

# 基于微分博弈的食品供应链溯源信息共享 行为协调机制研究

宋 焕,王瑞梅,马 威



(中国农业大学 经济管理学院,北京 100083)

**摘 要** 运用微分博弈的方法,构建追溯食品生产商和追溯食品加工商的博弈模型,研究 3 种不同决策模式下二者溯源信息共享的最优策略、收益及食品供应链总收益的变化情况,并利用 Matlab 对模型进行仿真模拟分析。结果表明:集中决策时食品供应链的总收益最大;成本分担契约可以实现追溯食品生产商和食品供应链收益的帕累托改进;溯源食品品牌形象及溯源信息共享成本的影响系数对追溯食品生产商和追溯食品加工商的溯源信息共享行为产生影响。

**关键词** 食品供应链;可追溯体系;溯源信息共享;微分博弈;食品安全

**中图分类号:**F274; F224.32 **文献标识码:**A **文章编号:**1008-3456(2018)03-0144-08

**DOI 编码:**10.13300/j.cnki.hnwkxb.2018.03.018

近年来,食品安全问题成为消费者关注的焦点<sup>[1]</sup>。食品可追溯体系被认为是解决食品安全,提升消费者信心的有效工具之一<sup>[2]</sup>,被广泛地应用于农产品质量安全管理领域<sup>[3]</sup>。我国的食品可追溯体系起步于 2000 年,主要集中在试点城市及有限的食品种类,可追溯体系的普及性不高<sup>[4]</sup>。为了进一步推动我国可追溯体系的发展,2015 年新修订的《中华人民共和国食品安全法》明确提出建立食品安全全程追溯制度。但受制于成本因素,市场上可追溯食品的价格较高,造成了市场的需求不足,降低了企业参与食品可追溯体系的积极性。同时,由于现有可追溯体系各个环节之间追溯标准不统一,损害了可追溯体系的运行效率。因此,供应链上成员企业之间的追溯利润协调机制对食品可追溯体系的发展,显得尤为重要。

已有较多学者对企业溯源信息共享问题进行了探讨。主要集中在以下几个方面:(1)企业溯源信息共享行为的机理分析。Wang 等利用信号博弈方法,对信息不对称下由多个食品核心企业和消费者组成的食品供应链中溯源信息共享机理进行分析,表明“优质”食品企业可通过披露足够的溯源信息实现与“劣质”食品企业的分离,而“次优”食品企业则需发送过量的溯源信息才能获取消费者对其食品安全的信任<sup>[5]</sup>。(2)影响企业溯源信息共享行为的因素研究。吴林海等和宋焕等的研究表明市场对可追溯食品的需求及食品企业收益影响食品企业可追溯的投资意愿<sup>[6-7]</sup>;李清光等以一家猪肉的可追溯企业为例,利用单案例分析的方法对该企业可追溯体系的特征、能力及成本与收益进行分析,表明企业内部信息化管理是企业实施可追溯体系的动力<sup>[8]</sup>;胡求光等的研究表明,可追溯体系技术标准的缺乏是影响农产品出口企业实施可追溯体系的负向因素<sup>[9]</sup>;Dediu 等和 Moga 等的研究表明,支持政策及可追溯体系的实施成本影响了罗马养鱼场可追溯体系的参与意愿<sup>[10-11]</sup>。(3)食品可追溯体系绩效评价研究。龚强等考察了可追溯体系对由下游销售者和上游农场组成的食品供应链利润的影响,认为可追溯体系的实施对供应链上下游企业利润的影响具有较大差异,提高了销售环节的利润,

收稿日期:2017-07-23

基金项目:国家“十二五”科技支撑计划课题项目“村镇服务业与相关产业协同发展关键技术研究”(2014BAL07B05);国家社会科学基金项目“农户环境行为对农业面源污染的影响及防控策略研究”(16AJY013);教育部人文社会科学项目“食品可追溯体系中参与主体的行为特征及其影响因素研究”(13YJCZH182)。

作者简介:宋 焕(1988-),女,博士研究生;研究方向:信息管理与电子商务。

通讯作者:马 威(1963-),女,副教授,博士;研究方向:信息管理与电子商务、人力资源管理。

降低了上游农场和供应链的总利润<sup>[12]</sup>;山丽杰等认为食品可追溯体系提升了食品供应链管理的效率,进而提升了社会总福利<sup>[13]</sup>。

综上所述,对溯源信息共享问题的研究取得了一定的成就,但仍存在一些不足:对溯源信息共享行为的研究多为静态研究,较少有考虑时间因素的动态研究,而食品企业共享溯源信息的行为是一个动态变化的过程;对溯源信息共享行为的协调研究多为单一机制研究,但是溯源信息共享的协调是一个由分散决策的低级协调向集中决策的高级协调转变的动态过程,最终达到理想的协调状态。微分博弈能充分考虑到溯源信息共享行为的变化及博弈的一个参与方随着溯源信息共享行为变化其策略调整对另一参与方的影响。因此,本文从动态视角,运用微分博弈,构建追溯食品生产商和追溯食品加工商的微分博弈模型,研究溯源信息共享成本不同承担方式对双方的共享行为及收益的影响,进一步研究集中决策对双方策略的影响。

## 一、基本假设

2002—2012年间中国食品安全事件主要集中在农产品初级生产与加工环节<sup>[14]</sup>,因此,本文仅考虑供应链中食品安全事件发生较多的生产与加工环节,即一个食品生产商和一个食品加工商在实施可追溯体系后的溯源信息协调问题。追溯食品生产商( $m$ )共享产地环境、投入种类、生产商信息及施用信息等溯源信息,追溯食品加工商( $s$ )共享产品验收、分级加工及包装入库等溯源信息。追溯食品加工商为了提高追溯食品生产商共享溯源信息的积极性,愿意为追溯食品生产商提供部分共享溯源信息的成本补贴,补贴比例为 $\delta$ 。研究假设如下:

$H_1$ :追溯食品生产商和追溯食品加工商均为理性“经济人”,双方拥有对方共享溯源信息的成本及利润等相关信息。

$H_2$ :追溯食品生产商和追溯食品加工商共享溯源信息的成本函数均为凸函数。追溯食品生产商和追溯食品加工商共享溯源信息的成本函数分别为: $C(Tm) = \frac{\gamma^1}{2} Tm^2$ ,  $C(Ts) = \frac{\gamma^2}{2} Ts^2$ ,其中 $\gamma_i$  ( $i=1,2$ )为大于零的常数,是追溯食品生产商和追溯食品加工商共享溯源信息成本的影响系数。

$H_3$ :追溯食品生产商和追溯食品加工商溯源信息共享行为影响追溯食品品牌形象。可追溯体系可以保障产品质量,提升消费者的信任水平<sup>[15]</sup>。追溯食品品牌形象是一个动态变化的量,其动态变化率 $\dot{Q}(t)$ 与二者的溯源信息共享行为有关,可表示为:

$$\dot{Q}(t) = \eta Tm(t) + \theta Ts(t) - \epsilon Q(t) \quad (1)$$

式(1)中, $Tm(t)$ 和 $Ts(t)$ 分别表示追溯食品生产商和追溯食品加工商溯源信息的共享行为; $\eta$ 表示追溯食品生产商溯源信息的共享行为对追溯食品品牌形象的影响系数; $\theta$ 表示追溯食品加工商溯源信息的共享行为对追溯食品品牌形象的影响系数; $\epsilon$ 表示追溯食品生产商和追溯食品加工商不进行溯源信息共享时,由于消费者遗忘等原因造成的追溯食品品牌形象的衰减系数<sup>[16]</sup>;  $Q(0) = Q_0$ 表示追溯食品品牌形象的初始水平。

$H_4$ :溯源食品的需求量与追溯食品品牌形象及价格线性相关。追溯食品品牌形象<sup>[17]</sup>及追溯食品价格<sup>[18]</sup>影响消费者购买意愿,追溯食品生产商和追溯食品加工商共享溯源信息时追溯食品需求函数如下:

$$D(t) = \alpha + \mu Q(t) + \kappa P(t) \quad (2)$$

式(2)中, $\alpha$ 为初始需求量; $\mu$ 为品牌形象对追溯食品需求量的影响系数; $P(t)$ 为 $t$ 时刻追溯食品的价格; $\kappa$ 为价格对追溯食品需求量的影响系数。

$H_5$ :追溯食品生产商和追溯食品加工商的收益分配系数分别为 $\varphi$ 和 $1-\varphi$ ,追溯食品生产商和追溯食品加工商具有相同的贴现率 $\rho$ 。

## 二、模型构建及求解

### 1. 分散决策情境下溯源信息共享的非合作博弈分析

在分散决策情景下(用下标1表示分散决策),追溯食品生产商和追溯食品加工商地位平等,各自

承担共享溯源信息的成本,此时,双方以各自利润最大化为原则,独立地选择各自的溯源信息共享行为。在无限时间内追溯食品生产商和追溯食品加工商的利润以相同的贴现因子  $\rho$  进行贴现,此时追溯食品生产商和追溯食品加工商的目标函数分别为:

$$R(T_{m_1}) = \int_0^{\infty} e^{-\rho t} \left\{ \varphi P(\alpha + \mu Q + \kappa P) - \frac{\gamma^1}{2} T_{m_1}^2 \right\} dt \quad (3)$$

$$R(T_{s_1}) = \int_0^{\infty} e^{-\rho t} \left\{ (1-\varphi)P(\alpha + \mu Q + \kappa P) - \frac{\gamma^2}{2} T_{s_1}^2 \right\} dt \quad (4)$$

根据文献<sup>[19]</sup>的方式,假设模型中的动态参数为与时间无关的常数,此时追溯食品生产商和追溯食品加工商的最优策略组合为静态反馈 Nash 均衡,同时为了书写方便,下文将省略  $t$ 。为了使得追溯食品品牌形象的动态方程存在唯一连续的解  $Q(t)$ ,本研究构造一组有界、连续、可微的追溯食品生产商最优函数值  $V_{m_1}$  和追溯食品加工商最优函数值  $V_{s_1}$ ,此时最优控制问题满足的 HJB(Hamilton-Jacobi-Bellman, HJB)方程如下:

$$\rho V_{m_1} = \max_{T_{m_1}} \left\{ \varphi P(\alpha + \mu Q + \kappa P) - \frac{\gamma^1}{2} T_{m_1}^2 + V'_{m_1}(\eta T_{m_1} + \theta T_{s_1} - \epsilon Q) \right\} \quad (5)$$

$$\rho V_{s_1} = \max_{T_{s_1}} \left\{ (1-\varphi)P(\alpha + \mu Q + \kappa P) - \frac{\gamma^2}{2} T_{s_1}^2 + V'_{s_1}(\eta T_{m_1} + \theta T_{s_1} - \epsilon Q) \right\} \quad (6)$$

对式(5)和式(6)关于  $T_{m_1}$  和  $T_{s_1}$  求一阶偏导,并令其等于零,可得:

$$T_{m_1} = \frac{\eta V'_{m_1}}{\gamma^1}; T_{s_1} = \frac{\theta V'_{s_1}}{\gamma^2} \quad (7)$$

将式(7)代入 HJB 方程整理可得:

$$\rho V_{m_1} = (\varphi \mu P - V'_{m_1} \epsilon) Q + \varphi P(\alpha + \kappa P) + \frac{V'_{m_1}{}^2 \eta^2}{2\gamma^1} + \frac{V'_{m_1} V'_{s_1} \theta^2}{\gamma^2} \quad (8)$$

$$\rho V_{s_1} = [(1-\varphi)\mu P - V'_{s_1} \epsilon] Q + (1-\varphi)P(\alpha + \kappa P) + \frac{V'_{s_1} V'_{m_1} \eta^2}{\gamma^1} + \frac{V'_{s_1}{}^2 \theta^2}{2\gamma^2} \quad (9)$$

由式(8)和式(9)可知,关于  $Q$  的线性最优值函数是 HJB 方程的解,令  $V_{m_1} = b_1 Q + b_2, V_{s_1} = b_3 Q + b_4$ ,其中  $b_1, b_2, b_3, b_4$  均为常数,则  $V'_{m_1} = b_1, V'_{s_1} = b_3$ ,代入式(8)和式(9)中可得:

$$b_1 = \frac{\varphi P \mu}{\rho + \epsilon}; b_2 = \frac{\varphi P(\alpha + \kappa P)}{\rho} + \frac{(\varphi \eta \mu P)^2}{2\gamma^1 \rho (\rho + \epsilon)^2} + \frac{\varphi(1-\varphi)P^2 \mu^2 \theta^2}{\gamma^2 \rho (\rho + \epsilon)^2}$$

$$b_3 = \frac{(1-\varphi)P \mu}{\rho + \epsilon}; b_4 = \frac{(1-\varphi)P(\alpha + \kappa P)}{\rho} + \frac{\varphi(1-\varphi)P^2 \mu^2 \eta^2}{\gamma^1 \rho (\rho + \epsilon)^2} + \frac{(1-\varphi)^2 P^2 \mu^2 \theta^2}{2\gamma^2 \rho (\rho + \epsilon)^2}$$

将  $V'_{m_1} = b_1 = \frac{\varphi P \mu}{\rho + \epsilon}, V'_{s_1} = b_3 = \frac{(1-\varphi)P \mu}{\rho + \epsilon}$  代入式(7)可得追溯食品生产商和追溯食品加工商分散决策时的静态反馈 Nash 均衡:

$$T_{m_1} = \frac{\eta \varphi P \mu}{\gamma^1 (\rho + \epsilon)}; T_{s_1} = \frac{(1-\varphi)P \mu \theta}{\gamma^2 (\rho + \epsilon)} \quad (10)$$

该 Nash 均衡情景下的追溯食品生产商、追溯食品加工商和食品供应链的最优值函数分别为:

$$V_{m_1} = \frac{\varphi P Q \mu}{\rho + \epsilon} + \frac{\varphi P(\alpha + \kappa P)}{\rho} + \frac{(\varphi \eta \mu P)^2}{2\gamma^1 \rho (\rho + \epsilon)^2} + \frac{\varphi(1-\varphi)P^2 \mu^2 \theta^2}{\gamma^2 \rho (\rho + \epsilon)^2} \quad (11)$$

$$V_{s_1} = \frac{(1-\varphi)P Q \mu}{\rho + \epsilon} + \frac{(1-\varphi)P(\alpha + \kappa P)}{\rho} + \frac{\varphi(1-\varphi)P^2 \mu^2 \eta^2}{\gamma^1 \rho (\rho + \epsilon)^2} + \frac{(1-\varphi)^2 P^2 \mu^2 \theta^2}{2\gamma^2 \rho (\rho + \epsilon)^2} \quad (12)$$

$$V_1 = \frac{P Q \mu}{\rho + \epsilon} + \frac{P(\alpha + \kappa P)}{\rho} + \frac{P^2 \mu^2 \eta^2 (2\varphi - \varphi^2)}{2\gamma^1 \rho (\rho + \epsilon)^2} + \frac{P^2 \mu^2 \theta^2 (1 - \varphi^2)}{2\gamma^2 \rho (\rho + \epsilon)^2} \quad (13)$$

## 2. 成本分担契约情境下的溯源信息共享行为的主从博弈分析

进一步分析成本分担契约情境下的溯源信息共享问题(用下标 2 表示成本分担契约决策)。追溯食品加工商作为供应链的核心企业,为了激励追溯食品生产商共享溯源信息,追溯食品加工商给追溯

食品生产商提供一定比例的补贴,此时双方的最优策略为静态反馈 Stackelberg 均衡策略。基于利润最大化的原则,首先追溯食品加工商确定自己的溯源信息共享行为,并承担追溯食品生产商溯源信息共享成本补贴  $\delta$ ;其次,依据追溯食品加工商的溯源信息共享行为及成本补贴程度,追溯食品生产商确定自己的溯源信息共享行为。利用逆向归纳法,首先确定追溯食品生产商的溯源信息共享行为。在无限时间内追溯食品生产商和追溯食品加工商的利润以相同的贴现因子  $\rho$  进行贴现,追溯食品生产商的目标函数为:

$$R(Tm_2) = \int_0^{\infty} e^{-\rho t} \left\{ \varphi P(\alpha + \mu Q + \kappa P) - \frac{\gamma^1}{2}(1-\delta)Tm_2^2 \right\} dt \quad (14)$$

此时,追溯食品生产商的最优控制问题满足 HJB 方程:

$$\rho Vm_2 = \max_{Tm_2} \left\{ \varphi P(\alpha + \mu Q + \kappa P) - \frac{\gamma^1}{2}(1-\delta)Tm_2^2 + V'm_2(\eta Tm_2 + \theta Ts_2 - \epsilon Q) \right\} \quad (15)$$

易知式(15)关于  $Tm_2$  是凹函数,一阶条件下最大化可得:

$$Tm_2 = \frac{\eta V'm_2}{\gamma^1(1-\delta)} \quad (16)$$

追溯食品加工商的目标函数为:

$$R(Ts_2) = \int_0^{\infty} e^{-\rho t} \left\{ (1-\varphi)P(\alpha + \mu Q + \kappa P) - \frac{\gamma^2}{2}Ts_2^2 - \frac{\delta\gamma^1}{2}Tm_2^2 \right\} dt \quad (17)$$

此时,追溯食品加工商的最优控制问题满足 HJB 方程:

$$\rho Vs_2 = \max_{Ts_2} \left\{ (1-\varphi)P(\alpha + \mu Q + \kappa P) - \frac{\gamma^2}{2}Ts_2^2 - \frac{\delta\gamma^1}{2}Tm_2^2 + V's_2(\eta Tm_2 + \theta Ts_2 - \epsilon Q) \right\} \quad (18)$$

将式(16)代入式(18),对式(18)的右侧求  $Ts_2$  和  $\delta$  的一阶偏导数,并令其等于零,可得:

$$Ts_2 = \frac{\theta V's_2}{\gamma^2}; \delta = \frac{2V's_2 - V'm_2}{2V's_2 + V'm_2} \quad (19)$$

将式(16)和式(19)代入 HJB 方程,整理可得:

$$\rho Vm_2 = (P\mu\varphi - V'm_2\epsilon)Q + \varphi P(\alpha + \kappa P) + \frac{\eta^2 V'm_2(2V's_2 + V'm_2)}{4\gamma^1} + \frac{V'm_2 V's_2 \theta^2}{\gamma^2} \quad (20)$$

$$\rho Vs_2 = [(1-\varphi)P\mu - V's_2\epsilon]Q + (1-\varphi)P(\alpha + \kappa P) + \frac{\eta^2(2V's_2 + V'm_2)^2}{8\gamma^1} + \frac{\theta^2 V's_2^2}{2\gamma^2} \quad (21)$$

由式(20)和式(21)可知,关于  $Q$  的线性最优值函数是 HJB 方程的解,令  $Vm_2 = d_1Q + d_2$ ,  $Vs_2 = d_3Q + d_4$ ,其中  $d_1, d_2, d_3, d_4$  均为常数,则  $V'm_2 = d_1$ ,  $V's_2 = d_3$ ,代入式(20)和式(21)中可得:

$$d_1 = \frac{P\mu\varphi}{\rho + \epsilon}; d_2 = \frac{\varphi P(\alpha + \kappa P)}{\rho} + \frac{(2\varphi - \varphi^2)P^2\mu^2\eta^2}{4\gamma^1\rho(\rho + \epsilon)^2} + \frac{\varphi(1-\varphi)P^2\mu^2\theta^2}{\gamma^2\rho(\rho + \epsilon)^2}$$

$$d_3 = \frac{P\mu(1-\varphi)}{\rho + \epsilon}; d_4 = \frac{(1-\varphi)P(\alpha + \kappa P)}{\rho} + \frac{(1-\varphi)^2P^2\mu^2\theta^2}{2(\rho + \epsilon)^2\rho\gamma^2} + \frac{P^2\eta^2\mu^2(2-\varphi)^2}{8\rho\gamma^1(\rho + \epsilon)^2}$$

将  $V'm_2 = d_1 = \frac{P\mu\varphi}{\rho + \epsilon}$ ,  $V's_2 = d_3 = \frac{P\mu(1-\varphi)}{\rho + \epsilon}$  代入式(16)和(19)可得追溯食品加工商主导的静态反馈 Stackelberg 均衡:

$$Tm_2 = \frac{P\eta\mu(2-\varphi)}{2\gamma^1(\rho + \epsilon)}; Ts_2 = \frac{(1-\varphi)P\mu\theta}{\gamma^2(\rho + \epsilon)}; \delta = \frac{2-3\varphi}{2-\varphi} \quad (22)$$

此时追溯食品生产商、追溯食品加工商和食品供应链的最优值函数分别为:

$$Vm_2 = \frac{PQ\mu\varphi}{\rho + \epsilon} + \frac{\varphi P(\alpha + \kappa P)}{\rho} + \frac{(2\varphi - \varphi^2)P^2\mu^2\eta^2}{4\gamma^1\rho(\rho + \epsilon)^2} + \frac{\varphi(1-\varphi)P^2\mu^2\theta^2}{\gamma^2\rho(\rho + \epsilon)^2} \quad (23)$$

$$Vs_2 = \frac{PQ\mu(1-\varphi)}{\rho + \epsilon} + \frac{(1-\varphi)P(\alpha + \kappa P)}{\rho} + \frac{(1-\varphi)^2P^2\mu^2\theta^2}{2(\rho + \epsilon)^2\rho\gamma^2} + \frac{P^2\eta^2\mu^2(2-\varphi)^2}{8\rho\gamma^1(\rho + \epsilon)^2} \quad (24)$$

$$V_2 = \frac{PQ\mu}{\rho+\epsilon} + \frac{P(\alpha+\kappa P)}{\rho} + \frac{\eta^2 P^2 \mu^2 (4-\varphi^2)}{8\rho\gamma^1 (\rho+\epsilon)^2} + \frac{(1-\varphi^2)P^2 \mu^2 \theta^2}{2\gamma^2 \rho (\rho+\epsilon)^2} \quad (25)$$

### 3. 集中决策情境下溯源信息共享行为的合作博弈分析

在集中决策情境下(用下标 3 表示集中决策),追溯食品生产商和追溯食品加工商相互合作,以食品供应链的总体利润最大为目标,集中决策各自溯源信息的共享行为。在无限时间内食品供应链的总利润以贴现因子  $\rho$  进行贴现,此时,食品供应链的总体利润为:

$$R = \int_0^{\infty} e^{-\rho t} \left\{ P(\alpha + \mu Q + \kappa P) - \frac{\gamma^1}{2} T m^2 - \frac{\gamma^2}{2} T s^2 \right\} dt \quad (26)$$

此时最优控制问题满足 HJB 方程:

$$\rho V_3 = \max_{Tm, Ts} \left\{ P(\alpha + \mu Q + \kappa P) - \frac{\gamma^1}{2} T m^2 - \frac{\gamma^2}{2} T s^2 + V'_3 (\eta T m_3 + \theta T s_3 - \epsilon Q) \right\} \quad (27)$$

对式(27)右侧求  $Tm_3$  和  $Ts_3$  的一阶偏导数,并令其等于零,可得:

$$Tm_3 = \frac{\eta V'_3}{\gamma^1}; Ts_3 = \frac{\theta V'_3}{\gamma^2} \quad (28)$$

将式(28)代入 HJB 方程可得:

$$\rho V_3 = (P\mu - V'_3 \epsilon)Q + P(\alpha + \kappa P) + \frac{V'^2_3 \eta^2}{2\gamma^1} + \frac{V'^2_3 \theta^2}{2\gamma^2} \quad (29)$$

由式(29)可知,关于  $Q$  的线性最优值函数是 HJB 方程的解,令  $V_3 = e_1 Q + e_2$ ,其中  $e_1, e_2$  均为常数,则  $V'_3 = e_1$ ,代入式(29)中可得:

$$e_1 = \frac{P\mu}{\rho+\epsilon}; e_2 = \frac{P(\alpha+\kappa P)}{\rho} + \frac{P^2 \mu^2 \eta^2}{2\rho\gamma^1 (\rho+\epsilon)^2} + \frac{P^2 \mu^2 \theta^2}{2\rho\gamma^2 (\rho+\epsilon)^2} \quad (30)$$

将  $V'_3 = e_1 = \frac{P\mu}{\rho+\epsilon}$ ,代入式(28)可得集中决策的静态反馈 Nash 均衡:

$$Tm_3 = \frac{P\mu\eta}{(\rho+\epsilon)\gamma^1}; Ts_3 = \frac{P\theta\mu}{(\rho+\epsilon)\gamma^2} \quad (31)$$

此时食品供应链的最优函数值为:

$$V_3 = \frac{QP\mu}{\rho+\epsilon} + \frac{P(\alpha+\kappa P)}{\rho} + \frac{P^2 \mu^2 \eta^2}{2\rho\gamma^1 (\rho+\epsilon)^2} + \frac{P^2 \mu^2 \theta^2}{2\rho\gamma^2 (\rho+\epsilon)^2} \quad (32)$$

### 4. 对比分析

根据式(10)、式(22)和式(31)可知:

$$Ts_1 = Ts_2 = \frac{(1-\varphi)P\mu\theta}{\gamma^2 (\rho+\epsilon)}, Ts_3 - Ts_2 = \frac{\varphi P\theta\mu}{(\rho+\epsilon)\gamma^2} > 0, \text{因此 } Ts_1 = Ts_2 < Ts_3;$$

$$Tm_2 - Tm_1 = \frac{P\eta\mu(2-3\varphi)}{2\gamma^1 (\rho+\epsilon)}, Tm_3 - Tm_2 = \frac{P\eta\mu\varphi}{2\gamma^1 (\rho+\epsilon)} > 0, Tm_3 - Tm_1 = \frac{P\eta\mu(1-\varphi)}{\gamma^1 (\rho+\epsilon)} > 0,$$

因此若  $\varphi < \frac{3}{2}$  时,  $Tm_1 < Tm_2 < Tm_3$ ; 若  $\varphi > \frac{3}{2}$  时,  $Tm_2 < Tm_1 < Tm_3$

推论 1:与分散决策模式相比,成本分担契约下,追溯食品加工商的溯源信息共享行为没有改善,但在集中决策模式下,追溯食品加工商的溯源信息共享行为得以改善;在集中决策模式下追溯食品生产商溯源信息共享的积极性最高,在分散决策模式和成本分担契约模式下,追溯食品生产商共享行为积极性的高低主要受制于收益分配系数,若收益分配系数大于  $3/2$ ,则分散决策模式下追溯食品生产商的溯源信息共享的积极性较高,若收益分配系数小于  $3/2$ ,则成本分担契约模式下追溯食品生产商的溯源信息共享的积极性较高。

根据式(11)、式(12)、式(23)和式(24)可知:

$$Vm_2 - Vm_1 = \frac{\varphi(2-3\varphi)P^2 \mu^2 \eta^2}{4\gamma^1 \rho (\rho+\epsilon)^2}, Vs_2 - Vs_1 = \frac{P^2 \mu^2 \eta^2 (2-3\varphi)^2}{8\rho\gamma^1 (\rho+\epsilon)^2} > 0$$

推论 2: 当  $\varphi < \frac{3}{2}$ , 在成本分担契约模式下, 追溯食品生产商及追溯食品加工商的收益大于分散决策模式下的利润, 此时可以实现二者利润的 Pareto 改善。当  $\varphi > \frac{3}{2}$  时, 在成本分担契约模式下, 追溯食品加工商的收益大于分散决策模式下的利润, 但追溯食品生产商的收益小于分散决策模式下的利润, 此时追溯食品生产商不会参与成本分担契约。

根据式(13)、式(25)和式(32)可知:

$$V_3 - V_1 = \frac{P^2 \mu^2 \eta^2 (1 - \varphi)^2}{8 \rho \gamma^1 (\rho + \epsilon)^2} + \frac{P^2 \mu^2 \theta^2 \varphi^2}{2 \gamma^2 \rho (\rho + \epsilon)^2} > 0; V_3 - V_2 = \frac{P^2 \mu^2 \eta^2 \varphi^2}{8 \rho \gamma^1 (\rho + \epsilon)^2} + \frac{P^2 \mu^2 \theta^2 \varphi^2}{2 \gamma^2 \rho (\rho + \epsilon)^2} > 0$$

推论 3: 与分散决策模式及成本分担契约模式相比, 集中决策模式下食品供应链的整体收益最大, 且集中决策对整体供应链的收益的 Pareto 改善, 受品牌形象对溯源食品需求量的影响系数  $\mu$ 、追溯食品生产商和追溯食品加工商共享溯源信息成本的影响系数  $\gamma^1$ 、 $\gamma^2$  等因素影响。同时, 追溯食品生产商和追溯食品加工商各自收益的增加值, 由双方谈判决定。

### 三、数值仿真

结合上述的模型, 利用 Matlab 对不同决策情境下食品供应链的最优均衡, 食品供应链成员及整体收益的变化过程进行仿真模拟。笔者调查了一家中型的民营大米加工企业, 年生产能力约为 10 万吨。该企业以政府平台为依托, 实现了从土壤现状、种植情况、收粮详情以及消费终端的全链条可追溯。该企业的追溯大米包含的溯源信息较为完善, 同时企业也面临如何与种植农户之间协调溯源信息共享成本问题, 具有一定的代表性。结合对该追溯企业初始销量、实施追溯成本、向上游农户支付的共享信息成本、追溯大米价格及销售量调查, 为了方便计算将部分初始参数设置为  $\alpha = 5, \gamma_1 = 0.6, \gamma_2 = 0.8, \varphi = 0.3, P = 10, \kappa = 0.7$ ; 同时企业品牌形象影响消费者购买行为<sup>[20]</sup>, 结合该企业实施追溯前后销售量的变化, 将初始参数设置为  $\eta = 0.4, \theta = 0.3, \mu = 0.2, \epsilon = 1$ ; 最后根据参考文献<sup>[21-22]</sup>中的研究, 假设  $\rho = 0.1, Q_0 = 0$ 。

由图 1 所示, 由分散决策模式过渡到成本分担契约模式时, 即追溯食品生产商和追溯食品加工商的最优收益值  $V_{m_2}$  和  $V_{s_2}$  随着时间增加而趋于平稳, 并且始终大于  $V_{m_1}$  和  $V_{s_1}$ 。同时, 追溯食品加工商的收益增值大于追溯食品生产商的收益增值。因此, 可以认为成本分担契约可实现追溯食品生产商和追溯食品加工商最优收益的 Pareto 改善。

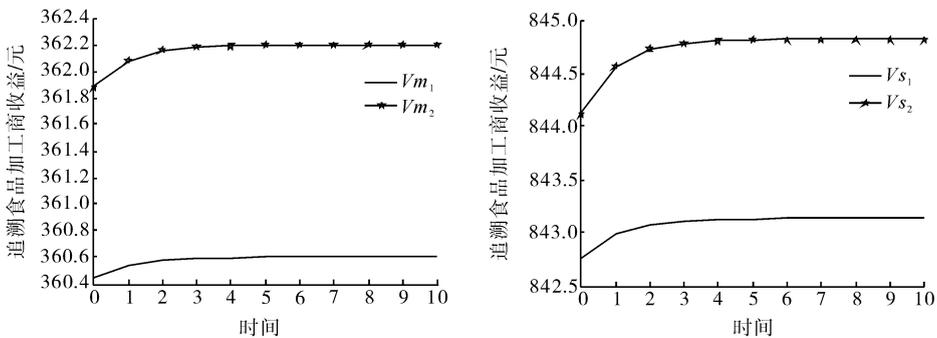


图 1 成本分担前后追溯食品生产商及追溯食品加工商的收益对比情况

由图 2 所示, 当追溯食品生产商和追溯食品加工商集中决策时, 食品供应链的最优总收益  $V_3$  最大, 其次为成本分担契约下的食品供应链的总收益  $V_2$ , 分散决策时食品供应链的最优总收益  $V_1$  最小。

由图 3 所示, 当共享溯源信息成本的影响系数  $\gamma_1$  和  $\gamma_2$  不断增加时, 追溯食品生产商及追溯食品加工商共享溯源信息的积极性不断降低。从分散决策过渡到成本分担契约时,  $T_{s_1}$ 、 $T_{s_2}$  重合,  $T_{m_2} > T_{m_1}$ , 即追溯食品加工商溯源信息共享的积极性未发生变化, 而追溯食品生产商溯源信息共享的积极

性将会改善;在集中决策情形下,二者共享溯源信息的积极性都将得到改善。

由图 4 可知,当追溯食品的品牌形象对追溯食品需求量的影响系数  $\mu$  逐渐增大,追溯食品生产商在三种模式下的溯源信息共享行为随着  $\mu$  的增加而增加;追溯食品加工商在三种模式下的溯源信息共享行为随着  $\mu$  的增加而增加,且  $Ts_1$  和  $Ts_2$  重合。由此可知,在集中决策模式下,追溯食品生产商和追溯食品加工商的溯源信息共享的积极性大于分散决策模式下的溯源信息共享的积极性。

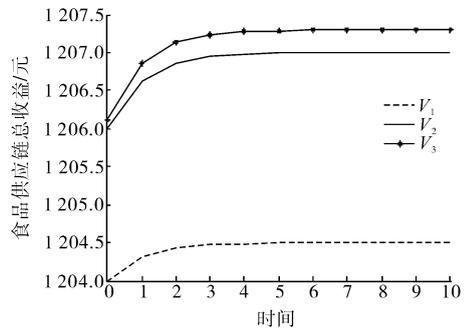


图 2 不同模式下食品供应链总收益的对比情况

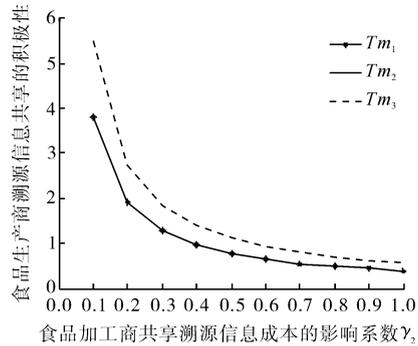
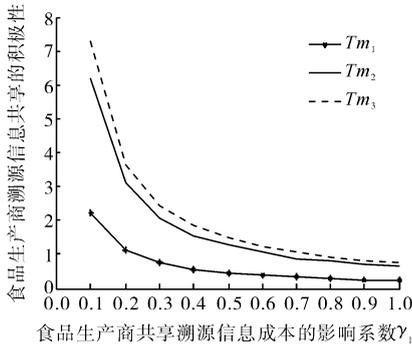


图 3  $\gamma_1$  和  $\gamma_2$  对追溯食品生产商和追溯食品加工商溯源信息共享行为的影响情况

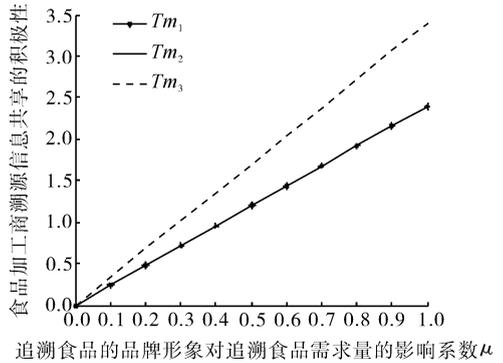
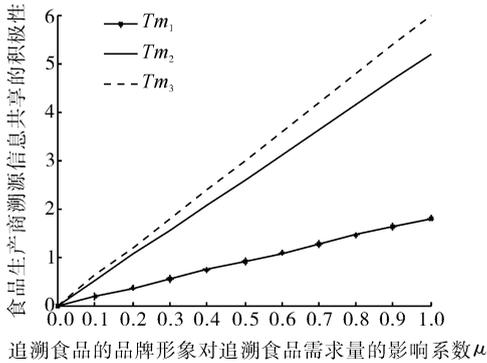


图 4  $\mu$  对追溯食品生产商和追溯食品加工商溯源信息共享行为的影响情况

### 四、结论与建议

利用微分博弈,构建了追溯食品生产商和追溯食品加工商的微分博弈模型,探讨了不同决策模式对双方溯源信息共享策略及收益的影响,并对不同模式下追溯食品生产商和追溯食品加工商溯源信息共享的积极性、收益及供应链总收益的变化情况进行了仿真模拟分析。结论为:不同决策模式对追溯食品生产商、追溯食品加工商及食品供应链的收益产生影响;品牌形象对追溯食品需求量的影响系数影响追溯食品生产商和追溯食品加工商的溯源信息共享行为;溯源信息共享成本的影响系数对追溯食品生产商和追溯食品加工商的溯源信息共享行为产生影响。

为了提高食品追溯企业共享溯源信息的积极性,提出以下政策建议:

(1)建立追溯参与主体之间的纵向协作机制。成本分担与集中决策模式可以提高追溯食品供应链的总利润,但我国可追溯体系的参与主体间各自为政,呈现分离状态。该现状损害了参与主体的收益,挫伤了参与追溯的积极性,而可追溯体系需要供应链中各成员的积极参与,才能形成完整的食品溯源信息。因此,追溯食品供应链的核心企业应与上下游企业共享追溯平台,溯源信息共享标准及相关技术人员等,形成协作主体之间有效的利益联结与风险共担协作机制,保障追溯信息的质量水平,

从而实现食品供应链的总利润最大化。

(2)提升追溯食品品牌形象。品牌形象对溯源食品需求量的影响系数对参与主体的追溯行为产生影响。政府应统一不同环节的溯源信息共享标准,建立可追溯标签的认证体系;同时,应定期对共享的溯源信息的真实性进行核查,减少甚至杜绝共享虚假的溯源信息,提高追溯标签的公信力,进而提高消费者对追溯食品的安全预期,树立良好的品牌形象,形成对追溯食品有效的市场需求。

(3)降低追溯体系的运营成本。溯源信息共享成本的影响系数影响参与主体的共享行为,我国的企业实施可追溯体系前期投入较大,运行成本偏高<sup>[23]</sup>。因此,政府可通过资金补贴、设备补贴、技术人员培训等方式,加大对追溯企业实施政策补贴力度,降低食品企业前期的追溯成本,提高食品企业参与可追溯体系的积极性;同时,应制定积极的营销策略,宣传追溯食品在保障食品安全方面的作用,增加消费者对如何使用追溯系统相关知识的了解,提高追溯食品的市场溢价水平。

## 参 考 文 献

- [1] MENOZZI D, HALAWANY D, MORA C, et al. Motives towards traceable food choice: a comparison between French and Italian consumers[J]. Food control, 2015(49): 40-48.
- [2] STERLING B, GOOCH M, DENT B, et al. Assessing the value and role of seafood traceability from an entire value-chain perspective[J]. Comprehensive reviews in food science and food safety, 2015, 14(3): 205-268.
- [3] 陈红华, 田志宏. 企业农产品可追溯系统的成本及定价策略——基于 A 企业调研数据的分析[J]. 中国农业大学学报(社会科学版), 2016, 33(4): 116-121.
- [4] 吴林海, 徐玲玲, 朱淀, 等. 企业可追溯体系投资意愿的主要影响因素研究: 基于郑州市 144 家食品生产企业的案例[J]. 管理评论, 2014, 26(1): 99-108.
- [5] WANG T Z, WANG R W, HU H W, et al. Would enterprises send food traceability information to consumers? [J]. Journal of food research, 2014, 4(1): 105-111.
- [6] 吴林海, 秦毅, 徐玲玲. 企业投资食品可追溯体系的决策意愿与影响因素研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2013, 23(6): 129-137.
- [7] 宋焕, 王瑞梅, 胡好. 食品供应链中溯源信息共享的演化博弈分析[J]. 哈尔滨工业大学学报(社会科学版), 2017, 19(2): 111-118.
- [8] 李清光, 王晓莉. 低成本背景下食品可追溯体系难以推广的原因分析——以可追溯猪肉为例[J]. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(7): 120-127.
- [9] 胡求光, 黄祖辉, 童兰. 农产品出口企业实施追溯体系的激励与监管机制研究[J]. 农业经济问题, 2012(4): 71-77.
- [10] DEDIU L, MOGA L M, CRISTEA V. The barriers for the adoption of traceability systems by Romanian fish farms[J]. Aacl bioflux, 2016, 9(6): 1323-1330.
- [11] MOGA L M, DEDIU L, ZHANG X, et al. Barriers of adopting traceability systems by romanian fishery and aquaculture[J]. Journal of environmental protection and ecology, 2016, 17(1): 284-290.
- [12] 龚强, 陈丰. 供应链可追溯性对食品安全和上下游企业利润的影响[J]. 南开经济研究, 2012(6): 30-48.
- [13] 山丽杰, 徐旋, 谢林柏. 实施食品可追溯体系对社会福利的影响研究——基于垂直差异化博弈的视角[J]. 公共管理学报, 2013, 10(3): 103-109.
- [14] 朱淀, 洪小娟. 2006—2012 年间中国食品安全风险评估与风险特征研究[J]. 中国农村观察, 2014(2): 49-59.
- [15] ELS A F, XU J J. Traceability as a key of seafood safety: reassessment and possible applications[J]. Reviews in fisheries science & aquaculture, 2017, 25(2): 158-170.
- [16] 游达明, 桂菊, 岳柳青. 加成定价下低碳供应链生态研发与促销的微分博弈分析[J]. 软科学, 2016, 30(2): 102-106.
- [17] 张振, 乔娟, 黄圣男. 基于异质性的消费者食品安全属性偏好行为研究[J]. 农业技术经济, 2013(5): 95-104.
- [18] LIN X L, LING L X, ZHU D, et al. Consumers' WTP for certified traceable tea in China[J]. British food journal, 2014, 117(5): 1440-1452.
- [19] 夏兆敏, 孙世民. 基于微分博弈的二级猪肉供应链质量行为协调机制研究[J]. 运筹与管理, 2014, 23(2): 198-205.
- [20] 韩杨, 陈建先, 李成贵. 中国食品追溯体系纵向协作形式及影响因素分析——以蔬菜加工企业为例[J]. 中国农村经济, 2011(12): 54-67.
- [21] 洪江涛, 黄沛. 基于微分博弈的供应链质量协调研究[J]. 中国管理科学, 2016, 24(2): 100-107.
- [22] 徐春秋, 赵道致, 原白云, 等. 上下游联合减排与低碳宣传的微分博弈模型[J]. 管理科学学报, 2016, 19(2): 53-65.
- [23] DANDAGE K, BADIA M R, RUIA G L. Indian perspective in food traceability: a review[J]. Food control, 2017(71): 217-227.