

突发事件下的乳制品供应链信息共享机制

宦梅丽¹, 陈鹏飞¹, 张莉², 侯云先¹

(1. 中国农业大学经济管理学院, 北京 100083; 2. 北京物资学院, 北京 101125)

摘要: 考虑有一个生产商和一个零售商的二级乳制品供应链系统中, 突发事件发生导致市场需求信息的随机扰动, 乳制品零售商因靠近市场能准确掌握该信息, 并决定是否与乳制品生产商共享的博弈均衡. 研究发现, 需求信息共享只有在特定条件下才能增加整个乳制品供应链的收益. 基于乳制品供应链整体收益最大化原则和乳制品生产商和零售商的帕累托条件, 构建了突发事件下需求信息共享的激励模型. 数值模拟仿真结果表明, 该激励模型能够最大化整个乳制品供应链的收益.

关键词: 突发事件; 信息共享机制; 乳制品供应链; 不确定需求

中图分类号: C931; F224.32 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.0253-2778.2019.06.010

引用格式: 宦梅丽, 陈鹏飞, 张莉, 等. 突发事件下的乳制品供应链信息共享机制[J]. 中国科学技术大学学报, 2019, 49(6): 506-516.

HUAN Meili, CHEN Pengfei, ZHANG Li, et al. Information sharing mechanism of dairy supply chain under emergencies[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2019, 49(6): 506-516.

Information sharing mechanism of dairy supply chain under emergencies

HUAN Meili¹, CHEN Pengfei¹, ZHANG Li², HOU Yunxian¹

(1. College of Economics and Management, China Agricultural University, Beijing 100083, China;
2. Beijing Wuzi University, Beijing 101125, China)

Abstract: A game equilibrium was studied in which a secondary dairy supply chain system consisting of one manufacturer and one retailer experiences a random disturbance of the market demand information caused by emergencies, and dairy product retailers can accurately grasp the information due to their close touch with the market and decide whether to share it with the dairy manufacturer. The results show that demand information sharing can increase the benefits of the entire dairy supply chain under certain conditions. Based on the principle of the overall profit maximization of the dairy supply chain and the Pareto condition of dairy manufacturer and retailer, the incentive model of demand information sharing during emergencies was constructed. Simulation results show that the incentive model can maximize the overall benefits of the dairy supply chain.

Key words: emergency; information sharing mechanism; dairy supply chain; uncertain demand

0 引言

近年来, 涉及食品安全的突发事件频发, 如

SARS、禽流感、H1N1 流感、三聚氰胺事件、海南毒豆角事件等, 给农产品的生产、销售、需求以及消费者食品安全信心等方面带来严峻挑战.

收稿日期: 2019-01-17; 修回日期: 2019-04-10

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划项目(2014BAL07B05), 国家社会科学基金项目(14BGL062)资助.

作者简介: 宦梅丽, 女, 1992年生, 博士. 研究方向: 涉农企业管理. E-mail: huanmeiliwa@163.com

通讯作者: 侯云先, 博士/教授. E-mail: houyunxian@163.com

供应链突发事件是指由供应链系统内外部偶发因素直接或间接引起,在短时间形成和爆发,直接影响甚至中断供应链运行,可能为供应链成员企业带来灾难性后果,需要成员企业立即采取应急管理措施的事件。突发事件发生时,多方博弈的分散决策模式难以有效应对供应链系统各节点面临的威胁,核心企业应当在充分信息共享的前提下基于契约激励集中决策,尽快修复供应链系统,以减少损失并最大化供应链整体收益。

目前,突发事件应急管理相关文献主要聚焦于工业品和农产品供应链,鲜有研究乳制品供应链突发事件应急协调。乳制品由于自身属性特殊,在生产、运输、需求等方面不确定性较大,并且直接关系到人类的生活与健康,其供应链面临的突发事件十分复杂,影响范围甚广。因而,乳制品供应链应急协调的研究非常迫切。

国内外学者对突发事件下的供应链应急管理和协调进行了诸多有益探索,取得了许多创新性成果,为乳制品供应链应急协调研究提供良好借鉴。早期文献大多以信息对称、市场价格稳定、市场需求变化确定、风险偏好中性等假设为前提展开^[1]。随着研究的深入,有学者开始关注突发事件下的信息不对称问题。比如文献[2]发现突发事件下买方隐藏需求信息,卖方隐藏成本信息,可运用非合作博弈的 Stackelberg 对策来实现激励。基于信息不对称假设,文献[3-5]研究突发事件导致需求、成本、产品运输时间等变动,并提出相应的契约激励模型,以实现供应链应急协调。文献[6]关注突发事件下需求信息不对称契约的供应链协调,发现突发事件导致基准的数量折扣契约难以发挥作用。

针对供应链各个主体间的信息不对称问题,一些学者开始探讨是否可以通过信息共享提高供应链的收益。他们关注了不同主体间的信息共享行为、机理和激励机制等,大多认为信息共享能够提高供应链收益^[7-8]。比如文献[8]研究食品供应链溯源信息共享行为协调机制,发现集中决策时食品供应链的总收益最大;成本分担契约可以实现追溯食品生产商和食品供应链收益的帕累托改进。信息共享的激励机制是促进信息共享的重要途径^[9],通过构建相应的激励机制可加强信息共享^[10]。

然而,供应链上各个企业并非共享所有信息都能实现收益的帕累托改进。文献[11]发现需求信息共享可以提高各个企业利润,而成本信息共享则相

反。但是上述文献在建模时将需求突变作为价格的线性或非线性函数,这与现实不太相符。

事实上,以乳制品为代表的食品属于信任品,突发事件对需求的扰动并不一定呈线性或非线性关系,可能是随机的。由于乳制品生产商远离乳制品消费市场,难以获取需求扰动信息。与之相反,零售商接近乳制品消费市场,能够及时掌握消费者需求信息,导致二者存在需求信息不对称。乳制品零售商是否能够通过共享需求信息,从而实现自身收益和整个乳制品供应链收益增加? 乳制品生产商参与信息共享是否能够获益? 如果是,需要满足什么条件?

鉴于此,本研究考虑了乳制品的信任品属性和保质期短、容易过期变质的生鲜属性,将新鲜度因子考虑其中,研究突发事件导致市场需求随机扰动下的乳制品供应链信息共享机制。

1 信息共享模型

1.1 模型符号说明

本研究假设有一个乳制品核心企业(生产商)和一个零售商的二级供应链,遵从生产商为领导者、零售商为从者的 Stackelberg 型重复博弈。在 Stackelberg 博弈过程中供应商根据自身利润最大化原则和零售商的订购量确定商品批发价,零售商根据自身利润最大化原则和供应商的批发价确定商品零售价。

为了描述乳制品供应链的特征,定义一个反映乳制品质量随时间 t 加速递减的单调连续减函数的新鲜度因子,令 $\theta_{(t)} = 1 - \frac{t^2}{T^2}$,其中 T 为乳制品的有效生命周期, $0 \leq t \leq T$, T 同时是有效运输时间约束^[3,12]。根据文献[3]关于鲜活农产品损耗系数的处理方法,构造一个运输过程中乳制品变化的损耗系数 $\varphi_{(t)} = \exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right) - 1$ 。即当 $t=0$ 时, $\varphi_{(t)}=0$; 当 $t=T$ 时, $\varphi_{(t)}=1$; $\varphi_{(t)} \in [0,1]$ 。则与运输时间有关的有效比率因子 $\beta_{(t)} = 1 - \varphi_{(t)} = 2 - \exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)$, $\beta_{(t)} \in [0,1]$ 。

模型中定义下标 R 和 M 分别表示零售商和生产商; d 表示商品需求, p 表示零售商的商品销售价格; w 表示生产商供应给零售商的批发价; π_R 和 π_M 分别表示零售商和生产商的利润。为简化研究,本研究借鉴经典文献中的做法,假定未发生突发事件时,

乳制品销售价格与市场需求呈线性关系^[13]: $d = a - bp$. 其中, a 和 b 为常数, 并且 $a > 0, b > 0$.

由于突发事件发生, 乳制品需求发生随机扰动, 乳制品零售商面临的市场需求突变为 $d' = a - bp + s$. 其中, s 反映零售商掌握的市场需求变动不确定大小的信息, 需求变动越大, 则 s 值越大. 零售商由于靠近市场, 完全掌握需求变动信息 s . s 是服从期望为 0、方差为 σ^2 的正态分布的随机变量, 即 $s \sim N(0, \sigma^2)$ 的正态分布的随机变量.

突发事件发生后, 乳制品生产商由于远离市场无法准确预测市场信息, 无法掌握市场需求的分布函数信息, 但零售商了解突发事件后的市场需求分布函数和概率, 即, 乳制品零售商和生产商掌握的市场需求信息是不对称的. 突发事件发生, 导致需求不确定性, 零售商决定是否共享不确定的需求信息. 本研究分别从零售商掌握不确定需求信息但不与生产商共享和零售商与生产商共享不确定需求信息两种模型进行研究.

1.2 模型 1 (零售商不与生产商共享不确定需求信息)

模型 1 中, 假设零售商拥有需求变动私人信息 s , 但是生产商无法获知此信息, 只能根据期望进行估计. 假设零售商为获取这种不确定需求信息需要付出成本为 c , c 为常数.

由于不共享信息, 则该成本完全由零售商独立承担, 则零售商面临的市场需求为 $q = a - bp + s$; 运输时间为 t 时, 零售商利润最大化下, 向乳制品生

产商订购 $Q = \frac{a - bp + s}{2 - \exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)}$, 其收益为

$$\pi_R = (p - w)Q - c = (p - w) \frac{a - bp + s}{2 - \exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)} - c;$$

生产商的收益为

$$\pi_M = wQ = w \frac{a - bp}{2 - \exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)}.$$

1.3 模型 2 (零售商与生产商共享不确定需求信息)

模型 2 中, 假设零售商愿意与生产商共享不确定需求信息, 假定为获取这种信息所花费成本仍为 c , c 为常数. 生产商根据常值 $\rho (0 \leq \rho \leq 1)$ 比率分担零售商获取该信息的成本 ($\rho = 0$ 时, 表示零售商无偿为生产商提供该信息)^[12].

假定未发生突发事件时, 乳制品销售价格与市

场需求呈线性关系, 零售商和生产商面临的市场需求均为 $q = a - bp$. 但由于突发事件发生, 乳制品需求发生随机扰动, 乳制品零售商面临的市场需求突变为 $q' = a - bp + s$, 零售商完全掌握需求变动信息 s , 并向乳制品生产商订购 $Q = \frac{a - bp + s}{2 - \exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)}$;

此时零售商收益为

$$\begin{aligned} \pi_R &= (p - w)Q - (1 - \rho)c = \\ &= (p - w) \frac{a - bp + s}{2 - \exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)} - (1 - \rho)c, \end{aligned}$$

乳制品生产商的收益为

$$\pi_M = wQ - \rho c = w \frac{a - bp + s}{2 - \exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)} - \rho c.$$

2 模型求解

对信息不共享和信息共享的模型根据逆向法进行求解, 并且满足如下条件:

$$\max_w \pi_M \text{ s. t. } \max_p \pi_R.$$

当乳制品需求不确定信息不被共享时, 生产商不掌握市场需求信息 s , 在求解 $\max_w \pi_M$ 时借鉴前人的处理方法, 采用期望进行估计^[13-14].

2.1 模型 1 的求解

根据零售商收益最大化原则, $\frac{\partial \pi_R}{\partial p} = \frac{a + bw + s - 2bp}{2 - \exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)} = 0$, $\frac{\partial^2 \pi_R}{\partial p^2} = \frac{-2b}{2 - \exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)} < 0$,

可以求解 $\max_p \pi_R$, 即当 $p^* = \frac{a + bw + s}{2b}$ 时, 零售

商可获得最大收益 $\pi_R^* = \frac{(a + s - bw)^2}{4b(2 - \exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right))} - c$.

此时, $\pi_M = w \frac{a - bp}{2 - \exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)}$, 用 p^* 带入 p

得, $\pi_M = \frac{aw - bw^2 - sw}{2(2 - \exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right))}$, 根据乳制品生产商收

益最大化原则, $\frac{\partial \pi_M}{\partial w} = \frac{a - 2bw - s}{2(2 - \exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right))} = 0$,

$$\frac{\partial^2 \pi_M}{\partial \omega^2} = -\frac{b}{2\left(2 - \exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)} < 0.$$

同理, 当 $\omega^* = \frac{a-s}{2b}$ 时, 可以求得乳制品生产商的最大收益. 由于乳制品生产商不掌握市场不确定信息 s , 在推导中采用 s 的期望 ($E(s) = 0$) 代替,

则 $\omega^* = \frac{a}{2b}$, 带入 π_M 得, $\pi_M^* = \frac{a\omega - b\omega^2 - s\omega}{2\left(2 - \exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)} =$

$$\frac{a^2}{8b\left(2 - \exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)}.$$

相应地, $p^* = \frac{a + b\omega + s}{2b} = \frac{3a + 2s}{4b}$, $\pi_R^* = \frac{(a + s - b\omega)^2}{4b\left(2 - \exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)} - c = \frac{(a + 2s)^2}{16b\left(2 - \exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)} - c.$

因此, 当突发事件发生时, 乳制品零售商掌握需求不确定信息, 但不与乳制品生产商共享时, 乳制品生产商和零售商的最优决策分别为

$$\omega_M^1 = \frac{a}{2b}, \pi_M^1 = \frac{a^2}{8b\left(2 - \exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)};$$

$$p_R^1 = \frac{3a + 2s}{4b}, \pi_R^1 = \frac{(a + 2s)^2}{16b\left(2 - \exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)} - c.$$

2.2 模型 2 的求解

同理, 根据零售商收益最大化原则,

$$\frac{\partial \pi_R}{\partial p} = \frac{\partial \left((p - \omega) \frac{a - bp + s}{2 - \exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)} - (1 - \rho)c \right)}{\partial p} = \frac{a - 2bp + s + b\omega}{2 - \exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)} = 0, \frac{\partial^2 \pi_R}{\partial p^2} = \frac{-2b}{2 - \exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)} < 0.$$

故当 $p^* = \frac{a + s + b\omega}{2b}$ 时, 乳制品零售商最大

收益为 $\pi_R^* = (p - \omega) \frac{a - bp + s}{2 - \exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)} - (1 - \rho)c =$

$$\left(\frac{a + s + b\omega}{2b} - \omega\right) \frac{a - b\omega + s}{4 - 2 \exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)} - (1 - \rho)c.$$

将 p^* 带入 π_M 得

$$\pi_M = \omega Q - \rho c = \omega \frac{a - bp + s}{2 - \exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)} - \rho c =$$

$$\omega \frac{a - b\omega + s}{4 - 2 \exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)} - \rho c.$$

根据乳制品生产商收益最大化原则, 有 $\frac{\partial \pi_M}{\partial \omega} =$

$$\frac{a - 2b\omega + s}{4 - 2 \exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)} = 0, \frac{\partial^2 \pi_M}{\partial \omega^2} = \frac{-b}{2 - \exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)} < 0. \text{ 故}$$

当 $\omega^* = \frac{a + s}{2b}$ 时, 乳制品生产商最大收益为 $\pi_M^* =$

$$\frac{(a + s)^2}{8b\left(2 - \exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)} - \rho c.$$

相应地, 有

$$p^* = \frac{a + s + b\omega}{2b} = \frac{a + s + b \frac{a + s}{2b}}{2b} = \frac{3(a + s)}{4b},$$

$$\pi_R^* = \left(\frac{a + s + b\omega}{2b} - \omega\right) \frac{a - b\omega + s}{4 - 2 \exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)} -$$

$$(1 - \rho)c = \frac{(a + s)^2}{16b\left(2 - \exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)} - (1 - \rho)c.$$

因此, 乳制品零售商在突发事件发生时, 掌握私人市场需求信息并与乳制品生产商共享时, 零售商和生产商的最优决策分别为

$$\omega_M^2 = \frac{a + s}{2b}, \pi_M^2 = \frac{(a + s)^2}{8b\left(2 - \exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)} - \rho c;$$

$$p_R^2 = \frac{3(a + s)}{4b},$$

$$\pi_R^2 = \frac{(a + s)^2}{16b\left(2 - \exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)} - (1 - \rho)c.$$

3 信息共享模型及其激励模型

3.1 信息共享优化乳制品供应链整体收益的条件
突发事件下乳制品零售商掌握需求信息但不与乳制品生产商共享时, 供应链整体收益为

$$\pi_1 = \pi_M^1 + \pi_R^1 = \frac{a^2}{8b\left(2 - \exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)} +$$

$$\frac{(a+2s)^2}{16b\left(2-\exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)}-c=\frac{2a^2+(a+2s)^2}{16b\left(2-\exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)}-c.$$

突发事件下乳制品零售商掌握需求信息并且与乳制品生产商共享时,供应链整体收益为

$$\begin{aligned}\pi_2 &= \pi_M^2 + \pi_R^2 = \frac{(a+s)^2}{8b\left(2-\exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)} - \rho c + \\ &\frac{(a+s)^2}{16b\left(2-\exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)} - (1-\rho)c = \\ &\frac{3(a+s)^2}{16b\left(2-\exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)} - c.\end{aligned}$$

要使在信息共享时乳制品供应链的整体收益实现优化,则

$$\begin{aligned}\pi_2 - \pi_1 &= \frac{3(a+s)^2}{16b\left(2-\exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)} - c - \\ &\left(\frac{2a^2+(a+2s)^2}{16b\left(2-\exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)} - c\right) = \\ &\frac{2as-s^2}{16b\left(2-\exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)} > 0.\end{aligned}$$

由于 $b > 0, 0 < \left(2-\exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right) < 1$, 故上式可简化为 $2as-s^2 > 0$, 即当 $s < 2a$ 时, 满足 $\pi_2 - \pi_1 > 0$, 表明突发事件发生时, 信息共享可实现乳制品供应链的利益优化. 但是当 $s > 2a$ 或 $s \leq 0$ 时, 信息共享无法增加乳制品供应链的整体收益.

命题 3.1 $3\sigma < 2a$ 时, 突发事件下, 乳制品不确定需求信息分布在 X 轴左侧, 即 $0 < s < 3\sigma$ 时, 信息共享对改进乳制品供应链收益有意义.

根据正态分布性质的 3σ 法则, 随机变量 X 服从正态分布, 即 $X \sim N(\mu, \sigma^2)$ 落在 $(\mu-3\sigma, \mu+3\sigma)$ 的概率为 0.997, 落在区间外概率为 0.003, X 在区间外取值的概率非常低. 由于 $s \sim N(0, \sigma^2)$, 故当 $-3\sigma < s < 3\sigma$, 该事件才不会成为小概率事件, 因此突发事件不确定需求信息共享对于改进整个供应链的收益需要满足条件 $0 < s < 3\sigma$ 才有意义.

3.2 信息共享的帕累托最优条件

突发事件下, 只有当乳制品零售商和生产商共享不确定需求信息大于不共享信息时的利润, 才有动力支付相应成本从而分享增加的收益.

也就是说, 当 $\pi_M^2 - \pi_M^1 > 0, \pi_R^2 - \pi_R^1 > 0$ 须同时成立.

$$\begin{aligned}\pi_M^2 - \pi_M^1 &= \frac{(a+s)^2}{8b\left(2-\exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)} - \\ &\rho c - \frac{a^2}{8b\left(2-\exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)} > 0,\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\pi_R^2 - \pi_R^1 &= \frac{(a+s)^2}{16b\left(2-\exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)} - (1-\rho)c - \\ &\frac{(a+2s)^2}{16b\left(2-\exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)} + c > 0.\end{aligned}$$

求解不等式组得

$$\begin{cases} s > -a + \sqrt{8b\rho c\left(2-\exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right) + a^2}, \\ s < -a - \sqrt{8b\rho c\left(2-\exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right) + a^2} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{aligned}-a - \sqrt{a^2 + 48b\rho c\left(2-\exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)} \\ &\frac{3}{3} < s < \\ &\frac{-a + \sqrt{a^2 + 48b\rho c\left(2-\exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)}}{3} \end{aligned} \quad (2)$$

联立不等式(1)和(2)可得

$$\begin{aligned}-a + \sqrt{8b\rho c\left(2-\exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right) + a^2} < s < \\ &\frac{-a + \sqrt{a^2 + 48b\rho c\left(2-\exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)}}{3} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned}-a - \sqrt{a^2 + 48b\rho c\left(2-\exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)} \\ &\frac{3}{3} < s < \\ &-a - \sqrt{8b\rho c\left(2-\exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right) + a^2} \end{aligned} \quad (4)$$

突发事件下, 当乳制品零售商掌握的不确定需求信息满足以上条件时, 乳制品零售商和生产商均愿意共享信息并支付相应成本. 条件(3)、(4)和信息共享对于整个乳制品供应链有益的条件 $0 < s < 2a$ 结合, 形成乳制品零售商与供应商信息共享的约束条件, 即只有当满足如下条件时

$$-a + \sqrt{8b\rho c\left(2-\exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right) + a^2} < s <$$

$$\frac{-a + \sqrt{a^2 + 48b\rho c \left(2 - \exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)}}{3}$$

$$\text{s. t. } \frac{-a + \sqrt{a^2 + 48b\rho c \left(2 - \exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)}}{3} < 2a \quad (5)$$

或

$$0 < s < 2a$$

$$\text{s. t. } \frac{-a + \sqrt{a^2 + 48b\rho c \left(2 - \exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)}}{3} > 2a \quad (6)$$

才能使乳制品零售商和生产商都愿意参与信息共享.

简化式(5)、(6)可得

$$-a + \sqrt{8b\rho c \left(2 - \exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)} + a^2 < s <$$

$$\frac{-a + \sqrt{a^2 + 48b\rho c \left(2 - \exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)}}{3}$$

$$\text{s. t. } a > \sqrt{b\rho c \left(2 - \exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)}$$

$$\text{或 } a < -\sqrt{b\rho c \left(2 - \exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)} \quad (7)$$

$$0 < s < 2a$$

$$\text{s. t. } -\sqrt{b\rho c \left(2 - \exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)} < a <$$

$$\sqrt{b\rho c \left(2 - \exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)} \quad (8)$$

由于 $a > 0$, 故乳制品零售商和生产商都愿意进行信息共享的最终约束条件为

$$-a + \sqrt{8b\rho c \left(2 - \exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)} + a^2 < s <$$

$$\frac{-a + \sqrt{a^2 + 48b\rho c \left(2 - \exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)}}{3}$$

$$\text{s. t. } a > \sqrt{b\rho c \left(2 - \exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)}$$

或

$$0 < s < 2a$$

$$\text{s. t. } 0 < a < \sqrt{b\rho c \left(2 - \exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)}.$$

3.3 信息共享的激励模型

由上文分析可知, 乳制品供应链的信息共享模型(模型 2)在 $0 < s < 2a$ 条件下对整个乳制品供应链系统有效, 而只有当满足 $0 < a < \sqrt{b\rho c \left(2 - \exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)}$ 条件时, 乳制品零售商和生产商均能从信息共享中有利可图. 当 $a > \sqrt{b\rho c \left(2 - \exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)}$ 时, 只有在

$$-a + \sqrt{8b\rho c \left(2 - \exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)} + a^2 < s <$$

$$\frac{-a + \sqrt{a^2 + 48b\rho c \left(2 - \exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)}}{3}$$

时才对乳制品零售商和生产商均实现帕累托改进.

$$\text{在 } 0 < s < -a + \sqrt{8b\rho c \left(2 - \exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)} + a^2$$

时, 乳制品零售商进行信息共享反而减少了乳制品生产商的利润, 增加的利润被零售商独享, 乳制品生产商没有动力参与信息共享. 在这个条件下, 有必要建立相应激励机制, 使乳制品生产商愿意参与不确定需求信息共享.

$$\text{在 } \frac{-a + \sqrt{a^2 + 48b\rho c \left(2 - \exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)}}{3} <$$

$s < 2a$ 时, 乳制品零售商进行需求信息共享并不能增加、反而减少了其利润, 增加的利润被乳制品生产商独享. 这与既有文献的研究结论类似^[13-15]. 在该条件下, 乳制品生产商有必要建立相应激励机制, 使乳制品零售商愿意共享需求信息.

值得注意的是, 当 $s < 0$ 或 $s > 2a$ 时, 乳制品供应商激励零售商信息共享会减少自身的利润. 因此必须对模型 2 进行改进, 使模型 1 和模型 2 在部分条件下才进行信息共享, 确保在整个乳制品供应链上有效. 对突发事件下乳制品零售商掌握的不确定需求信息 s , 使其在部分条件下进行信息共享, 建立激励改进模型(模型 3).

具体激励策略如表 1 所示.

当 $s < 0$ 或 $s > 2a$ 时, 信息不共享, 采用模型 1.

当 $0 < s < 2a$, 并且 $0 < a <$

$$\sqrt{b\rho c \left(2 - \exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)}$$

时, 信息共享, 采用模型 2.

而当

$$\begin{aligned}
 & a > \sqrt{b\rho c \left(2 - \exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)}, \\
 & -a + \sqrt{8b\rho c \left(2 - \exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right) + a^2} < s < \\
 & \frac{-a + \sqrt{a^2 + 48b\rho c \left(2 - \exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)}}{3}
 \end{aligned}$$

时,信息共享,采用模型 2.

为了更清晰地描述 s 在不同取值范围应采用的信息共享激励模型,本研究将模型 3 分成模型 3' 和模型 3'', 具体情况如下:

当 $a > \sqrt{b\rho c \left(2 - \exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)}, 0 < s < -a + \sqrt{8b\rho c \left(2 - \exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right) + a^2}$ 时,对信息共享采用激励模型 3', 即激励机制为乳制品生产商在信息不共享时的利润与信息共享时利润的差值,即 $\pi_M^1 - \pi_M^2$, 乳制品零售商再将剩余增加的利润以一定比例 λ_1 与生产商进行收益共享.

模型 3' 乳制品生产商的损失

$$\begin{aligned}
 \pi_M^1 - \pi_M^2 &= \frac{a^2}{8b \left(2 - \exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)} - \\
 & \left(\frac{(a+s)^2}{8b \left(2 - \exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)} - \rho c \right);
 \end{aligned}$$

乳制品零售商信息共享增加的利润为

$$\begin{aligned}
 \pi_R^2 - \pi_R^1 &= \frac{(a+s)^2}{16b \left(2 - \exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)} - \\
 & (1-\rho)c - \left(\frac{(a+2s)^2}{16b \left(2 - \exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)} - c \right);
 \end{aligned}$$

乳制品零售商信息共享所增加利润补偿乳制品生产商减少的利润后剩余利润为

$$\begin{aligned}
 (\pi_R^2 - \pi_R^1) - (\pi_M^1 - \pi_M^2) &= \frac{(a+s)^2}{16b \left(2 - \exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)} - \\
 & (1-\rho)c - \left(\frac{(a+2s)^2}{16b \left(2 - \exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)} - c \right) - \\
 & \left(\frac{a^2}{8b \left(2 - \exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)} - \left(\frac{(a+s)^2}{8b \left(2 - \exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)} - \rho c \right) \right) =
 \end{aligned}$$

$$\frac{2as - s^2}{16b \left(2 - \exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)};$$

对剩余利润以一定比例 λ_1 进行收益共享. 由此模型 3' 中乳制品生产商和零售商收益分别为

$$\pi_M^{3'} = \frac{a^2}{8b \left(2 - \exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)} +$$

$$\lambda_1 \frac{2as - s^2}{16b \left(2 - \exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)},$$

$$\begin{aligned}
 \pi_R^{3'} &= \pi_R^2 - (\pi_M^1 - \pi_M^2) = \\
 & \frac{a^2 + 6as + 3s^2}{16b \left(2 - \exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)} -
 \end{aligned}$$

$$\rho c - \lambda_1 \frac{2as - s^2}{16b \left(2 - \exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)}.$$

当

$$a > \sqrt{b\rho c \left(2 - \exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)},$$

$$\frac{-a + \sqrt{a^2 + 48b\rho c \left(2 - \exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)}}{3} < s < 2a$$

时,对信息共享采用激励模型 3'', 即激励机制为乳制品零售商在信息不共享时的利润与信息共享时利润的差值,即 $\pi_R^1 - \pi_R^2$, 乳制品生产商将剩余增加的利润以一定比例 λ_2 进行收益共享.

模型 3'' 乳制品生产商剩余利润

$$\pi_M^2 - \pi_M^1 = \frac{(a+s)^2}{8b \left(2 - \exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)} -$$

$$\rho c - \frac{a^2}{8b \left(2 - \exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)};$$

乳制品零售商的损失

$$\pi_R^1 - \pi_R^2 = \frac{(a+2s)^2}{16b \left(2 - \exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)} + c -$$

$$\frac{(a+s)^2}{16b \left(2 - \exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)} - (1-\rho)c;$$

乳制品生产商信息共享所增加利润补偿乳制品零售商利润的损失后剩余利润为

$$(\pi_M^2 - \pi_M^1) - (\pi_R^1 - \pi_R^2) =$$

$$\frac{(a+s)^2}{8b\left(2-\exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)}-\rho c-\frac{a^2}{8b\left(2-\exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)}+\left(\frac{(a+s)^2}{16b\left(2-\exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)}-(1-\rho)c-\frac{(a+2s)^2}{16b\left(2-\exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)}+c\right)=\frac{2as-s^2}{16b\left(2-\exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)}$$

对剩余利润以一定比例 λ_2 进行收益共享,由此模型 3'' 中乳制品生产商和零售商收益分别为

$$\pi_M^3=\pi_M^2-(\pi_R^1-\pi_R^2)-$$

$$\lambda_2\frac{2as-s^2}{16b\left(2-\exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)}=\frac{2as+2a^2-s^2}{16b\left(2-\exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)}-\lambda_2\frac{2as-s^2}{16b\left(2-\exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)},$$

$$\pi_R^3=\frac{(a+2s)^2}{16b\left(2-\exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)}-c+\lambda_2\frac{2as-s^2}{16b\left(2-\exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)}$$

表 1 信息共享激励模型

Tab. 1 Information sharing incentive model

s	π_M^3	π_R^3	π_3	w_M^3
$s < 0$ (模型 1)	$\frac{a^2}{8b\left(2-\exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)}$	$\frac{(a+2s)^2}{16b\left(2-\exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)}-c$	$\frac{2a^2+(a+2s)^2}{16b\left(2-\exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)}-c$	$\frac{a}{2b}$
$0 < s < 2a$, $a < \sqrt{8b\rho c\left(2-\exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)}$ (模型 2)	$\frac{(a+s)^2}{8b\left(2-\exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)}-\rho c$	$\frac{(a+s)^2}{16b\left(2-\exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)}-(1-\rho)c$	$\frac{3(a+s)^2}{16b\left(2-\exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)}-c$	$\frac{a+s}{2b}$
$a > \sqrt{8b\rho c\left(2-\exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)}$, $0 < s < -a + \sqrt{8b\rho c\left(2-\exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right) + a^2}$ (模型 3')	$\frac{a^2}{8b\left(2-\exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)} + \lambda_1\frac{2as-s^2}{16b\left(2-\exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)}$	$\frac{a^2+6as+3s^2}{16b\left(2-\exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)}-\rho c - \lambda_1\frac{2as-s^2}{16b\left(2-\exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)}$	$\frac{3(a+s)^2}{16b\left(2-\exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)}-c$	$\frac{a+s}{2b}$
$-a + \sqrt{8b\rho c\left(2-\exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right) + a^2} < s < -a + \sqrt{a^2 + 48b\rho c\left(2-\exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)}$ (模型 2)	$\frac{(a+s)^2}{8b\left(2-\exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)}-\rho c$	$\frac{(a+s)^2}{16b\left(2-\exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)}-(1-\rho)c$	$\frac{3(a+s)^2}{16b\left(2-\exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)}-c$	$\frac{a+s}{2b}$
$-a + \sqrt{a^2 + 48b\rho c\left(2-\exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)}$ (模型 3')	$\frac{2as+2a^2-s^2}{16b\left(2-\exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)} + \lambda_2\frac{2as-s^2}{16b\left(2-\exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)}$	$\frac{(a+2s)^2}{16b\left(2-\exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)}-c + \lambda_2\frac{2as-s^2}{16b\left(2-\exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)}$	$\frac{3(a+s)^2}{16b\left(2-\exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)}-c$	$\frac{a+s}{2b}$
$s > 2a$ (模型 1)	$\frac{a^2}{8b\left(2-\exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)}$	$\frac{(a+2s)^2}{16b\left(2-\exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)}-c$	$\frac{2a^2+(a+2s)^2}{16b\left(2-\exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right)\right)}-c$	$\frac{a}{2b}$

4 算例分析

考虑一个乳制品生产商和一个零售商组成的二级乳制品供应链,突发事件发生导致需求信息的扰动,该供应链系统基本参数设置为: $T=21$ (以酸奶为例,一般而言,其生命周期为 21 d), $t=10$, $a=200$, $b=5$, $c=250$, $\rho=0.5$, $\lambda=0.5$ 。根据乳制品零售商掌握的不确定需求信息变量 s 的不同取值对乳

制品供应链系统的 3 个模型进行比较分析。模拟结果如表 2 所示。

从命题 3.1 可知, $0 < s < 3\sigma$ 条件满足,才能使突发事件下需求信息共享对于整个改进供应链的收益有意义。根据实际情况,本研究对突发事件导致不确定需求的正态分布的方差 $\sigma=5$ 和 $\sigma=100$ 这两种情形分别进行数值模拟分析,结果如表 2 所示。从表中结果可以看出, $\sigma=5$ 时, $s \in (-15, 15)$, 和 $\sigma=$

100 时, $s \in (-300, 300)$ 相比, 后者的激励模型, 即模型 3 更有效.

从模型结果可以看出, 突发事件导致不确定需求变化的情况下, 模型 3 的乳制品供应链系统整体利润优于模型 1 和模型 2, 即 $\pi_3 \geq \pi_1, \pi_3 \geq \pi_2$. 换句话说, 模型 3 结合了模型 1 和模型 2 的优势, 通过激励策略, 可以使特定条件下的信息共享激励模型, 即模型 3 达到最优. 模型 1 和模型 2 的模拟结果符合前文的分析, 信息共享满足 $0 < s < 2a$ 时, 整个乳制品供应链的收益优于信息不共享时的收益, 即 $\pi_2 \geq \pi_1$.

对于乳制品生产商, 突发事件下不进行信息共享时, 即在模型 1 下, 不确定需求信息变动不影响其利润, 零售商自己承担掌握信息所需成本和所获得的收益. 进行信息共享时, 即在模型 2 下, 不确定需求信息增加时供应商的利润增加. 值得注意的是, 在 $0 < s < -a + \sqrt{8b\rho c \left(2 - \exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right) \right) + a^2}$ 时, 信息共享能够增加整个乳制品供应链的利润, 但供应商的利润低于在模型 1 下的利润, 即 $\pi_M^1 \geq \pi_M^2$, 导致乳制品供应商没有动机参与信息共享.

表 2 模型性能比较

Tab. 2 The comparison of different models' performance

s	模型 1			模型 2			模型 3		
	π_M^1	π_R^1	π_1	π_M^2	π_R^2	π_2	π_M^3	π_R^3	π_3
-350	598.8	1 621.3	2 220.2	211.8	43.4	255.3	598.8	1 621.3	2 220.2
-300	598.8	947.7	1 546.5	24.7	-50.1	-25.4	598.8	947.7	1 546.5
-250	598.8	423.7	1 022.5	-87.6	-106.3	-193.9	598.8	423.7	1 022.5
-200	598.8	49.4	648.2	-125.0	-125.0	-250.0	598.8	49.4	648.2
-150	598.8	-175.1	423.7	-87.6	-106.3	-193.9	598.8	-175.1	423.7
-100	598.8	-250.0	348.8	24.7	-50.1	-25.4	598.8	-250.0	348.8
-50	598.8	-175.1	423.7	211.8	43.4	255.3	598.8	-175.1	423.7
-15	598.8	-33.7	565.2	387.4	131.2	518.6	598.8	-33.7	565.2
-10	598.8	-7.5	591.4	415.4	145.2	560.7	598.8	-7.5	591.4
-5	598.8	20.2	619.0	444.3	159.6	603.9	598.8	20.2	619.0
-3	598.8	31.7	630.5	456.0	165.5	621.5	598.8	31.7	630.5
-2	598.8	37.6	636.4	461.9	168.5	630.4	598.8	37.6	636.4
-1	598.8	43.5	642.3	467.9	171.4	639.3	598.8	43.5	642.3
0	598.8	49.4	648.2	473.8	174.4	648.2	598.8	49.4	648.2
1	598.8	55.4	654.3	479.8	177.4	657.2	600.3	56.9	657.2
2	598.8	61.5	660.3	485.9	180.4	666.3	601.8	64.5	666.3
3	598.8	67.6	666.5	491.9	183.5	675.4	603.3	72.1	675.4
5	598.8	80.1	678.9	504.1	189.6	693.7	606.2	87.5	693.7
10	598.8	112.3	711.1	535.2	205.1	740.3	613.4	126.9	740.3
15	598.8	146.0	744.8	567.0	221.0	788.0	620.4	167.6	788.0
50	598.8	423.7	1 022.5	810.7	342.8	1 153.5	664.3	489.2	1 153.5
100	598.8	947.7	1 546.5	1 222.4	548.7	1 771.0	711.1	1 059.9	1 771.0
150	598.8	1 621.3	2 220.2	1 708.9	792.0	2 500.9	739.2	1 761.7	2 500.9
200	598.8	2 444.7	3 043.6	2 270.3	1 072.7	3 343.0	748.5	2 594.4	3 343.0
250	598.8	3 417.8	4 016.6	2 906.6	1 390.8	4 297.3	739.2	3 558.2	4 297.3
300	598.8	4 540.6	5 139.4	3 617.7	1 746.3	5 364.0	711.1	4 652.9	5 364.0
350	598.8	5 813.1	6 412.0	4 403.6	2 139.3	6 542.9	664.3	5 878.6	6 542.9

对于乳制品零售商, 当

$$\frac{-a + \sqrt{a^2 + 48b\rho c \left(2 - \exp\left(\frac{\ln 2}{T}t\right) \right)}}{3} < s$$

时, 突发事件下不确定需求信息共享导致零售商利润下降, $\pi_R^1 \geq \pi_R^2$, 导致乳制品零售商掌握信息却没有动机共享.

因此, 必须对信息共享能增加整个乳制品供应

链的利润的情况设计合理的激励机制. 即在模型3中的部分条件下的信息共享激励模型就是针对如上情况设计的. 模型3下, 在 $0 < s < 2a$ 时, 乳制品生产商总是满足 $\pi_M^3 \geq \pi_M^1$, 而乳制品零售商则总是满足 $\pi_R^3 \geq \pi_R^1$, 即乳制品零售商和生产商均愿意参与信息共享, 使整个乳制品供应链的利润增加.

5 结论

本文考察了有一个生产商和一个零售商的二级乳制品供应链, 由于乳制品自身的信任品属性, 突发事件发生导致乳制品需求的随机扰动, 乳制品零售商由于接近市场, 掌握不确定市场需求信息, 并决定是否与乳制品生产商共享的 Stackelberg 型重复博弈. 模型求解得出, 信息共享只有在特定条件下才能实现乳制品供应链系统效益的优化, 突发事件下乳制品零售商掌握的市场需求信息的价值增值只有在特定条件下才能发生. 不同情境下, 信息共享对乳制品生产商、乳制品零售商和整个乳制品供应链的收益影响不同. 本研究设计了特定条件下的信息共享激励模型, 通过数值仿真计算结果表明, 本研究构建的激励模型有效.

本研究的创新之处在于: ①充分考虑乳制品的信任品属性和生鲜属性, 将突发事件下供应链信息共享机制的研究应用于乳制品行业, 是对乳制品供应链相关领域研究的补充. 基于乳制品的信任品属性, 突发事件引发乳制品市场需求的随机扰动, 并且基于乳制品的生鲜属性, 将新鲜度因子引入信息共享模型中, 研究乳制品供应链零售商与生产商的信息共享行为及其对供应链系统中各主体收益的影响, 并设计乳制品零售商与生产商信息共享的激励机制. ②研究结论可以为突发事件下乳制品企业信息共享决策提供借鉴参考. 本研究求解出实现乳制品供应链系统效益优化的特定条件, 能够指导企业在不同情境下选择是否共享信息, 以提升乳制品生产商、乳制品零售商和整个乳制品供应链的收益.

但是本研究的假设条件相对简化, 尚有进一步研究的空间. 首先, 突发事件本身有概率分布, 带来需求的不确定性扰动也有概率分布, 可能并非确定值. 并且, 假设未发生突发事件时价格与市场需求呈线性关系并不一定符合实际. 此外, 仅考虑乳制品零售商与生产商共享和不共享需求扰动信息两种情形, 但现实中可能存在零售商共享部分信息, 或共享信息时提供虚假信息等情形. 因此, 后续研究中将放

松假设, 在信息共享模型中考虑上述问题, 从而使乳制品供应链系统中信息共享策略的设计更贴合实际.

参考文献(References)

- [1] XIAO T, YU G, SHENG Z. Coordination of a supply chain with one manufacturer and two retailers under demand promotion and disruption management decisions[J]. *Annals of Operations Research*, 2015, 135(1): 87-109.
- [2] ESMAEILI M, ZEEPHONGSEKUL P. Seller-buyer models of supply chain management with an asymmetric information structure [J]. *International Journal of Production Economics*, 2010, 123(1): 146-154.
- [3] 吴忠和, 陈宏, 梁翠莲. 时间约束下不对称信息鲜活农产品供应链应对突发事件协调模型[J]. *中国管理科学*, 2015, 23(6): 126-134.
WU Zhonghe, CHEN Hong, LIANG Cuilian. Supply chain disruptions coordination model of fresh agricultural products under time constraints with asymmetric information [J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2015, 23(6): 126-134.
- [4] YANG J, LIU H, YU X, et al. Emergency coordination model of fresh agricultural products' three-level supply chain with asymmetric information [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2016, 2016: 2780807.
- [5] 刘浪, 吴双胜, 史文强. 信息不对称下价格随机的应急数量折扣契约研究[J]. *中国管理科学*, 2018, 26(3): 169-176.
LIU Lang, WU Shuangsheng, SHI Wenqiang. Research on emergency quantity discount contract with stochastic price under asymmetric information [J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2018, 26(3): 169-176.
- [6] 覃艳华, 曹细玉, 宋璐君. 突发事件下需求信息不对称时的供应链协调应对[J]. *运筹与管理*, 2012, 21(4): 59-64.
QIN Yanhua, CAO Xiyu, SONG Lujun. Supply chain coordination with asymmetric demand information under disruption [J]. *Operations Research and Management Science*, 2012, 21(4): 59-64.
- [7] 王夏阳. 契约激励、信息共享与供应链的动态协调[J]. *管理世界*, 2005(4): 106-115.
WANG Xiayang. The dynamic coordination of stimulation by contract, information sharing and supply chain [J]. *Management World*, 2005(4): 106-115.
- [8] 宋焕, 王瑞梅, 马威. 基于微分博弈的食品供应链溯源信

- 息共享行为协调机制研究[J]. 华中农业大学学报(社会科学版), 2018(3):144-152.
- [9] XIAO T, QI X. Price competition, cost and demand disruptions and coordination of a supply chain with one manufacturer and two competing retailers[J]. *Omega*, 2008, 36(5): 741-753.
- [10] 马新安, 张列平, 田澎. 供应链中的信息共享激励: 动态模型[J]. 中国管理科学, 2001, 9(1): 19-24.
MA Xin'an, ZHANG Lieping, TIAN Peng. Information sharing incentive in supply chain: A dynamic model[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2001, 9(1): 19-24.
- [11] WU J, ZHAI X, HUANG Z. Incentives for information sharing in duopoly with capacity constraints[J]. *Omega*, 2008, 36(6): 963-975.
- [12] 杨亚, 范体军, 张磊. 新鲜度信息不对称下生鲜农产品供应链协调[J]. 中国管理科学, 2016, 24(9):147-155.
YANG Ya, FAN Tijing, ZHANG Lei. Coordination of fresh agricultural supply chain with asymmetric freshness information[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2016, 24(9):147-155.
- [13] 周雄伟, 马费成. 需求不确定环境下的供应链信息共享激励模型[J]. 管理工程学报, 2010, 24(4):122-127.
ZHOU Xiongwei, MA Feicheng. An incentive model of information sharing in supply chain with demand uncertainty[J]. *Journal of Industrial Engineering and Engineering Management*, 2010, 24(4):122-127.
- [14] 张玉林, 陈剑. 供应链中基于 Stackelberg 博弈的信息共享协调问题研究[J]. 管理工程学报, 2004, 18(3): 118-120.
ZHANG Yulin, CHEN Jian. Study based on Stackelberg game about the information sharing coordination in supply chain [J]. *Journal of Industrial Engineering and Engineering Management*, 2004, 18(3):118-120.
- [15] HUANG Z, GANGOPADHYAY A. Information sharing in supply chain management with demand uncertainty [C]// *Advanced Topics in Information Resource Management*, Volume 5. Hertfordshire, UK: Idea Group, 2005: 44-62.

(上接第 475 页)

- [14] 汤冰, 朱旻明, 刘明侯, 等. 声激励对圆射流流场结构控制的大涡模拟[J]. 中国科学技术大学学报, 2015, 45(2): 159-167.
TANG Bing, ZHU Minming, LIU Minghou, et al. LES of flow structure control of a round jet by acoustic excitation [J]. *Journal of University of Science & Technology of China*, 2015, 45(2): 159-167.
- [15] NOIRAY N, DUROX D, SCHULLER T, et al. Mode conversion in acoustically modulated confined jets [J]. *AIAA Journal*, 2009, 47(9): 2053-2062.
- [16] YILMAZ T, KODAL A. An analysis on coaxial jet flows using different decomposition techniques [J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2000, 14(3): 359-373.
- [17] BIRBAUD A L, DUROX D, CANDEL S. Upstream flow dynamics of a laminar premixed conical flame submitted to acoustic modulations [J]. *Combustion and Flame*, 2006, 146(3): 541-552.
- [18] FAVRE A J. Review on space-time correlations in turbulent fluids [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1965, 32(2): 241-257.
- [19] OLSSON M, FUCHS L. Large eddy simulation of the proximal region of a spatially developing circular jet [J]. *Physics of Fluids*, 1996, 8(8): 2125-2137.
- [20] JEONG J, HUSSAIN F. On the identification of a vortex [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1995, 285: 69-94.
- [21] BELLOWS B D, BOBBA M K, FORTE A, et al. Flame transfer function saturation mechanisms in a swirl-stabilized combustor [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2007, 31(2): 3181-3188.
- [22] PALIES P, DUROX D, SCHULLER T, et al. Acoustic - convective mode conversion in an aerofoil cascade [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2011, 672: 545-569.