

# 不同决策模式下农产品质量控制策略研究

于 荣 陈 枫 唐 润

(南京财经大学管理科学与工程学院,江苏南京 210023)

**摘 要:**农产品质量已经引起公众的广泛关注。考虑由一个供应商和一个零售商构成的两级农产品供应链,构建零售商主导下的 Stackelberg 分散决策博弈模型和两者协同合作下的集中决策博弈模型,以供应商和零售商的最优质量努力水平为状态变量,利用逆向求解法得出供应商和零售商的最优质量决策。研究表明:在一定条件下,农产品供应链中主体的合作可以实现供应商、零售商和整个供应链系统利润的 Pareto 改善,在此基础上分析实现 Pareto 改善的条件以推动农产品供应链达到协调。

**关键词:**农产品;微分博弈;质量控制;决策模式

**中图分类号:**F323.7      **文献标志码:**A      **文章编号:**1671-4970(2018)06-0042-07

近年来,生鲜农产品质量安全事故频发,多种食用农产品检出农残超标,“僵尸肉”变身美味佳肴摆上餐桌,柠檬酸“漂白藕”等事件导致社会公众对生鲜农产品的安全环境充满不信任。我国是传统农业大国,而农业是国民经济的基础,“十三五”时期,农产品质量安全问题已上升为国家重大战略,是关系普通民众生活的热点敏感问题,也是政府施策的基本着力点。2017 年,我国生鲜产品规模超过 13 亿吨,比 2016 年增长了 6.67%。生鲜农产品的季节性强、保质期短、极易腐烂变质,因此在生产、流通、销售过程中的质量控制显得尤为重要。随着人们生活水平的不断提升,对生鲜农产品质量的追求也在不断增强,如何提升生鲜农产品的质量逐渐成为社会广泛关注的焦点。由于对生鲜农产品冷链物流的建设缺乏系统化、标准化管理,我国生鲜农产品的损耗率高达 30% 左右,这不仅导致了供应链成员的直接经济损失,也阻碍了我国生鲜农产品供应链的协调和农业经济的发展。

## 一、文献综述

在生鲜农产品的相关研究中,产品的变质率 and 需求这两个因素越来越受到学者的关注。学术界对

于生鲜食品的生化特性研究都是基于腐败变质率函数,该函数是描述物品变质特性的主要特征参数,也是生鲜农产品区别于普通农产品问题的本质特征。Ghare 等最早对易腐品变质率问题进行了研究<sup>[1]</sup>,在此基础上,诸多学者对需求率和变质损耗率等进行了相应改进。Rong 等考虑时间与温度因素,给出了生鲜食品质量衰减函数,并模拟了生鲜食品质量衰减<sup>[2]</sup>;Wang 等基于时间和温度的生鲜产品质量衰减函数,进一步对易腐产品进行质量安全管理 and 评价<sup>[3]</sup>;在考虑了质量控制技术成本的情况下,Lee 给出了求解最优质量控制技术成本和补货计划的算法<sup>[4]</sup>;Yu 等则引入弧乘数描述生鲜食品数量变化特点研究食品供应链网络的竞争问题<sup>[5]</sup>;Aung 等认为,温度是延长易腐产品最重要的因素,并提供了 3 种评估冷链产品最佳温度的方法<sup>[6]</sup>;Katsaros 等在不同温度下进行冷冻菠菜质量损失动力学研究<sup>[7]</sup>。

研究生鲜食品供应链协调问题的另一重点就是对生鲜食品需求函数的构建。罗兵等研究两仓库 EOQ 模型时,认为线性时变的市场需求函数不能完备地表征生鲜产品实际的变质劣化过程,提出了指数时变的需求函数<sup>[8]</sup>;Cai 等假设生鲜食品需求函数为新鲜度和价格的指数乘积形式,在此前提下研

收稿日期:2018-08-06

基金项目:江苏省社会科学应用研究精品工程项目(18SYB-046);南京市科技发展计划项目(软科学研究 201809041);南京财经大学青年学者支持计划

作者简介:于荣(1985—),女,江苏连云港人,讲师,博士,从事食品安全管理研究。

究其补货策略<sup>[9]</sup>;刘昊提出需求是时间的二次多项式函数,在此基础上研究易腐品的库存问题<sup>[10]</sup>;王磊等则使用了消费者效用为新鲜度和价格线性加权形式,研究生鲜食品的定价策略<sup>[11]</sup>。也有学者针对生鲜农产品供应链的生鲜特性进行了相关研究。杨春等基于成本分担和收益共享合同,研究零售商和物流供应商保鲜努力水平决策问题<sup>[12]</sup>;但斌等研究在价值损耗约束下,生鲜农产品供应链协调策略问题<sup>[13]</sup>;陈军等借助变质库存控制相关理论,研究损耗控制下的生鲜农产品供应链协调问题,并提出降低损耗的思想方法<sup>[14]</sup>;林略等考虑鲜活农产品三级供应链,研究了收益共享契约下的供应链协调问题<sup>[15]</sup>;Cai等研究了生产商通过第三方物流供应生鲜产品的供应链协调<sup>[16]</sup>;王婧等考虑生鲜农产品在流通过程中的损失特性,引入期权合同工具进行供应链风险管理<sup>[17]</sup>;王冲等通过引入期权合同,给出生鲜农产品供应链协调的条件<sup>[18]</sup>;凌六一等对比了4种不同风险共担合同下农产品供应链主体策略研究<sup>[19]</sup>;熊峰等从关系契约角度对生鲜农产品供应链关系契约的稳定性进行研究<sup>[20]</sup>;Xie等考虑了基于随机需求下生鲜农产品供应链成员的质量投入和价格决策问题<sup>[21]</sup>。

国内外学者对生鲜农产品管理策略的研究集中探讨供应链库存、定价、补货等经典策略问题。早在2002年,Gigler等运用外观和质量的二维变量来刻画生鲜农产品在各递送阶段的价值状态<sup>[22]</sup>;Clements等分析了农产品供应链的特点,并阐述了其对供应链质量的影响<sup>[23]</sup>;肖勇波等最早将新鲜度指标引入生鲜农产品需求函数<sup>[24]</sup>;随后,陈军等构造了新鲜度指数衰减函数并将其引入基本变质库存模型<sup>[25]</sup>;Pathumnakul等建立了泰国鲜虾供应链协调模型<sup>[26]</sup>;Blackburn等从边际时间价值角度优化易逝性供应链<sup>[27]</sup>;李琳等采用RFID技术对生鲜农产品信息实时的监控和管理<sup>[28]</sup>,并进一步研究RFID技术应用前后对鲜活农产品供应链的影响<sup>[29]</sup>;根据顾客不同的偏好对其进行分类,但斌等分析需求挤兑效应对零售商的影响,以此来研究生鲜农产品的二次补货策略<sup>[30]</sup>。

大多数学者对生鲜农产品供应链质量控制的研究主要考虑生鲜农产品质量受多重因素的影响,以及生鲜农产品质量对供应链协调的影响,从长期动态角度考虑供应链双方多次决策的相关研究较少。考虑生鲜农产品质量随时间衰退的特征,笔者从长期的、动态的角度出发,应用微分博弈的方法对生鲜农产品质量控制策略进行研究。通过对比分析生鲜农产品供应链中供应商和零售商双方在非合作和合

作两种不同质量管理博弈情形下的供应链利润,揭示供应商和零售商的最优决策控制点以及最优参数的选取,从而达到供应链整体的协调。

## 二、生鲜农产品质量控制模型

### 1. 问题描述与假设

我国是一个以小农经营为基础的农业大国,大多数生鲜农产品是由分散农户生产的。相对于大型零售企业(如超市或大卖场),分散农户处于一个较弱地位,而大型零售商作为直接接触消费者的首要环节,能及时掌握消费者需求及市场信息的变化,在供应链中往往占据着主要地位。笔者对一个供应商 $s$ 和一个零售商 $r$ 组成的两级生鲜农产品供应链进行研究。零售商属于供应链中的核心企业,在生鲜农产品质量控制过程中,供应商控制生鲜农产品从田间到零售商中间的筛选和质量控制,而零售商主要控制生鲜产品的加工(包装、分拣等)和质量控制。为了确保生鲜农产品最终的质量,零售商应站在全局、系统的角度对供应商进行质量管理的协调。在此次研究中,用 $B_s$ 表示供应商为了控制生鲜农产品质量付出的质量控制努力, $B_r$ 表示零售商付出的质量控制努力。为建模需要,做出以下基本假设:

第一,用新鲜度指标来表示生鲜农产品的质量价值。生鲜农产品的新鲜度衰退包含自然流失和人为损害两方面,供应链双方在质量控制上的努力可延缓生鲜农产品新鲜度的衰减,且新鲜度是一个动态变化的过程,参考Prasad等<sup>[31]</sup>和熊中楷等<sup>[32]</sup>的研究思想,可用式(1)所示的微分方程描述生鲜农产品新鲜度的动态变化过程:

$$\dot{Q}(t) = \alpha B_s + \beta B_r - \gamma Q(t) \quad (1)$$

式中, $\dot{Q}(t) = \partial Q(t) / \partial t$ , $Q(t)$ 表示在 $t$ 时刻生鲜产品的新鲜度, $Q(0) = Q_0$ ,表示初始时刻的生鲜农产品新鲜度; $\alpha$ 表示供应商的质量控制努力对生鲜农产品新鲜度的影响系数, $\beta$ 表示零售商的质量控制努力对生鲜农产品新鲜度的影响系数; $\gamma$ 表示生鲜农产品新鲜度的自然衰减率。后文将通过构造汉密尔顿-雅克比-贝尔曼方程(HJB Equation)的方法来求解此微分方程。

第二,由于供应商和零售商对生鲜农产品的质量努力可以为整条供应链创造收益,借鉴洪江涛等<sup>[33]</sup>和张雄会等<sup>[34]</sup>的思想,假设因供应商与零售商对生鲜农产品的质量努力带来的收益函数是与生鲜产品的新鲜度成正比的,表示为函数形式如下:

$$R(Q(t)) = \varphi + \delta Q(t) \quad (2)$$

式中, $\varphi$ 为常数, $\delta$ 是生鲜农产品新鲜度对供应链总

收益的影响系数。

第三,供应商和零售商的质量控制努力水平越高,提高质量控制努力的成本越高。假设供应商和零售商的成本函数为凸函数,具体形式如下:

$$C(B_s) = \frac{1}{2}k_s B_s^2 \quad (3)$$

$$C(B_r) = \frac{1}{2}k_r B_r^2 \quad (4)$$

式中, $k_s, k_r$  分别表示供应商和零售商各自质量控制努力的成本系数。

第四,假设供应商和零售商通过质量控制努力产生的利润只在供应商和零售商之间分配,零售商是生鲜农产品供应链上的核心主体,它将确定供应商获得的份额为  $\theta, \theta \in (0, 1)$  为常数,零售商自己获得的收益份额为  $1-\theta$ 。

第五,假设供应商和零售商双方都是在无限时间内追求使自身利润最大化的最优质量管理策略,有相同且为正值的贴现率  $\rho$ 。

第六,生鲜农产品的种类较为多样,不同生鲜农产品特征下的决策模式也具有差异化。此次研究以生鲜果蔬类产品为研究对象,探讨不同决策模式下其质量控制策略。

## 2. 分散和集中决策情景下的博弈模型设计

### (1) 零售商主导下的 Stackelberg 博弈模型

当零售商处于核心主体地位,供应商作为追随者时,零售商和供应商双方之间将进行 Stackelberg 博弈,零售商为激励供应商,主动承担供应商部分质量控制努力成本。博弈顺序如下:首先,零售商决定自身的质量控制努力水平以及为激励供应商而承担的质量控制成本分担系数  $\omega \in (0, 1)$ ;然后,供应商根据自身利益最大化原则决定自身的最优质量控制努力水平,双方的博弈目标都是追求自身收益最大化。

这种情况下,供应商  $s$  和零售商  $r$  的目标函数分别为:

$$J_s(B_s) = \int_0^\infty e^{-\rho t} \left\{ \theta [\varphi + \delta Q(t)] - \frac{1}{2}(1 - \omega)k_s B_s^2 \right\} dt \quad (5)$$

$$J_r(B_r) = \int_0^\infty e^{-\rho t} \left\{ (1 - \theta) [\varphi + \delta Q(t)] - \frac{1}{2}k_r B_r^2 - \frac{1}{2}\omega k_s B_s^2 \right\} dt \quad (6)$$

由于该种情况下供应商和零售商的博弈构成 Stackelberg 博弈,可利用逆向归纳法。其中,零售商为博弈的领导者,供应商是博弈的跟随者。问题转化为供应商的单方最优控制问题,其最优利润函数

$V_s(Q)$  必须满足 HJB 方程:

$$\rho V_s(Q) = \max_{B_s} \left\{ \theta [\varphi + \delta Q(t)] - \frac{1}{2}(1 - \omega)k_s B_s^2 + V'_s(Q)(\alpha B_s + \beta B_r - \gamma Q(t)) \right\} \quad (7)$$

使式(7)最大化的关于  $B_s$  的一阶偏导数  $\frac{\partial V_s}{\partial B_s} = 0$ ,即供应商的最优质量控制努力水平反应函数为:

$$B_s = \frac{\alpha V'_s(Q)}{(1 - \omega)k_s} \quad (8)$$

供应商将根据给定的决策  $B_r$  采取自身的最优策略,零售商根据供应商的理性反应来确定自己的最优质量控制努力水平和质量成本分担系数,以满足自身利益最大化的目标。零售商的最优利润  $V_r(Q)$  满足的 HJB 方程如下:

$$\rho V_r(Q) = \max_{B_r} \left\{ (1 - \theta) [\varphi + \delta Q(t)] - \frac{1}{2}k_r B_r^2 - \frac{1}{2}\omega k_s B_s^2 + V'_r(Q)(\alpha B_s + \beta B_r - \gamma Q(t)) \right\} \quad (9)$$

将式(8)带入零售商的 HJB 方程式(9)可得:

$$\rho V_r(Q) = \max_{B_r, \omega} \left\{ (1 - \theta) [\varphi + \delta Q(t)] - \frac{1}{2}k_r B_r^2 - \frac{1}{2}\omega k_s \left[ \frac{\alpha V'_s(Q)}{(1 - \omega)k_s} \right]^2 + V'_r(Q) \left( \alpha \frac{\alpha V'_s(Q)}{(1 - \omega)k_s} + \beta B_r - \gamma Q(t) \right) \right\} \quad (10)$$

使式(10)最大化的关于  $B_r$  和  $\omega$  的一阶偏导数

$$\frac{\partial V_r}{\partial B_r} = 0, \frac{\partial V_r}{\partial \omega} = 0, \text{可得到:}$$

$$B_r = \frac{\beta V'_r(Q)}{k_r} \quad (11)$$

$$\omega = \frac{2V'_r(Q) - V'_s(Q)}{2V'_r(Q) + V'_s(Q)} \quad (12)$$

将式(8)(11)(12)带入式(7)(10),整理得:

$$\rho V_s(Q) = \theta \varphi + [\theta \delta - \gamma V'_s(Q)] Q(t) + \frac{\alpha^2 V'_s(Q)(2V'_r(Q) + V'_s(Q))}{4k_s} + \frac{\beta^2 V'_s(Q) V'_r(Q)}{k_r} \quad (13)$$

$$\rho V_r(Q) = (1 - \theta) \varphi + [(1 - \theta) \delta - \gamma V'_r(Q)] Q(t) + \frac{[\beta V'_r(Q)]^2}{2k_r} + \frac{\alpha^2 [2V'_r(Q) + V'_s(Q)]^2}{8k_s} \quad (14)$$

由式(13)(14)可知,关于  $Q$  的线性最优利润是 HJB 方程的解,令:

$$\begin{cases} V_s(Q) = a_1 + b_1 Q \\ V_r(Q) = c_1 + d_1 Q \end{cases} \quad (15)$$

式中,  $a_1, b_1, c_1, d_1$  为常数。

将式(15)及其对  $Q$  的导数  $V'_s(Q) = b_1, V'_r(Q) = d_1$  代入式(13)(14),计算可得到最优值函数系数:

$$\begin{cases} a_1 = \frac{\theta\varphi}{\rho} + \frac{\theta(1-\theta)\beta^2\delta^2}{(\rho+\gamma)^2\rho k_r} + \frac{\theta(2-\theta)\alpha^2\delta^2}{4(\rho+\gamma)^2\rho k_s} \\ b_1 = \frac{\theta\delta}{\rho+\gamma} \\ c_1 = \frac{(1-\theta)\varphi}{\rho} + \frac{(1-\theta)^2\beta^2\delta^2}{2(\rho+\gamma)^2\rho k_r} + \frac{(2-\theta)^2\alpha^2\delta^2}{8(\rho+\gamma)^2\rho k_s} \\ d_1 = \frac{(1-\theta)\delta}{\rho+\gamma} \end{cases} \quad (16)$$

将以上系数  $a_1, b_1, c_1, d_1$  代入式(8)(11)(12),可以得到零售商主导的质量控制博弈情形下 Stackelberg 均衡为(为方便区分用下标 1 表示):

$$B_{s1} = \frac{(2-\theta)\alpha\delta}{2(\rho+\gamma)k_s} \quad (17)$$

$$B_{r1} = \frac{(1-\theta)\beta\delta}{(\rho+\gamma)k_r} \quad (18)$$

$$\omega = \begin{cases} \frac{2-3\theta}{2-\theta} & 0 < \theta < \frac{2}{3} \\ 0 & \frac{2}{3} < \theta < 1 \end{cases} \quad (19)$$

可求得供应商和零售商以及整个生鲜农产品供应链的最优值函数分别为:

$$V_{s1}(Q) = \frac{\theta\varphi}{\rho} + \frac{\delta^2}{(\rho+\gamma)^2\rho} \left[ \frac{\theta(1-\theta)\beta^2}{k_r} + \frac{\theta(2-\theta)\alpha^2}{4k_s} \right] + \frac{\theta\delta}{(\rho+\gamma)}Q \quad (20)$$

$$V_{r1}(Q) = \frac{(1-\theta)\varphi}{\rho} + \frac{\delta^2}{(\rho+\gamma)^2\rho} \left[ \frac{(1-\theta)^2\beta^2}{2k_r} + \frac{(2-\theta)^2\alpha^2}{8k_s} \right] + \frac{(1-\theta)\delta}{(\rho+\gamma)}Q \quad (21)$$

$$V_{\text{总}1}(Q) = V_{s1}(Q) + V_{r1}(Q) = \frac{\varphi}{\rho} + \frac{\delta^2}{(\rho+\gamma)^2\rho} \left[ \frac{(1-\theta^2)\beta^2}{2k_r} + \frac{(4-\theta^2)\alpha^2}{8k_s} \right] + \frac{\delta}{(\rho+\gamma)}Q \quad (22)$$

## (2) 合作模式下的博弈模型

供应商和零售商作为一个有机整体,以合作的形式共同确定最优质量控制努力水平,在供应商和零售商进行协同质量控制博弈情形下,双方能够以生鲜农产品供应链系统利润最优为首要原则来共同

的决定  $B_s$  和  $B_r$  的值。因此,在集中决策下,生鲜农产品供应链目标函数为:

$$J_{\text{总}}(Q) = J_s + J_r = \int_0^\infty e^{-\rho t} \{ \varphi + \delta Q(t) - \frac{1}{2}k_s B_s^2 - \frac{1}{2}k_r B_r^2 \} dt \quad (23)$$

则式(23)对应的供应链最优利润函数满足的 HJB 方程为:

$$\rho V_{\text{总}}(Q) = \max_{B_s, B_r} \left\{ \varphi + \delta Q(t) - \frac{1}{2}k_s B_s^2 - \frac{1}{2}k_r B_r^2 + V'_{\text{总}}(Q)(\alpha B_s + \beta B_r - \gamma Q) \right\} \quad (24)$$

对式(24)求一阶偏导数,可得供应商和零售商的最优质量控制努力水平分别为:

$$B_s = \frac{\alpha V'_{\text{总}}(Q)}{k_s} \quad (25)$$

$$B_r = \frac{\beta V'_{\text{总}}(Q)}{k_r} \quad (26)$$

将式(25)(26)代入到式(24)HJB 方程的右端,可得:

$$\rho V_{\text{总}}(Q) = \varphi + [\delta - \gamma V'_{\text{总}}(Q)]Q(t) + \frac{\alpha^2 V'^2_{\text{总}}(Q)}{2k_s} + \frac{\beta^2 V'^2_{\text{总}}(Q)}{2k_r} \quad (27)$$

由式(27)可知,关于  $Q$  的线性最优利润是 HJB 方程的解,令:

$$V_{\text{总}}(Q) = a_2 + b_2 Q, \quad a_2, b_2 \text{ 均为常数} \quad (28)$$

将(28)式及其对  $Q$  的导数:  $V'_{\text{总}}(Q) = b_2$  代入式(27)中,可得:

$$\rho(a_2 + b_2 Q) = \varphi + [\delta - \gamma b_2]Q(t) + \frac{\alpha^2 b_2^2}{2k_s} + \frac{\beta^2 b_2^2}{2k_r} \quad (29)$$

根据式(29)可得到最优值函数系数:

$$\begin{cases} a_2 = \frac{\varphi}{\rho} + \frac{\delta^2}{2\rho(\rho+\gamma)^2} \left( \frac{\alpha^2}{k_s} + \frac{\beta^2}{k_r} \right) \\ b_2 = \frac{\delta}{\rho+\gamma} \end{cases} \quad (30)$$

将系数  $a_2, b_2$  代入式(25)(26)中可得,在合作质量控制博弈形式下,供应商和零售商的最优质量控制努力水平分别为(为方便区分用下标 2 表示):

$$B_{s2} = \frac{\alpha\delta}{(\rho+\gamma)k_s} \quad (31)$$

$$B_{r2} = \frac{\beta\delta}{(\rho+\gamma)k_r} \quad (32)$$

进一步地,可计算出生鲜农产品供应链整体最优利润为:

$$V_{\text{总}2}(Q) = \frac{\varphi}{\rho} + \frac{\delta^2}{\rho(\rho + \gamma)^2} \left( \frac{\alpha^2}{2k_s} + \frac{\beta^2}{2k_r} \right) + \frac{\delta}{(\rho + \gamma)} Q \quad (33)$$

### 三、比较分析

推论 1: 集中决策模式下, 供应商和零售商的质量控制努力水平均优于分散决策模式下的质量控制努力水平, 且质量控制努力行为的改善比例会随着收益分配系数的增加而增加。

证明: 比较 Stackelberg 主从博弈和集中决策模式中供应商和零售商的质量控制行为模式, 根据式 (31) 和式 (17), 式 (32) 和式 (18), 可得如下结果:

$$B_{s2} - B_{s1} = \frac{\alpha\delta}{(\rho + \gamma)k_s} - \frac{(2 - \theta)\alpha\delta}{2(\rho + \gamma)k_s} = \frac{\theta\alpha\delta}{2(\rho + \gamma)k_s} > 0 \quad (34)$$

$$B_{r2} - B_{r1} = \frac{\beta\delta}{(\rho + \gamma)k_r} - \frac{(1 - \theta)\beta\delta}{(\rho + \gamma)k_r} = \frac{\theta\beta\delta}{(\rho + \gamma)k_r} > 0 \quad (35)$$

由此可得, 在集中决策模式下, 供应商和零售商的质量控制努力水平优于其在 Stackelberg 主从博弈分散决策模式下的质量控制努力水平。分别计算供应商和零售商的质量控制努力水平的改善比例, 可得:

$$\frac{B_{s2} - B_{s1}}{B_{s1}} = \frac{\frac{\theta\alpha\delta}{2(\rho + \gamma)k_s}}{\frac{(2 - \theta)\alpha\delta}{2(\rho + \gamma)k_s}} = \frac{\theta}{2 - \theta} \quad (36)$$

$$\frac{B_{r2} - B_{r1}}{B_{r1}} = \frac{\frac{\theta\beta\delta}{(\rho + \gamma)k_r}}{\frac{(1 - \theta)\beta\delta}{(\rho + \gamma)k_r}} = \frac{\theta}{1 - \theta} \quad (37)$$

$$\text{由于} \left( \frac{\theta}{2 - \theta} \right)' = \frac{2}{(2 - \theta)^2} > 0 \text{ 且} \left( \frac{\theta}{1 - \theta} \right)' = \frac{1}{(1 - \theta)^2} > 0,$$

因此  $\frac{\theta}{2 - \theta}, \theta \in (0, 1)$  以及  $\frac{\theta}{1 - \theta}, \theta \in (0, 1)$  皆为单调增函数。推论 1 即可得证。

推论 2: 当供应商和零售商由 Stackelberg 主从博弈过渡到协同合作模式时, 整个生鲜农产品供应链的最优利润会增加, 且增加值与供应商的质量控制努力水平的改善值呈正比, 与供应商质量控制努力水平对生鲜农产品新鲜度的影响系数  $\alpha$  呈正比, 与零售商的质量控制努力水平的改善值呈正比, 与零售商的质量控制努力水平对生鲜农产品新鲜度的影响系数  $\beta$  呈正比, 与利润分配系数  $\theta$  呈正比, 与生鲜农产品新鲜度对供应链总收益的影响系数  $\delta$  呈正比, 与生鲜农产品新鲜度的衰减率  $\gamma$  呈反比, 与贴现率  $\rho$  呈反比。

证明: 比较协同合作模式和 Stackelberg 主从博

弈模型中整个生鲜农产品供应链的最优利润, 根据式 (33) 和式 (22), 可得:

$$\begin{aligned} V_{\text{总}2}(Q) - V_{\text{总}1}(Q) &= \frac{\delta^2}{(\rho + \gamma)^2 \rho} \left[ \frac{\theta^2 \alpha^2}{8k_s} + \frac{\theta^2 \beta^2}{2k_r} \right] \\ &= \frac{1}{\rho} \left\{ \frac{\theta\alpha\delta}{4(\rho + \gamma)} (B_{s2} - B_{s1}) + \frac{\theta\beta\delta}{2(\rho + \gamma)} (B_{r2} - B_{r1}) \right\} > 0 \end{aligned} \quad (38)$$

由式 (38) 可得推论 2。在此应当注意, 供应商和零售商愿意进行合作质量控制的前提是其获得的利润将会优于非合作的情形, 因此, 当供应商和零售商进行协同质量控制时, 最优策略方案  $(B_{s2}, B_{r2})$  必须满足以下约束条件:

$$\begin{aligned} V_{s2}(Q) - V_{s1}(Q) &\geq 0 \\ V_{r2}(Q) - V_{r1}(Q) &\geq 0 \end{aligned} \quad (39)$$

此时求得的质量控制努力水平才是供应商与零售商都能接受的, 也是帕累托最优的。而对于供应链利润增量的分配问题, 一般来说取决于双方的谈判(讨价还价)能力。

推论 3: 当生鲜农产品供应链利润分配系数  $\theta$  满足下列条件时:

$$\theta \in [2A/(1 + 4A), 4A/(1 + 4A)]$$

供应商和零售商的质量控制行为可以通过合作达到帕累托最优。

证明: 根据式 (33) 可求得:

$$\begin{aligned} V_{s2}(Q) &= \theta V_{\text{总}2}(Q) = \frac{\theta\varphi}{\rho} + \frac{\theta\delta^2}{\rho(\rho + \gamma)^2} \left( \frac{\alpha^2}{2k_s} + \frac{\beta^2}{2k_r} \right) + \frac{\theta\delta}{(\rho + \gamma)} Q \\ V_{r2}(Q) &= (1 - \theta) V_{\text{总}2}(Q) = \frac{(1 - \theta)\varphi}{\rho} + \frac{(1 - \theta)\delta^2}{\rho(\rho + \gamma)^2} \left( \frac{\alpha^2}{2k_s} + \frac{\beta^2}{2k_r} \right) + \frac{(1 - \theta)\delta}{(\rho + \gamma)} Q \end{aligned} \quad (40)$$

根据式 (20) (21) (39) (40), 可求得:

$$\begin{aligned} V_{s2}(Q) - V_{s1}(Q) &= \frac{\theta\delta^2}{\rho(\rho + \gamma)^2} \left( \frac{\theta}{4} \frac{\alpha^2}{k_s} + \frac{2\theta - 1}{2} \frac{\beta^2}{k_r} \right) > 0 \end{aligned} \quad (41)$$

$$\begin{aligned} V_{r2}(Q) - V_{r1}(Q) &= \frac{\theta\delta^2}{\rho(\rho + \gamma)^2} \left( -\frac{\theta}{8} \frac{\alpha^2}{k_s} + \frac{1 - \theta}{2} \frac{\beta^2}{k_r} \right) > 0 \end{aligned} \quad (42)$$

要满足上述两式, 则需要满足:  $\theta \in (0, 1/2)$  时,

$$\frac{\theta}{1 - 2\theta} > \frac{2\beta^2 k_s}{\alpha^2 k_r}, \frac{\theta}{1 - \theta} < \frac{4\beta^2 k_s}{\alpha^2 k_r} \text{ 两式成立; } \theta \in (1/2, 1) \text{ 时,}$$

$$\frac{\theta}{1 - 2\theta} < \frac{2\beta^2 k_s}{\alpha^2 k_r}, \frac{\theta}{1 - \theta} < \frac{4\beta^2 k_s}{\alpha^2 k_r} \text{ 两式成立。}$$

令  $A = \frac{\beta^2 k_s}{\alpha^2 k_r}$ , 则以上式子可以化简为:  $\theta \in (0,$

$1/2)$  时, 需要满足: ①  $\frac{\theta}{1 - 2\theta} > 2A$ , ②  $\frac{\theta}{1 - \theta} < 4A$ ;  $\theta \in$

(1/2,1)时,需要满足:③ $\frac{\theta}{1-2\theta}<2A$ ,④ $\frac{\theta}{1-\theta}<4A$ 。

由于  $A \geq 0$ ,所以③成立。

由反证法解①②得到, $\theta \in [2A/(1+4A), 4A/(1+4A)]$ ,因为  $\theta \in (0,1/2)$ , $2A/(1+4A) > 0$  恒成立,所以可得:

$4A/(1+4A) > 1/2 \Rightarrow A > 1/4$  时, $\theta \in (2A/(1+4A), 1/2)$

$4A/(1+4A) < 1/2 \Rightarrow A < 1/4$  时, $\theta \in [2A/(1+4A), 4A/(1+4A)]$

同理,解③④得到, $\theta \in [2A/(1+4A), 4A/(1+4A)]$ ,因为  $\theta \in (1/2,1)$ ,且  $2A/(1+4A) < 1/2$ , $4A/(1+4A) < 1$  恒成立,所以可得:

$4A/(1+4A) > 1/2 \Rightarrow A > 1/4$  时, $\theta \in [1/2, 4A/(1+4A)]$

$4A/(1+4A) < 1/2 \Rightarrow A < 1/4$  时,无解

$\theta = 1/2$  时,需满足 $\frac{\theta}{1-\theta} < 4A, \Rightarrow A > 1/4$

由以上反证法可以得出,只有  $\theta$  满足推论 3 的条件时,供应商和零售商才会通过合作的方式实现帕累托最优,产出较高的供应链利润。

四、算例仿真

本节将通过算例验证上述模型及结论,参数数值如表 1 所示。

表 1 模型参数设定

| 参数名称      | 参数值  | 参数名称     | 参数值 |
|-----------|------|----------|-----|
| $\alpha$  | 0.1  | $\beta$  | 0.1 |
| $\gamma$  | 0.1  | $Q_0$    | 0.1 |
| $\varphi$ | 1    | $\delta$ | 0.4 |
| $k_s$     | 0.1  | $k_r$    | 0.1 |
| $\theta$  | 0.48 | $\rho$   | 0.1 |

在不同博弈情形下的供应商、零售商以及整条供应链系统的利润,其随时间变化的曲线如图 1~3 所示。由图 1~3 所示的利润变化曲线可以看出,供应商、零售商和供应链的总利润都是在集中决策模式下优于在 Stackelberg 博弈分散决策模式下的情

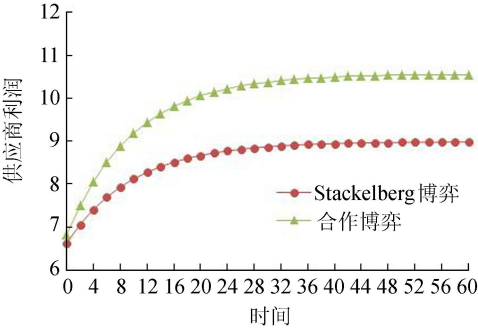


图 1 供应商利润变化情况( $\theta=0.48$  时)

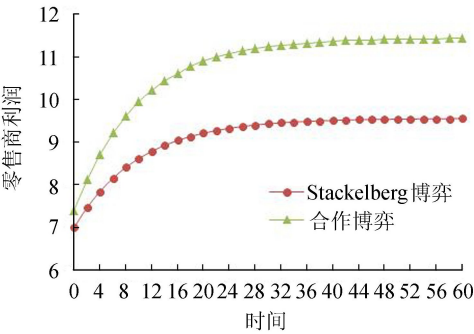


图 2 零售商利润变化情况( $\theta=0.48$  时)

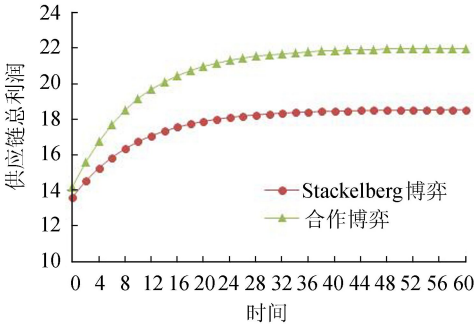


图 3 供应链总利润变化情况( $\theta=0.48$  时)

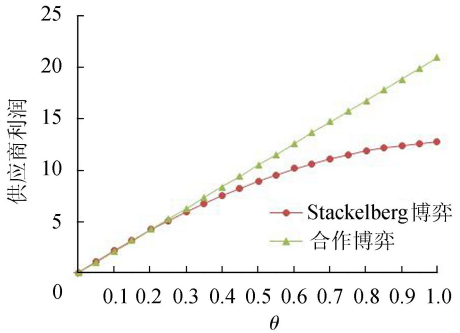


图 4 供应商利润变化情况( $t=20$  时)

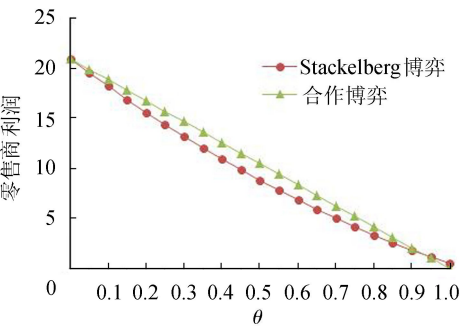


图 5 零售商利润变化情况( $t=20$  时)

形。比较而言,合作博弈情形下增长的利润空间比非合作的情形下增加的利润要大。

从上述供应商、零售商以及生鲜农产品供应链的利润变化情况可知,要想实现对三者在两种博弈情形下的帕累托改进,必须对供应链系统在集中决策模式下的利润增量进行合理分配。通过探讨收益分配系数对最优利润的影响,来解决利润增量的合理分配问题。图 4~6 是收益分配系数对供应商、零

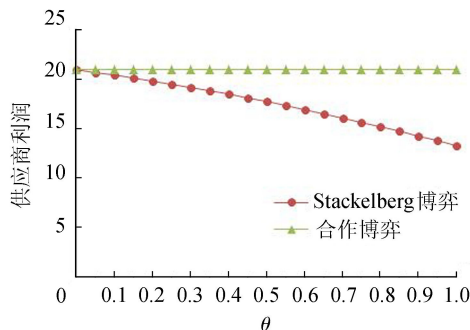


图6 供应链总利润变化情况( $t=20$  时)

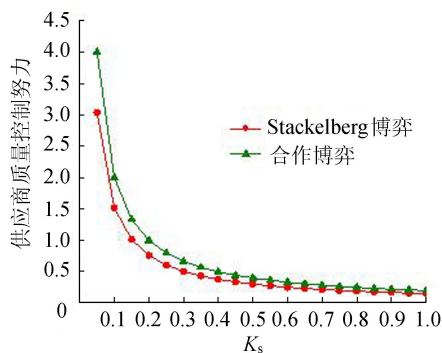


图7 供应商质量控制努力水平变化( $\theta=0.48$ )

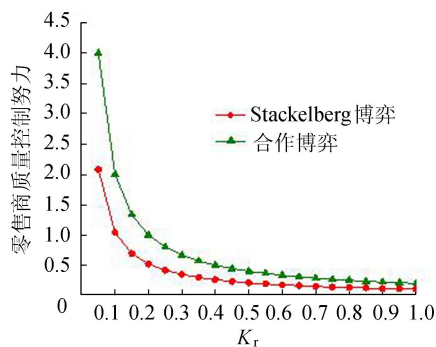


图8 零售商质量控制努力水平变化( $\theta=0.48$ )

售商和供应链总收益的影响曲线。由此可知,收益分配系数与供应商利润是正相关关系,但对零售商利润却是反向的,收益分配系数越大,零售商利润越小。对于供应商和零售商这两个主体来说,当分配系数满足某个区间时,才会有合作博弈下的利润大于 Stackelberg 博弈下的利润。这与推论 3 结论一致。

通过图 7 和图 8 可知,供应商和零售商的质量控制努力与成本系数呈反比,当成本  $k_s$  和  $k_r$  逐渐增加时,双方的质量控制努力水平均不断下降,但集中决策模式下的质量控制努力水平均优于分散决策模式下的质量控制努力水平,且与推论 1 的结论一致。

图 9 反映的是供应商和零售商各自的质量控制努力系数对生鲜农产品新鲜度的影响曲面。生鲜农产品的新鲜度与供应商和零售商各自的质量控制努力系数成正比,随着供应商和零售商对质量控制努力的增加,集中决策下生鲜农产品的新鲜度明显优于分散决策下生鲜农产品的新鲜度。通过对比分析

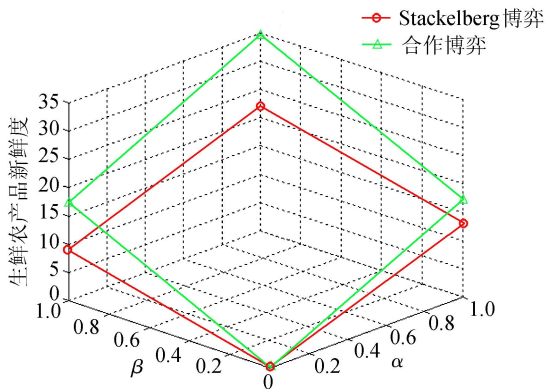


图9 生鲜农产品的新鲜度变化( $t=20$  时)

进一步可得:供应商和零售商对质量控制努力程度越敏感,生鲜农产品质量越能够得到保障,质量控制努力转化为生鲜农产品质量的转化率越高,质量的提升效果越显著。

## 五、结 语

基于微分博弈理论,笔者对供应商和零售商在两级生鲜农产品供应链中的合作质量决策问题进行研究,构建了零售商为主导的 Stackelberg 博弈模型以及合作模式下的博弈模型,得出的研究结论包括:①在零售商为主导的 Stackelberg 博弈情形下,供应商、零售商分散决策模式得到的利润和供应链总利润远远低于合作模式下的博弈情形,且质量行为改善比例均会随着收益分配系数的增加而增加;②收益分配系数与供应商利润呈正相关关系,与零售商利润呈负相关关系,收益分配系数越大,零售商利润越小,与供应链总利润无关;③供应商和零售商为控制生鲜农产品质量付出的质量控制努力与质量控制成本呈负相关,质量控制成本系数越大,供应商和零售商的质量控制努力越小;④生鲜农产品的新鲜度与供应商和零售商的质量控制努力系数呈正相关,且集中决策下生鲜农产品新鲜度优于分散决策下生鲜农产品新鲜度。

生鲜农产品供应链是个复杂的系统,根据模型及参数分析,可从以下 3 个方面入手控制提高生鲜农产品的质量:第一,构建供应商和零售商的纵向协调机制,加强参与主体的合作深度;第二,缩短生鲜农产品的流通环节,生鲜农产品的特点是保质期短,并且易腐烂变质,因此应调整参与主体,优化供应链结构,通过供应链各资源的高效利用保障生鲜农产品质量;第三,加大政策的扶持力度。供应商和零售商对生鲜农产品的质量努力水平可通过财政补贴的方式来激励和提高。此次研究结论可以为供应链主体在质量控制、激励设计等方面的决策提供理论依据,然而,由于本研究仅考虑单个供应商和零售商组成的两级生鲜农产品供应链,针对供应链中存在的风险以

及多级供应链主体的博弈是下一步研究的重点。

参考文献：

[ 1 ] GHARE P M, SCHRADER G P. A model for an exponentially decaying inventory[J]. Journal of Industrial Engineering,1963,14(5):238-243.

[ 2 ] RONG A Y, RENZO A, MARTIN G. An optimization approach for managing fresh food quality throughout the supply chain [J]. International Journal of Production Economics,2011,131(1):421-429.

[ 3 ] WANG X J, DONG L. A dynamic product quality evaluation based pricing model for perishable food supply chains [J]. Omega,2012,40(6):906-917.

[ 4 ] LEE Y P,DYE C Y. An inventory model for deteriorating items under stock-dependent demand and controllable deterioration rate [J]. Computers & Industrial Engineering,2012,63(2):474-482.

[ 5 ] YU M,NAGURNEY A. Competitive food supply chain networks with application to fresh produce[J]. European Journal of Operational Research,2013,224(2):273-282.

[ 6 ] AUNG M M,CHANG Y S. Temperature management for the quality assurance of a perishable food supply chain [J]. Food Control,2014,40(1):198-207.

[ 7 ] KATSAROS G, DERMESONLUOGLU E. Kinetic study of quality indices and shelf life modelling of frozen spinach under dynamic conditions of the cold chain[J]. Journal of Food Engineering,2015(148):13-23.

[ 8 ] 罗兵,王卫明. 指数时变需求的变质品两仓库 EOQ 模型[J]. 中国管理科学,2007,15(s1):482-486.

[ 9 ] CAI X Q,CHEN J, XIAO Y B,et al. Optimization and coordination of fresh product supply chains with freshness-keeping effort[J]. Production and Operations Management,2010,19(3):261-278.

[10] 刘昊. 供应链环境下易变质商品的库存模型研究[J]. 物流工程与管理,2010,32(9):83-85.

[11] 王磊,但斌. 基于消费者选择行为的生鲜农产品保鲜和定价策略研究[J]. 管理学报,2014,11(3):449-454.

[12] 杨春,但斌. 考虑保鲜努力的生鲜农产品零售商与物流服务商的协调合同[J]. 技术经济,2010(12):122-126.

[13] 但斌,陈军. 基于价值损耗的生鲜农产品供应链协调[J]. 中国管理科学,2008,16(5):42-49.

[14] 陈军,但斌. 基于实体损耗控制的生鲜农产品供应链协调[J]. 系统工程理论与实践,2009,29(3):54-62.

[15] 林略,杨书萍,但斌. 时间约束下鲜活农产品三级供应链协调[J]. 中国管理科学,2011,19(3):55-62.

[16] CAI X Q,CHEN J,XIAO Y B,et al. Fresh-product supply chain management with logistics out-sourcing [J]. Omega,2013,41(4):752-765.

[17] 王婧,陈旭. 考虑期权合同的生鲜农产品批发商的最优订货[J]. 系统工程理论与实践,2010,30(12):2137-2144.

[18] 王冲,陈旭. 考虑期权合同的生鲜农产品供应链定价和协调[J]. 预测,2013,32(3):76-80.

[19] 凌六一,郭晓龙,胡中菊,等. 基于随机产出与随机需求的农产品供应链风险共担合同[J]. 中国管理科学,2013,21(2):50-57.

[20] 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,2015,23(8):102-111.

[21] XIE G,YUE W Y,WANG S Y, et al. Quality investment and price decision in a risk-averse supply chain [J]. European Journal of Operation Research,2011,214(2):403-410.

[22] GIGLERA J K, HENDRIX E M T, HEESEN R A. On optimisation of agri chain by dynamic programming [J]. European Journal of Operational Research,2002,139(3):613-625.

[23] CLEMENTS M D, LAZO R M, MARTIN S K. Relationship connectors in NZ fresh produce supply chains [J]. British Food Journal,2008,110(4/5):346-360.

[24] 肖勇波,陈剑,徐小林. 到岸价格商务模式下涉及远距离运输的时鲜产品供应链协调[J]. 系统工程理论与实践,2008,28(2):19-25.

[25] 陈军,但斌,张旭梅. 多级价格折扣下基于损耗控制的生鲜农产品 EOQ 模型[J]. 系统工程理论与实践,2009,29(7):43-54.

[26] PATHUMNAKUL S, PIEWTHONGNGAMK K, KHAMJAN S. Intergrating a shrimp-growth function, farming skills information, and a supply allocation algorithm to manage the shrimp supply chain[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2009,66(1):93-105.

[27] BLACKBURN I J, SCUDDER G. Supply chain strategies for perishable products: the case of fresh produce [J]. Production and Operations Management,2009,18(2):129-137.

[28] 李琳,范体军. 面向零售商主导的生鲜农产品供应链的定价策略研究[C]. 第十六届中国管理科学学术年会,山西:山西大学经济与管理学院,2014.

[29] 李琳,范体军. 基于 RFID 技术应用的鲜活农产品供应链决策研究[J]. 中国管理科学,2012,20(6):87-93.

[30] 但斌,丁松. 基于顾客分类的生鲜农产品二次补货策略研究[J]. 中国管理科学,2012,20(6):87-93.

[31] PRASAD A, SETHI S P. Competitive advertising under uncertainty: a stochastic differential game approach [J]. Journal of Optimization Theory and Applications,2004,123(1):163-185.

[32] 熊中楷,聂佳佳,熊榆. 零售商竞争下纵向合作广告的微分对策模型[J]. 管理科学学报,2010,13(6):11-22.

[33] 洪江涛,黄沛. 两级供应链上质量控制的动态协调机制研究[J]. 管理工程学报,2011,25(2):62-65.

[34] 张雄会,陈俊芳,黄培. 两种供应商质量控制方式的比较研究[J]. 工业工程与管理,2008,13(6):11-16.

(责任编辑:高虹)