

曹武军, 陈志斐. 非线性时变需求下鲜活农产品供应链应对成本扰动研究[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(12): 571–576.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2016.12.167

# 非线性时变需求下鲜活农产品供应链 应对成本扰动研究

曹武军, 陈志斐

(郑州大学管理工程学院, 河南郑州 450001)

**摘要:** 在非线性时变需求各级成员努力增加收益的情况下, 对比分析一个由生产商—分销商—零售商构成的鲜活农产品三级供应链在成本扰动前后的最优生产决策和协调问题。运用 Kuhn–Tucker 条件和 Stackelberg 动态博弈求解供应链最优生产决策和协调时应该满足的条件, 运用两部收费协议协调供应链系统。结果表明: 供应链成员达成一致协议, 在其他条件不变时, 产品的基准售价、单位努力成本、批发价、各级成员的利润均随着产品成本的上升而上升, 随着  $k$  的上升而下降, 随着  $\beta$  的上升而上升; 成本扰动后, 产品的基准售价、单位努力成本、批发价、各级成员的利润均以计划期对应参数的确定倍数同方向变动。

**关键词:** 非线性时变需求; 努力成本; 鲜活农产品供应链; 成本扰动; 两部收费协议

**中图分类号:** F304.2    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1002-1302(2016)12-0571-06

在我国鲜活农产品被分为 5 个部分: 新鲜蔬菜、新鲜水

收稿日期: 2015-10-15

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 2012BAD34B06); 河南省高校创新人才支持计划(编号: 2011HASTIT002); 河南省教育厅自然科学研究计划(编号: 12A630037)。

作者简介: 曹武军(1971—), 男, 河南郑州人, 博士, 副教授, 主要从事农产品动态定价问题及供应链协调研究。E-mail: 13944485@qq.com。

通信作者: 陈志斐, 硕士研究生, 主要从事农产品供应链协调研究。E-mail: 1161679542@qq.com。

果、鲜活水产品、活的禽兽、新的肉蛋奶, 这些产品是一类特殊的易变质产品, 随着储存时间的增长, 新鲜度下降, 使用价值下降, 需求下降。在市场稳定的状况下, 要想获得更多的利润, 生产商和分销商必须付出更多的努力成本来保证产品质量, 零售商必须加大努力成本来促进产品销售。但是, 当外部环境发生变化, 原来制定的计划不能平稳执行, 生产销售出现偏差, 供应链各级成员的利益受到伤害, 合作关系将被瓦解, 在此用“扰动”一词来描述原来计划偏离的状态。在实践中, 新技术的引入、人力成本的变化、环境的突变等原因都会造成产品成本扰动, 从而导致原始供应链不再协调, 如 2013 年 9

- [3] Ntow W J, Gijzen H J, Kelderman P, et al. Farmer perceptions and pesticide use practices in vegetable production in Ghana[J]. Pest Management Science, 2006, 62(4): 356–365.
- [4] Atreya K. Pesticide use knowledge and practices: a gender differences in Nepal[J]. Environmental Research, 2007, 104(2): 305–311.
- [5] Abhilash P C, Singh N. Pesticide use and application: an Indian scenario[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 165(1/3): 1–12.
- [6] Obayelu A E, Awoyemi T T. Consumers' perception on the use of agrochemical and agrochemical residues in Yams: an empirical study of Kabba—Bunu local government area of Kogi State, Nigeria[J]. China Agricultural Economic Review, 2006, 4(2): 239–249.
- [7] 王志刚, 李腾飞. 蔬菜出口产地农户对食品安全规制的认知及其农药决策行为研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2012, 22(2): 164–169.
- [8] 乔娟, 曹蕾. 基于食品质量安全的农户认知、行为、态度和意愿分析[J]. 中国畜牧杂志, 2009, 45(14): 24–28.
- [9] 郝利, 任爱胜, 冯忠泽, 等. 农产品质量安全农户认知分析[J]. 农业技术经济, 2008(6): 30–35.
- [10] 关俊霞, 陈玉萍, 吴海涛, 等. 南方农户农业生产的技术需求研究[J]. 经济问题, 2007, 332(4): 84–86.
- [11] 黄季焜, 齐亮, 陈瑞剑. 技术信息知识、风险偏好与农民施用

农药[J]. 管理世界, 2008(5): 71–76.

- [12] 蔡键. 教育不足、地区差异与农药认知——基于广东省 11 个县 272 位稻农的实证分析[J]. 当代经济科学, 2013, 35(6): 78–85.
- [13] 周峰, 徐翔. 无公害蔬菜生产者农药使用行为研究——以南京为例[J]. 经济问题, 2008, 341(1): 94–96.
- [14] 郑冬梅. 完善农产品质量安全保障体系的分析[J]. 农业经济问题, 2006(11): 23–36.
- [15] 赵建欣, 张忠根. 农户安全农产品生产决策影响因素分析[J]. 统计研究, 2007, 24(11): 90–92.
- [16] 冯忠泽, 李庆江. 农户农产品质量安全认知及影响因素分析[J]. 农业经济问题, 2007, 28(4): 22–26.
- [17] 李光润. 无公害农产品认证与质量控制——基于生产者角度[J]. 上海农业学报, 2007, 23(1): 101–104.
- [18] 周宝梅. 稻农农药使用心态与行为研究——基于对泰州市稻农的问卷调查的分析[D]. 扬州: 扬州大学, 2007: 71–72.
- [19] 侯博, 山丽杰, 牛亮云. 农药残留认知与主要影响因素研究——河南省 223 个小麦种植农户的案例[J]. 江南大学学报: 人文社会科学版, 2012, 11(2): 121–130, F0003.
- [20] 周洁红. 农户蔬菜质量安全控制行为及其影响因素分析——基于浙江省 396 户菜农的实证分析[J]. 中国农村经济, 2006(11): 25–34.

月 10 日全球品牌畜牧网发布我国推行了自然养猪技术,使得每头生猪的收入大约增加 40 元,减少开支 110 元,生产商的收益十分明显;2008 年南方冰雪灾害,直接导致当地 138.4 万  $\text{hm}^2$  农作物绝收,对其他地区鲜活农产品的需求急剧上升,由于道路阻塞导致运输不及时,农业经济损失 940 亿元。

鲜活农产品成本扰动不仅影响企业利润,更影响企业的未来发展。那么如何根据鲜活农产品自身特点,准确预测市场需求,有效协调供应链系统,在成本发生扰动后,找出受影响的因素,重新设计供应链系统,使得供应链各级成员有效协调,提高系统的抗风险性,减少成本扰动对供应链的不利影响,这不仅有重要的理论价值,更有实践意义。首先,国内对线性(或者非线性)需求下鲜活农产品供应链协调管理的研究主要有徐广业等用博弈模型分析了非线性市场需求下合作社和超市的定价协调管理决策<sup>[1]</sup>;林略等研究了鲜活农产品在时间约束下利用收益共享契约在一定范围内协调供应链的决策<sup>[2-4]</sup>;林略等研究了线性时变需求的供应链在有库存和剩余的情况下利用时间折扣契约协调供应链过程<sup>[5]</sup>。其次,国内外对成本扰动下的供应链研究也颇多,姚珣等研究了需求函数是非线性条件下单个供应商和零售商组成的供应链在面临市场规模和生产成本同时扰动时,供应商主导的 Stackelberg 博弈下供应链协调应对机制<sup>[6]</sup>;徐浩等运用两部定价协议协调成本和需求同时扰动下的双渠道供应链<sup>[7]</sup>;韩小花等研究了在制造成本扰动下,单个制造商和零售商组成的闭环供应链的最优生产决策与协调机制问题,结果表明两部收费契约能协调扰动前后的闭环供应链<sup>[8]</sup>;周建中等研究了单个生产商和销售商组成的二级供应链,在信息非对称市场需求函数为线性和非线性的情况下,市场需求和成本同时扰动

下的供应链最优决策<sup>[9]</sup>;吴忠和等探讨了单个制造商和单个零售商组成的供应链中,需求和零售商的购买成本同时扰动下调节数量折扣契约的参数使得供应链再次达到协调的问题<sup>[10]</sup>;但是对鲜活农产品三级供应链应对成本扰动的研究较少,廖春萍研究了需求和成本同时扰动下鲜活农产品供应链通过改进收益共享契约达成,同时当需求和成本不同时扰动时,根据其扰动幅度设置不同的协调策略<sup>[11]</sup>。

本研究探讨在非线性市场需求下,零售商主导的鲜活农产品供应链最优生产销售决策,运用两部收费协议协调成本扰动前后的供应链系统。重点探讨 3 个问题:(1)两部收费协议如何在成本扰动前后有效协调供应链系统;(2)供应链系统的各个参数变量均受哪些因素的影响,是怎样影响的;(3)成本扰动后各个变量与计划期相比,是怎样变动的。

1 问题描述与相关假设

本研究探讨由单个生产商 M—分销商 D—零售商 R 构成的鲜活农产品三级供应链,考虑一个单周期模型,零售商在销售季一次性订购整个周期的需求量。鲜活农产品三级供应链由零售商主导;生产商和分销商在农产品交易过程中努力保证质量,假定在生产和分销过程中无损耗,只有市场销售过程中有产品损耗,季末无剩余,无缺货;所有的信息(成本、市场需求等)都是共享的,供应链成员均是风险中性,追求利润最大化;产品在销售的过程中其新鲜度必然会随着时间  $t$  的增长单调连续加速递减,引用新鲜度函数  $\theta_{(t)} = 1 - \frac{t^2}{T^2}$ ,其中  $T$  是鲜活农产品的整个有效生命周期, $\theta_{(t)} \in [0, 1]$ <sup>[5]</sup>,其他相关符号如表 1 所示。

表 1 研究中所用符号汇总

符号	符号定义	符号	符号定义
$g$	供应链成员为了更好销售产品所做的单位努力成本	$w_A$	分销商给零售商的批发价格, $c_d + w_B < w_A$
$c_r$	零售商的单位销售成本	$k_A$	批发价 $w_A$ 对基准价格的反映系数, $0 < k_A < \frac{4}{5}$
$c_d$	分销商的单位订购加工成本	$A$	批发价 $w_A$ 函数中的可变常数, $0 < A < c_d + c_m$
$c_m$	生产商的单位生产成本	$w_B$	生产商给分销商的批发价格, $c_m < w_B$
$T$	鲜活农产品的整个有效生命周期	$k_B$	批发价 $w_B$ 对基准价格的反映系数, $0 < k_B < k_A$
$p$	$t$ 时刻零售商的单位产品售价	$B$	批发价 $w_B$ 中的可变常数, $0 < B < c_m$
$p_0$	产品新鲜度为 1 时零售商设置的基准售价	$a$	市场潜在需求量
$k$	生鲜农产品的基准价格 $p_0$ 的弹性系数, $k > 1 + \beta$	$\lambda_1$	单位缺货成本
$\beta$	单位努力 $g$ 的需求弹性系数, $0 < \beta < 1$	$\lambda_2$	单位处理成本
$Q$	零售商的销售总量	$\pi$	供应链的利润
$\pi_r$	零售商的利润	$\pi_d$	分销商的利润
$\pi_m$	生产商的利润		

假设 1:由生鲜农产品的特殊性 & 具体市场调研情况可知,零售商的单位产品售价与新鲜度成正比例变化,且零售商在销售开始之前总会预设最大零售价格,在此假定产品新鲜度为 1 时,零售商设置的最大的零售价格为零售商的基准售价  $p_0$ ;则令  $t$  时刻零售商的单位产品售价为  $p = p_0 \theta_{(t)} = p_0 (1 - \frac{t^2}{T^2})$ 。假设 2:在实际生产销售中,生产商和分销商的批发价格与零售商的基准售价成正比例变化,依据文献[12]假定生产商给分销商的批发价格为  $w_B = k_B p_0 + B$ ;分销商给零售商的批发价格为  $w_A = k_A p_0 + A$ ;由于  $c_d + w_B < w_A$  且  $c_m < w_B$ ,则有  $0 < B < c_m, 0 < A < c_d + c_m$ 。假设 3:鲜活农产品的市

场需求受到销售时间、销售价格、努力成本的影响,根据文献[1]及鲜活农产品的特殊性,假定  $t$  时刻的市场需求函数为  $q = ap_0^{-k} g^\beta \theta_{(t)}$ ;设置此需求函数原因是:(1)它符合需求函数的特点,对  $p_0$ 、 $g$ 、 $t$  分别求一阶和二阶偏导,表明上式  $q$  符合市场规律,同时可以看出市场需求量是关于销售时间、基准售价、努力成本的复合函数;(2)在实际生产销售中,将每天的销售数据做散点图,得到的实际情况用  $q = ap_0^{-k} g^\beta \theta_{(t)} = ap_0^{-k} g^\beta (1 - \frac{t^2}{T^2})$  拟合,再用最小二乘法估计参数  $k$  和  $\beta$ ,从而再次确定市场需求函数的拟合曲线为  $q = ap_0^{-k} g^\beta \theta_{(t)}$ 。随着产品售价的下降和销售的努力,产品的损失基本为 0,从 0 到

$T$  的整个销售时间内,零售商的销售总量为  $Q = \int_0^T q dt = \frac{2}{3} a p_0^{-k} g^\beta T$ , 产品的销售收入为  $\int_0^T p q dt = \int_0^T a p_0^{1-k} g^\beta (1 - \frac{t^2}{T^2})^2 dt = \frac{8}{15} a p_0^{1-k} g^\beta T$ 。

## 2 成本稳定下的供应链决策分析

### 2.1 集中决策下的供应链模型

在集中决策下,假定存在唯一的一个决策者,也就是说将生产商、分销商、零售商看作是一个利润完全一致的主体,由于市场需求是关于销售时间、基准售价、努力成本的复合函数。产品的销售周期  $T$  已知,决策者根据市场状况确定最优基准售价和努力成本,以实现供应链利润最大化。不考虑供应链成员间的转移支付,令  $c = c_r + c_d + c_m$ ,则整个供应链的利润函数为:

$$\pi = \int_0^T p q dt - (c + 3g)Q = \frac{8}{15} a p_0^{1-k} g^\beta T - \frac{2}{3} (c + 3g) a p_0^{-k} g^\beta T \quad (1)$$

由于供应链整体追求的是最大利润,则根据 Kuhn - Tucker 条件:

$$s. t \begin{cases} (p_0^*, g^*) \in \arg \max \pi^* = \frac{2}{3} (\frac{8}{15} p_0^* - c - 3g) a (p_0^*)^{-k} (g^*)^\beta T; \\ p_0^* > 0, g^* > 0 \end{cases}$$

得到最优基准售价为  $p_0^* = \frac{5kc}{4(k-1-\beta)}$ , 最优单位努力成本为

$$g^* = \frac{\beta c}{3(k-1-\beta)}, \text{ 则 } Q^* = \frac{2}{3} a \left[ \frac{5kc}{4(k-1-\beta)} \right]^{-k} \left[ \frac{\beta c}{3(k-1-\beta)} \right]^\beta T; \quad (2)$$

同时  $\frac{\partial^2 \pi}{\partial p_0^2}(p_0^*) < 0, \frac{\partial^2 \pi}{\partial g^2}(g^*) < 0$ , 则  $p_0^*, g^*$  是供应链的最优基准售价和最大努力成本。

一般情况下,最优单位努力成本  $g^* < c_m < c_d < c_r$ , 且当努力到达一定程度后不仅无法增加销量,而且会增加成本负担,减少供应链利润,上面求解的  $g^*$  明显比实际单位努力成本大很多,也就是说供应链各成员相互博弈达成一致协定的过程中,得到的单位努力成本要小于  $g^*$ , 同理,在实践中供应链各成员相互博弈达成一致协定的过程中,得到的销售量要小于  $Q^*$ 。

### 2.2 无契约分散决策下的供应链模型

在分散决策下,供应链各级成员的生产销售是一个动态博弈的过程,在此过程中,零售商面临的市场需求是关于销售时间、基准售价、努力成本的复合函数,且在产品销售周期已知,供应链各级成员会依据自身条件设立最优基准售价和努力成本,使得自身利润最大化,则零售商的利润函数为:

$$\pi_r = \int_0^T p q dt - (c_r + w_A + g)Q = \frac{2}{3} (\frac{8}{15} p_0 - k_A p_0 - A - c_r - g) a p_0^{-k} g^\beta T; \quad (3)$$

分销商的利润函数为:

$$\pi_d = (w_A - w_B - c_d - g)Q = \frac{2}{3} [(k_A - k_B) p_0 + A - B - c_d - g] a p_0^{-k} g^\beta T; \quad (4)$$

生产商的利润函数为:

$$\pi_m = (w_B - c_m - g)Q = \frac{2}{3} (k_B p_0 + B - c_m - g) a p_0^{-k} g^\beta T. \quad (5)$$

依据 2.1 的推导过程,得出如下结果:零售商的最优基准

售价为  $p_0^r = \frac{k(A + c_r)}{(\frac{4}{5} - k_A)(k-1-\beta)}$ , 零售商的最大努力成本为

$g_r = \frac{\beta(A + c_r)}{k-1-\beta}$ ; 分销商的最优基准售价为  $p_0^d =$

$\frac{k(B - A + c_d)}{(k_A - k_B)(k-1-\beta)}$ , 分销商的最大努力成本为  $g_d = \frac{\beta(B - A + c_d)}{k-1-\beta}$ ; 生产商的最优基准售价为  $p_0^m = \frac{k(c_m - B)}{k_B(k-1-\beta)}$ ,

生产商的最大努力成本为  $g_m = \frac{\beta(c_m - c_d)}{k-1-\beta}$ 。

在分散决策下,供应链各级成员均想要各自利润最大化,将其最优基准售价和努力成本对比分析得到:  $p_0^m < p_0^d < p_0^r$ ,  $g_d < g_m < g_r$ , 零售商想要的最优利润  $\pi_r^*$  过分地高于现状,也就是说一般理性的消费者不会接受高基准售价  $p_0^r$ , 风险中性的零售商也不能倾注高单位努力成本  $g_r$ , 现实中不可能存在零售商想要的最优利润  $\pi_r^*$ , 各级成员之间是非平衡状态。因此,各级成员必须通过实践中的相互博弈达成一致认可,最终使得供应链协调。

### 2.3 两部收费协议下供应链各级成员决策分析

供应链各级成员为了达成长期稳定合作关系,必须统一基准售价和单位努力成本,但是这样做会损坏部分成员的利益,在此引入两部收费协议  $T(w, f)$  来协调供应链。因为两部收费协议不仅能够协调供应链中的双重边际效应问题,而且具有很强的讨价还价能力,可以快速实现供应链系统利润在各级成员间的有效分配。

决策过程可看成是三阶段的 Stackelberg 博弈:首先,零售商根据自身利润目标以及分销商的反应函数确定向分销商支付的固定费用  $f_A$ 、产品的基准售价  $p_0$ 、努力成本  $g$ ; 然后,分销商依据自身利润目标以及生产商的反应函数确定向生产商支付的固定费用  $f_B$  和批发价  $w_A$ ; 最后,生产商依据分销商和零售商的决策确定产品的批发价  $w_B$ 。由于在两部收费协议下的批发价为  $w_A^* = k_A^* p_0 + A^*$ , 且  $w_B^* = k_B^* p_0 + B^*$ , 则需要确定的是反映系数  $k_A^*, A^*, k_B^*, B^*$  的值。因此,决策模型为

$$\begin{aligned} \max \pi_r^*(p_0, f_A) &= \int_0^T p q dt - (c_r + w_A^* + g)Q - f_A; \quad (6) \\ s. t \begin{cases} (k_A^*, A^*) \in \arg \max \pi_d^* = (w_A^* - w_B^* - c_d - g)Q + f_A - f_B \\ (k_B^*, B^*) \in \arg \max \pi_m^* = (w_B^* - c_m - g)Q + f_B \\ (k_A^*, A^*) \in \arg \max \pi_d^* > \pi_d^* \\ (k_B^*, B^*) \in \arg \max \pi_m^* > \pi_m^* \\ 0 < k_A^* < k_B^* < \frac{4}{5} \\ k > 1 + \beta, 0 < \beta < 1 \end{cases} \end{aligned}$$

(7)

模型(7)的第 1 个和第 2 个约束条件分别是分销商和生产商的激励相容条件,第 3 个和第 4 个约束条件分别是分销商和生产商的个人理性约束。

命题 1: 当契约参数满足: 最优基准售价为  $p_0^{**} = p_0^* = \frac{5kc}{4(k-1-\beta)}$ 、最优单位努力成本为  $g^{**} = \frac{\beta^2 c}{(3\beta+2)(k-1-\beta)} < g^*$ 、分销商的最优批发价格为  $w_A^* = \frac{2\beta c(1+\beta)}{(3\beta+2)(k-1-\beta)} + c_m + c_d$ 、生产商的最优批发价格为  $w_B^* = \frac{\beta c(1+\beta)}{(3\beta+2)(k-1-\beta)} + c_m$ 、零售商的最优销量为  $c$  时, 两部收费协议能够协调鲜活农产品三级供应链。证明: 满足参数范围的情况下, 应用逆向归纳法。首先由  $p_0$  和  $g$  最优化的一阶条件得出生产商和分销商批发价格的反映系数方程组, 并将方程组联立求解得出:

$$k_A^* = \frac{2kg}{\beta p_0}; A^* = c_m + c_d - 2 \frac{k-1-\beta}{\beta} g; k_B^* = \frac{kg}{\beta p_0}; B^* = c_m - \frac{k-1-\beta}{\beta} g, \text{然后将上述得到的反映系数代入 } \pi_r^* \text{ 中, 得到}$$

$$\pi_r^* = \frac{8}{15} a p_0^{1-k} g^\beta T - (c + \frac{3\beta+2}{\beta} g) Q, \text{最后由 } p_0 \text{ 和 } g \text{ 最优化的一阶条件求出生产商的基准售价为 } p_0^{**} = \frac{5kc}{4(k-1-\beta)}, \text{最优}$$

$$\text{单位努力成本为 } g^{**} = \frac{\beta^2 c}{(3\beta+2)(k-1-\beta)}, \text{常理来说, } g^{**} < g^* \text{ 不能实现供应链的协调, 但是正如“2.1”节中所述的供应链各成员相互博弈达成一致协定的过程中, 得到的单位努力成本才是供应链系统及各级成员的最优努力成本, 故供应链系统及各级成员的最优努力成本为 } g^{**}。 \text{从而得到 } k_A^* = \frac{3g}{5(3\beta+2)}; A^* = c_m + c_d - 2 \frac{\beta}{3\beta+2} c; k_B^* = \frac{4g}{5(3\beta+2)}; B^* = c_m - \frac{\beta}{3\beta+2} c; \text{供应链系统以及零售商的最优销量为 } Q^{**} = \frac{2}{3} a$$

$$[\frac{5kc}{4(k-1-\beta)}]^{-k} [\frac{\beta^2 c}{(3\beta+2)(k-1-\beta)}]^\beta T; \text{分销商的最优批发价格为 } w_A^* = \frac{2\beta c(1+\beta)}{(3\beta+2)(k-1-\beta)} + c_m + c_d; \text{生产商的最优批发价格为 } w_B^* = \frac{\beta c(1+\beta)}{(3\beta+2)(k-1-\beta)} + c_m; \text{按常理通过 } (k_A^*, A^*) \in \max \pi_d^* > \pi_d^* \text{ 和 } (k_B^*, B^*) \in \max \pi_m^* > \pi_m^* \text{ 得到 } f_A \text{ 和 } f_B \text{ 的范围, 但是在无契约分散决策下部分供应链成员的利润无实际意义, 因此此处无法求得固定费用 } f_A \text{ 和 } f_B \text{ 的取值范围, 但是这不影响两部收费协议在实践中的指导效力。此时供应链各级成员的利润函数为 } \pi_r^* = \frac{(1+\beta)^2(2-\beta)c}{(3\beta+2)(k-1-\beta)} Q^{**} - f_A;$$

$$\pi_d^* = \frac{\beta c}{(3\beta+2)(k-1-\beta)} Q^{**} + f_A - f_B; \pi_m^* = \frac{\beta c}{(3\beta+2)(k-1-\beta)} Q^{**} + f_B。$$

结论 1: 供应链成员达成一致协议, 在其他条件不变时, 产品的基准售价、单位努力成本、批发价、零售商的总销量、各级成员的利润均随着产品成本的上升而上升, 随着  $k$  的上升而下降; 随着  $\beta$  的上升而上升。证明: 由命题 1 得到产品的基准售价为  $p_0^{**} = p_0^* = \frac{5kc}{4(k-1-\beta)}$ , 由于  $k-1-\beta > 0, 0 < \beta < 1$ , 且  $p_0^{**}$  关于  $k$  的一阶求导小于 0, 关于  $\beta$  的一阶求导大于 0。所以在其他条件不变的情况下,  $p_0^{**}$  随着总成本  $c$  的

$$\frac{5k}{4(k-1-\beta)} \text{ 倍同方向变动; } p_0^{**} \text{ 随着 } k \text{ 的上升而下降, 随着 } \beta$$

的上升而上升。同理仿照上述推理过程, 在其他条件不变的情况下,  $g^{**}$  随着总成本  $c$  的  $\frac{\beta^2}{(3\beta+2)(k-1-\beta)}$  倍同方向变动;  $g^{**}$  随着  $k$  的上升而下降, 随着  $\beta$  的上升而上升。批发价、零售商的总销量、各级成员的利润均随着成本的上升而上升, 随着  $k$  的上升而下降, 随着  $\beta$  的上升而上升。

### 3 成本扰动下的供应链决策分析

#### 3.1 集中供应链协调分析

在实际中, 生产成本扰动信息通常是非对称的。假定鲜活农产品生产商进行了一次小规模裁员, 这直接造成生产商的单位生产成本变动, 间接影响了分销商和零售商的单位成本, 在此假定中只有生产商能感觉到成本扰动  $\Delta c$ , 分销商和零售商无成本扰动, 但是成本扰动下的基准售价变为  $p_0^\Delta$ , 努力成本变为  $g^\Delta$ , 批发价变为  $w_A^\Delta = k_A^\Delta p_0 + A^\Delta, w_B^\Delta = k_B^\Delta p_0 + B^\Delta$ ; 由于成本扰动比较突然, 且扰动信息是非对称的, 零售商按照市场需求订货, 但是农产品的生产周期长, 不能及时响应市场变化, 因此, 由生产商承担产品过剩时的处理费用和产品短缺时的损失费用。假定  $\lambda_1$  为单位缺货成本,  $\lambda_2$  为单位处理成本。此时集中决策下的供应链为

$$\pi_\Delta = \int_0^T p q dt - (c + 3g^\Delta) Q^\Delta - \lambda_1 (Q^\Delta - Q^*) - \lambda_2 (Q^\Delta - Q^*)。 \quad (8)$$

命题 2:  $\begin{cases} Q^\Delta > Q^*, \Delta c < 0 \\ Q^\Delta < Q^*, \Delta c > 0 \end{cases}$ 。证明: 用反证法证明, 假定  $\Delta c < 0$  时有  $Q^\Delta < Q^*$ , 则  $\pi_\Delta = \int_0^T p q dt - (c + 3g^\Delta) Q^\Delta - \lambda_2 (Q^\Delta - Q^*)$ , 由  $p_0$  和  $g$  最优化的一阶、二阶条件得出供应链的最优基准售价为  $p_0^\Delta = \frac{5k(c + \Delta c - \lambda_2)}{4(k-1-\beta)}$ , 最优单位努力成本为  $g^\Delta = \frac{\beta(c + \Delta c - \lambda_2)}{3(k-1-\beta)}$ , 则  $Q^\Delta = \frac{2}{3} a [\frac{5k(c + \Delta c - \lambda_2)}{4(k-1-\beta)}]^{-k} [\frac{\beta(c + \Delta c - \lambda_2)}{3(k-1-\beta)}]^\beta T > Q^*$ , 这与题目条件不符合, 所以假设不成立, 即  $\Delta c < 0$  时有  $Q^\Delta > Q^*$ , 同理可得,  $\Delta c > 0$  时有  $Q^\Delta < Q^*$ 。

命题 3: 发生成本扰动后, 供应链系统的最优基准售价和最优努力成本为

$$p_0^{\Delta*} = \begin{cases} \frac{5k(c + \Delta c + \lambda_1)}{4(k-1-\beta)}, \Delta c \leq -\lambda_1 \\ \frac{5k(c + \Delta c)}{4(k-1-\beta)}, -\lambda_1 < \Delta c < \lambda_2; \\ \frac{5k(c + \Delta c - \lambda_2)}{4(k-1-\beta)}, \Delta c \geq \lambda_2 \end{cases} \quad (9)$$

$$g^{\Delta*} = \begin{cases} \frac{\beta(c + \Delta c + \lambda_1)}{3(k-1-\beta)}, \Delta c \leq -\lambda_1 \\ \frac{\beta(c + \Delta c)}{3(k-1-\beta)}, -\lambda_1 < \Delta c < \lambda_2。 \\ \frac{\beta(c + \Delta c - \lambda_2)}{3(k-1-\beta)}, \Delta c \geq \lambda_2 \end{cases} \quad (10)$$

证明: 当生产成本扰动后, 根据命题 3, 我们将模型 (8) 分为  $\Delta c < 0$  和  $\Delta c > 0$  这 2 种情况讨论, 当  $\Delta c < 0$  时, 模型 (8) 简化为

$$\pi_\Delta = \int_0^T p q dt - (c + 3g^\Delta) Q^\Delta - \lambda_1 (Q^\Delta - Q^*); \quad (11)$$

当  $\Delta c > 0$  时, 模型(8)简化为

$$\pi_{\Delta} = \int_0^T p q dt - (c + 3g^{\Delta})Q^{\Delta} - \lambda_2(Q^* - Q^{\Delta})。 (12)$$

对于模型(11)、(12)由 Kuhn-Tucker 条件求得最优解(9)和(10), 当然依旧如“2.1”节分析的在实际中的单位努力成本要小于  $g^{\Delta*}$ , 则理论上的利润为

$$\pi^* = \begin{cases} \frac{2}{3}a \left[ \frac{5k(c + \Delta c + \lambda_1)}{4(k-1-\beta)} \right]^{-k} \left[ \frac{\beta(c + \Delta c + \lambda_1)}{3(k-1-\beta)} \right]^{\beta} T^{\frac{c + \Delta c + \lambda_1}{k-1-\beta}}, \Delta c \leq -\lambda_1 \\ \frac{2}{3}a \left[ \frac{5k(c + \Delta c)}{4(k-1-\beta)} \right]^{-k} \left[ \frac{\beta(c + \Delta c)}{3(k-1-\beta)} \right]^{\beta} T^{\frac{c + \Delta c}{k-1-\beta}}, -\lambda_1 < \Delta c < \lambda_2 \\ \frac{2}{3}a \left[ \frac{5k(c + \Delta c - \lambda_2)}{4(k-1-\beta)} \right]^{-k} \left[ \frac{\beta(c + \Delta c - \lambda_2)}{3(k-1-\beta)} \right]^{\beta} T^{\frac{c + \Delta c - \lambda_2}{k-1-\beta}}, \Delta c \geq \lambda_2 \end{cases}。$$

结论 2: 当成本扰动在  $-\lambda_1 < \Delta c < \lambda_2$  范围内时, 集中化决策下的最优基准售价、单位努力成本、销量将会与计划期的一样, 即最优决策对于成本扰动具有鲁棒性, 利润不变化; 当  $\Delta c \leq -\lambda_1$  时, 基准售价和单位努力成本随着负扰动量的增加而减小, 利润随着负扰动量的增加而上升; 当  $\Delta c \geq \lambda_2$  时, 基准售价和单位努力成本随着正扰动量的增加而增加, 利润随着正扰动量的增加而下降。由结论 2 可知, 当成本扰动超出一定的范围时, 供应链系统需要调整决策。

### 3.2 分散供应链协调分析

以零售商为主导的供应链系统, 生产商承担产品过剩时的处理费用和产品短缺时的损失费用。在两部收费协议下各级成员的利润决策模型为

$$(p_0^{\Delta}, F_A) \in \arg \max_{\pi_{\Delta r}} \pi_{\Delta r}^* = \int_0^T p^* q dt - (c_r + w_A^* + g^{\Delta})Q^{\Delta} - F_A; (13)$$

$$\text{s. t.} \begin{cases} (k_A^{\Delta}, A^{\Delta}) \in \arg \max_{\pi_{\Delta d}^*} \pi_{\Delta d}^* = (w_A^{\Delta} - w_B^{\Delta} - c_d - g^{\Delta})Q^{\Delta} + F_A - F_B \\ (k_B^{\Delta}, B^{\Delta}) \in \arg \max_{\pi_{\Delta m}^*} \pi_{\Delta m}^* = (w_B^{\Delta} - c_m - \Delta c - g^{\Delta})Q^{\Delta} + F_B - \\ \lambda_1(Q^{\Delta} - Q^*) - \lambda_2(Q^* - Q^{\Delta}) \\ 0 < k_B^{\Delta} < k_A^{\Delta} < \frac{4}{5} \\ k > 1 + \beta, 0 < \beta < 1 \end{cases}。 (14)$$

模型(14)的第 1 个和第 2 个约束条件分别是分销商和生产商的激励相容条件。

命题 4: 当契约参数满足:

$$\text{最优基准售价为 } p_0^{\Delta*} = p_0^* = \begin{cases} \frac{5k(c + \Delta c + \lambda_1)}{4(k-1-\beta)}, \Delta c \leq -\lambda_1 \\ \frac{5k(c + \Delta c)}{4(k-1-\beta)}, -\lambda_1 < \Delta c < \lambda_2; \\ \frac{5k(c + \Delta c - \lambda_2)}{4(k-1-\beta)}, \Delta c \geq \lambda_2 \end{cases}$$

最优单位努力成本为

$$g^{\Delta*} = \begin{cases} \frac{\beta^2(c + \Delta c + \lambda_1)}{(3\beta + 2)(k-1-\beta)}, \Delta c \leq -\lambda_1 \\ \frac{\beta^2(c + \Delta c)}{(3\beta + 2)(k-1-\beta)}, -\lambda_1 < \Delta c < \lambda_2; \\ \frac{\beta^2(c + \Delta c - \lambda_2)}{(3\beta + 2)(k-1-\beta)}, \Delta c \geq \lambda_2 \end{cases}$$

分销商的最优批发价格为

$$w_{\Delta A}^* = \begin{cases} \frac{2\beta(1+\beta)}{(3\beta+2)(k-1-\beta)}(c + \Delta c + \lambda_1) + c_m + c_d + \Delta c + \lambda_1, \\ \Delta c \leq -\lambda_1 \\ \frac{2\beta(1+\beta)}{(3\beta+2)(k-1-\beta)}(c + \Delta c) + c_m + c_d + \Delta c, \\ -\lambda_1 < \Delta c < \lambda_2 \\ \frac{2\beta(1+\beta)}{(3\beta+2)(k-1-\beta)}(c + \Delta c - \lambda_2) + c_m + c_d + \Delta c - \lambda_2, \\ \Delta c \geq \lambda_2 \end{cases}$$

生产商的最优批发价格为

$$w_{\Delta B}^* = \begin{cases} \frac{\beta(1+\beta)}{(3\beta+2)(k-1-\beta)}(c + \Delta c + \lambda_1) + c_m + \Delta c + \lambda_1, \\ \Delta c \leq -\lambda_1 \\ \frac{\beta(1+\beta)}{(3\beta+2)(k-1-\beta)}(c + \Delta c) + c_m + \Delta c, \\ -\lambda_1 < \Delta c < \lambda_2 \\ \frac{\beta(1+\beta)}{(3\beta+2)(k-1-\beta)}(c + \Delta c - \lambda_2) + c_m + \Delta c - \lambda_2, \\ \Delta c \geq \lambda_2 \end{cases}$$

时, 两部收费协议能够协调鲜活农产品三级供应链。

证明: 依据命题 1 和命题 3 的推导过程, 即可证明上述命题 4 成立。则零售商的最优销量为

$$Q^{\Delta*} = \begin{cases} \frac{2}{3}a \left[ \frac{5k(c + \Delta c + \lambda_1)}{4(k-1-\beta)} \right]^{-k} \left[ \frac{\beta^2(c + \Delta c + \lambda_1)}{(3\beta+2)(k-1-\beta)} \right]^{\beta} T, \\ \Delta c \leq -\lambda_1 \\ \frac{2}{3}a \left[ \frac{5k(c + \Delta c)}{4(k-1-\beta)} \right]^{-k} \left[ \frac{\beta^2(c + \Delta c + \lambda_1)}{(3\beta+2)(k-1-\beta)} \right]^{\beta} T, \\ -\lambda_1 < \Delta c < \lambda_2 \\ \frac{2}{3}a \left[ \frac{5k(c + \Delta c - \lambda_2)}{4(k-1-\beta)} \right]^{-k} \left[ \frac{\beta^2(c + \Delta c - \lambda_2)}{(3\beta+2)(k-1-\beta)} \right]^{\beta} T, \\ \Delta c \geq \lambda_2 \end{cases};$$

故零售商的最优利润函数为

$$\pi_{\Delta r}^* = \begin{cases} Q^{\Delta*} \frac{(1+\beta)^2(2-\beta)(c + \Delta c + \lambda_1)}{(3\beta+2)(k-1-\beta)} - F_A, \Delta c \leq -\lambda_1 \\ Q^{\Delta*} \frac{(1+\beta)^2(2-\beta)(c + \Delta c)}{(3\beta+2)(k-1-\beta)} - F_A, -\lambda_1 < \Delta c < \lambda_2; \\ Q^{\Delta*} \frac{(1+\beta)^2(2-\beta)(c + \Delta c - \lambda_2)}{(3\beta+2)(k-1-\beta)} - F_A, \Delta c \geq \lambda_2 \end{cases}$$

分销商的最优利润函数为

$$\pi_{\Delta d}^* = \begin{cases} Q^{\Delta*} \frac{\beta(c + \Delta c + \lambda_1)}{(3\beta+2)(k-1-\beta)} + F_A - F_B, \Delta c \leq -\lambda_1 \\ Q^{\Delta*} \frac{\beta(c + \Delta c)}{(3\beta+2)(k-1-\beta)} + F_A - F_B, -\lambda_1 < \Delta c < \lambda_2; \\ Q^{\Delta*} \frac{\beta(c + \Delta c - \lambda_2)}{(3\beta+2)(k-1-\beta)} + F_A - F_B, \Delta c \geq \lambda_2 \end{cases}$$

生产商的最优利润函数为

$$\pi_{\Delta m}^* = \begin{cases} Q^{\Delta*} \frac{\beta(c + \Delta c + \lambda_1)}{(3\beta+2)(k-1-\beta)} + F_B, \Delta c \leq -\lambda_1 \\ Q^{\Delta*} \frac{\beta(c + \Delta c)}{(3\beta+2)(k-1-\beta)} + F_B, -\lambda_1 < \Delta c < \lambda_2。 \\ Q^{\Delta*} \frac{\beta(c + \Delta c - \lambda_2)}{(3\beta+2)(k-1-\beta)} + F_B, \Delta c \geq \lambda_2 \end{cases}$$

结论 3: 当成本扰动在  $-\lambda_1 < \Delta c < \lambda_2$  范围内时, 分散决策

下的最优基准售价、单位努力成本、销量将会与计划期的一样,即最优决策对于成本扰动具有鲁棒性,利润不变化;当  $\Delta c \geq \lambda_2$  时,基准售价和单位努力成本随着负扰动量的增加而减小,供应链各级成员的最优利润随着负扰动量的增加而上升;基准售价和单位努力成本随着正扰动量的增加而增加,供应链各级成员的最优利润随着正扰动量的增加而下降。则当成本扰动超出一定的范围时,供应链系统和供应链各级成员均会调整决策。

结论 4: 成本扰动后,供应链成员达成一致协议,在其他条件不变时,产品的基准售价、单位努力成本、批发价、零售商的总销量、各级成员的利润均随着产品成本 ( $c + \Delta c$ ) 的上升而上升,随着  $k$  的上升而下降,随着  $\beta$  的上升而上升。对比成本扰动前后供应链系统各参数及最优利润的变动得到:

最优基准售价的变动为

$$\Delta p = p_0^{\Delta*} - p_0^{**} = \begin{cases} \frac{5k}{4(k-1-\beta)}(\Delta c + \lambda_1), \Delta c \leq -\lambda_2 \\ \frac{5k}{4(k-1-\beta)}\Delta c, -\lambda_1 < \Delta c < \lambda_2 \\ \frac{5k}{4(k-1-\beta)}(\Delta c - \lambda_2), \Delta c \geq \lambda_2 \end{cases};$$

最优努力成本的变动为

$$\Delta g = g^{\Delta*} - g^{**} = \begin{cases} \frac{\beta^2(\Delta c + \lambda_1)}{(3\beta+2)(k-1-\beta)}, \Delta c \leq -\lambda_1 \\ \frac{\beta^2\Delta c}{(3\beta+2)(k-1-\beta)}, -\lambda_1 < \Delta c < \lambda_2 \\ \frac{\beta^2(\Delta c - \lambda_2)}{(3\beta+2)(k-1-\beta)}, \Delta c \geq \lambda_2 \end{cases};$$

分销商的最优批发价格变动为

$$\Delta w_A = \begin{cases} \frac{(3\beta+2)k - (1+\beta)(2-\beta)}{(3\beta+2)(k-1-\beta)}(\Delta c + \lambda_1), \Delta c \leq -\lambda_1 \\ \frac{(3\beta+2)k - (1+\beta)(2+\beta)}{(3\beta+2)(k-1-\beta)}\Delta c, -\lambda_1 < \Delta c < \lambda_2 \\ \frac{(3\beta+2)k - (1+\beta)(2+\beta)}{(3\beta+2)(k-1-\beta)}(\Delta c - \lambda_2), \Delta c \geq \lambda_2 \end{cases};$$

生产商的最优批发价格变动为

$$\Delta w_B = \begin{cases} \frac{(3\beta+2)k - 2(1+\beta)^2}{(3\beta+2)(k-1-\beta)}(\Delta c + \lambda_1), \Delta c \leq -\lambda_1 \\ \frac{(3\beta+2)k - 2(1+\beta)^2}{(3\beta+2)(k-1-\beta)}\Delta c, -\lambda_1 < \Delta c < \lambda_2 \\ \frac{(3\beta+2)k - 2(1+\beta)^2}{(3\beta+2)(k-1-\beta)}(\Delta c - \lambda_2), \Delta c \geq \lambda_2 \end{cases}。$$

结论 5: 当成本发生扰动后,结合结论 3 可以看出,最优基准售价的变动是计划期基准售价同方向变动的  $\frac{5k}{4(k-1-\beta)}$  倍;最优单位努力成本的变动是计划期同方向变动的  $\frac{\beta^2}{(3\beta+2)(k-1-\beta)}$  倍;分销商的最优批发价格变动是原计划同方向变动的  $\frac{(3\beta+2)k - (1+\beta)(2+\beta)}{(3\beta+2)(k-1-\beta)}$  倍;生产商的最优批发价格变动是原计划同方向变动的

$\frac{(3\beta+2)k - 2(1+\beta)^2}{(3\beta+2)(k-1-\beta)}$  倍;则由基准售价和单位努力成本的变动可以看出,成本扰动后的利润变动将会与计划期利润以一个确定的倍数同方向变动。

#### 4 结论

本研究探讨一个由零售商主导的鲜活农产品三级供应链,市场需求为非线性需求,供应链各级成员努力增加收益的情况下,供应链在成本扰动前后的最优生产销售决策和协调问题。首先分析成本扰动稳定时供应链系统通过两部收费协议协调自身的过程,然后探讨成本扰动后两部收费协议协调供应链系统的过程,最后对比分析成本扰动前后各个变量受哪些因素的影响,怎样影响,以及与计划期相比各个参数是怎样变动的。研究结果表明:(1)供应链成员达成一致协议,在其他条件不变时,产品的基准售价、单位努力成本、批发价、各级成员的利润均随着产品成本的上升而上升,随着  $k$  的上升而下降,随着  $\beta$  的上升而上升;(2)成本扰动后,产品的基准售价、单位努力成本、批发价、各级成员的利润均以计划期对应参数的确定倍数同方向变动。

由于本研究是在一定的假设基础上论证的,所以可能与实际有一定的出入,对此,笔者将在后面的工作中做进一步的研究。

#### 参考文献:

- [1] 徐广业,黄胜忠,王磊. 农超对接供应链的效益分析——定价决策权威视角[J]. 中国流通经济,2014,28(1):43-46.
- [2] 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.
- [3] 林略,杨书萍,但斌. 收益共享契约下鲜活农产品三级供应链协调[J]. 系统工程学报,2010,25(4):484-491.
- [4] 杨书萍. 收益共享契约下鲜活农产品供应链协调研究[D]. 重庆:重庆大学,2011.
- [5] 林略,雷晓燕,但斌. 基于线性时变需求的鲜活农产品三级供应链协调[J]. 工业工程,2011,14(4):46-51.
- [6] 姚珣,唐小我,吴晓志. 非线性需求函数下需求与成本同时扰动时的供应链协调研究[J]. 西南民族大学学报:人文社会科学版,2011,32(8):115-121.
- [7] 徐浩,李佳川. 成本和需求扰动时双渠道供应链的协调机制研究[J]. 预测,2014,33(4):70-75.
- [8] 韩小花,杨倩霞,后锐. 成本扰动下零售商主导型闭环供应链生产与协调决策[J]. 工业工程与管理,2015,20(1):100-107.
- [9] 周建中,陈秀宏. 非对称信息下市场需求与生产成本同时发生扰动时的供应链决策[J]. 中国管理科学,2013,21(3):61-70.
- [10] 吴忠和,陈宏,赵千,等. 需求和零售商购买成本同时扰动的供应链应急协调[J]. 中国管理科学,2012,20(6):110-117.
- [11] 廖春萍. 突发事件下鲜活农产品三级供应链的协调研究[D]. 长沙:湖南大学,2012.
- [12] 胡劲松,王虹. 三级供应链应对突发事件的价格折扣契约研究[J]. 中国管理科学,2007,15(3):103-107.