P_m - P_s - C_m), T_1 - \alpha q(P_s - C_s)\} < M \\ & < \text{Min}\{T_2 + (\eta q - \beta q)(P_m - P_s - C_m), T_1 + (\lambda q - \alpha q)(P_s - C_s)\} \end{aligned}$$

$$\text{其中, } y_{d2} = \frac{\alpha q(P_s - C_s) - T_1 + M}{\lambda q(P_s - C_s)}; \quad x_{d2} = \frac{\beta q(P_m - P_s - C_m) - T_2 + M}{\eta q(P_m - P_s - C_m)}。$$

证明: 对于系统 (III), 分别令 $d_x/d_t = 0$, $d_y/d_t = 0$, 可知该系统的平衡点为: (0, 0)、(0, 1)、(1, 0)、(1, 1)。

若 (x_{d2}, y_{d2}) 为该系统的平衡点, 则 $0 < x_{d2} < 1$, $0 < y_{d2} < 1$ 。

由 $0 < x_{d2} < 1$ 得:

$$0 < \frac{\beta q(P_m - P_s - C_m) - T_2 + M}{\eta q(P_m - P_s - C_m)}, \text{ 又由前文假设可知 } P_m > P_s + C_m,$$

那么可得 $T_2 - \beta q(P_m - P_s - C_m) < M$;

$$\frac{\beta q(P_m - P_s - C_m) - T_2 + M}{\eta q(P_m - P_s - C_m)} < 1 \text{ 又由前文假设可知 } P_m > P_s + C_m,$$

那么可得 $M < T_2 + (\eta q - \beta q)(P_m - P_s - C_m)$

即当 $T_2 - \beta q(P_m - P_s - C_m) < M < T_2 + (\eta q - \beta q)(P_m - P_s - C_m)$ 时, $0 < x_{d2} < 1$ 。

又由 $0 < y_{d2} < 1$ 得:

$$0 < \frac{\alpha q(P_s - C_s) - T_1 + M}{\lambda q(P_s - C_s)} \text{ 且 } P_s > C_s, \text{ 可得 } T_1 - \alpha q(P_s - C_s) < M$$

$$\frac{\alpha q(P_s - C_s) - T_1 + M}{\lambda q(P_s - C_s)} < 1 \text{ 且 } P_s > C_s, \text{ 可得 } M < T_1 + (\lambda q - \alpha q)(P_s - C_s)$$

即当 $T_1 - \alpha q(P_s - C_s) < M < T_1 + (\lambda q - \alpha q)(P_s - C_s)$ 时, $0 < y_{d2} < 1$ 。

命题 10: (1, 1) 是系统 (III) 唯一的 ESS 的充要条件是:

$$M > \text{Max} \left\{ -\frac{1}{2} [(\beta q - \eta q)(P_m - P_s - C_m) - T_2 + (\alpha q - \lambda q)(P_s - C_s) - T_1], \right. \\ \left. T_1 - (\alpha q - \lambda q)(P_s - C_s), T_2 - (\beta q - \eta q)(P_m - P_s - C_m) \right\} \quad (5.3)$$

证明: 从表 5.2 对平衡点的分析可知, (1, 1) 是上述系统唯一的 ESS 的充要条件为 $\text{tr}J < 0$ 且 $\det J > 0$ 。即:

$$-\left[(\alpha q - \lambda q)(P_s - C_s) - T_1 + 2M\right] - \left[(\beta q - \eta q)(P_m - P_s - C_m) - T_2\right] < 0 \\ \Leftrightarrow M > -\frac{1}{2} \left[(\beta q - \eta q)(P_m - P_s - C_m) - T_2 + (\alpha q - \lambda q)(P_s - C_s) - T_1\right]$$

且:

$$\left[(\alpha q - \lambda q)(P_s - C_s) - T_1 + M\right] \left[(\beta q - \eta q)(P_m - P_s - C_m) - T_2 + M\right] > 0 \\ \Leftrightarrow M > T_1 - (\alpha q - \lambda q)(P_s - C_s), M > T_2 - (\beta q - \eta q)(P_m - P_s - C_m)$$

所以, 当不等式 (5.3) 成立时, 平衡点 (1, 1) 满足 $\text{tr}J < 0$ 且 $\det J > 0$ 。

在式 (5.3) 的条件下, 由表 5.2 可知 (0, 0) 是系统的不稳定点, (0, 1) 和 (1, 0) 是系统的鞍点, (1, 1) 是系统唯一的 ESS。故得证。

表 5.2 系统 (III) 的平衡点分析

均衡点	$\text{tr}J$	$\det J$
$x=0$ $y=0$	$\begin{bmatrix} \alpha q(P_s - C_s) - T_1 + 2M \\ \beta q(P_m - P_s - C_m) - T_2 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \alpha q(P_s - C_s) \\ -T_1 + M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta q(P_m - P_s - C_m) \\ -T_2 + M \end{bmatrix}$
$x=1$ $y=0$	$\begin{bmatrix} -\alpha q(P_s - C_s) + T_1 \\ (\beta q - \eta q)(P_m - P_s - C_m) - T_2 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -\alpha q(P_s - C_s) + T_1 - M \\ (\beta q - \eta q)(P_m - P_s - C_m) - T_2 + M \end{bmatrix}$
$x=0$ $y=1$	$\begin{bmatrix} (\alpha q - \lambda q)(P_s - C_s) - T_1 \\ -\beta q(P_m - P_s - C_m) - T_2 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -(\alpha q - \lambda q) \\ (P_s - C_s) + T_1 - M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta q(P_m - P_s - C_m) \\ -T_2 + M \end{bmatrix}$
$x=1$ $y=1$	$\begin{bmatrix} -(\alpha q - \lambda q)(P_s - C_s) - T_1 + 2M \\ -(\beta q - \eta q)(P_m - P_s - C_m) - T_2 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} (\alpha q - \lambda q) \\ (P_s - C_s) - T_1 + M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (\beta q - \eta q) \\ (P_m - P_s - C_m) - T_2 + M \end{bmatrix}$

命题 10 表明: 当供应商和加工商选择冷链质量投入所获得的收益小于所花费的投入成本, 即 $\alpha < \alpha_1$, $\beta < \beta_1$, 政府可以通过补贴的手段促使供应商和加工商均

进行冷链质量的投入，且这一补贴额度必须要足够大，直到超过某一临界值时，补贴才起到作用。

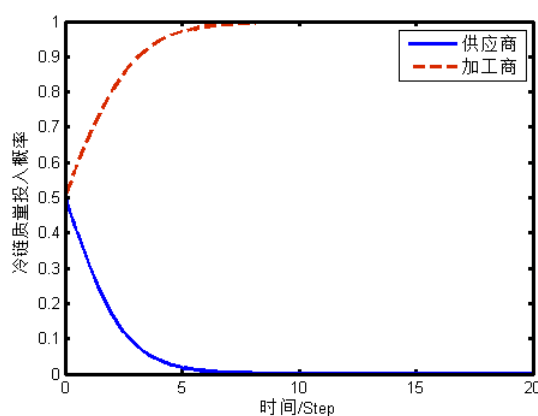
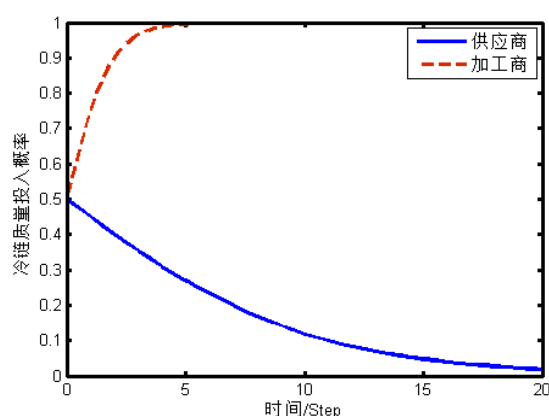
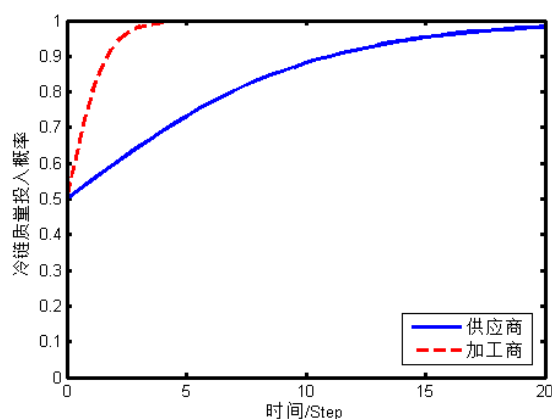
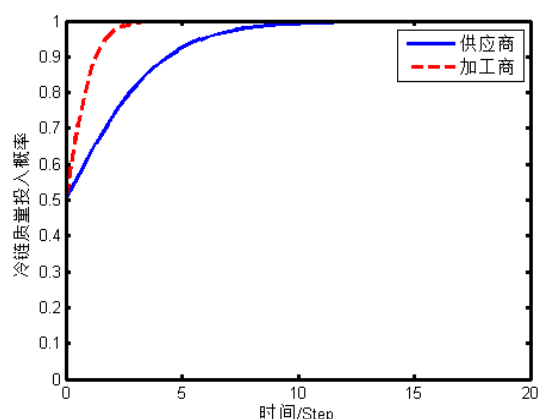
5.1.3 数值仿真

本节主要选取补贴机制下相关模型变量，满足前文假设条件并设定初始值，具体如表 5.3 所示。运用 Matlab 软件对演化博弈模型结果进行数值仿真，得到系统动态演化图，并对供应商和加工商进行冷链质量投入的演化轨迹进行分析，支持补贴机制下相关结论的正确性。

表 5.3 补贴机制下演化博弈模型外生变量说明

符号	模型中的变量	初始值
q	产品需求量	5
C_s	供应商每单位产品成本	0.1
P_s	供应商每单位产品售价	0.2
C_m	加工商每单位产品成本	0.1
P_m	加工商每单位产品售价	0.35
α	供应商质量投入收益增加率	0.15
β	加工商质量投入收益增加率	0.15
T_1	供应商冷链质量投入的成本	0.03
T_2	加工商冷链质量投入的成本	0.03
λ	供应商“搭便车”的收益	0.1
η	加工商“搭便车”的收益	0.1
M	政府的补贴力度	0.5

当供应商和加工商进行冷链质量投入初始概率相同，即 (x, y) 初始值取 $(0.5, 0.5)$ 时，由小到大地逐步增大补贴额 M ，可以分别得到系统动态演化图 5.1、图 5.2、图 5.3 和图 5.4。

图 5.1 $M=0.5$ 时系统动态演化图图 5.2 $M=1.0$ 时系统动态演化图图 5.3 $M=2.0$ 时系统动态演化图图 5.4 $M=2.5$ 时系统动态演化图

图中横轴表示系统的演化时间，纵轴表示进行冷链质量投入的概率，蓝色实线表示供应商进行冷链质量投入的概率随时间变化的演化路径，红色虚线表示加工商进行冷链质量投入的概率随时间变化的演化路径。从图 5.1 可以看出，当 $M=0.5$ 时，在 $\text{Time step}=7$ 时，加工商策略趋向是选择进行冷链质量投入，供应商策略趋向是选择不进行冷链质量投入；从图 5.2 可以看出，随着惩罚力度的增大，当 $M=1.0$ 时供应商和加工商的策略选择仍然是 $(0, 1)$ ，但与 $M=0.5$ 时相比，其策略选择趋势与耗时发生了变化，加工商选择进行冷链质量投入趋势加快，从 $\text{Time step}=7$ 变为 $\text{Time step}=5$ ，供应商不进行冷链质量投入趋势变缓由 $\text{Time step}=7$ 变为 $\text{Time step}=21$ ；从图 5.3 可以看出，当 $M=2.0$ 时，供应商和加工商的策略选择趋向于 $(1, 1)$ ，但是此时供应商和加工商愿意进行冷链质量投入的时间并不相同，在 $\text{Time step}=4$ ，加工选择演化稳定策略，而供应商选择演化稳定策略所需时间刚好在横轴端点处；从图 5.4 可以看出，当 $M=3.2$ 时，供应商和加工商的演化稳定策略选择

趋向于 (1, 1)，但是两者选择进行冷链质量投入的时间加快了，在 Time step=10 前，两者都选择了进行冷链质量投入的策略。

从以上分析我们可以得到当补贴力度较小时，并不能改变供应商和加工商的策略选择，只会改变演化趋势速度，并不能达到预期效果，易造成政府补贴浪费，只有当补贴力度超过供应商或加工商进行冷链质量投入临界值时，才会改变其策略的选择，此时补贴性价比最高，当政府继续加大补贴力度时，供应商和加工商趋向于选择进行冷链质量投入的速度加快，但如果片面追求演化稳定速度，会加重政府这方面的财政支出。结合我国冷链发展情况来看，很多企业尚未建立冷链物流服务体系，公共冷库建设较少，冷冻冷藏物流设备不完善，还未能形成规模效益，且运输和储藏成本也比普通货车高 30% 至 50%。具体补贴落实，应从我国冷链物流实际情况和政府合理补贴角度出发，系统推出相关扶持政策，针对购置冷链运输设备和建设冷库需要高额成本的问题，政府可以进行预算量化所需补贴额度，提供一定低于市场利率的贷款甚至免息贷款，在冷库建设占地方面实施减税免税和优化手续政策，鼓励冷链物流企业进行冷链基础设施的构建，提高冷库技术水平和促使冷藏冷冻运输车辆的多元化。针对一些中小冷链企业不能实现对产品质量追踪溯源的问题，政府应给予相应补贴，帮助其构建现代化信息管理系统，并派遣相关技术人员帮助其有效利用信息管理系统，保障冷链上产品的质量。

当供应商和加工商进行冷链质量投入初始概率不相同时，当点 (x, y) 初始值为 (0.4, 0.6) 时，由小到大逐步地提升补贴力度 M，可以分别得到系统动态演化图 5.5、图 5.6、图 5.7 和图 5.8。

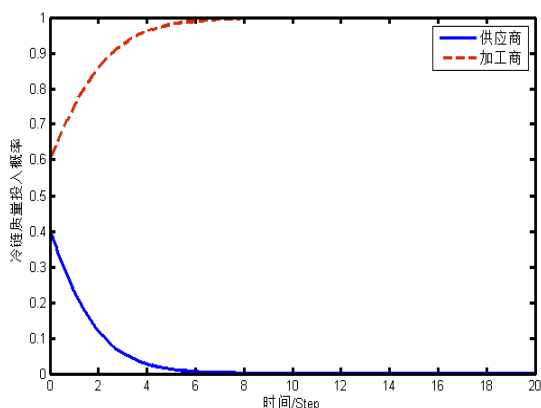


图 5.5 M=0.5 时系统动态演化图

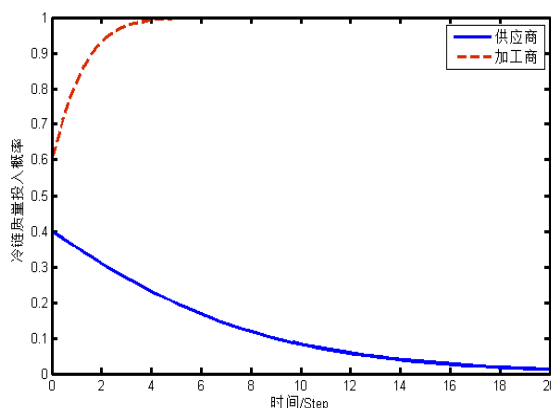
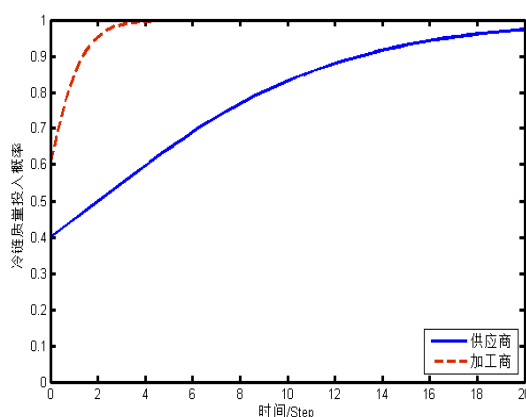
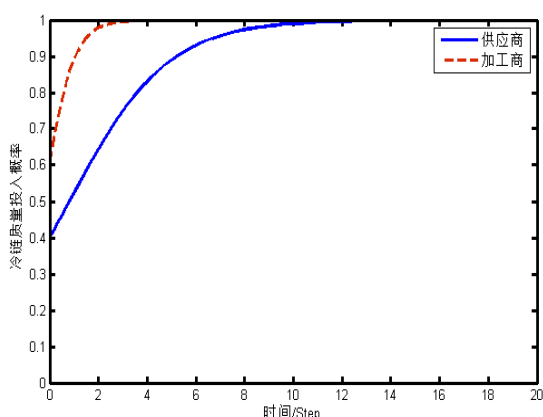


图 5.6 M=1.0 时系统动态演化图

图 5.7 $M=2$ 时系统动态演化图图 5.8 $M=2.5$ 时系统动态演化图

从图 5.5 可以看出，当 $M=0.5$ 时，在 Time step=6 时，加工商策略趋向是选择进行冷链质量投入，供应商策略趋向是选择不进行冷链质量投入；从图 5.6 可以看出，随着惩罚力度的增大，当 $M=1.0$ 时供应商和加工商的策略选择仍然是 $(0, 1)$ ，但与 $M=0.5$ 时相比，其策略选择趋势与耗时发生了变化，加工商选择进行冷链质量投入趋势加快，从 Time step=6 变为 Time step=4，供应商不进行冷链质量投入趋势变缓由 Time step=6 变为 Time step=20；从图 5.7 可以看出，当 $M=2.0$ 时，供应商和加工商的策略选择趋向于 $(1, 1)$ ，但是此时两者愿意进行冷链质量投入的时间并不相同；从图 5.8 可以看出，当 $M=3.2$ 时，供应商和加工商的演化稳定策略选择趋向于 $(1, 1)$ ，但是双方选择进行冷链质量投入的时间加快了，在 Time step=10 前，双方都选择了进行冷链质量投入的策略。

由此可知，当供应商和加工商进行冷链质量投入初始概率不同时，随着补贴额度的改变，系统演化轨迹仍然符合演化分析结论，找到能让供应商和加工商都愿意进行冷链质量投入的补贴力度临界值，避免补贴力度偏小起不到作用，造成补贴浪费，又避免补贴力度过大，增加政府不必要支出和负担。与供应商和加工商进行冷链质量投入初始概率相同的情况相比，双方的系统演化规律是相同的，但双方演化轨迹趋势变化快慢是不同的，当一方或双方冷链质量投入初始概率高于 0.5，此时其选择进行冷链质量投入的趋势加快，当一方或双方冷链质量投入初始概率低于 0.5，此时其选择不进行冷链质量投入的趋势加快，因此在对待供应商和加工商进行冷链质量投入初始概率不同时，与初始概率相同相比，对冷链质量投入初始概率低的一方要补贴更大些。

5.2 不相同补贴下的演化分析

5.2.1 模型的建立

当冷链上供应商和加工商中一方在市场中处于成熟期而另外一方处于成长期时，双方的经济实力和风险应对能力是不同的，处于市场发展成长期的一方市场规模和抵御风险能力相对较下，而处于市场发展成熟期的一方，已形成规模和品牌，为了增加消费者对品牌的忠诚度，其进行冷链质量投入的概率要高于处于成长期的另外一方，在相同补贴模型下，已经分析得出当双方进行冷链质量投入的概率不同时，要对冷链质量投入概率低的一方进行更大力度的补贴。

针对供应商和加工商进行冷链质量投入概率不同这种情况，为了得到更加合适的补贴额度，将给予两者额度大小不相等的补贴，假设政府对供应商投入资源保护冷链质量的补贴额度为 G_p ，对加工商投入资源保护冷链质量的补贴额度为 G_m ，那么这时供应商可以获得收益是 $\pi_{s0} + G_p$ ，加工商可以获得的收益是 $\pi_{m0} + G_m$ ，那么这时可以得到两者收益矩阵，具体如表 5.4 所示。

表 5.4 不相同补贴机制下供应商和加工商的收益矩阵

收益		加工商	
		进行冷链质量投入	不进行冷链质量投入
供应商	进行冷链质量投入	$\pi_{s0} + G_p, \pi_{m0} + G_m$	$\pi_{s0} + G_p, \pi_{m1}$
	不进行冷链质量投入	$\pi_{s1}, \pi_{m0} + G_m$	R_s, R_m

5.2.2 模型的求解与分析

根据表 5.4 不相同补贴机制下供应商和加工商的收益矩阵提供的条件，经计算可以分别得到供应商和加工商的复制动态方程：

$$X_3 = \frac{d_x}{d_t} = x(U_{A1} - \overline{U_A}) = x(1-x) [\alpha q(P_s - C_s) - y\lambda q(P_s - C_s) - T_1 + G_m] \quad (5.4)$$

$$Y_3 = \frac{d_y}{d_t} = y(U_{B1} - \overline{U_B}) = y(1-y) [\beta q(P_m - P_s - C_m) - \eta q x(P_m - P_s - C_m) - T_2 + G_p] \quad (5.5)$$

复制动态方程 (5.4) 和 (5.5) 组合可构建一个二维动力系统 (IV)。

命题 11: 系统 (IV) 的平衡点为 $(0, 0)$, $(0, 1)$, $(1, 0)$, $(1, 1)$

当且仅当不等式(5.6)成立时, (x_{d3}, y_{d3}) 也为该系统的平衡点。

$$\begin{aligned} T_2 - \beta q(P_m - P_s - C_m) < G_p < T_2 + (\eta q - \beta q)(P_m - P_s - C_m) \\ T_1 - \alpha q(P_s - C_s) < G_m < T_1 + (\lambda q - \alpha q)(P_s - C_s) \end{aligned} \quad (5.6)$$

$$\text{其中, } y_{d3} = \frac{\alpha q(P_s - C_s) - T_1 + G_m}{\lambda q(P_s - C_s)}; \quad x_{d3} = \frac{\beta q(P_m - P_s - C_m) - T_2 + G_p}{\eta q(P_m - P_s - C_m)}。$$

证明: 对于系统 (IV), 分别令 $d_x/d_t = 0$, $d_y/d_t = 0$, 可知该系统的平衡点为: $(0, 0)$ 、 $(0, 1)$ 、 $(1, 0)$ 、 $(1, 1)$ 。

若 (x_{d3}, y_{d3}) 为该系统的平衡点, 则 $0 < x_{d3} < 1$, $0 < y_{d3} < 1$ 。

由 $0 < x_{d3} < 1$ 得:

$$0 < \frac{\beta q(P_m - P_s - C_m) - T_2 + G_p}{\eta q(P_m - P_s - C_m)}, \text{ 又由前文假设可知 } P_m > P_s + C_m,$$

那么可得 $T_2 - \beta q(P_m - P_s - C_m) < G_p$;

$$\frac{\beta q(P_m - P_s - C_m) - T_2 + G_p}{\eta q(P_m - P_s - C_m)} < 1 \text{ 又由前文假设可知 } P_m > P_s + C_m,$$

那么可得 $G_p < T_2 + (\eta q - \beta q)(P_m - P_s - C_m)$;

所以当 $T_2 - \beta q(P_m - P_s - C_m) < G_p < T_2 + (\eta q - \beta q)(P_m - P_s - C_m)$ 时, x_{d3} 为系统平衡点的横坐标。

又由 $0 < y_{d3} < 1$ 得:

$$0 < \frac{\alpha q(P_s - C_s) - T_1 + G_m}{\lambda q(P_s - C_s)} \text{ 且 } P_s > C_s, \text{ 可得 } T_1 - \alpha q(P_s - C_s) < G_m$$

$$\frac{\alpha q(P_s - C_s) - T_1 + G_m}{\lambda q(P_s - C_s)} < 1 \text{ 且 } P_s > C_s, \text{ 可得 } G_m < T_1 + (\lambda q - \alpha q)(P_s - C_s)$$

那么当 $T_1 - \alpha q(P_s - C_s) < G_m < T_1 + (\lambda q - \alpha q)(P_s - C_s)$ 时, y_{d3} 为系统平衡点纵坐标。所以当政府对冷链上供应商和加工商的补贴额分别满足不等式 (5.6) 条件时, 点 (x_{d3}, y_{d3}) 也为该系统的平衡点。

5.2.3 不同补贴额对演化稳定性影响分析

命题 12: 平衡点 $(1, 1)$ 是系统 (IV) 唯一的 ESS 的充要条件是:

$$\begin{aligned} G_p &> T_1 - (\alpha q - \lambda q)(P_s - C_s) \\ G_m &> T_2 - (\beta q - \eta q)(P_m - P_s - C_m) \\ G_m + G_p &> -[(\beta q - \eta q)(P_m - P_s - C_m) - T_2 + (\alpha q - \lambda q)(P_s - C_s) - T_1] \end{aligned} \quad (5.7)$$

证明: 从表 5.5 对平衡点的分析可知, $(1, 1)$ 是上述系统唯一的 ESS 的充要条件为 $trJ < 0$ 且 $\det J > 0$ 。

由 $trJ < 0$ 可以得到:

$$\begin{aligned} & -[(\alpha q - \lambda q)(P_s - C_s) - T_1 + G_m + G_p] - [(\beta q - \eta q)(P_m - P_s - C_m) - T_2] < 0 \\ \Leftrightarrow & G_m + G_p > -[(\beta q - \eta q)(P_m - P_s - C_m) - T_2 + (\alpha q - \lambda q)(P_s - C_s) - T_1] \end{aligned}$$

又由 $\det J > 0$ 可以得到:

$$\begin{aligned} & [(\alpha q - \lambda q)(P_s - C_s) - T_1 + G_p][(\beta q - \eta q)(P_m - P_s - C_m) - T_2 + G_m] > 0 \\ \Leftrightarrow & G_p > T_1 - (\alpha q - \lambda q)(P_s - C_s), \quad G_m > T_2 - (\beta q - \eta q)(P_m - P_s - C_m) \end{aligned}$$

所以, 当政府对冷链上供应商和加工商的补贴额度及总体补贴额度分别满足下列不等式 (5.7) 时, 即:

$$\begin{aligned} G_p &> T_1 - (\alpha q - \lambda q)(P_s - C_s) \\ G_m &> T_2 - (\beta q - \eta q)(P_m - P_s - C_m) \\ G_m + G_p &> -[(\beta q - \eta q)(P_m - P_s - C_m) - T_2 + (\alpha q - \lambda q)(P_s - C_s) - T_1] \end{aligned} \quad \text{时,}$$

系统的 $trJ < 0$ 且 $\det J > 0$, 所以 $(1, 1)$ 是系统唯一的 ESS。

当矩阵的迹和雅可比行列式值满足不等式 (5.7) 的条件时, 由表 5.5 可知 $(0, 0)$ 是系统的不稳定点, $(0, 1)$ 和 $(1, 0)$ 是系统的鞍点。

故得证。

表 5.5 系统 (IV) 的平衡点分析

均衡点	trJ	detJ
$x=0$ $y=0$	$\begin{bmatrix} \alpha q(P_s - C_s) - T_1 + G_p \\ \beta q(P_m - P_s - C_m) - T_2 + G_m \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \alpha q(P_s - C_s) \\ -T_1 + G_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta q(P_m - P_s - C_m) \\ -T_2 + G_m \end{bmatrix}$
$x=1$ $y=0$	$\begin{bmatrix} -\alpha q(P_s - C_s) + T_1 - G_p + G_m \\ (\beta q - \eta q)(P_m - P_s - C_m) - T_2 \end{bmatrix} +$	$\begin{bmatrix} -\alpha q(P_s - C_s) + T_1 - G_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (\beta q - \eta q) \\ (P_m - P_s - C_m) - T_2 + G_m \end{bmatrix}$
$x=0$ $y=1$	$\begin{bmatrix} (\alpha q - \lambda q)(P_s - C_s) - T_1 + G_p \\ -\beta q(P_m - P_s - C_m) - T_2 + G_m \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -(\alpha q - \lambda q) \\ (P_s - C_s) + T_1 - G_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta q(P_m - P_s - C_m) \\ -T_2 + G_m \end{bmatrix}$
$x=1$ $y=1$	$\begin{bmatrix} -(\alpha q - \lambda q)(P_s - C_s) - T_1 + G_p \\ (\beta q - \eta q)(P_m - P_s - C_m) - T_2 + G_m \end{bmatrix} -$	$\begin{bmatrix} (\alpha q - \lambda q) \\ (P_s - C_s) - T_1 + G_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (\beta q - \eta q) \\ (P_m - P_s - C_m) - T_2 + G_m \end{bmatrix}$

命题 12 表明:

根据政府给予供应商和加工商的补贴额度的差异可以分为三种情况: (1) 当政府给予供应商的补贴额度 G_p 提高, 而给予加工商的补贴额度 G_m 减少, 系统的均衡点会趋向于点 (1, 0), 此时, 供应商倾向于采取冷链质量投入策略, 加工商倾向于采取不进行冷链质量投入策略, 系统处于非稳定状态, 政府为了保护冷链质量安全, 同样会给予加工商补贴鼓励其投入资源保护冷链质量。(2) 当政府给予供应商的补贴额度 G_p 减少, 而给予加工商的补贴额度 G_m 提高, 系统均衡点会趋向于点 (0, 1), 此时, 供应商倾向于采取不进行冷链质量投入策略, 加工商倾向于采取进行冷链质量投入策略, 系统处于非稳定状态, 政府为了保护冷链质量安全, 同样会给予供应商补贴鼓励其投入资源保护冷链质量, 系统中包含冷链质量投入的区域将扩大。(3) 当政府给予冷链上供应商和加工商的补贴额度同比例提高的时候, 且超过临界值时, 此时冷链上的供应商和加工商趋向于投入资源保护冷链质量, 保障冷链上产品安全。

5.3 本章小结

本章针对冷链上节点企业进行质量投入的收益小于成本的情况, 政府应采取补贴机制鼓励供应商和加工商进行冷链质量投入, 首先构建相同补贴额度机制下

演化博弈模型，求解模型得到具体补贴额度，并对模型进行仿真分析，考虑到现实中供应商和加工商运营状况不同，需要补贴的额度也不同，为了得出更佳合适的补贴额度，构建了不相同补贴下的演化博弈模型，求解模型分别得到对供应商和加工商的具体有效补贴额。

第6章 政府监管下同类企业间冷链质量投入的演化博弈研究

前文主要研究了如何让供应商和加工商两个不同群体都选择投入资源保障冷链质量，但在任意一个同类群体企业间也存在进行和不进行冷链质量投入两种策略。为了保障冷链上产品全程流通安全，每一类群体内部间也应均投入资源保护冷链质量。政府不参加管理和监督的情况下，供应商群体 A 和 B 为了保障自身利益会不断调整策略，最终都会选择不进行冷链质量投入的策略达到演化均衡，此时，需要政府采取措施引导冷链上同一类群体企业选择冷链质量投入策略，保障冷链上产品的质量安全。

6.1 演化博弈模型假设与建立

6.1.1 演化博弈模型的假设

本文以冷链上供应商群体为例，将供应商群体分为 A 和 B 两类，假设当供应商群体 A 和 B 都投入资源保护冷链质量时收益均为 π_{s0} ；供应商群体 A 和 B 都不投入资源保护冷链质量的收益均为 π_{s1} ；若一方投入资源而另外一方不投入资源保护冷链质量，那么投入资源一方的收益为 π_{sd} ，没投入资源一方的收益为 π_{sn} 。此时，政府为保障冷链质量安全，对投入资源保护冷链质量的供应商群体进行补贴，且补贴额为 G ，对不投入资源保护冷链质量的供应商群体进行惩罚，且惩罚额为 F 。此时可以得到政府监管下供应商群体 A 和 B 之间博弈收益矩阵，具体如表 6.1 所示。

表 6.1 政府监管下供应商群体 A 和 B 间的收益矩阵

收益		供应商群体 B	
		进行冷链质量投入	不进行冷链质量投入
供应商群体 A	进行冷链质量投入	$\pi_{s0} + G, \pi_{s0} + G$	$\pi_{sd} + G, \pi_{sn} - F$
	不进行冷链质量投入	$\pi_{sn} - F, \pi_{sd} + G$	$\pi_{s1} - F, \pi_{s1} - F$

6.1.2 演化博弈模型的建立

供应商群体 A 和 B 可以选择进行冷链质量投入或不进行冷链质量投入这两种策略，并在多次加工生产销售重复地进行博弈。假设供应商选择冷链质量投入策略的概率为 x ，不选择冷链质量投入策略的概率为 y ；

那么，当供应商群体进行冷链质量投入时，其期望收益为：

$$U_1 = x(\pi_{s0} + G) + y(\pi_{sd} + G) \quad (6.1)$$

$$U_2 = x(\pi_{sn} - F) + y(\pi_{s1} - F) \quad (6.2)$$

供应商的混合策略，即供应商进行与不进行冷链质量投入的平均期望收益为：

$$\bar{U} = xU_1 + (1-x)U_2 \quad (6.3)$$

则供应商的复制动态方程为：

$$F(x) = \frac{d_x}{d_t} = x(U_1 - \bar{U}) = (1-x)x[x(\pi_{s0} + \pi_{s1} - \pi_{sd} - \pi_{sn}) + \pi_{sd} - \pi_{s1} + F + G] \quad (6.4)$$

$$F(y) = \frac{d_y}{d_t} = y(U_2 - \bar{U}) = (1-y)y[y(\pi_{s0} + \pi_{s1} - \pi_{sd} - \pi_{sn}) + \pi_{sn} - \pi_{s0} + F + G] \quad (6.5)$$

6.2 演化博弈模型的求解与分析

供应商投入资源保护冷链质量的概率为 x 与不投入资源保护冷链质量的概率为 y 两者的和为 1，即 $x + y = 1$ ，两种行为策略概率是互补的，则本文只对概率为 x 的行为策略进行分析。

令微分方程 $F(x) = x(1-x)[x(\pi_{s0} + \pi_{s1} - \pi_{sd} - \pi_{sn}) + \pi_{sd} - \pi_{s1} + F + G] = 0$ ，则可以得到微分方程的三个解： $x_1 = 0$ ， $x_2 = 1$ ， $x_3 = \frac{\pi_{sd} - \pi_{s1} + F + G}{\pi_{sd} - \pi_{s0} + \pi_{sn} - \pi_{s1}}$ ，由微分方程的平衡点及稳定性原理，可以判断这三个平衡点是否为演化稳定策略。

当 $\left. \frac{dF(x^\vee)}{dx} \right|_{x=x^\vee} < 0$ 时，则平衡点 x^\vee 为系统的演化稳定策略。

对 $F(x)$ 求导，得 $\frac{dF(x)}{dx} = (1-2x)[x(\pi_{s0} + \pi_{s1} - \pi_{sd} - \pi_{sn}) + \pi_{sd} - \pi_{s1} + F + G] + x(1-x)(\pi_{s0} + \pi_{s1} - \pi_{sd} - \pi_{sn})$ ；

当 $x_1 = 0$ 时，则有 $\left. \frac{dF(x_1)}{dx} \right|_{x=x_1} = \pi_{sd} - \pi_{s1} + F + G$ ；

当 $x_2 = 1$ 时, 则有 $\left. \frac{dF(x_2)}{dx} \right|_{x=x_2} = \pi_{sn} - \pi_{s0} - F - G$;

当 $x_3 = \frac{\pi_{sd} - \pi_{s1} + F + G}{\pi_{sd} - \pi_{s0} + \pi_{sn} - \pi_{s1}}$ 时,

则有 $\left. \frac{dF(x_3)}{dx} \right|_{x=x_3} = \frac{(\pi_{s1} - \pi_{sd} + F + G)(\pi_{sn} - \pi_{s0} - F - G)}{\pi_{sd} - \pi_{s0} + \pi_{sn} - \pi_{s1}}$;

由上述三式子可以得到 $\left. \frac{dF(x^\vee)}{dx} \right|_{x=x^\vee}$ 是否大于 0, 与 $F+G$ 、 $\pi_{sd} - \pi_{s1}$ 及 $\pi_{sn} - \pi_{s0}$ 的取值有关系, $\pi_{sd} - \pi_{s1}$ 和 $\pi_{sn} - \pi_{s0}$ 是假设已知量, 则三个平衡点是否为演化稳定策略与 $F+G$ 的取值有关系, 根据 $F+G$ 的取值可以分成以下三种情况分析系统的演化稳定性:

(1) 当 $F+G > \max(\pi_{s1} - \pi_{sd}, \pi_{sn} - \pi_{s0})$ 时, 则有

$$\left. \frac{dF(x_1)}{dx} \right|_{x=x_1} = \pi_{sd} - \pi_{s1} + F + G > 0;$$

$$\left. \frac{dF(x_2)}{dx} \right|_{x=x_2} = \pi_{sn} - \pi_{s0} - F - G < 0;$$

$$\left. \frac{dF(x_3)}{dx} \right|_{x=x_3} = \frac{(\pi_{s1} - \pi_{sd} - F - G)(\pi_{sn} - \pi_{s0} - F - G)}{\pi_{sd} - \pi_{s0} + \pi_{sn} - \pi_{s1}} > 0;$$

由此可知平衡点 x_1, x_3 不是演化稳定策略, 平衡点 $x_2 = 1$ 是演化稳定策略, 表明当政府对供应商群体进行冷链质量投入策略的补贴和对不进行冷链质量投入的惩罚足够大时, 即 $F+G > \max(\pi_{s1} - \pi_{sd}, \pi_{sn} - \pi_{s0})$ 时, 供应商进行冷链质量投入带来的综合收益大于不进行冷链质量投入的综合收益, 那么供应商群体会逐渐的采取进行冷链质量投入的策略。

(2) 当 $\min(\pi_{s1} - \pi_{sd}, \pi_{sn} - \pi_{s0}) \leq F+G \leq \max(\pi_{s1} - \pi_{sd}, \pi_{sn} - \pi_{s0})$ 时, 要分成两种情况分析系统的演化稳定性:

① 当 $(\pi_{sn} - \pi_{s0}) \leq F+G \leq (\pi_{s1} - \pi_{sd})$ 时,

$$\left. \frac{dF(x_1)}{dx} \right|_{x=x_1} = \pi_{sd} - \pi_{s1} + F + G < 0;$$

$$\left. \frac{dF(x_2)}{dx} \right|_{x=x_2} = \pi_{sn} - \pi_{s0} - F - G < 0;$$

$$\left. \frac{dF(x_3)}{dx} \right|_{x=x_3} = \frac{(\pi_{s1} - \pi_{sd} - F - G)(\pi_{sn} - \pi_{s0} - F - G)}{\pi_{sd} - \pi_{s0} + \pi_{sn} - \pi_{s1}} < 0;$$

②当 $(\pi_{s1} - \pi_{sd}) \leq F + G \leq (\pi_{sn} - \pi_{s0})$ 时,

$$\left. \frac{dF(x_1)}{dx} \right|_{x=x_1} > 0; \quad \left. \frac{dF(x_2)}{dx} \right|_{x=x_2} > 0; \quad \left. \frac{dF(x_3)}{dx} \right|_{x=x_3} < 0;$$

由此可知, 当 $(\pi_{sn} - \pi_{s0}) \leq F + G \leq (\pi_{s1} - \pi_{sd})$ 时, 平衡点 x_1, x_2, x_3 是演化稳定策略, 开始时会有 $x_3 = \frac{\pi_{sd} - \pi_{s1} + F + G}{\pi_{sd} - \pi_{s0} + \pi_{sn} - \pi_{s1}}$ 比例左右的供应商进行冷链质量投入, 但不进行冷链质量投入的综合收益要更大, 供应商群体会逐渐地采取不进行冷链质量投入的策略; 当 $(\pi_{s1} - \pi_{sd}) \leq F + G \leq (\pi_{sn} - \pi_{s0})$ 时, 平衡点 x_1, x_2 不是演化稳定策略, 平衡点 x_3 是演化稳定策略。

(3) 当 $F + G \leq \min(\pi_{s1} - \pi_{sd}, \pi_{sn} - \pi_{s0})$ 时,

$$\left. \frac{dF(x_1)}{dx} \right|_{x=x_1} = \pi_{sd} - \pi_{s1} + F + G < 0;$$

$$\left. \frac{dF(x_2)}{dx} \right|_{x=x_2} = \pi_{sn} - \pi_{s0} - F - G > 0;$$

$$\left. \frac{dF(x_3)}{dx} \right|_{x=x_3} = \frac{(\pi_{s1} - \pi_{sd} - F - G)(\pi_{sn} - \pi_{s0} - F - G)}{\pi_{sd} - \pi_{s0} + \pi_{sn} - \pi_{s1}} > 0;$$

由此可知, 当 $F + G \leq \min(\pi_{s1} - \pi_{sd}, \pi_{sn} - \pi_{s0})$ 时, 平衡点 x_2, x_3 不是演化稳定策略, 平衡点 x_1 是演化稳定策略。表明当政府对进行冷链质量投入的供应商群体补贴不够大, 以及对不进行冷链质量投入的供应商群体惩罚力度不够严时, 会导致不进冷链质量投入的综合收益大于进行冷链质量投入的综合收益的情况出现, 那么供应商群体最终将倾向于采取不进行冷链质量投入的策略。

6.3 本章小结

本章针对同类冷链节点企业内部间质量投入博弈问题, 以供应商为例, 为促使其进行冷链质量投入, 对搭便车行为进行惩罚、质量投入行为进行补贴, 构建了政府监管下供应商群体内部间的演化博弈模型, 并进行求解分析得到具体执行力度。

第7章 研究结论与展望

7.1 主要研究结论

本文首先构建没有政府参与情况下，冷链上供应商和加工商两个群体之间的演化博弈模型；接着建立政府监管下的演化博弈模型（惩罚和补贴），对政府惩罚契约与补贴机制下供应商和加工商的演化博弈模型进行求解分析，并通过 Matlab 软件对模型进行仿真；最后研究了同类冷链节点企业间的冷链质量投入博弈，并采取措施促使其进行冷链质量投入。得出以下基本结论：

（1）当供应商与加工商投入资源保护冷链质量所带来的收益由小逐渐变大时，会依次出现不同演化稳定策略：双方均不选择投入资源保护冷链质量、一方选择投入资源保护冷链质量而另一方不选择投入资源保护冷链质量、双方均选择投入资源保护冷链质量。（2）供应商和加工商是否选择冷链质量投入策略与“搭便车”行为能获得收益相关紧密，当不进行资源投入通过“搭便车”行为就能获得较高收益时，冷链上供应商或加工商选择冷链质量投入的概率会大大降低。（3）针对供应商和加工商选择“搭便车”行为，政府要采取惩罚策略，当惩罚力度满足式（4.3）时，惩罚契约才有效，即两者采取的演化稳定策略是进行冷链质量投入。（4）当供应商和加工商进行冷链质量投入初始概率不同时，冷链质量投入收益低的一方选择不投入策略的趋势加快，因此为达到与初始概率相同的执行效果，惩罚额度应更大些。（5）当通过选择冷链质量投入策略所获得的收益小于投入成本时，为了提高冷链上供应商和加工商投入资源保护冷链的积极性，政府应给予两者补贴，并且只有当补贴力度满足式（5.3）时，即两者采取的演化稳定策略是进行冷链质量投入。（6）当供应商和加工商进行冷链质量投入初始概率不同时，冷链质量投入收益低的一方选择不投入策略的趋势加快，因此，为达到与初始概率相同的执行效果，补贴额度应更大些。（7）当政府惩罚和补贴力度足够大时，同类冷链节点企业趋向于采取冷链质量投入策略。

7.2 研究展望

本文运用演化博弈理论分析了冷链节点企业选择不选择冷链质量投入策略的演化路径，针对“搭便车”及冷链质量投入收益小于成本问题，分别引入惩罚策略和补贴策略，并定量确定惩罚力度和补贴力度，为冷链质量安全保障研究做出了有益补充，但还存在以下两个方面的不足：

（1）本文主要研究了冷链上供应商和加工商两个重要节点企业以及两者内部间关于冷链质量投入的博弈，但现实生活中，冷链上的主体还有销售端及消费者，冷链上的主体之间也存在复杂的博弈关系，若构建多群体关于冷链质量投入的演化博弈模型，冷链质量安全将得到进一步提升。

（2）本文未考虑契约协调下冷链节点企业策略选择，为了达到冷链整体收益最大化，冷链上重要主体之间可以共同分担冷链质量投入所需花费的成本，共享冷链质量投入所带来的额外收益，因此构建“成本分担+收益共享”契约模型下，冷链节点企业策略选择将是冷链质量安全研究的一个重要方向。

参考文献

- [1] KUO J C ,CHEN M C. Developing an advanced Multi-Temperature Joint Distribution System for the food cold chain [J]. Food Control, 2010, 21(4):559-566.
- [2] HOANG H M, FLICK D, ALVAREZ G, et al. Combined deterministic and stochastic approaches for modelling the evolution of food products along the cold chain [J]. International Journal of Refrigeration, 2012, 35(4):915-926.
- [3] TECHANE B ,GIRMA G. Food traceability as an integral part of logistics management in food and agricultural supply chain [J].Food Control,2013, 33(1):32-48.
- [4] 毋庆刚. 我国冷链物流发展现状与对策研究[J]. 中国流通经济,2011, 02:24-28.
- [5] 杨丽伟. 我国冷链物流现状及发展趋势分析[J]. 现代商贸工业,2018,01:29-30.
- [6] 樊爱珍,张翠花. 我国冷藏药品冷链物流存在的问题与对策研究[J]. 现代商业,2016(9):20-21.
- [7] JOHN L, PATRICK L,RAMZI O, et al. Reducing the loss of vaccines from accidental freezing in the cold chain: The experience of continuous temperature monitoring in Tunisia[J]. Vaccine, 2015, 33(7):902-906.
- [8] Amir S, Reza F S. A new benchmarking approach in Cold Chain [J]. Applied mathematical modeling, 2012, 36(1):212- 224.
- [9] Rohit J, D.K .Banwet, Ravi Shankar. A Delphi-AHP-TOPSIS based benchmarking framework for performance improvement of a cold chain [J]. Expert Systems with Application, 2011,38 (8) :10170- 10813.
- [10] Yahia EM. Cold chain development and challenges in the developing world [J]. ActaHorticulturae, 2010, 877:127-132.
- [11] Shih C W, Wang C H. Integrating wireless sensor networks with statistical quality control to develop a cold chain system in food industries [J]. Computer Standards & Interfaces. 2016, 45: 62-78.
- [12] Gwanpua SG, Verboven P, Leducq D. The FRISBEE tool, a software for optimising the trade-off between food quality, energy use, and global warming impact of cold chains [J]. Journal of food Engineering, 2015, 148: 2-12.

- [13] Gogou E, Katsaros G, Derens E, et al. Cold chain database development and application as a tool for the cold chain management and food quality evaluation[J]. International Journal of Refrigeration, 2015, 52:109-121.
- [14] Mercier S, Villeneuve S, Mondor M. Time-Temperature Management Along the Food Cold Chain: A Review of Recent Developments [J]. Comprehensive Reviews in Food Science & Food Safety, 2017, 16 (4):647-667.
- [15] 李洁. 物联网技术在农产品冷链物流中的应用[J]. 中国集体经济,2011,(11): 45-53.
- [16] 马婷,李芳,单大亚. 基于物联网技术的食品冷链物流跟踪及追溯问题研究[J]. 上海理工大学学报,2013,35(06):557-561.
- [17] 张琳芳. 基于物联网技术冷链物流系统的研究[J]. 林区教学,2016,08: 81-82.
- [18] 汪旭晖,张其林. 基于物联网产的生鲜农产品冷链物流体系构建: 框架、机理与路径[J]. 南京农业大学学报, 2016.16(1): 31-39.
- [19] Hongxia Zhao, Sheng Liu, Changqing Tian. An Overview of Current Status of Cold Chain in China [J]. International Journal of Refrigeration, 2018, 88: 483-495.
- [20] 杨路明,马小雅. 生鲜农产品冷链物流断链成因及规避路径研究[J]. 青海社会科学,2015,06: 66-70.
- [21] 熊峰,彭健,金鹏等. 生鲜农产品供应链关系契约稳定性影响研究——以冷链设施补贴模式为视角[J]. 中国管理科学,2015,08: 102-111.
- [22] 伍景琼,韩春阳,贺瑞. 生鲜食品冷链配送相关理论研究综述[J]. 华东交通大学学报 2016,33(01): 45-54.
- [23] YuChu Li, YenHong Chen. Assessing the thermal performance of three cold energy storage materials with low eutectic temperature for food cold chain [J]. Energy, 2016, 115: 238-256.
- [24] 王淑云,姜樱梅,王宪杰. 农产品冷链三级库存一体化策略研究[J]. 中国管理科学,2016,24(02): 108-114.
- [25] 唐润,范宇翔,彭洋洋. 保鲜温度影响下的生鲜农产品供应链收益共享契约[J]. 江苏农业科学,2017,45(01): 293-298.
- [26] 钟秀英. 我国药品冷链物流现状、成因与发展策略分析[J]. 中国市场,2012,02: 22-24.

- [27] 师绘敏. 我国医药冷链物流发展中存在的问题及对策研究[J]. 中国医药指南,2012,10(19): 398-399.
- [28] Hatchett R. The medicines refrigerator and the importance of the cold chain in the safe storage of medicines [J]. Nurs Stand, 2017, 32 (6):53-63.
- [29] 赵贤. 中美药品冷链物流体系的比较研究[J]. 中国药业,2012,16: 15-16.
- [30] 蒋思维. 药品冷链流通管理存在的问题及对策[J]. 中国药业,2014,22: 6-8.
- [31] Subzwari M, Nasir S. Preserving Efficacy of Temperature Sensitive Medicines-Logistics Management in Pharmaceutical Supply Chain [J]. South Asian Journal of Management Sciences, 2015, 9 (1):1-9.
- [32] Ringo S, Mugoyela V , Kaale E , et al. Assessment of Medicines Cold Chain Storage Conformity with the World Health Organization Requirements in Health Facilities in Tanzania [J]. Pharmacology & Pharmacy, 2017 , 08 (10) :325-338.
- [33] 雍佳松,杨世民. 我国医药冷链体系的现状及其发展建议[J]. 中国药房,2014,25: 2308-2311.
- [34] Markmann N. innovations and Adaptations in the Cold Chain[J]. Biopharm International, 2015, 28(5): 35-49.
- [35] 舒彤,王改改,汪寿阳等. 基于 RFID 技术投资医药冷链配送中心选址一库存研究[J]. 2016, 20: 220-225.
- [36] 颜晓乐. 从“山东疫苗事件”探析我国医药冷链物流发展策略[J]. 重庆科技学院学报,2016,09:44-46.
- [37] 杨芸. 从“疫苗”事件看我国药品冷链物流发展现状[J]. 现代经济信息,2016,05: 378-379.
- [38] 周燕,张麒麟,付丽娜等. 信息公开机制控制搭便车行为的效果——实验证据[J]. 管理科学学报,2014,17(04):86-89.
- [39] MANCUR O J. The logic of collective action: public goods and the theory of groups [M]. Cambridge: Harvard University press, 1965.
- [40] Feng T, Tai S, Sun C, et.al. Study on Cooperative Mechanism of Prefabricated Producers Based on Evolutionary Game Theory [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2017 (6):1-6.
- [41] 杜军,徐建,刘凯. 基于演化博弈的供应链合作广告机制[J]. 系统工程,2015,33(01):105-118.

- [42] 李美苓, 张强, 邹正兴. 食品供应链企业社会责任的演化博弈分析[J]. 运筹与管理, 2017, 26(08): 34-43.
- [43] 张国兴, 方帅, 汪应洛. 基于演化博弈的供应链协调机制分析[J]. 统计与决策, 2015, 15(12): 45-49.
- [44] 许民利, 王俏, 欧阳林寒. 食品供应链中质量投入的演化博弈分析[J]. 中国管理科学, 2012, (15): 131-141.
- [45] 刘子昂, 张超. 食品供应链中各主体质量投入最优策略博弈[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2016, 41(02): 128-133.
- [46] 张彦楠, 司林波, 孟卫东. 基于博弈论的我国食品安全监管体制探究[J]. 统计与决策, 2015, (20): 61-63.
- [47] 许芳芳. 食品安全的进化博弈分析[J]. 赤峰学院学报, 2015, 31(11): 54-56.
- [48] 吴晶妹, 范瑾. 食品造假与部门监管——基于博弈论视角的分析[J]. 现代管理科学, 2016(1): 3-5.
- [49] 于淼, 马军海. 双渠道回收闭环供应链演化博弈复杂性与控制[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2017, 14(02): 67-74.
- [50] 霍良安, 邵洋洋, 林徐勋. 演化博弈视角下的再制造闭环供应链回收策略研究[J]. 计算机应用研究, 2018, 35(03): 1-10.
- [51] 刘笑迪. 构建从田间到餐桌的全过程食品安全监管体系[EB/OL]. (2014-03-04) [2016-02-17]. http://www.gov.cn/xinwen/2014-03/04/content_2628712.htm.
- [52] 戚湧, 张明, 丁刚. 政府监管与科技资源共享群体之间的演化博弈研究[J]. 科技进步与对策, 2013, 30(06): 12-15.
- [53] 巫强, 刘蓓. 政府研发补贴方式对战略性新兴产业创新的影响机制研究[J]. 产业经济研究, 2014, 06: 41-49.
- [54] 曹海旺, 窦迅, 薛朝改等. 政府激励下秸秆发电供应链的演化博弈模型与分析[J]. 运筹与管理, 2017, 26(01): 89-94.
- [55] Mahmoudi R, Rasti-Barzoki M. Sustainable supply chains under government intervention with a real-world case study: An evolutionary game theoretic approach [J]. Computers & Industrial Engineering, 2018, 116: 130-143.
- [56] 伍晓茜, 熊伟清. 政府补贴机制下的逆向供应链演化博弈研究[J]. 绿色科技, 2012(08): 191-195.

-
- [57] 高阔. 农产品供应链中质量安全投入的动态分析及政府调控研究[J]. 华东经济管理, 2016, 30(08): 108-114.
- [58] 于涛, 刘长玉. 政府与第三方在产品质量监管中的演化博弈分析及仿真研究[J]. 中国管理科学, 2016, 24(06): 91-96.
- [59] Yanli Zhang, Xiaojian Hu, Haihong Yang. Decision of dual channel green supply chain when considering government green supervision [J]. Revista De La Facultad De Ingenieria , 2017, 32 (5) : 363-371.

致谢

时光飞逝，不觉间已在重庆邮电大学度过美好而充实的三年研究生生活。在这三年里，我的思想有了更高觉悟，学术有了进一步提升，各方面能力有了进一步提高，这一切离不开母校和老师的培养。论文完成之际亦是离别之时，对母校和老师只有感恩与不舍。

首先，在这里，我要感谢导师李昌兵教授在过去的三年时间里对我的指导和照顾，在我的学习和生活遇到问题时，总是耐心地帮我解决，特别是在本论文写作过程中对我的悉心指导，让我得以克服重重困难完成论文。李老师严谨务实的学术精神和诲人不倦的优良品德使我终生受益。

其次，我要感谢学院领导、教授及硕士研究生导师组，在我论文写作过程中，给予我中肯的建议与指导，让我在学术生涯少走弯路；感谢各位教授在我论文答辩和预答辩过程中，对我的论文框架及思路给出建设性的意见与指导；感谢辅导员全洪兵老师在我研究生三年中对我日常生活及学习的支持和鼓励。

感谢那些给我学术创作带来启发的作者们，在我课题研究遇到困难时，他们睿智的成果总能引发我的进一步思考，开阔我的学术创作视野。其学术创作成果置于引文及参考文献部分。

此外，感谢我的三年同窗、师兄师姐和师弟师妹们，无论是学术上的正式交流还是生活上的非正式交流，都帮助我打开了思路、开阔了视野，从他们学到自身所欠缺的东西，与他们的相处使我的研究生三年充满了美好与欢乐。

最后，我想要衷心感谢我的父母，他们为我的学习生活提供物质和精神上的支持，他们的爱，让我乐观坚强而自信。在未来的人生道路上，我一定会坚持与努力，回报他们的无私奉献。

在这三年里，我要感谢的人与事实在太多，短短的字里行间不足以表达我对你们的感激与不舍。在此，致上我最诚挚的谢意！

攻读硕士学位期间从事的科研工作及取得的成果

参与科研项目：

- [1] 面向 Web 评论文本的情感分析方法研究（KJ1600440），重庆市教委科学技术研究项目，2016.07-2018.06
- [2] 基于多主体博弈的供应链契约选择与协调控制机制研究（ECML201403），电子商务与现代物流重庆高校市级重点实验室，2015.09-2017.03

发表及完成论文：

- [1] 李昌兵,汪尔晶,杨宇. 政府监管下冷链物流资源投入的演化博弈研究[J]. 北京交通大学学报（社会科学版）,2017,16(03):110-118.
- [2] 李昌兵,汪尔晶. 物联网环境下生鲜农产品物流配送路径优化研究[J]. 商业研究,2017,4:1-9.
- [3] 李昌兵,凌永亮,汪尔晶. 基于兴趣度的Web访问用户关联规则挖掘研究[J]. 计算机工程与设计. 2017, 38(04):852-856.