

考虑风险偏好的生鲜农产品供应链激励契约设计

郑 琪, 范体军

(华东理工大学商学院, 上海 200237)

摘要: 针对生鲜农产品“农超对接”模式中的信息不对称, 采用委托代理理论建立了生鲜农产品供应链激励契约的数学模型。结合生鲜农产品流通过程产生巨大损耗的特性, 研究了生鲜农产品新鲜度和风险偏好程度对供应链利润的影响, 并探讨了生鲜农产品投入质量安全科技因素前后供应链利润的变动趋势。结果表明: 生鲜农产品供应链各主体的利润随着新鲜度的减小而减少, 随着风险偏好程度的增大而呈现先减少后增加的趋势; 考虑生鲜农产品质量安全科技投入激励契约后, 超市、生鲜农产品生产商以及供应链总利润都在不同程度上有所提高。最后通过算例分析对结论进行了验证。

关键词: 生鲜农产品; 新鲜度; 供应链; 风险偏好程度; 激励契约

中图分类号: F274 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-6062(2018)02-0171-008

DOI: 10.13587/j.cnki.jieem.2018.02.019

0 引言

我国是世界上最大的生鲜农产品生产大国, 其中蔬菜产量占世界总产量的 52%, 水果占 22%, 肉类占 32%, 水产品占 31%, 每年有 4 万亿吨蔬菜进入流通领域。生鲜农产品作为现代农业的重要组成部分, 它的供应链运作关系着民生问题的保障和改善^[1]。我国政府非常重视生鲜农产品的运作问题。2013 年国办发[2013]5 号文件要求, 继续对鲜活农产品实施从生产到消费的全环节低税收政策, 将免征蔬菜流通环节增值税政策扩大到部分鲜活肉蛋产品^[2]。同时商业部、农业部积极推行“农超对接”等新型模式, 以此来降低流通成本与产品价格^[3]。然而由于生鲜农产品的生产季节性和周期性、流通的易腐性和鲜活性、消费的时效性和品质性、质量的安全性和脆弱性, 加上其运作模式的多样性和复杂性, 特别是在不同模式下供应链各主体之间的信息不对称和它们的不同风险偏好等问题, 导致生鲜农产品供应链运作过程中损耗率惊人, 质量安全也令人担忧。在“农超对接”模式下, 生鲜农产品由生产商直接到超市, 具有稳定生鲜品价格、减少流通环节、保障供应链各主体收益和促进食品安全等优势, 越来越多的生鲜农产品供应链采用这种模式。因此, 迫切需要研究针对“农超对接”模式下存在的信息不对称性以及风险偏好情况的供应链协调问题, 进而提高生鲜农产品的流通效率并降低损耗率。

在生鲜农产品供应链的研究方面, 尽管国内外相当多的文献对生鲜农产品、易逝品及短生命周期产品进行了研究, 但他们的研究多集中于库存管理及订货策略。Dye^[4]假设生鲜农产品损耗率不为常数, 建立了变质率时变且回购率依赖于时间的变质库存模型。Balachandran 等^[5]研究了基于供应商与制造商的易逝品收益共享、风险分担角度的外部损失分

担模型。徐贤浩等^[6]研究了基于博弈论中的激励模型的短生命周期产品的供应链订货策略。在此基础上, Chao 等^[7]进一步将两种惩罚模型相结合, 设计了双惩罚模型。Halim 等^[8]研究了随机需求下部分短缺量拖后以及产品变质率为模糊数情况下的订货策略。Lodree 等^[9]假设消费者的需求会随着生鲜农产品的变质程度而改变, 研究了在此情形下的生鲜农产品库存管理。丁松等^[10]通过经济订货批量模型研究易逝品零售商的订货策略。事实上, 契约合同能够促进生鲜农产品供应链的协调, 对其影响也是非常之大, 运用契约合同将会改善供应链各主体的利润, 但上述研究没有结合契约合同来研究生鲜农产品供应链。

在供应链的协调研究方面而言, 现有的研究主要集中于非易腐品供应链。Charles 等^[11]指出在双重道德风险下, 通过对最优契约参数的选择, 简单的线性合同能达到相对的预期效果。Chen 等^[12]在天气影响农产品市场需求下, 通过设计风险补偿契约实现了不利天气影响需求下的供应链协调; 张菊亮等^[13]设计了一种新的契约协调机制, 不需要供应商监督销售商的实际努力水平也能促成供应链协调。Krishnan 等^[14]指出在一个制造商和一个分销商组成的供应链在随机需求下, 回购契约不能协调分销商付出有成本的努力。Li 等^[15]研究非对称信息下提前承诺和期权合同在供应链管理中的作用, 对二者单独使用和合并使用进行了对比。Zhao 等^[16]采用合作博弈方法研究供应链决策问题, 得出期权合同能达到供应链协调。Liang 等^[17]将期权合同运用到救济物资的供应链管理中, 讨论了两阶段物资递送下期权合同的最优定价, 并得到期权合同能提高救济物资供应链的效率。事实上, 生鲜农产品不同于易腐品, 契约的设计可以有效地促进生鲜

收稿日期: 2015-02-17 修回日期: 2015-09-01

基金项目: 教育部新世纪人才计划资助项目 (NCET-11-0637); 国家自然科学基金重点资助项目 (71431004); 国家自然科学基金面上资助项目 (71171082、71202052)

作者简介: 郑琪 (1988—), 女, 河南南阳人; 华东理工大学商学院, 博士研究生; 研究方向: 运营与物流供应链管理。

农产品供应链的协调。但上述研究没有结合生鲜农产品这一特殊易逝品及其特性进行分析。

一部分学者在考虑生鲜农产品损耗的基础上研究了供应链的协调，现有文献主要集中于产品损耗及质量衰减对供应链协调的影响。如 Cai 等^[18]指出生鲜农产品在远距离运输过程中可能存在两种类型的损耗，并针对两阶段供应链构建了努力水平影响流通损耗的供应链优化模型。Taleizadeh 等^[19]研究了变质率随时间变化的库存补充问题，以此来提高供应链的运作效率。Ferguson 等^[20]提出易逝品在运输过程中存在着巨大的损耗，并对此种情况下供应链的协调进行了研究。Blackburn 等^[21]对农产品损耗所引起的质量衰减问题进行了研究。但斌等^[22]针对生鲜农产品损耗的特点，构造了生鲜农产品新鲜度和零售价格影响的消费者时变效用函数，研究了消费者在不同时刻购买生鲜农产品的效用和数量的变化，以此来使消费者效用达到最大化。Fritz 等^[23]研究了影响生鲜农产品供应链整体运作效率的关键因素，以及提高效率的主要途径，以此来进行生鲜农产品供应链的协调。然而，不同的风险偏好及生鲜农产品供应链的运作模式对供应链带来的直接影响存在很大差异。但上述研究没有考虑生鲜农产品供应链上各主体的风险偏好问题，以及结合生鲜品供应链运作的具体模式对其进行研究。

基于此，针对由生鲜农产品市场价格的需求不确定性，将生鲜农产品的产品新鲜度及风险偏好程度融入到激励契约的设计中。考虑生鲜农产品易变质、易腐烂、流通损耗大的特性，将生鲜农产品供应链风险管理与契约合同相结合，运用委托代理理论，引入生鲜农产品的产品新鲜度及风险偏好程度，在“农超对接”模式下对生鲜农产品供应链的激励契约进行设计，得出了一些有意义的结论并给出了相应的管理启示。

1 问题描述与假设

本文针对农超对接模式下，由一个生鲜农产品生产商与一个大型连锁超市组成的两级生鲜农产品供应链系统进行研究，在这里，生鲜农产品生产商是指以农民专业合作社作为生产单位的组织，大型连锁超市是生鲜农产品的销售方。本文考虑在生鲜农产品销售过程中超市的努力水平 e 对农产品采购量与质量的影响，以及风险偏好程度 ρ 对订货量的影响。在生产与销售季节来临之前，生鲜农产品生产商与超市签订一个双方商定的激励契约：生产季节开始后生鲜农产品生产商根据超市的采购计划在一定农资投入的基础上决策整个生产过程中的种植面积及品类进行生产；生产季节结束后超市以一定的采购价格收购生鲜农产品生产商提供的所有农产品，随后超市决策销售价格并在销售市场进行销售。

在这个过程中，生鲜农产品生产商与超市之间的信息是不对称的，生鲜农产品生产商不能观察到超市的行为或即使观察到了超市的行为，但不知道这个行为是由超市本身的努力水平 e 引起还是由政府政策、天气情况等外生的不确定因素 x 引起时，生鲜农产品生产商在对激励契约设计时，必须考虑到超市的参与约束以及对超市的激励相容约束，在此情况下所实现的最优解被称为次优解。因而，在生鲜农产品的激励契约设计中的各影响因素——超市付出的努力程度、风险偏好程度、产出所得收益中双方的分成份额、超市付出努

力的成本、产品新鲜度的分析中都是基于这个原则。所得的激励契约就是指既能够促使生鲜农产品生产商积极参与，又能激励超市提高努力水平和履约率，并使生鲜农产品供应链所获得期望效用最大。根据委托代理理论中的机制设计，生鲜农产品生产商要想使自己的期望效用最大化，必须满足两个约束：参与约束和激励相容约束。

结合现实情况，我们作出如下假设：

假设 1 生鲜农产品供应链由一个生鲜农产品生产商和一个超市组成。二者追求自身利益的最大化，且具有完全理性的充分分析能力。

假设 2 影响生鲜农产品生产商与超市的政府政策、天气情况等外生因素具有不确定性，且服从均值为零，方差为 σ^2 的正态分布。

假设 3 超市具有“私人信息”，且不容易直接观察到该行为，超市与生鲜农产品生产商之间的信息是不完全的。

本文所涉及的主要参数符号如下所示：

e 为超市选择付出的努力程度， y 为超市所采购农产品的效用函数， ρ 为风险偏好程度， k 为生鲜农产品销售过程中所得利润的超市的分成份额， $1-k$ 是生鲜农产品生产商的分成份额， θ 是生鲜农产品的新鲜度， $\pi(y)$ 为超市与生鲜农产品生产商的激励契约， $c(e)$ 超市付出努力的成本， u_0 为超市的最低保留收入， β 成本系数， $v(\cdot)$ 为生鲜农产品生产商的期望效用函数， $u(\cdot)$ 为超市的期望效用函数， $f(y, e)$ 为分布函数， $F(y, e)$ 为密度函数。

2 生鲜农产品供应链的激励契约设计

2.1 完全信息下生鲜农产品供应链的激励契约设计

超市所采购农产品的效用函数为 $y = e + x$ ，其中 x 为政府政策、天气情况等外生的不确定性因素，并且 $x \sim N(0, \sigma^2)$ ，即 $Ey = E(e + x) = e$ ， $\text{var}(y) = \sigma^2$ 。生鲜农产品生产商设计的激励契约为 $\pi(y) = s + ky$ ，其中 s 是双方商定的固定收益， k 是销售过程中所得利润的超市的分成份额， $1-k$ 是生鲜农产品生产商的分成份额，即 y 每增加一个单位，超市的可变收入增加 k 单位。其中 $0 \leq k \leq 1$ 。

定理 1 对于两级生鲜农产品供应链，通过引入激励契约机制，在完全信息的情况下，超市存在唯一的最优努力水平和最优分成份额，生鲜农产品生产商也存在唯一的最优分成份额和对超市最优固定收益的决策，使得双方期望利润最大化。

证明：在给定的激励契约为 $\pi(y) = s + ky$ 的情况下，生鲜农产品生产商的期望效用等于期望收入，即 $E v(y - t(y)) = E(y - s - ky) = -s + (1 - k)e$ 。

超市付出努力的成本 $c(e)$ 可以等价于货币成本，根据张维迎对努力程度所消耗成本的量化， $c(e) = \frac{1}{2} \beta e^2$ ，其中

$\beta > 0$ ，表示成本系数 β 越大，超市付出努力所消耗的成本就越大，同样的努力 e 带来的正效应就越小。超市的实际收入为 $u = \pi(y) - c(e) = s + k(e + x) - \frac{1}{2} \beta e^2$ 。

根据相关文献可得，生鲜农产品的新鲜度衰减函数为 $\theta(t) = \theta'$ ， θ 为生鲜农产品上架时的新鲜度，其取值范围为

$0 < \theta < 1$; 损耗率函数为 $h(\theta(t)) = -\theta \ln \theta$, 该函数和新鲜度 θ 有关, 是时间 t 的连续递减函数, $\ln \theta < 0$, $h(\theta(t)) > 0$ 。由于生鲜农产品生产商与超市之间是完全信息, 确定性等价收入等于实际收入减去产品损耗所带来的价值损失, 即

$$(1 - h(\theta(t)))[s + k(e + x) - \frac{1}{2}\beta e^2]。$$

u_0 是超市的最低保留收入, 根据生鲜农产品生产商的参与约束条件, 当确定性等价收入不小于 u_0 时, 超市才会接受激励契约。因此, 超市的参与约束 IR 为

$$(1 - h(\theta(t)))[s + k(e + x) - \frac{1}{2}\beta e^2] \geq u_0 \quad (1)$$

在完全信息的情况下, 生鲜农产品生产商可以监测到超市付出的努力程度 e 。在这种情况下, 激励相容约束 IC 不起作用, 超市的努力程度可以通过满足参与约束 IR 来实现最优激励契约。由此可知, 生鲜农产品生产商获得最优利润所需满足的数学模型为

$$\begin{aligned} \max_{s, k, e} E v &= -s + (1 - k)e \\ s.t. &\left\{ (1 - h(\theta(t)))[s + k(e + x) - \frac{1}{2}\beta e^2] \geq u_0 \right. \end{aligned} \quad (2)$$

在实际情况中, 生鲜农产品生产商只要达到自身的收益最大化, 是不愿意支付给生鲜农产品生产商更多利润分成的。所以, 上述激励契约的利润模型可以表述为

$$\max_{s, k, e} (e - \frac{u_0}{1 + \theta' \ln \theta} + kx - \frac{1}{2}\beta e^2) \quad (3)$$

根据隐函数的求导法则, 分别对 k , e 进行求导, 可得

$$e^* = \frac{1}{\beta}, k^* = 0 \quad (4)$$

将上述结果 (4) 代入超市的参与约束 IR 中可得

$$s^* = \frac{u_0}{1 + \theta' \ln \theta} + \frac{1}{2\beta} \quad (5)$$

公式 (5) 即为帕累托最优激励契约, 在完全信息情况下, 生鲜农产品生产商支付给超市的固定收益等于超市最低保留收入与付出努力程度所消耗的成本之和。

此时, 生鲜农产品生产商可以观察到超市所选择的努力程度 e , 并且观察到超市选择的努力程度 $e < \frac{1}{\beta}$ 时, 二者的激励契约设计为 $\underline{s} < u_0 < s^*$, 在这种情况下, 超市决定做出的努力程度为 $e = \frac{1}{\beta}$, 达到帕累托最优。

2.2 不完全信息下生鲜农产品供应链的激励契约设计

在不完全信息的情况下, 超市付出的努力程度 e 是私人信息, 只有超市自己知道, 生鲜农产品生产商观察不到, 不能达成完全信息情况下的帕累托最优。 ρ 是风险偏好程度,

$\frac{1}{2}\rho k^2 \sigma^2$ 是超市的风险成本。其中 ρ 的取值范围为 $0 \leq \rho \leq 1$, 当 $\rho \rightarrow 0$ 时, 风险偏好程度越来越小, 当 $\rho \rightarrow 1$ 时, 风险偏好程度越来越大。

定理 2 在不完全信息情况下, 如果超市的分成份额大于

零, 那么超市在生鲜农产品供应链的运作过程中必须承担一定的风险; 生鲜农产品生产商虽然不能完全观测到超市的努力程度, 但通过与超市之间的激励契约, 能够实现自身期望利润的最大化。

证明: 在给定 $k = 0$ 时, 超市将最大化自身的确定性等价收入来决定付出的努力程度, 对确定性等价收入进行求导可得 $e = \frac{k}{\beta}$, 即超市的激励相容约束 IC 为 $e = \frac{k}{\beta}$, 由此可知, 生鲜农产品生产商获得最优利润所需满足的数学模型为

$$\begin{aligned} \max_{s, k} \pi &= -s + (1 - k)e \\ s.t. &\left\{ \begin{aligned} (1 - h)(s + ke - \frac{1}{2}\beta e^2 - \frac{1}{2}\rho k^2 \sigma^2) &\geq u_0 \\ e &= \frac{k}{\beta} \end{aligned} \right. \end{aligned} \quad (6)$$

求解, 可得

$$\max_k \pi = \frac{k}{\beta} - \frac{k^2}{2\beta} - \frac{1}{2}\rho k^2 \sigma^2 - \frac{u_0}{1 + \theta' \ln \theta} \quad (7)$$

根据隐函数的求导法则, 对 k 进行求导, 可得

$$k = \frac{1}{1 + \rho\beta\sigma^2} \quad (8)$$

由式 (7) 可知, 在不完全信息情况下, 通过生鲜农产品生产商与超市之间的激励契约, 能够实现自身期望利润的最大化; 由式 (8) 可知, $k > 0$, 则超市在供应链运作过程中承担一定的风险。

在生鲜农产品生产商与超市无法达成信息共享的情况下, 产生了帕累托最优风险分担无法达到, 进而出现的风险成本和较低的努力水平导致的期望产出的净损失减去努力成本的节约而形成的激励成本。

此时的风险成本为

$$C_{r1} = \frac{1}{2}\rho k^2 \sigma^2 = \frac{\rho\sigma^2}{2(1 + \rho\beta\sigma^2)^2} \quad (9)$$

在完全信息情况下, 帕累托最优合同时的努力水平 $e^* = \frac{1}{\beta}$; 在不完全信息的情况下, 生鲜农产品生产商激励超市的最优努力水平为 $e = \frac{k}{\beta} = \frac{1}{\beta(1 + \rho\beta\sigma^2)} < e^*$ 。由于期望产出为 $Ey = e$, 所以期望产出的净损失为

$$\Delta Ey = \Delta e = e^* - e = \frac{\rho\sigma^2}{1 + \rho\beta\sigma^2} > 0。$$

努力成本的节约为

$$\Delta C = C(e^*) - C(e) = \frac{2\rho\sigma^2 + \beta\rho^2\sigma^4}{2(1 + \rho\beta\sigma^2)^2} > 0$$

此时的激励成本为

$$C_{i1} = \Delta Ey - \Delta C = \frac{\beta\rho^2\sigma^4}{2(1 + \rho\beta\sigma^2)^2} > 0 \quad (10)$$

由此可知, 超市在供应链运作过程中需要承担的成本为

$$C_{a1} = C_{r1} + C_{i1} = \frac{\rho\sigma^2}{2(1 + \rho\beta\sigma^2)} > 0 \quad (11)$$

如果超市在供应链运作过程中想要获得利润的分成，则必须承担一定的风险，此时生鲜农产品生产商激励超市的最优努力水平为 $\frac{1}{\beta(1+\rho\beta\sigma^2)}$ ，超市在供应链运作过程中承担的成本为 $\frac{\rho\sigma^2}{2(1+\rho\beta\sigma^2)}$ 。因此，本文考虑引入风险偏好因子来对生鲜农产品供应链的激励契约进行设计。

3 考虑风险偏好因子的生鲜农产品供应链激励契约设计

由于无法预知未来的市场需求量而盲目制定采购计划等因素的影响，生鲜农产品产生库存积压进而造成价值损耗，超市会承担一定的风险，通过引入该风险因子对生鲜农产品供应链激励契约进行设计，使得供应链的利润在一定程度上得到提高。然而，面对日益严峻的生鲜农产品质量安全问题，该领域的科技投入不足问题就显得更加尖锐。目前我国生鲜农产品质量安全科技投入不足，以及资金缺口较大等状况，严重影响了科技创新与科研成果的产生，使得我国生鲜农产品科技发展缺乏足够的后劲。加大生鲜农产品的科技投入对提高产品质量安全具有重要意义。

定理 3 在不完全信息情况下，具有不同风险偏好程度的超市所需承担的各项成本也是不同的，加入对生鲜农产品质量安全科技投入 b ，可以提高超市的分成份额，且在一定程度上降低了超市在生鲜农产品供应链运作过程中的风险成本、激励成本以及最终的总成本；如果激励契约成立，超市通过一定的最优努力程度，可获得最优分成份额，并使自身期望效用最大化。

证明：假设 b 为不完全信息下生鲜农产品生产商可以观察到的在生鲜农产品供应链中对产品质量安全科技投入，且 b 与超市付出的努力程度 e 无关，与政府政策等外生的不确定性因素 x 有关，与超市采购农产品的效用函数 y 有关， $b \sim N(0, \sigma_b^2)$ 。生鲜农产品生产商设计的激励契约为 $\pi(y, b) = s + k(y + \gamma b)$ ， γ 表示超市的收入与 b 的相关性，如果 $\gamma = 0$ ，超市的收入与 b 无关。生鲜农产品生产商最为重要的问题是选择最优的 s 、 k 和 γ 。

在给定的激励契约为 $\pi(y, b) = s + k(y + \gamma b)$ 的情况下，超市的确定性等价收入为

$$(1-h)[s + ke - \frac{1}{2}\beta e^2 - \frac{1}{2}\rho k^2 \text{var}(y + \gamma b)]$$

$(1-h)[s + ke - \frac{1}{2}\beta e^2 - \frac{1}{2}\rho k^2(\sigma^2 + \gamma^2\sigma_b^2 + 2\gamma \text{cov}(y, b))]$ 超市的参与约束 IR 为确定性等价收入不小于 u_0 。

对于生鲜农产品生产商设计的激励契约，超市选择 e 最大化确定性等价收入。对其进行求导，可得超市的激励相容约束 IC 为 $e = \frac{k}{\beta}$ 。

由于 b 与 e 无关， γ 对超市的努力程度没有影响。生鲜农产品生产商的期望收入为 $E(y - s - k(y + \gamma b)) = -s + (1-k)e$ 。

由此可知，生鲜农产品生产商获得最优利润所需满足的数学模型为

$$\begin{aligned} \max_{s, k} &= -s + (1-k)e \\ \text{s.t.} & \begin{cases} (1-h)[s + ke - \frac{1}{2}\beta e^2 - \frac{1}{2}\rho k^2(\sigma^2 + \gamma^2\sigma_b^2 + 2\gamma \text{cov}(y, b))] \geq u_0 \\ e = \frac{k}{\beta} \end{cases} \end{aligned}$$

将 IR 和 IC 代入目标函数，其可以化为

$$\max_{k, \gamma} \frac{k}{\beta} - \frac{1}{2}\rho k^2(\sigma^2 + \gamma^2\sigma_b^2 + 2\gamma \text{cov}(y, b)) - \frac{k^2}{2\beta} - \frac{u_0}{1 + \theta \ln \theta}$$

上述目标函数分别对 k 和 γ 进行求导，得

$$\frac{1}{\beta} - \rho k(\sigma^2 + \gamma^2\sigma_b^2 + 2\gamma \text{cov}(y, b)) - \frac{k}{\beta} = 0 \quad (12)$$

$$\gamma\sigma_b^2 + \text{cov}(y, b) = 0 \quad (13)$$

解式 (12) 和 (13) 可得

$$k = \frac{1}{1 + \rho\beta(\sigma^2 - \frac{\text{cov}^2(y, b)}{\sigma_b^2})} \quad (14)$$

$$\gamma = -\frac{\text{cov}(y, b)}{\sigma_b^2} \quad (15)$$

由于 $\sigma^2\sigma_b^2 \geq \text{cov}^2(y, b)$ ，所以 $0 < k < 1$ 。

在考虑生鲜农产品质量安全科技投入 b 前后，可以得到，当 $\text{cov}(y, b) \neq 0$ 时，将 b 作为一个因素列入激励契约，超市的分成份额为 $k = \frac{1}{1 + \rho\beta(\sigma^2 - \frac{\text{cov}^2(y, b)}{\sigma_b^2})} > \frac{1}{1 + \rho\beta\sigma^2}$ ，此时

超市的分成份额得到了提高，激励契约的激励力度也得到了提高。另外，超市所要承担的风险为

$$\text{var}(\pi(y, b)) = \frac{\sigma^2 - \frac{\text{cov}^2(y, b)}{\sigma_b^2}}{[1 + \rho\beta(\sigma^2 - \frac{\text{cov}^2(y, b)}{\sigma_b^2})]^2}$$

而 $\text{var}(\pi(y)) = \frac{\sigma^2}{(1 + \rho\beta\sigma^2)^2}$ ，所以 $\text{var}(\pi(y, b)) < \text{var}(\pi(y))$ ，此时超市所承担的风险降低了。

在不完全信息下，将生鲜农产品生产商可以观察到产品质量安全科技投入 b 列入激励契约后，此时的风险成本为

$$C_{r,2} = \frac{1}{2}\rho \text{var}(t(y, b)) = \frac{\rho(\sigma^2 - \frac{\text{cov}^2(y, b)}{\sigma_b^2})}{2[1 + \rho\beta(\sigma^2 - \frac{\text{cov}^2(y, b)}{\sigma_b^2})]^2}$$

生鲜农产品生产商期望产出的净损失为

$$\Delta E y = \Delta e = e^* - e = \frac{\rho(\sigma^2 - \frac{\text{cov}^2(y, b)}{\sigma_b^2})}{1 + \rho\beta(\sigma^2 - \frac{\text{cov}^2(y, b)}{\sigma_b^2})}$$

努力成本的节约为

$$\Delta C = \frac{2\rho(\sigma^2 - \frac{\text{cov}^2(y,b)}{\sigma_b^2}) + \rho^2\beta(\sigma^2 - \frac{\text{cov}^2(y,b)}{\sigma_b^2})^2}{2\left[1 + \rho\beta(\sigma^2 - \frac{\text{cov}^2(y,b)}{\sigma_b^2})\right]^2}, \text{ 此时的激励成本为 } C_{i2} = \Delta E y - \Delta C = \frac{\rho^2\beta(\sigma^2 - \frac{\text{cov}^2(y,b)}{\sigma_b^2})^2}{2\left[1 + \rho\beta(\sigma^2 - \frac{\text{cov}^2(y,b)}{\sigma_b^2})\right]^2}。$$

由此可知，超市在供应链运作过程中需要承担的成本为

$$C_{a2} = C_{r2} + C_{i2} = \frac{\rho(\sigma^2 - \frac{\text{cov}^2(y,b)}{\sigma_b^2})}{2\left[1 + \rho\beta(\sigma^2 - \frac{\text{cov}^2(y,b)}{\sigma_b^2})\right]} \quad (16)$$

由上可知，在信息不完全的情况下，将超市可以观察到的质量安全科技投入 b 加入激励契约前后的结果进行比较可得到以下结论。生鲜农产品的成份份额得到了提高，同时契约的激励力度也得到了提高；当 $\text{cov}(y,b) = 0$ 时，超市在供应链运作过程中需要承担的成本是相同的；当 $\text{cov}(y,b) \neq 0$ 时，风险成本、激励成本以及最终的总成本都在不同程度上有所降低，因此生鲜农产品供应链上的利润就得到了提高。

定理 4 在不完全信息的情况下，加入对生鲜农产品的质量安全技术投入 b 后，生鲜农产品生产商和超市的利润随着生鲜农产品的损耗率的增大而减少，随着风险偏好程度的增加先减小后增大，当 y 与 b 具有相关性时，生鲜农产品供应链的利润在一定程度上得到了提高。

证明：在不完全信息下，将生鲜农产品生产商可以观察到产品质量安全技术投入 b 列入激励契约后，超市获得的利润函数为：

$$\Pi_r = (1 + \theta \ln \theta)(s + ke - \frac{1}{2}\beta e^2) - \frac{1}{2}\rho k^2(\sigma^2 + \gamma^2\sigma_b^2 + 2\gamma \text{cov}(y,b)) - \frac{\rho(\sigma^2 - \frac{\text{cov}^2(y,b)}{\sigma_b^2})}{2\left[1 + \rho\beta(\sigma^2 - \frac{\text{cov}^2(y,b)}{\sigma_b^2})\right]} \quad (17)$$

因为 $h = -\theta \ln \theta$ ，所以生鲜农产品的损耗率 h 随着时间 t 的增大而增大，随着新鲜度 θ 的减小而增大。对利润函数关于 h 进行求导，可得

$$\frac{d\Pi_r}{dh} = -(s + ke\beta e^2 - \frac{1}{2}\rho k^2(\sigma^2 + \gamma^2\sigma_b^2 + 2\gamma \text{cov}(y,b))) < 0,$$

$\frac{d^2\Pi_r}{dh^2} = 0$ ，超市的利润为单调递减函数，利润 Π 随着生鲜农产品的损耗率 h 的增大而减少，单位产品的利润随着时间 t 的增大而减少，随着新鲜度 θ 的减小而减少。

对超市的利润函数关于 ρ 进行求导，可得

$$\frac{d\Pi_r}{d\rho} = -\frac{1}{2}k^2(\sigma^2 + \gamma^2\sigma_b^2 + 2\gamma \text{cov}(y,b))(1-h) - \left(\frac{2}{\rho(\sigma^2 - \frac{\text{cov}^2(y,b)}{\sigma_b^2})} + 2\beta\right)^{-2} * \frac{2}{\rho^2(\sigma^2 - \frac{\text{cov}^2(y,b)}{\sigma_b^2})},$$

$\frac{d^2\Pi_r}{d\rho^2} > 0$ ，超市的利润为先单调递减，达到极值点后再单调递增的函数，利润 Π 随着风险偏好程度 ρ 的增加先减小后增大。

当 $\text{cov}(y,b) \neq 0$ 时，加入对生鲜农产品的基础设施 b 的

投入后，由式 (16) 可知， $\frac{\rho(\sigma^2 - \frac{\text{cov}^2(y,b)}{\sigma_b^2})}{2\left[1 + \rho\beta(\sigma^2 - \frac{\text{cov}^2(y,b)}{\sigma_b^2})\right]}$ 比加

入 b 前有所降低，则超市在供应链运作过程中的利润得到了提高。

生鲜农产品生产商获得的利润函数为：

$$\Pi_s = (1 + \theta \ln \theta)[-s + (1-k)e] \quad (18)$$

因为 $h = -\theta \ln \theta$ ，所以生鲜农产品的损耗率 h 随着时间 t 的增大而增大，随着新鲜度 θ 的减小而增大。对利润函数

关于 h 进行求导，可得 $\frac{d\Pi_s}{dh} = -[s + (1-k)e]$ ，因为

$-s + (1-k)e > 0$ ，所以 $\frac{d\Pi_s}{dh} < 0$ ， $\frac{d^2\Pi_s}{dh^2} = 0$ ，生鲜农产品生产商的利润为单调递减函数，利润 Π 随着生鲜农产品的损耗率 h 的增大而减少，单位产品的利润随着时间 t 的增大而减少，随着新鲜度 θ 的减小而减少。

通过引入风险因子和对产品基础实施的投入等变量，生鲜农产品供应链的激励契约得到了优化，不仅可以降低风险成本，还可以提高超市的努力水平，同时提供双方获得更多的利润并优化生鲜农产品供应链。

4 算例分析

现在以一个具体的一种生鲜农产品为例，阐述和验证本文的主要结论。假设生鲜农产品的成本系数 $\beta = 0.6$ ，超市的最低保留收入 $u_0 = 0.2$ 万元，双方商定的固定收益 $s = 0.3$ 万元，政府政策、天气情况等外生的不确定性因素 $x = 0.5$ ，方差 $\sigma^2 = 0.9$ ，生鲜农产品基础设施投入 b 的方差 $\sigma_b^2 = 0.8$ ，超市所采购农产品的效用函数 y 与基础设施投入 b 的协方差 $\text{cov}(y,b) = 0.6$ 。根据这些参数，可以得到以下结果。

当生鲜农产品的损耗率和风险偏好程度为某一特定值时， $\theta = 0.8$ ， $\rho = 0.5$ ，可以得出不同情形下生鲜农产品供应链的利润结果。

表 1 不同情形下生鲜农产品供应链的利润结果对比

情形	超市利润(万元)	生鲜农产品生产商利润(万元)	总利润(万元)
完全信息	1.3417	1.0899	2.4316
不完全信息(加入 b 前)	0.5563	0.4127	0.9690
不完全信息(加入 b 后)	0.7061	0.4908	1.1969

对比表 1 的结果可知，在完全信息的情形下，超市和生鲜农产品生产商的利润明显优于不完全信息情形下对应的利润结果，这验证了定理 1 的结论。在不完全信息的情形下，加入对生鲜农产品基础设施 b 的投入后，超市和生鲜农产品生产商的利润，以及总利润都在一定程度上得到了提高，这与定理 3 相吻合。通过分析可以得到，加大生鲜农产品质量安全科技投入、提高信息的共享程度对生鲜农产品供应链的收益具有很好的优化作用。

在不完全信息的情形下，生鲜农产品损耗率和风险偏好程度对生鲜农产品供应链利润的影响也是不同，为了进一步验证相关结论，分别令这两个参数其中一个不变，另一个可变参数对生鲜农产品供应链利润的影响。得到了生鲜农产品损耗率对供应链利润影响的趋势图和风险偏好程度对供应链利润影响的趋势图。

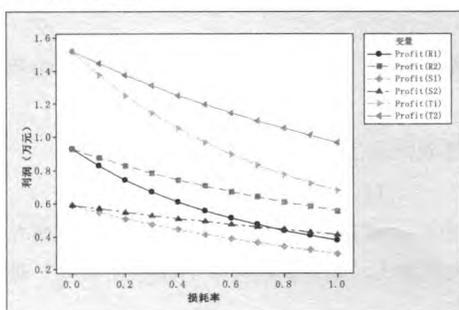


图 1 不完全信息下生鲜农产品损耗率对供应链利润的影响

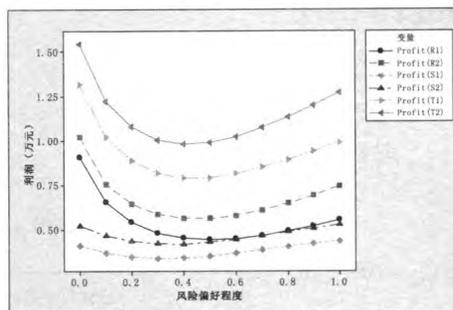


图 2 不完全信息下风险偏好程度对供应链利润的影响

在不完全信息的情形下，图 1 和图 2 反映了生鲜农产品损耗率和风险偏好程度者两个参数有一个为固定值时，另一个对生鲜农产品供应链利润的影响。当风险偏好程度为固定值时，随着生鲜农产品损耗率的增大，即新鲜度的减小，生鲜农产品的超市利润、生鲜农产品生产商利润、总利润也在逐渐减少；当生鲜农产品的损耗率为固定值时，随着风险偏好程度的增加，生鲜农产品的超市利润、生鲜农产品生产商利润、总利润呈现先减少后增加的趋势。这符合定理 4 的结论。超市可根据上述结果采购符合自己期望收益的不同新鲜度的产品，生鲜农产品生产商亦可根据上述结果选择符合自己期望收益的风险偏好程度的超市进行合作。

当超市的风险偏好程度 ρ 和产品损耗率 θ 同时变化时，生鲜农产品供应链上的利润也会发生不同的变化，具体利润结果如表 2 所示。

表 2 不完全信息下参数变化对生鲜农产品供应链利润的影响

超市利润(万元)		生鲜农产品生产商利润(万元)		总利润(万元)	
加入 b 前	加入 b 后	加入 b 前	加入 b 后	加入 b 前	加入 b 后
1.1332	1.1332	0.6333	0.6333	1.7665	1.7665
0.7771	0.8227	0.5308	0.5516	1.3080	1.3743
0.6140	0.6846	0.4572	0.4957	1.0712	1.1803
0.5220	0.6103	0.4041	0.4578	0.9261	1.0681
0.4699	0.5736	0.3696	0.4364	0.8395	1.0100
0.4425	0.5617	0.3501	0.4281	0.7926	0.9898
0.4309	0.5667	0.3410	0.4288	0.7719	0.9955
0.4299	0.5838	0.3382	0.4343	0.7681	1.0181
0.4361	0.6094	0.3385	0.4418	0.7745	1.0513
0.4471	0.6411	0.3398	0.4495	0.7870	1.0906
0.4616	0.6772	0.3411	0.4562	0.8028	1.1333

由表 2 的结果可以看出，当超市的风险偏好程度 ρ 和产品损耗率 θ 同时变化时，在加入对生鲜农产品基础设施 b 的投入后，生鲜农产品供应链上超市和生鲜农产品生产商的利润在一定程度上都得到了提高，这一变化趋势和定理 3 完全吻合。而这两个参数变量对生鲜农产品供应链利润的影响可以用图 3 来说明。

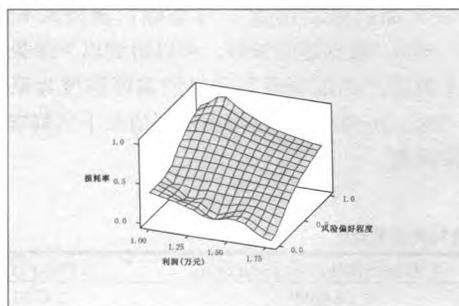


图 3 损耗率及风险偏好程度对生鲜农产品供应链利润的影响

在不完全信息的情况下，由于生鲜农产品的损耗率及超市的风险偏好程度的共同作用，供应链的利润也发生了一定的波动。从图 3 可以看出，当风险偏好程度一定时，生鲜农产品供应链的利润随着产品损耗率的增大而减少；当产品损耗率一定时，生鲜农产品供应链的利润随着超市的风险偏好程度先减小后增大。这两个参数的同时变化使得生鲜农产品供应链的利润在一定程度上呈现出了起伏涨落的趋势，超市和生鲜农产品生产商应根据自己的期望收益对产品新鲜度及风险偏好程度做出合理的选择。

5 结语

本文将生鲜农产品的新鲜度和风险偏好程度作为变量，构造了生鲜农产品供应链激励契约的数学模型。分别建立了完全信息、不完全信息、引入风险偏好因子以及加入对生鲜农产品质量安全科技投入等情况下超市与生鲜农产品生产商之间的激励契约模型，得出不同情形下超市分成份额以及

利润的变化,并对加入生鲜农产品基础设施投入这一变量前后生鲜农产品供应链的利润进行比较。通过本文的研究可以得到以下结论:

(1)在完全信息的情况下,通过引入激励契约机制,超市存在唯一的最优努力水平和最优分成份额,生鲜农产品生产商也存在唯一的最优分成份额和对超市最优固定收益的决策,使得双方期望利润最大化。

(2)在不完全信息的情况下,超市获得分成份额的前提条件是必须承担一定的风险,否则无法达到帕累托最优水平,并且生鲜农产品生产商需要付出代理成本。而完全信息的情形下超市和生鲜农产品生产商的利润明显优于不完全信息情形下对应的利润结果。这表明通过互联网信息平台提高信息的共享程度可以实现生鲜农产品供应链的协调。

(3)加入对生鲜农产品质量安全科技投入后,超市的分成份额得到了提高,超市和生鲜农产品生产商的利润,以及总利润都在一定程度上得到了提高。这充分说明了在激励契约中列入生鲜农产品质量安全科技投入对生鲜农产品供应链的收益具有很好的优化作用。

(4)当风险偏好程度一定时,生鲜农产品供应链的利润随着产品损耗率的增大而减少;当产品损耗率一定时,生鲜农产品供应链的利润随着超市的风险偏好程度先减小后增大。根据以上结果,超市可采购符合自己期望收益的不同新鲜度的产品,生鲜农产品生产商亦可选择符合自己期望收益的风险偏好程度的超市进行合作。

本文的研究是基于一个生鲜农产品生产商与一个超市组成的两级生鲜农产品供应链系统,没有考虑多个生鲜农产品生产商与多个超市组成的生鲜农产品供应链系统。另外,本文假设影响生鲜农产品生产商与超市的政府政策、天气情况等外生因素服从正态分布,而现实中的情况则较为复杂。在今后的研究中,应放宽假设,对上述情形进行探讨,使研究更加深入。

参考文献

- [1] 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].系统工程理论与实践,2014,34(4):836-844.
- [2] 中华人民共和国中央人民政府网.国办发[2013]5号[Z].http://www.gov.cn/zwqk/2013-01/15/content_2312686.htm.
- [3] 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.
- [4] Dye C Y. Joint pricing and ordering policy for a deteriorating inventory with partial backlogging [J]. Omega, 2007, 35(2): 184-189.
- [5] Balachandran K R, Radhakrishnan S. Quality implications of warranties in a supply chain[J]. Management Science, 2005, 51(8): 1266-1277.
- [6] 徐贤浩,聂思弱.零售商主导的短生命周期产品供应链订货策略[J].管理科学学报,2009,12(4):83-93.
- [7] Chao G H, Irvani S M R, Savaskan R C. Quality improvement incentives and product recall cost sharing contracts[J]. Management Science, 2009, 55(7): 1122-1138.
- [8] Halim K A, Giri B C, Chaudhuri K S. Fuzzy economic order quantity model for perishable items with stochastic demand, partial backlogging and fuzzy deterioration rate[J]. International Journal of Operational Research, 2008, 3(1): 77-96.
- [9] Lodree Jr E J, Uzochukwu B M. Production planning for a deteriorating item with stochastic demand and consumer choice[J]. International Journal of Production Economics, 2008, 116(2): 219-232.
- [10] 丁松,但斌.随机需求下考虑零售商风险偏好的生鲜农产品最优订货策略[J].管理学报,2012,9(9):1382-1387.
- [11] Corbett C J, DeCroix G A, Ha A Y. Optimal shared-savings contracts in supply chains: Linear contracts and double moral hazard[J]. European Journal of Operational Research, 2005, 163(3): 653-667.
- [12] Chen F Y H, Yano C A. Improving supply chain performance and managing risk under weather-related demand uncertainty [J]. Management Science, 2010, 56(8): 1380-1397.
- [13] 张菊亮,陈剑.销售商的努力影响需求变化的供应链的合约[J].中国管理科学,2004,12(04):50-56.
- [14] Krishnan H, Kapuscinski R, Buzz D A. Coordinating contracts for decentralized supply chain with retailer promotional effort [J]. Management Science, 2004, 50(1): 48-64.
- [15] Li H T, Ritchken P, Wang Y Z. Option and forward contracting with asymmetric information: valuation issues in supply chains[J]. European Journal of Operational Research, 2009, 197(1): 134-148.
- [16] Zhao Y X, Wang S Y, Cheng T C, et al. Coordination of supply chains by option contracts: a cooperative game theory approach[J]. European Journal of Operational Research, 2010, 207(1): 668-675.
- [17] Liang L, Wang X, Gao J. An option contract pricing model of relief material supply chain[J]. Omega, 2012, 40(5): 594-600.
- [18] 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.
- [19] Taleizadeh A A, Mohammadi B, Cárdenas-Barrón L E, et al. An EOQ model for perishable product with special sale and shortage[J]. International Journal of Production Economics, 2013, 145(1): 318-338.
- [20] Ferguson M, Ketzenberg M E. Information sharing to improve retail product freshness of perishables[J]. Production and Operations Management, 2006, 15(1): 57-73.
- [21] Blackburn J, Scudder G. Supply chain strategies for perishable products: The case of fresh produce [J]. Production and Operations Management, 2009, 18(2): 129-137.
- [22] 但斌,王磊,李宇雨.考虑消费者效用与保鲜的生鲜农产品 EOQ 模型[J].中国管理科学,2011,19(1):100-108.
- [23] Fritz M, Hausen T. Electronic supply network coordination in agrifood networks: barriers, potentials, and path dependencies[J]. International Journal of Production Economics, 2009, 121(2): 441-453.

Design of incentive contract for fresh agricultural products supply chain considering risk preference

ZHENG Qi, FAN Ti-jun

(School of Business, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract: Fresh agricultural product is an important part of modern agriculture. The operation of the supply chain is related to the improvement of people's living standard. However, due to the perishable nature of the fresh agricultural products, and its diversified and complex operation patterns, especially the issue of information asymmetry and their different risk preferences among the main supply chain members in different operation modes, the loss rate of fresh agricultural products in the supply chain operation is high. Currently, "farming-supermarket" docking has many disadvantages, such as stabilizing the price of fresh products, reducing intermediate links in circulation, protecting the supply chain benefit of each main member and promoting food safety and others. More and more fresh products supply chains are using this model. Therefore, there is an urgent need to study the supply chain coordination of asymmetric information and risk preference in "farming-supermarket" docking model, in order to improve the circulation efficiency of fresh agricultural products and reduce the loss rate.

This paper considers asymmetric information of farmer and supermarket in the supply chain of fresh agricultural products, and the supply chain system consisting of one fresh product supplier and one retailer. The principal-agent theory is used to establish the problem of both participants having different target functions, and a mathematics model of incentive contract for fresh agricultural products supply chain. This paper investigates how product freshness impacts profit of fresh agricultural products supply chain after considering all the features of fresh agricultural products, such as seasonal and periodic production, a huge loss in circulation, the limited time in consumption, and safety of the product in quality.

At the same time, different risk preference and the operational mode of fresh agricultural products supply chain make great differences. Therefore, the effect of risk preference on fresh product supply chain's profit is studied. However, fresh agricultural products supply chains are facing the increasingly serious quality and safety problem on fresh agricultural products, and the insufficient investment of science and technology in the area. Increasing investment of science and technology on fresh agricultural products can greatly improve the quality and safety of fresh products. This paper researches the incentive contract by considering the changing trend of supply chain's profit and the investment of quality and safety in science and technology.

There are four primary research results. First, the fresh agricultural products supply chain can achieve Pareto optimality by adopting incentive contract mechanism. The supermarket has the only optimal effort level and the optimal amount of ingredients. Fresh agricultural products supplier also has only one optimal divided share and the optimal fixed income decision for the supermarket. The two participants maximize their own expected profit. Second, the profit of the fresh agricultural products supply chain under complete information is higher than the profit of that under incomplete information. In another word, improving the degree of information sharing can achieve the coordination of fresh agricultural products supply chain on the Internet information platform. Third, the profit of the fresh agricultural products supply chain decreases when product freshness reduces. When retailer's risk preference increases, the profit falls firstly, and then grows. Fourth, the retailer's profit, the supplier's profit, and total profit in fresh agricultural products supply chain are improved in varying degrees after quality and safety in science and technology are invested in the incentive contract. It can be seen that the investment of quality and safety in agricultural products supply chain has a good role in the optimization of the supply chain. Finally, the conclusions are verified by numerical analysis.

Key words: Fresh agricultural products; Freshness; Supply chain; Risk preference; Incentive contract

中文编辑：杜 健；英文编辑：Charlie C. Chen