

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(1): 293–298.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2017.01.079

# 保鲜温度影响下的生鲜农产品供应链收益共享契约

唐 润<sup>1,2</sup>, 范宇翔<sup>1</sup>, 彭洋洋<sup>1</sup>

(1. 南京财经大学管理科学与工程学院, 江苏南京 210023; 2. 利物浦大学管理学院, 英国利物浦 L693BX)

**摘要:**以单个供应商和零售商组成的生鲜农产品供应链为研究对象, 依据供应商采取的保鲜温度对生鲜农产品新鲜度、保鲜成本对市场的影响, 研究收益共享契约下供应商的最优保鲜温度设定问题。首先对比分散决策和集中决策 2 种情况, 得出设计契约可以改进供应链效用; 其次建立收益共享契约模型, 以协调供应商的保鲜成本与效用的关系; 最后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。

**关键词:**保鲜温度; 生鲜农产品供应链; 供应商; 零售商; 收益共享契约

**中图分类号:** F252 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2017)01-0293-06

生鲜农产品具有易腐性, 然而目前我国部分生鲜农产品物流配送仍以常温物流和自然物流为主, 导致流通过程中严重损耗<sup>[1]</sup>。随着人们对食品质量要求水平的提高, 如何在流通过程中保障食品新鲜度已成为人们广泛关注的问题。在生鲜农产品供应链的流通环节中, 如果没有采取合理的保鲜温度, 新鲜度就会加速衰减, 进而降低市场需求以及销售收益, 然而低温保鲜又会增加保鲜成本。如何权衡保鲜成本与供应链上相关利益与主体收益的关系, 在保证生鲜农产品质量的同时保证供应链收益, 须要设计相应的契约, 以实现生鲜农产品供应链协调。

针对供应链契约协调问题, 目前国内外开展的研究日趋成熟。其中, 很多学者将收益共享契约理论应用于供应链协调问题, 研究对象也从二级供应链<sup>[2]</sup>、三级供应链<sup>[3]</sup>扩展到了多级供应链<sup>[4-5]</sup>, 然而局限性在于仅研究了一般产品的供应链协调, 没有考虑生鲜农产品供应链所具有的特性。新鲜度作为生鲜农产品的重要特性, 很多学者已经开始结合该因素对生鲜农产品供应链协调展开研究。由于新鲜度会随着时间的推移而逐渐消逝, 在食品供应链研究领域, 目前绝大多数学者考虑的是时间对新鲜度的影响, 即新鲜度的时变效应<sup>[6-7]</sup>。然而, 除了时间因素以外, 温度因素对生鲜农产品新鲜度的影响也不容忽视, 考虑到温度对生鲜农产品新鲜度的影响, Rong 等提出了用于描述生鲜农产品质量衰减的零阶和一阶反应方程, 将生鲜农产品新鲜度衰减变化规律主要分为 2 类, 其中零阶反应方程主要适用于果蔬类生鲜农产品, 而一阶反应方程则适用于肉类生鲜农产品<sup>[8]</sup>。此外, 保鲜温度的设定又与保鲜成本密切相关, 考虑到温度对于保鲜成本的影响, Kim 等考虑了生鲜农产品在运输及保存过程中温度、湿度与最适温度、湿度之间的差异, 构建了相应的成本损失函

数<sup>[9]</sup>。Aung 等通过引入相应的权重进一步改进成本损失函数, 并对混合食品最优保鲜温度的设定展开了研究<sup>[10]</sup>。然而, 上述文章仅从温度控制的技术角度对单个成员的食品保鲜温度问题进行研究, 并未对生鲜农产品供应链上其他成员的相关利益进行探讨。

综上所述, 考虑新鲜度因素的生鲜农产品供应链契约协调问题目前已经有了一定的研究基础, 但大多数学者仅以时间作为新鲜度的影响因子。此外, 虽然部分学者也将温度作为影响新鲜度以及保鲜成本的因素, 但大多是针对单个成员展开的研究, 从生鲜农产品供应链整体角度开展的契约协调研究并不多。因此, 本研究综合考虑了温度对新鲜度以及保鲜成本的影响, 运用契约协调理论, 以期在保证生鲜农产品质量的同时保证供应链上各成员及整体的收益。

## 1 问题描述与基本假设

### 1.1 问题描述

本研究将 1 个供应商  $s$  和 1 个零售商  $r$  组成的生鲜农产品二级供应链单周期销售模型作为研究对象。这里主要考虑由供应商承担库存环节以及配送环节的保鲜成本,  $T$  表示供应商采取的保鲜温度,  $^{\circ}\text{C}$ 。供应商以批发价  $\omega$  (元) 将生鲜农产品批发给零售商, 零售商再以零售价  $p$  (元) 将生鲜农产品销售给顾客。此外, 为了保证供应商愿意以合理的保鲜温度进行保鲜, 引入收益共享契约参数  $\lambda$ 。供应链具体结构如图 1 所示。

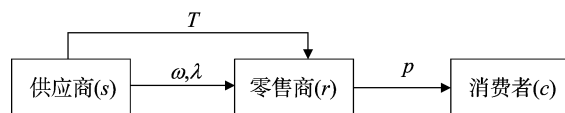


图1 生鲜农产品供应链结构

### 1.2 基本假设

(1) 由于生鲜农产品具有易变质的特性, 不仅会影响供应商和零售商各自的利润, 导致内部损失, 还会由于问题食品流向消费者, 从而产生较大的外部损失, 因此假设供应商和零售商会选择规避风险的决策行为。本研究中  $\mu_s$  和  $\mu_r$  分别表示供应商和零售商的风险规避系数。

收稿日期: 2016-03-31

基金项目: 国家社会科学基金 (编号: 16BGL130)。

作者简介: 唐 润 (1979—), 男, 安徽桐城人, 博士, 副教授, 研究方向为食品供应链管理。E-mail: tangruns@foxmail.com。

通信作者: 范宇翔, 硕士研究生, 研究方向为食品供应链管理。E-mail: 649199151@qq.com。

(2) 生鲜农产品的新鲜度与温度和时间这 2 种因素相关。结合瑞典科学家阿伦尼乌斯提出的阿伦尼乌斯方程<sup>[11-12]</sup>, 本研究以满足参考文献[8]中一阶反应方程的生鲜农产品作为研究对象, 该类生鲜农产品的新鲜度公式表示如下:

$$\theta = \theta(t, T) = v\theta_0 \exp(-\sum t_n \eta), \eta = \exp(-E/GT_n), n \in N. \quad (1)$$

式中:  $\eta$  为腐败反应速率, mol/s;  $v$  为反应速率常数, mol/L,  $0 < v < 1$ ;  $\theta_0$  代表初始新鲜度,  $0 < \theta_0 < 1$ ;  $T_n$  为第  $n$  时刻的温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $E$  为反应的活化能, kJ/mol;  $G$  为摩尔气体常量, kJ/(mol ·  $^{\circ}\text{C}$ );  $\theta(t, T)$  表示在  $t$  时刻、 $T$  温度下的生鲜农产品新鲜度。

由于本研究主要考虑温度对生鲜农产品新鲜度的影响, 为方便计算, 不考虑反应速率常数, 并以供应商和零售商一个固定的销售期  $S$  为研究周期, 记为  $E/G = \varepsilon$ , 因此新鲜度函数简化如下:

$$\theta = \theta(T) = \theta_0 \exp[-\eta(T) \times S], \eta(T) = \exp(-\varepsilon/T), n \in N. \quad (2)$$

(3) 在供应商对生鲜农产品进行冷藏保鲜处理的过程中, 借鉴 Rong 等的方法<sup>[8]</sup>, 引入冷藏性能系数 (coefficient of performance, 简称 COP) 和相对转移成本系数  $\psi$ , 计算供应商的冷藏保鲜成本  $c_i$  (元)。计算方法如下:

$$\begin{aligned} COP &= \frac{Q_i}{W} = \frac{T}{T_c - T}, COP_0 = \frac{T_0}{T_c - T_0}, \\ c_i &= \psi \times \frac{COP_0}{COP} = \frac{\psi T_0 T_c}{T_c - T_0} \times \frac{1}{T} - \frac{\psi T_0}{T_c - T_0}. \end{aligned} \quad (3)$$

式中:  $T$  表示供应商设置的冷藏保鲜温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $T_c$  表示环境温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $T_0$  表示生鲜农产品在保鲜设备中的基准温度,  $^{\circ}\text{C}$ 。本研究假设  $T_c$  和  $T_0$  为常量, 且  $T_c > T_0$ , 为便于分析, 将保鲜成本  $c_i$  (元) 表示为:

$$c_i = \frac{A}{T} - B, \text{ 记 } A = \frac{\psi T_0 T_c}{T_c - T_0}, B = \frac{\psi T_0}{T_c - T_0}. \quad (4)$$

(4) 由于生鲜农产品的新鲜度会对市场需求造成影响, 而新鲜度又是温度的函数, 因此在文献[13-15]的基础上, 对传统的需求函数进行改进, 构建考虑保鲜温度因素的生鲜农产品需求函数  $D = \alpha - \beta p + \gamma \theta T$ 。其中,  $\alpha$  为不确定市场上消费者对生鲜农产品的初始需求规模, 其均值为  $\bar{\alpha}$ , 方差为  $\sigma^2$ 。 $\beta$  和  $\gamma$  分别表示消费者需求对生鲜农产品价格以及新鲜度的敏感系数。

其他假设条件及相应的符号表示含义:  $U_{s1}$ 、 $U_{s2}$ 、 $U_{s3}$  分别表示供应商在分散决策、集中决策以及收益共享契约决策下的效用;  $U_{r1}$ 、 $U_{r2}$ 、 $U_{r3}$  分别表示零售商在分散决策、集中决策以及收益共享契约决策下的效用;  $U_{s1}$ 、 $U_{s2}$ 、 $U_{s3}$  分别表示在分散决策、集中决策以及收益共享契约决策下供应链的总效用;  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$  分别表示分散决策、集中决策以及收益共享契约决策下零售商的零售价格, 元;  $\omega_1$ 、 $\omega_2$ 、 $\omega_3$  分别表示分散决策、集中决策以及收益共享契约决策下供应商的批发价格, 元;  $c$  表示供应商的单位生产成本, 元; 收益共享契约参数  $\lambda \in [0, 1]$ 。

## 2 生鲜农产品供应链基准决策模型

### 2.1 分散式决策模型

由于本研究讨论的是供应商和零售商在风险规避条件下

的情形, 因此借鉴叶飞等的研究结论<sup>[16]</sup>, 得到分散式决策下风险规避型供应商、零售商各自的效用函数:

$$U_{s1} = [\bar{\alpha} - \beta p + \gamma \theta(T)](\omega - c) - \mu_s(\omega - c)^2 \sigma^2 - \frac{A}{T} + B. \quad (5)$$

$$U_{r1} = [\bar{\alpha} - \beta p + \gamma \theta(T)](p - \omega) - \mu_r(p - \omega)^2 \sigma^2. \quad (6)$$

在分散式决策模型中, 供应商和零售商分别根据自身效用最大化原则进行决策, 该决策是一个动态博弈的过程, 本研究采用由生鲜农产品供应商和零售商构成的 Stackelberg 博弈。在该博弈过程中, 假设供应商处于主导地位, 供应商的决策变量为批发价格  $\omega$  (元), 零售商的决策变量为零售价格  $p$  (元)。在分散决策状态下, 对于给定的批发价  $\omega_1$ , 零售商首先确定能够最大化自身效用的最优零售价  $p_1^*$ , 供应商再根据  $p_1^*$  确定使自己效用最大的最优批发价  $\omega_1^*$ 。具体过程表示如下:

$$\begin{aligned} \max_{\omega} U_{s1} &= [\bar{\alpha} - \beta p + \gamma \theta(T)](\omega - c) - \mu_s(\omega - c)^2 \sigma^2 - \frac{A}{T} + B; \\ \text{约束条件 } p_1^* &= \arg \max_p U_{r1}. \end{aligned} \quad (7)$$

$$\max_p U_{r1} = [\bar{\alpha} - \beta p + \gamma \theta(T)](p - \omega) - \mu_r(p - \omega)^2 \sigma^2. \quad (8)$$

通过求供应商、零售商的效用函数分别对批发价和零售价的二阶偏导, 可得:  $\frac{\partial^2 U_{s1}}{\partial \omega^2} = -2\mu_s \sigma^2 < 0$ ,  $\frac{\partial^2 U_{r1}}{\partial p^2} = -2(\beta + \mu_r \sigma^2) < 0$ 。显然, 这 2 个效用函数都为凹函数, 存在唯一的最优值。运用逆向求解法, 先求  $U_{r1}$  对  $p$  的一阶偏导, 并令  $\frac{\partial U_{r1}}{\partial p} = 0$ , 即可求出使零售商效用最大的零售价:

$$p_1^* = \frac{\bar{\alpha} + \gamma \theta(T) + (\beta + 2\mu_r \sigma^2) \omega_1}{2(\beta + \mu_r \sigma^2)}; \quad (9)$$

将(9)式代入(7)式, 求  $U_{s1}$  对  $\omega_1$  的一阶偏导数, 并令  $\frac{\partial U_{s1}}{\partial \omega_1} = 0$ , 可求出使得供应商效用最大的批发价:

$$\omega_1^* = \frac{(\beta + 2\mu_r \sigma^2) [\bar{\alpha} + \beta c + \gamma \theta(T)] + 4c\mu_s \sigma^2 (\beta + \mu_r \sigma^2)}{2(\beta^2 + 2\beta\mu_r \sigma^2 + 2\beta\mu_s \sigma^2 + 2\mu_r \mu_s \sigma^4)}. \quad (10)$$

令  $M = \beta\mu_r + \beta\mu_s + \mu_r \mu_s \sigma^2$ ,  $N = 2(\beta + \mu_r \sigma^2)$ , 则:

$$\omega_1^* = \frac{(\beta + 2\mu_r \sigma^2) [\bar{\alpha} + \beta c + \gamma \theta(T)] + 2c\mu_s \sigma^2 N}{2(\beta^2 + 2\sigma^2 M)}. \quad (11)$$

再将(11)式代入(9)式, 可得:

$$\begin{aligned} p_1^* &= \frac{\bar{\alpha} + \gamma \theta(T)}{N} + \\ &\frac{(\beta + 2\mu_r \sigma^2)^2 \times [\bar{\alpha} + \beta c + \gamma \theta(T)] + 2(\beta + 2\mu_r \sigma^2) c\mu_s \sigma^2 N}{2(\beta^2 + 2\sigma^2 M) N}. \end{aligned} \quad (12)$$

则  $(\omega_1^*, p_1^*)$  为 Stackelberg 博弈下分别使得供应商和零售商效用最大的价格, 将其代入(7)、(8)式可得供应商和零售商各自的最优效用  $(U_{s1}^*, U_{r1}^*)$ 。再令  $\frac{\partial U_{s1}^*}{\partial T} = 0$ ,  $\frac{\partial U_{r1}^*}{\partial T} = 0$ , 可得到供应商和零售商各自最优定价下的最优温度  $T_{s1}^*$  和  $T_{r1}^*$ 。因表达式较复杂, 这里不予给出。

### 2.2 集中式决策模型

在供应链集中式决策模型中, 供应商和零售商作为一个

利益共同体共同决策,从而实现供应链整体效用最大化。与分散式决策类似,集中决策下风险规避型供应商、零售商以及供应链的整体效用函数:

$$U_{c2} = [\bar{\alpha} - \beta p + \gamma \theta(T)](\omega - c) - \mu_s(\omega - c)^2 \sigma^2 - \frac{A}{T} + B_0. \quad (13)$$

$$U_{c2} = [\bar{\alpha} - \beta p + \gamma \theta(T)](p - \omega) - \mu_r(p - \omega)^2 \sigma^2. \quad (14)$$

$$U_{c2} = [\bar{\alpha} - \beta p + \gamma \theta(T)](p - c) - \mu_r(p - \omega)^2 \sigma^2 - \mu_s(\omega - c)^2 \sigma^2 - \frac{A}{T} + B_0. \quad (15)$$

考虑供应链整体效用函数,其关于  $\omega$  和  $p$  的二阶海塞矩阵为:

$$H = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 U_{c2}}{\partial \omega^2} & \frac{\partial^2 U_{c2}}{\partial \omega \partial p} \\ \frac{\partial^2 U_{c2}}{\partial p \partial \omega} & \frac{\partial^2 U_{c2}}{\partial p^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2\sigma^2(\mu_r + \mu_s) & 2\mu_r \sigma^2 \\ 2\mu_r \sigma^2 & -2(\beta + \mu_r \sigma^2) \end{bmatrix}.$$

一阶主子式  $|D_1| = -2\sigma^2(\mu_r + \mu_s) < 0$ , 并且二阶主子式:  $|D_2| = [-2\sigma^2(\mu_r + \mu_s)] \times [-2(\beta + \mu_r \sigma^2)] - (2\mu_r \sigma^2)^2 = 4\sigma^2(\beta \mu_r + \beta \mu_s + \mu_r \mu_s \sigma^2) > 0$ . 因此,二阶海塞矩阵  $H$  为负定,该函数为凹函数,存在极大值。 $U_{c2}$  关于  $\omega$  和  $p$  的一阶偏导分别:

$$\frac{\partial U_{c2}}{\partial \omega} = 2\mu_r \sigma^2(p - \omega) - 2\mu_s \sigma^2(\omega - c). \quad (16)$$

$$\frac{\partial U_{c2}}{\partial p} = -\beta(p - c) + [\bar{\alpha} - \beta p + \gamma \theta(T)] - 2\mu_r \sigma^2(p - \omega). \quad (17)$$

令  $\frac{\partial U_{c2}}{\partial \omega} = 0, \frac{\partial U_{c2}}{\partial p} = 0$ , 可求得集中决策下各自的最优定价:

$$\omega_2^* = \frac{\mu_r c N + \mu_r [\bar{\alpha} + \beta c + \gamma \theta(T)]}{2M}. \quad (18)$$

$$p_2^* = \frac{[\bar{\alpha} + \beta c + \gamma \theta(T)](\mu_r + \mu_s) + 2\mu_r \mu_s \sigma^2 c}{2M}. \quad (19)$$

将  $(\omega_2^*, p_2^*)$  代入(15)式,可得集中状态下满足最优定价的供应链整体最优效用如下:

$$U_{c2}^* = \frac{(\mu_r + \mu_s)[\bar{\alpha} - \beta c + \gamma \theta(T)] \{ [\bar{\alpha} - \beta c + \gamma \theta(T)] M + 4\beta \mu_r \mu_s \sigma^2 \}}{4M^2} - \frac{A}{T} + B_0.$$

在满足最优定价的条件下,进一步对供应链质量进行控制,即设定最优保鲜温度。将该式对温度  $T$  进行求导,并令导数等于 0,化简可得:

$$\text{当 } T \in \left\{ T | \theta(T) \times \eta(T) \times \{ M[\bar{\alpha} - \beta c + \gamma \theta(T)] + 2\beta \mu_r \mu_s \sigma^2 \} < \frac{2M^2 A}{(\mu_r + \mu_s) \gamma \delta \varepsilon} \right\}$$

时,供应链整体的最优效用随着  $T$  的增加而增加;

$$\text{当 } T \in \left\{ T | \theta(T) \times \eta(T) \times \{ M[\bar{\alpha} - \beta c + \gamma \theta(T)] + 2\beta \mu_r \mu_s \sigma^2 \} < \frac{2M^2 A}{(\mu_r + \mu_s) \gamma \delta \varepsilon} \right\}$$

时,供应链整体的最优效用随着  $T$  的增加而减少。由此可得,集中状态下必然存在一个最优温度  $T_c^*$ ,使得供应链整体效用达到最大。

### 2.3 分散式决策和集中式决策比较

通过对分散式决策和集中式决策下各自对应的最优定价以及最优效用进行比较,有如下命题成立:

命题 1,分散决策和集中决策相比:(1)  $\omega_1^* > \omega_2^*$ ; (2)  $p_1^*$

$> p_2^*$ ; (3) 当  $(\beta + \mu_r \sigma^2)(p_1^* + p_2^*) + \mu_s \sigma^2(\omega_1^* + \omega_2^* - 2c) > \bar{\alpha} + \beta c + \gamma \theta(T)$  时,  $U_{c2}^* > U_{s1}^* + U_{r1}^*$ 。

证明:(1)由(11)、(18)式可得:

$$\omega_1^* - \omega_2^* = \frac{(\beta + 2\mu_r \sigma^2)[\bar{\alpha} + \beta c + \gamma \theta(T)] + 2c\mu_s \sigma^2 N}{2(\beta^2 + 2\sigma^2 M)} - \frac{\mu_s c N + \mu_r [\bar{\alpha} + \beta c + \gamma \theta(T)]}{2M} = \frac{\beta \mu_s N [\bar{\alpha} - \beta c + \gamma \theta(T)]}{4M(\beta^2 + 2\sigma^2 M)}. \quad (20)$$

又由(18)、(19)式可得:

$$\omega_2^* - c = \frac{\mu_r [\bar{\alpha} - \beta c + \gamma \theta(T)]}{2M}, \text{ 且 } p_2^* - c = \frac{(\mu_r + \mu_s)[\bar{\alpha} - \beta c + \gamma \theta(T)]}{2M}.$$

显然,集中决策下供应商的最优批发价  $\omega_2^*$  以及零售商的最优零售价  $p_2^*$  均大于供应商的单位产品生产成本  $c$ , 因此  $\bar{\alpha} - \beta c + \gamma \theta(T) > 0$ , 从而得出  $\omega_1^* - \omega_2^* > 0$ , 即  $\omega_1^* > \omega_2^*$ 。

(2) 由(11)、(12)式,可得,  $p_1^* - \omega_1^* = \frac{[\bar{\alpha} - \beta c + \gamma \theta(T)](\beta^2 + 2\sigma^2 M + \mu_s \sigma^2 N)}{2(\beta^2 + 2\sigma^2 M)N}$ ; 再由(18)、(19)式可得,  $p_2^* - \omega_2^* = \frac{\mu_s [\bar{\alpha} - \beta c + \gamma \theta(T)]}{2M}$ 。

又由(1)中结论可知,  $\omega_1^* - \omega_2^* > 0$ , 因此,  $p_1^* - p_2^* > p_1^* - p_2^* - (\omega_1^* - \omega_2^*) = p_1^* - \omega_1^* - (p_2^* - \omega_2^*)$ , 再由

$$p_1^* - \omega_1^* - (p_2^* - \omega_2^*) = \frac{[\bar{\alpha} - \beta c + \gamma \theta(T)](\beta^2 + 2\sigma^2 M + \mu_s \sigma^2 N)}{2(\beta^2 + 2\sigma^2 M)N} - \frac{\mu_s [\bar{\alpha} - \beta c + \gamma \theta(T)]}{2M} = \frac{[\bar{\alpha} - \beta c + \gamma \theta(T)] \times [\beta^2 M + 2\beta \mu_r^2 \sigma^2 (\beta + \mu_s \sigma^2)]}{2(\beta^2 + 2\sigma^2 M)MN} > 0. \quad (21)$$

因此,  $p_1^* - p_2^* > p_1^* - \omega_1^* - (p_2^* - \omega_2^*) > 0$ , 即  $p_1^* > p_2^*$ 。

(3) 根据分散决策和集中决策下各自最优效用表达式,可得:

$$U_{c2}^* - (U_{s1}^* + U_{r1}^*) = (p_1^* - p_2^*) \{ (\beta + \mu_r \sigma^2)(p_1^* + p_2^*) - \mu_r \sigma^2 - [\bar{\alpha} + \beta c + \gamma \theta(T)] \} + \mu_r \sigma^2(\omega_1^* - \omega_2^*) + \mu_s \sigma^2(\omega_1^* - \omega_2^*)(\omega_1^* + \omega_2^* - 2c).$$

由(2)可知,  $p_1^* - \omega_1^* - (p_2^* - \omega_2^*) > 0$ , 即  $p_1^* - p_2^* > \omega_1^* - \omega_2^*$ 。因此,

$$U_{c2}^* - (U_{s1}^* + U_{r1}^*) > (\omega_1^* - \omega_2^*) \{ (\beta + \mu_r \sigma^2)(p_1^* + p_2^*) - \mu_r \sigma^2 - [\bar{\alpha} + \beta c + \gamma \theta(T)] \} + \mu_r \sigma^2(\omega_1^* - \omega_2^*) + \mu_s \sigma^2(\omega_1^* - \omega_2^*)(\omega_1^* + \omega_2^* - 2c) = (\omega_1^* - \omega_2^*) \{ (\beta + \mu_r \sigma^2)(p_1^* + p_2^*) + \mu_s \sigma^2(\omega_1^* + \omega_2^* - 2c) - [\bar{\alpha} + \beta c + \gamma \theta(T)] \}. \quad (22)$$

由(22)式可得,当  $(\beta + \mu_r \sigma^2)(p_1^* + p_2^*) + \mu_s \sigma^2(\omega_1^* + \omega_2^* - 2c) - [\bar{\alpha} + \beta c + \gamma \theta(T)] > 0$ , 即  $(\beta + \mu_r \sigma^2)(p_1^* + p_2^*) + \mu_s \sigma^2(\omega_1^* + \omega_2^* - 2c) > \bar{\alpha} + \beta c + \gamma \theta(T)$  时,  $U_{c2}^* > U_{s1}^* + U_{r1}^*$ 。命题 1 得证。

命题 1 表明,虽然分散状态下供应商的最优批发价与零售商的最优零售价均比集中状态下的价格要高,但在双方风险规避系数等因素满足一定条件的情况下,集中决策状态下供应链的整体最优效用大于分散决策状态下供应商和零售商的最优效用之和,此时分散决策下的供应链仍存在一定的

效用改进空间,可以通过设计相应的契约从而促进双方的合作,实现供应链效用改进。

### 3 收益共享契约协调模型

在生鲜农产品供应链收益共享契约设计中,设零售商保留的销售收益比例为  $\lambda$ , 供应商获得的销售收益比例为  $1 - \lambda$ , 二者的效用函数分别为:

$$U_{\lambda} = [\bar{\alpha} - \beta p + \gamma \theta(T)](\lambda p - \omega) - \mu_r(\lambda p - \omega)^2 \sigma^2. \quad (23)$$

$$U_{\lambda} = [\bar{\alpha} - \beta p + \gamma \theta(T)][(1 - \lambda)p + \omega - c] - \mu_s[(1 - \lambda)p + \omega - c]^2 \sigma^2 - \frac{A}{T} + B. \quad (24)$$

在收益共享契约协调机制下的 Stackelberg 博弈过程中,仍假设供应商占据主导地位,即零售商首先在供应商给定的批发价格条件下求得最优零售价  $p_3^*$ , 供应商再根据零售商的最优零售价决定自身最优批发价  $\omega_3^*$ 。由于  $\frac{\partial^2 U_{\lambda}}{\partial p^2} =$

$-2\lambda(\beta + \mu_r \lambda \sigma^2) < 0$ , 且  $\frac{\partial^2 U_{\lambda}}{\partial \omega^2} = -2\mu_s \sigma^2 < 0$ , (23)、(24) 式分

别是关于  $p$  和  $\omega$  的凹函数,因此均存在唯一的最优值。令  $\frac{\partial U_{\lambda}}{\partial p} = 0$ , 可得最优零售价为:

$$p_3^* = \frac{\lambda[\bar{\alpha} + \gamma \theta(T)] + (\beta + 2\lambda\mu_r \sigma^2)\omega_3}{2\lambda(\beta + \lambda\mu_r \sigma^2)}. \quad (25)$$

供应链契约协调的目的是为了让协调之后的状态尽量达到集中决策下的状态。在本研究中,收益共享契约激励的目的就是让契约决策下的需求  $D$  以及最优保鲜温度  $T$  和集中决策下的相等,因此由改进后的需求函数  $D = \alpha - \beta p + \gamma \theta(T)$  可知,收益共享契约决策下的零售价应与集中决策下的零售价相等<sup>[16-17]</sup>,即满足  $p_3^* = p_2^*$ 。根据(19)、(25)式可得收益共享契约决策时供应商的最优批发价  $\omega_3^*$ , 为:

$$\omega_3^* = \frac{\lambda\mu_r \sigma^2 [\bar{\alpha} + \beta c + \gamma \theta(T)][\lambda\mu_r - (1 - \lambda)\mu_s] + \lambda c[\beta M + 2\mu_r \mu_s \sigma^2 (\beta + \lambda\mu_r \sigma^2)]}{(\beta + 2\lambda\mu_r \sigma^2)M}. \quad (26)$$

将(26)式代入(25)式,可得:

$$p_3^* = \frac{\lambda[\bar{\alpha} + \gamma \theta(T)] + (\beta + 2\lambda\mu_r \sigma^2)\omega_3^*}{2\lambda(\beta + \lambda\mu_r \sigma^2)}. \quad (27)$$

同样地,  $(\omega_3^*, p_3^*)$  为收益共享契约条件下利用 Stackelberg 博弈求得的使得供应商和零售商效用最大的价格。

由(26)式中  $\omega_3^*$  的值必大于 0, 因此可得  $\lambda$  的初步取值范围为:

$$\lambda \in \left( \frac{\mu_r \mu_s \sigma^2 [\bar{\alpha} - \beta c + \gamma \theta(T)] - \beta c M}{\mu_r \sigma^2 (\mu_r + \mu_s) [\bar{\alpha} + \beta c + \gamma \theta(T)] + 2c \mu_r^2 \mu_s \sigma^4}, 1 \right).$$

命题 2, 收益共享契约决策状态下: (1)  $\omega_3^*$  是  $\lambda$  的增函数; 当  $\lambda > \frac{\mu_s}{\mu_r + \mu_s}$  时,  $\omega_3^*$  是  $T$  的减函数; 当  $\lambda < \frac{\mu_s}{\mu_r + \mu_s}$  时,  $\omega_3^*$  是  $T$  的增函数; (2)  $p_3^*$  是  $\lambda$  的减函数, 也是  $T$  的减函数。

证明: (1) 将(26)式分子分母同除以  $\lambda$ , 可得,

$$\omega_3^* = \frac{\mu_r \sigma^2 [\bar{\alpha} + \beta c + \gamma \theta(T)][\lambda(\mu_r + \mu_s) - \mu_s] + c[\beta M + 2\mu_r \mu_s \sigma^2 (\beta + \lambda\mu_r \sigma^2)]}{(\frac{\beta}{\lambda} + 2\mu_r \sigma^2)M}. \quad (28)$$

由(28)式可得,  $\omega_3^*$  是  $\lambda$  的增函数。

又由  $\frac{\partial \omega_3^*}{\partial T} = \frac{\lambda\gamma\mu_r \sigma^2 [\lambda\mu_r - (1 - \lambda)\mu_s]}{(\beta + 2\lambda\mu_r \sigma^2)M} \times \frac{\partial \theta(T)}{\partial T}$ , 且

$\frac{\lambda\gamma\mu_r \sigma^2}{(\beta + 2\lambda\mu_r \sigma^2)M} > 0$ ,  $\frac{\partial \theta(T)}{\partial T} < 0$ , 可知  $\frac{\partial \omega_3^*}{\partial T}$  的正负性取决于  $[\lambda\mu_r - (1 - \lambda)\mu_s]$  的正负。当  $[\lambda\mu_r - (1 - \lambda)\mu_s] > 0$  时,  $\lambda > \frac{\mu_s}{\mu_r + \mu_s}$ , 此时  $\frac{\partial \omega_3^*}{\partial T} < 0$ ; 当  $[\lambda\mu_r - (1 - \lambda)\mu_s] < 0$  时,  $\lambda < \frac{\mu_s}{\mu_r + \mu_s}$ , 此时  $\frac{\partial \omega_3^*}{\partial T} > 0$ 。由此(1)得证。

(2) 与(1)类似, 对(25)式进行变形, 可以证明  $p_3^*$  是  $\lambda$  的减函数, 也是  $T$  的减函数。命题 2 得证。

收益共享契约参数的提高, 意味着零售商保留的销售收益份额越高, 分给供应商的销售收益越低。由命题 2 可知,  $p_3^*$  是  $\lambda$  的减函数,  $\omega_3^*$  是  $\lambda$  的增函数。显然, 收益共享契约参数越大, 零售商保留的销售收益份额越高, 此时就会相应地降低零售价; 同样, 分给供应商的销售收益越低, 供应商的批发价就会越高。

此外, 保鲜温度的降低意味着保鲜成本的提高。由命题 2 可得,  $p_3^*$  是  $T$  的减函数, 这是因为对于零售商而言, 随着保鲜温度的降低, 零售商要间接地承担因供应商保鲜成本增加带来的费用, 从而提高零售价。与此同时,  $\omega_3^*$  与  $T$  的关系还和  $\lambda$  的取值有关。即对于供应商来说, 当收益共享契约参数大于相应的临界值时(临界值与供应商和零售商各自的风险规避因子相关), 如果保鲜温度降低, 供应商会提高批发价。这是因为收益共享契约参数较大时, 供应商分得的销售收益较低, 保鲜温度的降低又会提高供应商的保鲜成本, 供应商的批发价自然会提高。而收益共享契约参数小于临界值时, 随着保鲜温度降低, 供应商的批发价也会降低。由于此时契约参数较小, 供应商分得的销售收益则较高, 因此会降低批发价, 而温度降低所增加的保鲜成本又会使供应商提高批发价。又因为供应商的批发价最终还是降低的, 由此可得该情况下契约参数取值对供应商批发价的影响大于温度变化对批发价的影响, 即契约参数给供应商带来的额外收益大于因降低保鲜温度所增加的保鲜成本, 此时的契约参数能够激励供应商提高保鲜措施, 同时供应商也愿意提供较低的批发价。

命题 2 仅分析了温度以及契约参数的取值对供应商及零售商各自最优价格的影响, 并没有涉及对效用的优化。有效的契约协调机制应使博弈中任何一方的效用均不会减少, 即供应商和零售商愿意签订收益共享契约的前提条件是签订契约后两者的最优效用均不小于非契约分散状态下两者的最优效用, 同时供应链整体效用也能得到改善。根据上文中对集中决策以及分散决策的分析可知, 必定存在使得供应链整体效用最大的温度  $T_c^*$ , 以及分别使供应商和零售商取得最优效用的温度  $T_{s1}^*$  和  $T_{r1}^*$ 。因此, 契约合作所满足的约束条件如下:

$$\begin{cases} U_{\lambda}^*[p_3^*(\lambda, T_c^*), \omega_3^*(\lambda, T_c^*)] \geq U_{r1}^*(T_{r1}^*) \\ U_{\lambda}^*[p_3^*(\lambda, T_c^*), \omega_3^*(\lambda, T_c^*)] \geq U_{s1}^*(T_{s1}^*) \end{cases}. \quad (29)$$

该约束条件代表了收益共享契约的思想, 即通过设定契约参数  $\lambda$ , 使契约协调下的供应商愿意以使供应链整体效用最大的保鲜温度  $T_c^*$  进行保鲜, 同时供应商和零售商各自的最优效用均不小于非契约分散状态下两者的最优效用。将上

文中相应各式代入该不等式组,可以求出在温度  $T_c^*$  下供应商与零售商的收益共享契约参数  $\lambda$  的取值。

4 算例分析

为了进一步对上述模型的结论进行分析,验证契约协调的有效性,给出算例分析。对本研究模型的参数赋值如下:假设不确定市场上消费者对生鲜农产品的初始需求规模  $\alpha$  服从均值  $\bar{\alpha}=100$ 、方差  $\sigma^2=4$  的正态分布。其他参数分别为  $\beta=0.4, \gamma=10, T_c=25, T_0=5, \psi=0.2, c=10, \mu_r=0.6, \mu_s=0.4, \theta_0=0.9, E=100, G=22.4, S=10$ 。

由上文对集中决策的分析可知,存在一个最优温度  $T_c^*$ ,使供应链整体效用达到最大。令  $T \in [0, 8] (^{\circ}\text{C})$ ,根据上述数据可计算出集中决策和分散决策下不同温度对应的供应链整体效用,具体如图 2 所示。

由图 2 可得,集中决策下供应链的整体效用大于分散决策下的整体效用,即  $U_{c2}^* > U_{s1}^* + U_{r1}^*$ ,此时可以实现供应链效用优化,同时也能得出集中决策下使得供应链整体效用最大的温度  $T_c^*$ ,约为  $1^{\circ}\text{C}$ ,此时供应链最优整体效用  $U_{c2}^*$  为 1 345.97 元。再根据上文对分散决策的分析,可求出分散决

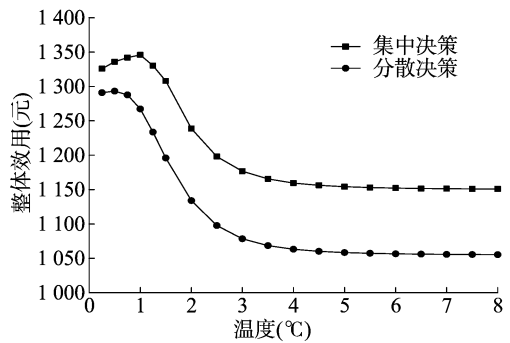


图2 集中决策与分散决策效用对比

策下供应商最优效用  $U_{s1}^*$  以及零售商最优效用  $U_{r1}^*$ ,分别为 647.22、645.90 元。结合上文对(26)式的分析,并将相应的参数代入,可得  $\lambda$  的初始取值范围为  $[0.3, 1]$ 。因收益共享契约激励的目的就是让契约决策下供应商愿意以集中决策下使得供应链整体效用最大的最优保鲜温度  $T_c^*$  进行保鲜,下面给出  $T_c^*=1^{\circ}\text{C}$  时契约决策下不同契约参数取值对应的最优定价、最优效用和集中决策下的整体最优效用,以及分散决策时各自的最优效用及整体最优效用,具体如表 1 所示。

表 1 不同契约值对供应链最优价格及效用的影响

$\lambda$	$p_3^*$ (元)	$\omega_3^*$ (元)	$U_{s3}^*$ (元)	$U_{r1}^*$ (元)	$U_{s3}^*$ (元)	$U_{s1}^*$ (元)	$U_{c3}^*$ (元)	$U_{c2}^*$ (元)	$U_{c1}^*$ (元)
0.3	48.63	0.35	637.12	645.90	697.52	647.22	1 334.64	1 345.97	1 293.12
0.4	44.26	2.34	662.18	645.90	661.37	647.22	1 323.55	1 345.97	1 293.12
0.5	41.21	4.48	677.26	645.90	642.12	647.22	1 319.38	1 345.97	1 293.12
0.6	38.95	6.68	688.78	645.90	627.05	647.22	1 315.83	1 345.97	1 293.12
0.7	37.21	8.94	694.97	645.90	614.23	647.22	1 309.20	1 345.97	1 293.12
0.8	35.84	11.22	712.58	645.90	592.14	647.22	1 304.72	1 345.97	1 293.12
0.9	34.72	13.53	727.70	645.90	571.02	647.22	1 298.72	1 345.97	1 293.12
1.0	33.79	15.85	805.99	645.90	489.98	647.22	1 295.97	1 345.97	1 293.12

对表 1 进行分析可得,在收益共享契约决策状态下,供应商和零售商的效用之和比分散状态下有所提升,即  $U_{c3}^* > U_{s1}^*$ ,但与集中状态相比,收益共享契约对供应链整体效用的改进还有一定的差距,即  $U_{c3}^* < U_{c2}^*$ 。此外,最优的收益共享契约参数还需要满足不等式组(29)的约束条件,即  $U_{s3}^* \geq U_{r1}^*$ ,  $U_{s3}^* \geq U_{s1}^*$ 。由该约束条件可得,该情况下的收益共享契约参数值  $\lambda=0.4$ 。

另外,零售商的最优定价  $p_3^*$  随着  $\lambda$  的增加而递减,而供应商的最优定价  $\omega_3^*$  随着  $\lambda$  的增加而递增,这与命题 2 中的结论是一致的,并且当  $\lambda$  增加相同的单位时,  $\omega_3^*$  的变化幅度远大于  $p_3^*$  的变化幅度。这是因为在最优定价的 Stackelberg 博弈中,供应商处于主导地位,使得其价格对于  $\lambda$  变化的敏感性较大。

由于  $\lambda$  会通过影响最优定价,进而影响最优效用,下面进一步分析  $\lambda$  变化对  $U_{s3}^*$ 、 $U_{s1}^*$  以及  $U_{c3}^*$  的影响。分别取  $T=0.75、1、1.25^{\circ}\text{C}$ ,每种温度下对应的契约参数与最优效用的关系如图 3 至图 5 所示。

由图 3 至图 5 可得,随着  $\lambda$  的增大,零售商的最优效用增加,但供应商的最优效用却在不断减小,供应链的整体最优效用也在不断减少。这是因为  $\lambda$  越大,零售商保留的销售收益越多,供应商分得的额外销售收益越少,因此  $U_{s3}^*$  增加,  $U_{s1}^*$

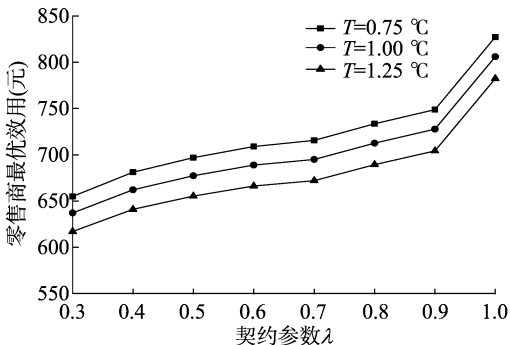
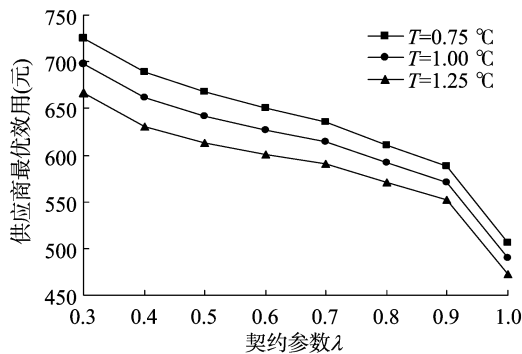
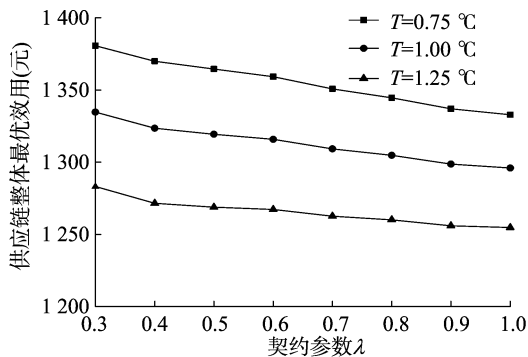


图3 零售商最优效用随 $\lambda$ 变化而变化的情况

减少,此时对供应商的激励作用也减小。又由于整体最优效用  $U_{c3}^*$  减少,所以  $U_{c3}^*$  减少的幅度大于  $U_{s3}^*$  增加的幅度,供应链整体效用的改进效果也会降低,收益共享契约的协调作用也就不明显。同理,  $\lambda$  减小,零售商的最优效用减少,供应商的最优效用增加,供应链的整体最优效用也会增加,收益共享契约的协调作用越强。因此,若满足(29)式契约合作约束条件的契约参数唯一,此时不须要考虑  $\lambda$  变化对协调作用的影响,该数值即为最优契约参数值,如表 1 中求得的  $\lambda=0.4$ ;若满足约束条件的契约参数取值是一个区间,即  $\lambda \in [\lambda_1, \lambda_2]$ ,此时契约参数应取区间的下限值,即  $\lambda=\lambda_1$ 。

此外,随着  $T$  的降低,  $U_{s3}^*$ 、 $U_{s1}^*$  以及  $U_{c3}^*$  均会提高,即提高

图4 供应商最优效用随 $\lambda$ 变化而变化的情况图5 供应链整体最优效用随 $\lambda$ 变化而变化的情况

保鲜努力水平会使得零售商、供应商以及供应链整体最优效用进一步得到提升。综上可得,合理的收益共享契约参数能有效地激励供应商采取最优保鲜温度,同时实现供应链的效用改进。

## 5 结语

本研究结合生鲜农产品的特性,考虑保鲜温度因素对生鲜农产品新鲜度以及保鲜成本的影响,通过建立收益共享契约协调模型,求出具体条件下契约参数的取值。该契约能够有效地激励供应商采取合理的保鲜温度,在保证生鲜农产品质量的同时实现供应链各自成员以及整体效用的改进。但本研究仅以单个风险规避型供应商和零售商组成的生鲜农产品两级供应链为研究对象,如何考虑风险偏好变化的影响以及拓展到多级供应链的情形,都值得进一步研究。

## 参考文献:

- [1] 孙春华. 我国生鲜农产品冷链物流现状及发展对策分析[J]. 江苏农业科学, 2013, 41(1): 395-399.
- [2] Cachon G P, Lariviere M A. Supply chain coordination with revenue

sharing contracts: strengths and limitations [J]. Management Science, 2005, 51(1): 30-44.

- [3] 庞庆华, 张月, 胡玉露, 等. 突发事件下需求依赖价格的三级供应链收益共享契约[J]. 系统管理学报, 2015, 24(6): 887-896.
- [4] Li H K, Li C. Research of revenue sharing contract in many-to-one and retailer-dominant supply chain with fuzzy demand [C]// International Conference on Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering, 2013: 500-505.
- [5] 桑圣举, 张强. 模糊需求下 $n$ 级供应链的收益共享契约机制研究[J]. 中国管理科学, 2013, 21(3): 127-136.
- [6] Wang X, Li D. A dynamic product quality evaluation based pricing model for perishable food supply chains [J]. Omega, 2012, 40(6): 906-917.
- [7] 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.
- [8] Rong A, Akkerman R, Grunow M. An optimization approach for managing fresh food quality throughout the supply chain [J]. International Journal of Production Economics, 2011, 131(1): 421-429.
- [9] Kim W R, Aung M M, Chang Y S, et al. Freshness gauge based cold storage management: a method for adjusting temperature and humidity levels for food quality [J]. Food Control, 2015, 47: 510-519.
- [10] 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.
- [11] Park H R, Kim K, Lee S J. Adjustment of Arrhenius activation energy of laccase-based time-temperature integrator (TTI) using sodium azide [J]. Food Control, 2013, 32(2): 615-620.
- [12] Sathivel S, Huang J, Prinyawiwatkul W. Thermal properties and applications of the Arrhenius equation for evaluating viscosity and oxidation rates of unrefined pollock oil [J]. Journal of Food Engineering, 2008, 84(2): 187-193.
- [13] 肖迪, 潘可文. 基于收益共享契约的供应链质量控制与协调机制[J]. 中国管理科学, 2012, 20(4): 67-73.
- [14] Li Y, Lim A, Rodrigues B. Note-pricing and inventory control for a perishable product [J]. Manufacturing and Service Operations Management, 2009, 11(3): 538-542.
- [15] Sheu J B. Marketing-driven channel coordination with revenue sharing contracts under price promotion to end customers [J]. European Journal of Operational Research, 2011, 214(2): 246-255.
- [16] 叶飞, 林强. 风险规避型供应链的收益共享机制研究[J]. 管理工程学报, 2012, 26(1): 113-118.
- [17] 张晓林, 李广. 鲜活农产品供应链协调研究——基于风险规避的收益共享契约分析[J]. 技术经济与管理研究, 2014(2): 13-17.