信息共享下库存量牛鞭效应的影响因素研究①

卢继周[1,2]，冯耕中[1,2]，王能民[1,2]，马云高[3]
(1. 西安交通大学管理学院，西安 710049; 2. 过程控制与效率工程教育部重点实验室，西安 710049;
3. 国网能源研究院，北京 102209)

摘要: 目前的研究多从供应链上游角度出发考虑传统牛鞭效应，而本文从供应链下游的角度研究库存量牛鞭效应得到了不一样的管理学启示. 在需求函数方面，建立的需求模型包括市场规模、价格敏感性系数等更有现实意义的要素. 在此，本文建立了包括一个零售商和一个制造商的简单两级供应链，得出了制造商在采用补充至订货点策略和最小均方差预测技术，在两种不同的信息共享模式下的库存量牛鞭效应表达式，并对他们的影响因素进行了分析. 而且通过数值分析对模型进行了验证并得到新的结果. 通过研究发现，信息共享能够显著降低制造商的库存量牛鞭效应; 零售商和制造商的库存量牛鞭效应都不受市场规模的影响; 零售商的库存量牛鞭效应在一定条件下不存在; 相比于零售商提前期，制造商提前期对制造商的库存量牛鞭效应影响更大. 同时，价格敏感性系数、价格自相关系数等因素对制造商库存量牛鞭效应也有不同程度的影响.

关键词: 信息共享; 库存量; 牛鞭效应
中图分类号: F224; F274　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1007 - 9807(2017)03 - 0136 - 12

0 引　言

牛鞭效应，或者称之为需求信息扭曲，会造成库存投入过量、服务水平下降等现象，导致供应链运行效率的低下[1-3]. 很多学者通过对牛鞭效应的研究发现需求预测的误差是导致牛鞭效应的一个重要原因[4]，因为不准确的预测将影响供应链上企业的订货计划和库存控制[5-7]. 而供应链上企业之间的信息共享被公认为是一种可以有效提高预测精度从而降低牛鞭效应的途径[8-10].

传统的牛鞭效应是指需求信息的扭曲，也就是订货量波动向上游的逐级放大现象，而在这里为什么要讨论库存量牛鞭效应[11]，也就是库存量波动相比于终端需求波动的逐级放大现象? 由于订货量牛鞭效应会造成供应链上游企业库存过量投入、产能规划误导和生产计划紊乱等不利影响[2,4]，从而会增加供应链上游企业的成本，因此，对订货量牛鞭效应的研究主要是基于供应链上游企业的视角. 然而，库存量牛鞭效应将会导致下游库存成本的上升和服务水平的下降[11]. Ma 等[11] 研究了不同预测技术对库存量牛鞭效应的影响，并结合订货量牛鞭效应构建了供应链整体牛鞭效应的衡量方法.

在供应链中有很多信息共享的方式，例如生产信息共享，库存信息共享，需求信息共享等. Lee 等[12] 在两级供应链中使用服从一阶自回归(AR(1))的需求过程研究了需求信息共享对牛鞭效应的影响. 很多研究者在 Lee 等的基础上对假设进行了放松或者采用了其他的信息共享方式[13,14]. Ma 等[15] 讨论了在一个三级供应链中三

① 收稿日期: 2014 - 04 - 28; 修订日期: 2016 - 03 - 17.
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71390333; 71572145).
作者简介: 卢继周(1989—)，男，甘肃玉门人，博士生. Email: jizhou_lu@yeah.net

种信息共享模式对订货量牛鞭效应的影响，分别是无信息共享，终端需求和订单信息共享以及终端需求信息共享. 终端需求和订单信息共享是指制造商基于终端顾客的需求和产品价格以及零售商的订货量来预测自己提前期内的需求. Ma 等[15]研究得出信息共享将不会影响零售商的订货量牛鞭效应. 但是，下游的订货量波动将会影响上游的库存量. 根据 Ma 的结论，能否做出如下推论: 信息共享不影响上游的库存量波动? 本文通过基于库存量牛鞭效应的研究，发现这一推论是不正确的，同样的信息共享方式可以在不影响零售商订货量牛鞭效应的同时，降低上游制造商的库存量波动.

在需求过程方面，自回归移动平均模型(ARIMA)得到了广泛的应用[16-18]. 特别是简单的一阶自回归模型(AR(1))[12,19,20]. 其中 Lee 等[12]就是在这样的假设之下，建立了零售商的期望库存和缺货损失模型，对牛鞭效应和期望成本进行了分析; 而 Gilbert[18]则是使用更一般的自回归移动平均模型(ARIMA(p, d, q))进行了研究.

通过对已有文献的分析发现，现有文献忽略了对信息共享下库存量牛鞭效应的研究，也缺乏对库存量牛鞭效应影响因素的分析，同时，市场终端的需求多采用 ARIMA 模型，该模型中的参数都没有现实含义，无法在现实中得到很好的解释. 而本文与现有研究的主要区别在于: 1) 在信息共享下研究库存量牛鞭效应可以解释前人研究过程中产生的疑问; 2) 对库存量牛鞭效应的决定因素进行了探讨，厘清了各因素变化对牛鞭效应的影响; 3) 采用了价格敏感性的需求函数，使对牛鞭效应影响因素的分析更具现实意义.

因此，本文建立了包括一个零售商和一个制造商的两级供应链. 零售商面临价格敏感性需求，并且价格服从一阶自回归[11,15]. 假设零售商和制造商都运用补充订货至目标库存(order-up-to)的库存策略[21,22]，制造商使用最小均方差(MMSE)技术[11,15,21]在两种信息共享模式下——无信息共享，终端需求和订单信息共享——预测自己的提前期内的需求. 由此，得出了不同信息共享模式下制造商库存量牛鞭效应的表达式，并对其影响因素进行分析.

1 基本模型

为了让模型更有现实意义，本文采用了价格敏感性的函数，即需求是价格的函数，而价格服从一阶自回归(AR(1)). 这样就将市场规模、价格敏感系数、价格自相关系数、市场冲击和需求冲击等具有现实意义的变量考虑进了模型. 因此，建立第 t 期的市场需求和价格如下

$$d_t = a - bp_t + \varepsilon_t \tag{1}$$

$$p_t = \mu + \rho p_{t-1} + \eta_t \tag{2}$$

表 1 部分变量及含义

Table 1 Variables and definitions

参数	含义
a	市场规模
b	价格敏感性系数②
d_t	第 t 期的市场需求
p_t	第 t 期的市场价格
q_t	零售商第 t 期的订货量
L_i	零售商/制造商的提前期($i = 1,2$; 1: 零售商; 2: 制造商)
I_t^i	零售商/制造商在第 t 期的净库存，即持有库存($i = 1,2$; 1: 零售商; 2: 制造商)
ε_t	零售商面临的市场冲击，与市场价格无关，服从正态分布 $\varepsilon_t \sim N(0,\sigma^2)$，且服从独立同分布($i.i.d$)
μ	决定价格均值的非负常数
ρ	价格自相关系数，$\rho \in (0,1)$
η_t	整个市场产生的价格冲击，服从正态分布 $\eta_t \sim N(0,\delta^2)$，且服从独立同分布($i.i.d$)

② 在本文中，假设市场上销售的商品都是正常商品，也就是随着价格的增加，商品的需求下降，即 $b > 0$. 在这里不考虑吉芬商品.

假设对于任意的 t 和 t' 都有 $cov(p_t, \varepsilon_{t'}) = 0$；当 $t < t'$ 时有 $cov(p_t, \eta_{t'}) = 0$. 所以可以得出，$E(d_t) = a - b\mu/(1-\rho)$，$Var(d_t) = \sigma^2 + b^2\delta^2/(1-\rho^2)$，以及 $E(p_t) = \mu/(1-\rho)$，$Var(p_t) = \delta^2/(1-\rho^2)$.

本文假设零售商采用补充至目标库存(order-up-to)的策略，根据提前期需求的预测值计算目标库存 y_t^1

$$y_t^1 = \hat{D}_t^{L_1} + z\hat{\sigma}_t^{L_1} \tag{3}$$

其中 $\hat{D}_t^{L_1}$ 是零售商提前期 L_1 内的需求预值，z 为安全因子[23]，需求预测误差 $\hat{\sigma}_t^{L_1} = \sqrt{Var(D_t^{L_1} - \hat{D}_t^{L_1})}$.

在以往的文献中，当需求过程是一阶自回归过程时，使用最小均方差(MMSE)的预测技术得到的第 $t+i$ ($i = 0,1,2\cdots$)期的市场需求的预测值 $\hat{d}_{t+i} = E(d_{t+i} \mid d_{t-1})$ [12,19,24,25]. 但本文假设需求是价格的函数，而价格服从一阶自回归. 所以类似的，当使用最小均方差预测时，根据等式(2)，可以得到以下等式成立[11,15].

$$\begin{aligned} p_{t+i} &= \mu + \rho p_{t+i-1} + \eta_{t+i} \\ &= (1+\rho)\mu + \rho^2 p_{t+i-2} + (\rho\eta_{t+i-1} + \eta_{t+i}) \\ &= \cdots = \frac{1-\rho^{i+1}}{1-\rho}\mu + \rho^{i+1}p_{t-1} + \sum_{j=0}^{i}\rho^{i-j}\eta_{t+j} \end{aligned}$$

$$\hat{p}_{t+i} = E(p_{t+i} \mid p_{t-1}) = \frac{1-\rho^{i+1}}{1-\rho}\mu + \rho^{i+1}p_{t-1}$$

那么第 $t+i$ 期($i = 0,1,2,\cdots$)的市场需求的预测值 $\hat{d}_{t+i} = a - b\hat{p}_{t+i} = a - b\left(\frac{1-\rho^{i+1}}{1-\rho}\mu + \rho^{i+1}p_{t-1}\right)$. 由此可以推出零售商提前期 L_1 内的需求预测值 $\hat{D}_t^{L_1} = \sum_{i=0}^{L_1-1}\hat{d}_{t+i} = L_1\partial + \frac{b\rho}{1-\rho}\Upsilon_{L_1}\mu - b\rho\Upsilon_{L_1}p_{t-1}$，其中 $\partial = a - \frac{b\mu}{1-\rho}$，$\Upsilon_{L_1} = \frac{1-\rho^{L_1}}{1-\rho}$.

引理1 需求预测误差是与时间无关的变量，即对于任意的 t 和 t' 都有 $\hat{\sigma}_t^{L_1} = \hat{\sigma}_{t'}^{L_1}$.

证明

$$D_t^{L_1} = \sum_{i=0}^{L_1-1}d_{t+i} = \sum_{i=0}^{L_1-1}(a - bp_{t+i} + \varepsilon_{t+i})$$

$$\begin{aligned} &Var(D_t^{L_1} - \hat{D}_t^{L_1}) \\ &= Var\left(\sum_{i=0}^{L_1-1}(a - bp_{t+i} + \varepsilon_{t+i}) - \sum_{i=0}^{L_1-1}(a - b\hat{p}_{t+i})\right) \\ &= Var\left(-b\sum_{i=0}^{L_1-1}\sum_{j=0}^{i}(\rho^{i-j}\eta_{t+j}) + \sum_{i=0}^{L_1-1}\varepsilon_{t+i}\right) \\ &= Var\left(\sum_{i=0}^{L_1-1}\varepsilon_{t+i}\right) + b^2 Var\left(\sum_{i=0}^{L_1-1}\sum_{j=0}^{i}(\rho^{i-j}\eta_{t+j})\right) \\ &= L_1\sigma^2 + \frac{b^2\delta^2}{(1-\rho)^2}\left[L_1 + \frac{\rho(1-\rho^{L_1})(\rho^{L_1+1}-\rho-2)}{1-\rho^2}\right] \end{aligned}$$

$Var(D_t^{L_1} - \hat{D}_t^{L_1})$ 是一个与 t 无关的表达式，所以 $\hat{\sigma}_t^{L_1}$ 与时间无关. 证毕.

零售商周期盘点库存，为使库存保持在 y_t^1 水平，第 t 期初向上游制造商发出订货请求 $q_t = y_t^1 - (y_{t-1}^1 - d_{t-1}) = \hat{D}_t^{L_1} - \hat{D}_{t-1}^{L_1} + z(\hat{\sigma}_t^{L_1} - \hat{\sigma}_{t-1}^{L_1}) + d_{t-1}$，由引理1得出 $q_t = \hat{D}_t^{L_1} - \hat{D}_{t-1}^{L_1} + d_{t-1}$. 所以，有以下等式成立

$$\begin{aligned} q_{t+i} = &(1-\rho^i)\partial + \rho^i q_t + \varepsilon_{t+i-1} - \rho^i\varepsilon_{t-1} - \\ &b\Upsilon_{L_1+1}\eta_{t+i-1} + b\rho^i\Upsilon_{L_1}\eta_{t-1} - \\ &b\rho^{L_1}\sum_{k=1}^{i-1}(\rho^k\eta_{t+i-k-1}) \end{aligned} \tag{4}$$

$i = 1,2,\cdots$

其中当 $Y < X$ 时 $\sum_X^Y = 0$.

2 库存量牛鞭效应

2.1 零售商的库存量牛鞭效应

在第 $t-1$ 期末，零售商观察到市场需求 d_{t-1}，并在第 t 期初根据自己的现有库存和目标库存(order-up-to level)向上游制造商发出订货请求 q_t，经过提前期 L_1 后，在第 $t+L_1$ 期初，零售商收到货物，所以可以得到零售商第 t 期的净库存

$$I_t^1 = \hat{D}_{t-L_1}^{L_1} - D_{t-L_1}^{L_1} \tag{5}$$

证明

$$I_t^1 = I_{t-1}^1 + q_{t-L_1} - d_{t-1} \Rightarrow q_t = I_{t+L_1}^1 - I_{t+L_1-1}^1 + d_{t+L_1-1}$$

Vassian[26] 和 Ma 等[11] 给出使净库存波动最小的订货量为 $q_t = \hat{D}_t^{L_1} - \sum_{i=1}^{L_1-1}q_{t-i} - I_t^1$. 其中 $\sum_{i=1}^{L_1-1}q_{t-i}$ 是零售商所有已经发出订货请求但没有收

到货物的订货量．所以有

$$\begin{aligned}
& I_{t+L_1}^1 - I_{t+L_1-1}^1 + d_{t+L_1-1} \\
&= \hat{D}_t^{L_1} - \sum_{i=1}^{L_1-1}\left(I_{t+L_1-i}^1 - I_{t+L_1-i-1}^1 + d_{t+L_1-i-1}\right) - I_t^1 \\
&= \hat{D}_t^{L_1} - \left(I_{t+L_1-1}^1 - I_t^1 + \sum_{i=0}^{L_1-2} d_{t+i}\right) - I_t^1
\end{aligned}$$

$$I_{t+L_1}^1 = \hat{D}_t^{L_1} - \sum_{i=0}^{L_1-1} d_{t+i} = \hat{D}_t^{L_1} - D_t^{L_1}$$

$$I_t^1 = \hat{D}_{t-L_1}^{L_1} - D_{t-L_1}^{L_1}$$ 证毕．

由引理 1 可以得到

$$\begin{aligned}
Var(I_t^1) &= Var(D_{t-L_1}^{L_1} - \hat{D}_{t-L_1}^{L_1}) \\
&= Var(D_t^{L_1} - \hat{D}_t^{L_1}) = L_1\sigma^2 + \frac{b^2\delta^2}{(1-\rho)^2} \times \\
&\left[L_1 + \frac{\rho(1-\rho^{L_1})(\rho^{L_1+1}-\rho-2)}{1-\rho^2}\right]
\end{aligned} \tag{6}$$

传统牛鞭效应是需求的波动逐级放大的现象，其最常见的表达形式是需求方差的比值，以本文为例即 $Var(q_t)/Var(d_t)$，比值大于 1 证明牛鞭效应存在．定义库存量牛鞭效应为库存量波动相对于终端需求波动的逐级放大现象，因此类似地，这里也采用方差比值的形式来表现库存量牛鞭效应，即 $Var(I_t)/Var(d_t)$，比值大于 1 证明牛鞭效应存在[11]．由此可以得到定理 1．

定理 1　如果零售商使用补充至目标库存策略和最小均方差预测技术，那么零售商的库存量牛鞭效应为

$$\begin{aligned}
BWE_{\text{inventory}}^1 &= \frac{Var(I_t^1)}{Var(d_t)} \\
&= L_1 + \frac{b^2\delta^2\rho}{(1-\rho)\left[(1-\rho^2)\sigma^2 + b^2\delta^2\right]} \times \\
&\left[2L_1 + (\rho^{L_1+1}-\rho-2)Y_{L_1}\right]
\end{aligned} \tag{7}$$

其中 $Var(d_t) = \sigma^2 + b^2\delta^2/(1-\rho^2)$．

由于零售商直接面对市场，市场需求和价格信息对于零售商来说都是清楚的，所以，零售商不存在信息共享的问题．因此，本文分析的重点将放在信息共享下不同因素对制造商库存量牛鞭效应的影响．

2.2　制造商的库存量牛鞭效应

当制造商在第 t 期初收到零售商的订货请求后，立刻发出相应货物．与此同时，制造商根据自己的现有库存和目标库存，开始组织生产产量 M_t，经过提前期 L_2，在第 $t+L_2$ 期初完成生产．所以制造商第 t 期的净库存为

$$I_t^2 = \hat{Q}_{t-L_2}^{L_2} - Q_{t-L_2}^{L_2} \tag{8}$$

(证明同等式(5)的证明)．

下面将分析在不同信息共享模式下制造商的库存量牛鞭效应．当没有信息共享时，制造商在预测自己提前期内的需求(即提前期 L_2 内零售商的订货量)时，只能利用零售商第 t 期的订货量 q_t．当在终端需求和订单信息共享模式下时，制造商在预测自己提前期内的需求时，除了知道零售商第 t 期的订货量 q_t 外，还可以利用零售商共享给他的终端市场的信息——市场的波动、价格的波动，反映在模型里就是 ε_{t-1} 和 η_{t-1} 在这种情况下变为常数[12-14, 27-29]．

2.2.1　没有信息共享

在这种模式下，市场波动和价格波动 ε_{t-1} 和 η_{t-1} 都是未知的变量，根据等式(4)有 $\hat{q}_{t+i}^{NIS} = E(q_{t+i} \mid q_t) = (1-\rho^i)\partial + \rho^i q_t, i = 1,2,\cdots$．所以在制造商的提前期 L_2 内，零售商的订货量的预测值为 $\hat{Q}_t^{L_2,NIS} = \sum_{i=1}^{L_2}\hat{q}_{t+i}^{NIS} = (L_2 - \rho Y_{L_2})\partial + \rho Y_{L_2}q_t$．同时，零售商在提前期 L_2 内的实际订货量为

$$\begin{aligned}
Q_t^{L_2} &= \sum_{i=1}^{L_2} q_{t+i} = (L_2 - \rho Y_{L_2})\partial + \rho Y_{L_2}q_t + \\
&\sum_{i=1}^{L_2}\varepsilon_{t+i-1} - \rho Y_{L_2}\varepsilon_{t-1} + b\rho Y_{L_1}Y_{L_2}\eta_{t-1} - \\
&b\sum_{i=1}^{L_2}(Y_{L_1+L_2-i+1}\eta_{t+i-1})
\end{aligned}$$

可以得到 $Var(Q_t^{L_2} - \hat{Q}_t^{L_2,NIS}) = (L_2 + \rho^2Y_{L_2}^2)\sigma^2 + b^2\delta^2\left(\rho^2Y_{L_1}^2Y_{L_2}^2 + \sum_{i=1}^{L_2}Y_{L_1+L_2-i+1}^2\right)$．

由此看出，$Var(Q_t^{L_2} - \hat{Q}_t^{L_2,NIS})$ 是与时间无关的变量．根据等式(8)，在没有信息共享的情况下制造商第 t 期的净库存波动量为 $Var(I_t^{2,NIS}) = Var(\hat{Q}_{t-L_2}^{L_2,NIS} - Q_{t-L_2}^{L_2}) = Var(Q_t^{L_2} - \hat{Q}_t^{L_2,NIS})$．

定理 2　如果制造商使用补充至目标库存策略和最小均方差预测技术，那么制造商在没有信息共享情况下的库存量牛鞭效应为

$$BWE_{\text{inventory}}^{2,NIS} = \frac{Var(I_t^{2,NIS})}{Var(d_t)} = \frac{1-\rho^2}{(1-\rho^2)\sigma^2 + b^2\delta^2} \times \left[(L_2 + \rho^2 Y_{L_2}^2)\sigma^2 + b^2\delta^2 \left(\rho^2 Y_{L_1}^2 Y_{L_2}^2 + \sum_{i=1}^{L_2} Y_{L_1+L_2-i+1}^2 \right) \right] \tag{9}$$

其中 $Var(d_t) = \sigma^2 + b^2\delta^2/(1-\rho^2)$.

2.2.2　终端需求和订单信息共享模式

在这种模式下，ε_{t-1} 和 η_{t-1} 都是已知的常量，根据等式(4)有 $\hat{q}_{t+i}^{IS} = E(q_{t+i} \mid q_t) = (1-\rho^i)\partial + \rho^i q_t - \rho^i \varepsilon_{t-1} + b\rho^i Y_{L_1}\eta_{t-1}, i = 1,2,\cdots$. 在制造商的提前期 L_2 内，零售商的订货量的预测值为 $\hat{Q}_t^{L_2,IS} = \sum_{i=1}^{L_2} \hat{q}_{t+i}^{IS} = (L_2 - \rho Y_{L_2})\partial + Y_{L_2}q_t - \rho Y_{L_2}\varepsilon_{t-1} + b\rho Y_{L_1}Y_{L_2}\eta_{t-1}$. 所以可以得到 $Var(Q_t^{L_2} - \hat{Q}_t^{L_2,IS}) = L_2\sigma^2 + b^2\delta^2 \sum_{i=1}^{L_2} Y_{L_1+L_2-i+1}^2$. 由此看出 $Var(Q_t^{L_2} - \hat{Q}_t^{L_2,IS})$ 是与时间无关的变量. 根据等式(8)，在终端需求和订单信息共享模式下制造商第 t 期的净库存波动量为 $Var(I_t^{2,IS}) = Var(\hat{Q}_{t-L_2}^{L_2,IS} - Q_{t-L_2}^{L_2}) = Var(Q_t^{L_2} - \hat{Q}_t^{L_2,IS})$.

定理 3　如果制造商使用补充至目标库存策略和最小均方差预测技术，那么制造商在终端需求和订单信息共享模式下的库存量牛鞭效应为

$$BWE_{\text{inventory}}^{2,IS} = \frac{Var(I_t^{2,IS})}{Var(d_t)} = \frac{1-\rho^2}{(1-\rho^2)\sigma^2 + b^2\delta^2} \times \left(L_2\sigma^2 + b^2\delta^2 \sum_{i=1}^{L_2} Y_{L_1+L_2-i+1}^2 \right) \tag{10}$$

其中 $Var(d_t) = \sigma^2 + b^2\delta^2/(1-\rho^2)$.

2.2.3　信息共享的作用

定理 4　如果制造商使用补充至目标库存策略和最小均方差预测技术，并且和零售商合作实现终端需求和订单信息共享模式，那么制造商的库存量牛鞭效应将会得到抑制.

证明

$$BWE_{\text{inventory}}^{2,IS} - BWE_{\text{inventory}}^{2,NIS} = -\frac{(1-\rho^2)\rho^2 Y_{L_2}^2}{(1-\rho^2)\sigma^2 + b^2\delta^2} \times (\sigma^2 + b^2\delta^2 Y_{L_1}^2) < 0$$

证毕.

通过定理 4 可以看到终端需求和订单信息共享模式可以有效降低库存量牛鞭效应. 但是，Ma 等[15]研究得出终端需求和订单信息共享模式将不会影响零售商的订货量牛鞭效应. 同时，下游零售商的订货量的波动直接影响上游制造商的库存计划. 那么为什么信息共享不影响零售商的订货量牛鞭效应，反而降低了制造商的库存量牛鞭效应呢? 从等式(8)中可以找到原因，其中 $Q_t^{L_2} = \sum_{i=1}^{L_2} q_{t+i}$ 是零售商在提前期 L_2 内的订货量，根据 Ma 等[15]的结论，信息共享将不会影响这一部分. 但是信息共享会使制造商对提前期内零售商订货量的预测值 $\hat{Q}_t^{L_2,NIS} = \sum_{i=1}^{L_2} \hat{q}_{t+i}^{NIS}$ 更加准确，更加接近 $Q_t^{L_2}$，这样就使得制造商的库存量 $Var(I_t^2) = Var(\hat{Q}_{t-L_2}^{L_2} - Q_{t-L_2}^{L_2})$ 的波动减小，从而抑制了制造商的库存量牛鞭效应.

3　库存量牛鞭效应的影响因素分析

在得到了零售商，制造商在不同信息共享模式下的库存量牛鞭效应后，本节讨论他们各自的库存量牛鞭效应都会受到哪些因素的影响.

3.1　零售商库存量牛鞭效应的影响因素

根据定理 1，可以看到零售商的库存量牛鞭效应不受市场规模 a 的影响，同时，也与制造商的提前期 L_2 无关.

命题 1　当零售商提前期 $L_1 = 1$ 时，零售商不存在库存量牛鞭效应.

证明

当 $L_1 = 1$ 时，等式(7)变为 $BWE_{\text{inventory}}^1 = 1 - \frac{b^2\delta^2\rho^2}{(1-\rho^2)\sigma^2 + b^2\delta^2}$. 显然，此时 $BWE_{\text{inventory}}^1 < 1$，所以不存在库存量牛鞭效应.　　证毕.

命题 2　假设 $L_1 = 2$，零售商的库存量牛鞭效应为

$$BWE_{\text{inventory}}^1 = 2 + \frac{b^2\delta^2\rho}{(1-\rho)\left[(1-\rho^2)\sigma^2 + b^2\delta^2\right]} \times \left[1 + (\rho^3 - \rho - 2)(1+\rho)\right],$$

此时有

1) 当 $0 < \rho \leqslant 0.6956$ 时，$\frac{\partial}{\partial b}BWE_{\text{inventory}}^1 > 0$，

$\frac{\partial}{\partial\sigma^2}BWE^1_{\text{inventory}} < 0$，$\frac{\partial}{\partial\delta^2}BWE^1_{\text{inventory}} > 0$；

2）当 $0.6956 < \rho < 1$ 时，$\frac{\partial}{\partial b}BWE^1_{\text{inventory}} < 0$，$\frac{\partial}{\partial\sigma^2}BWE^1_{\text{inventory}} > 0$，$\frac{\partial}{\partial\delta^2}BWE^1_{\text{inventory}} < 0$.

由命题 2 可以看到当自相关系数 ρ 处于不同区间时，零售商的库存量牛鞭效应在价格与各个参数的关系发生了很大变化. 随着 ρ 的增加，零售商的库存量牛鞭效应关于 b 和 δ^2 的导数都是先为正后为负，关于 σ^2 的导数先为负后为正，价格自相关系数 $\rho = 0.6956$ 是一个临界值. 这意味着，零售商的库存量牛鞭效应随着 b 和 δ^2 的增加，先增大后减小; 随着 σ^2 的增大，先减小后增大.

3.2 制造商库存量牛鞭效应的影响因素

命题 3 当没有信息共享时，制造商的库存量牛鞭效应与各个参数的关系如下

1）$\frac{\partial}{\partial L_1}BWE^{2,NIS}_{\text{inventory}} > 0$，$\frac{\partial}{\partial L_2}BWE^{2,NIS}_{\text{inventory}} > 0$

2）假设 $L_1 = L_2 = 1$ 时

当 $0 < \rho \leqslant 0.7549$ 时，$\frac{\partial}{\partial b}BWE^{2,NIS}_{\text{inventory}} > 0$，$\frac{\partial}{\partial\sigma^2}BWE^{2,NIS}_{\text{inventory}} < 0$，$\frac{\partial}{\partial\delta^2}BWE^{2,NIS}_{\text{inventory}} > 0$；

当 $0.7549 < \rho < 1$ 时，$\frac{\partial}{\partial b}BWE^{2,NIS}_{\text{inventory}} < 0$，$\frac{\partial}{\partial\sigma^2}BWE^{2,NIS}_{\text{inventory}} > 0$，$\frac{\partial}{\partial\delta^2}BWE^{2,NIS}_{\text{inventory}} < 0$.

3）当 $L_1 = L_2 = 1$ 时，$BWE^{2,NIS}_{\text{inventory}} > BWE^1_{\text{inventory}}$

由命题 3 可以看出，当没有信息共享时，制造商的库存量牛鞭效应随着提前期 L_1 和 L_2 的增加而增加. 假设 $L_1 = L_2 = 1$ 时，随着价格自相关系数 ρ 的增加，制造商的库存量牛鞭效应关于价格敏感性系数 b 和价格冲击 δ^2 的导数都是先为正后为负，关于市场冲击 σ^2 的导数先为负后为正. 这意味着，制造商的库存量牛鞭效应随着 b 和 δ^2 的增加，先增大后减小; 随着 σ^2 的增大，先减小后增大. 同时发现在没有信息共享时，制造商的库存量牛鞭效应不受市场规模 a 影响. 结合命题 1 当零售商提前期 $L_1 = 1$ 时零售商不存在库存量牛鞭效应，由此可以得到 $L_1 = L_2 = 1$ 时，$BWE^{2,NIS}_{\text{inventory}} > BWE^1_{\text{inventory}}$，即库存量向供应链上游逐级放大，也就是库存量牛鞭效应的定义.

命题 4 当在终端需求和订单信息共享模式下时，制造商的库存量牛鞭效应与各个参数的关系如下

1）$\frac{\partial}{\partial L_1}BWE^{2,IS}_{\text{inventory}} > 0$，$\frac{\partial}{\partial L_2}BWE^{2,IS}_{\text{inventory}} > 0$；

2）假设 $L_1 = L_2 = 1$ 时，

当 $0 < \rho \leqslant 0.8393$ 时，$\frac{\partial}{\partial b}BWE^{2,IS}_{\text{inventory}} > 0$，$\frac{\partial}{\partial\sigma^2}BWE^{2,IS}_{\text{inventory}} < 0$，$\frac{\partial}{\partial\delta^2}BWE^{2,IS}_{\text{inventory}} > 0$；

当 $0.8393 < \rho < 1$ 时，$\frac{\partial}{\partial b}BWE^{2,IS}_{\text{inventory}} < 0$，$\frac{\partial}{\partial\sigma^2}BWE^{2,IS}_{\text{inventory}} > 0$，$\frac{\partial}{\partial\delta^2}BWE^{2,IS}_{\text{inventory}} < 0$.

3）当 $L_1 = L_2 = 1$ 时，$BWE^{2,IS}_{\text{inventory}} > BWE^1_{\text{inventory}}$

由命题 4 可以看出，当在终端需求和订单信息共享模式下时，制造商的库存量牛鞭效应随着提前期 L_1 和 L_2 的增加而增加. 假设 $L_1 = L_2 = 1$ 时，随着价格自相关系数 ρ 的增加，制造商的库存量牛鞭效应关于价格敏感性系数 b 和价格冲击 δ^2 的导数都是先为正后为负，关于市场冲击 σ^2 的导数先为负后为正. 这意味着，制造商的库存量牛鞭效应随着 b 和 δ^2 的增加，先增大后减小; 随着 σ^2 的增大，先减小后增大. 同时，在终端需求和订单信息共享模式下时，制造商的库存量牛鞭效应不受市场规模 a 影响. 如命题 3 中的 3），在信息共享的情况下，也能得出库存量沿供应链逐级放大的结论.

根据命题 3 和命题 4，无论信息共享与否，制造商的库存量牛鞭效应与提前期的关系都不受其他参数的影响，都是随着 L_1 和 L_2 的增大而增大. 在现实中，随着制造商提前期 L_2 的增大，制造商需要预测的时间段变长，则面临的需求不确定性越大，需求的不确定性则会导致制造商的库存变化波动加剧，从而增加库存量牛鞭效应. 而零售商提前期 L_1 对制造商库存量牛鞭效应的影响则是间接的，零售商提前期增大使得零售商面临的需求不确定性增大，从而影响零售商的订货决策，零售商不稳定的订货量则会造成制造商库存量的波动，导致库存量牛鞭效应增大. 但是库存量牛鞭效应与价格敏感性系数 b 、市场冲击 σ^2 和价格冲击 δ^2 的关系都随着 ρ 的增大有截然不同变化，存在一个 ρ 的临界值，在这个临界值两边 b 、σ^2 和 δ^2 对库存量牛鞭效应的影响是相反的.

4 数值分析

前面用解析的方法分析了零售商和制造商的库存量牛鞭效应的影响因素，但都是在假设 $L_1 = 2$，或者 $L_1 = L_2 = 1$ 的情况下得出的，为了使本文的分析更有一般性，用数值仿真的方法分析当 $L_1 = L_2 \neq 1$ 以及 $L_1 \neq L_2$ 时，在不同信息共享模式下不同因素对制造商库存量牛鞭效应的影响③.

在数值分析中，假设 $\sigma^2 = \delta^2 = 1$，分别在提前期 $L_1 = L_2 = 2$，$L_1 = 2L_2 = 4$ 和 $L_1 = L_2/2 = 2$ 三种情况下，运用公式(9)和公式(10)分析了价格自相关系数 $\rho \in \{0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9\}$ 和价格敏感性系数 $b \in \{1, 3, 5, 7, 9\}$ 的不同组合对制造商库存量牛鞭效应的影响(如表 2、表 3 和表 4).

通过数值仿真，可以明显的看到在其他条件一样时，信息共享显著降低了制造商的库存量牛鞭效应，价格自相关系数 ρ 越大，这种效果越明显. 除此之外，还有四个新的发现.

1) 对比表 2 和表 3、表 2 和表 4，可以看到当价格自相关系数 ρ 和价格敏感性系数 b 一定时，制造商提前期 L_2 的增加所带来的制造商库存量牛鞭效应的变化(两种信息共享模式下都符合)比零售商提前期 L_1 同等变化时所带来的变化要大. 例如，当 $L_1 = L_2 = 2$ 时，且 $(\rho, b) \in \{(0.2, 5), (0.6, 9), (0.8, 3)\}$，$(BWE^{2,NIS}_{\text{inventory}}, BWE^{2,IS}_{\text{inventory}}) = \{(3.014\,2, 2.935\,4), (6.967\,0, 5.461\,7), (7.559\,7, 5.154\,3)\}$. 当 L_1 从 2 增加为 4，而 L_2 仍为 2，ρ 和 b 取值不变，制造商的库存量牛鞭效应分别为 $(BWE^{2,NIS}_{\text{inventory}}, BWE^{2,IS}_{\text{inventory}}) = \{(3.047\,0, 2.961\,9), (9.776\,2, 6.998\,1), (15.034\,8, 8.700\,0)\}$，增加幅度为 $\{(1.09\%, 0.90\%), (40.32\%, 28.13\%), (98.88\%, 68.79\%)\}$. 而当 L_2 从 2 增加为 4，L_1 仍为 2，ρ 和 b 取值不变，制造商的库存量牛鞭效应分别为 $(BWE^{2,NIS}_{\text{inventory}}, BWE^{2,IS}_{\text{inventory}}) = \{(5.982\,5, 5.897\,3), (15.244\,0, 12.459\,7), (20.323\,8, 13.854\,3)\}$，此时，增加幅度为 $\{(98.48\%, 100.90\%), (118.80\%, 128.13\%), (168.84\%, 168.79\%)\}$. 为了更直观的观察这个性质，对比 $L_1 = L_2 = 2$，$L_1 = 2L_2 = 4$ 和 $L_1 = L_2/2 = 2$ 三种情况下牛鞭效应均值的变化. 此时，不考虑 ρ，b 的影响，将所有 (ρ, b) 组合下的牛鞭效应值相加后求均值，可以得到 $(BWE^{2,NIS}_{\text{inventory}}, BWE^{2,IS}_{\text{inventory}})_{L_1=L_2=2} = (5.113\,0, 4.043\,0)$，$(BWE^{2,NIS}_{\text{inventory}}, BWE^{2,IS}_{\text{inventory}})_{L_1=2L_2=4} = (7.812\,2, 5.368\,5)$ 和 $(BWE^{2,NIS}_{\text{inventory}}, BWE^{2,IS}_{\text{inventory}})_{L_1=L_2/2=2} = (11.940\,6, 9.411\,5)$. 因此，零售商提前期增加时，制造商库存量牛鞭效应的增加幅度为 $(52.79\%, 32.78\%)$，而制造商提前期同等增加时，牛鞭效应的增加幅度为 $(133.53\%, 132.78\%)$. 可以看到增加幅度大幅提高，所以制造商提前期 L_2 比零售商提前期 L_1 对制造商库存量牛鞭效应的影响更大. 因此，如果制造商试图通过缩短提前期来减小库存量牛鞭效应，那么应把工作的重点放在减小制造商的生产提前期 L_2 上，例如改进生产工艺以提高生产效率，采用提前订货策略(advanced order)[30]以加快供应商的供货速度，采用无线射频技术(RFID)来缩短物流时间[31]，使用企业资源计划(ERP)和物料需求计划(MRP)来提高企业运行效率等.

2) 当 $L_1 = L_2 \neq 1$ 以及 $L_1 \neq L_2$ 时，不同信息共享模式下的制造商牛鞭效应关于价格敏感性系数 b 的变化趋势不再受价格自相关系数 ρ 的影响，无论 ρ 为何值，制造商的库存量牛鞭效应都是随着 b 的增加而增加. 可见，存在 ρ 的一个临界值使得 $\frac{\partial}{\partial b} BWE^{2,NIS}_{\text{inventory}}$ 和 $\frac{\partial}{\partial b} BWE^{2,IS}_{\text{inventory}}$ 在临界值两边符号不同只是 $L_1 = L_2 = 1$ 时的特殊状况. b 为价格敏感性系数，即单位价格变化引起的需求变化. b 越大意味着价格变动会引发更剧烈的需求变动，剧烈的需求变动会严重影响零售商对提前期内的需求的预测，从而导致零售商订货的波动，继而影响制造商的库存，增大库存量牛鞭效应.

3) 当价格敏感性系数 b 一定时，不同信息共享模式下的制造商牛鞭效应随着价格自相关系数 ρ 的增大呈现先增大后减小的趋势. 并且使得牛鞭效应取得最大值的 ρ 值集中在 $0.7 - 0.8$ 左右. 同时随着 b 的增加，使得牛鞭效应取得最大值的 ρ 值在逐渐减小.

③ 由于本文重点在于考察信息共享下库存量牛鞭效应的影响因素，零售商的库存量牛鞭效应不受信息共享的影响，所以在本节中不对零售商的库存量牛鞭效应进行数值分析.

表 2 当 $L_1 = L_2 = 2$ 时，不同参数组合对制造商库存量牛鞭效应的影响分析

Table 2 The influence on manufacturer's inventory BWE by different combinations of variables when $L_1 = L_2 = 2$

		ρ										
	b	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	$\rho_{\max}$	$BWE_{\max}$
$BWE^{NIS}_{\text{inventory}}$	1	2.235 3	2.564 4	3.025 0	3.651 8	4.459 8	5.407 8	6.322 9	6.739 4	5.532 5	0.791 5	6.744 5
	3	2.412 2	2.955 2	3.666 2	4.565 7	5.627 4	6.728 3	7.570 0	7.559 7	5.633 1	0.752 6	7.724 7
	5	2.439 3	3.014 2	3.760 7	4.695 9	5.786 1	6.897 2	7.717 7	7.647 6	5.642 6	0.747 9	7.846 9
	7	2.447 5	3.031 8	3.788 9	4.734 4	5.832 8	6.946 4	7.760 2	7.672 7	5.645 3	0.746 5	7.882 4
	9	2.450 9	3.039 3	3.800 8	4.750 7	5.852 4	6.967 0	7.777 9	7.683 1	5.646 4	0.745 9	7.897 3
		ρ										
	b	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	$\rho_{\max}$	$BWE_{\max}$
$BWE^{IS}_{\text{inventory}}$	1	2.222 0	2.495 6	2.830 0	3.228 1	3.676 3	4.127 4	4.462 4	4.412 1	3.380 2	0.745 3	4.512 4
	3	2.398 0	2.877 7	3.439 8	4.066 7	4.707 9	5.257 4	5.518 8	5.154 3	3.608 5	0.703 2	5.519 1
	5	2.424 9	2.935 4	3.529 7	4.186 2	4.848 1	5.401 9	5.643 9	5.233 9	3.630 1	0.697 9	5.644 0
	7	2.433 0	2.952 6	3.556 5	4.221 5	4.889 4	5.444 0	5.679 9	5.256 5	3.636 1	0.696 4	5.680 3
	9	2.436 4	2.959 9	3.567 8	4.236 4	4.906 7	5.461 7	5.695 0	5.265 9	3.638 6	0.695 7	5.695 5

表 3 当 $L_1 = 2L_2 = 4$ 时，不同参数组合对制造商库存量牛鞭效应的影响分析

Table 3 The influence on manufacturer's inventory BWE by different combinations of variables when $L_1 = 2 L_2 = 4$

		ρ										
	b	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	$\rho_{\max}$	$BWE_{\max}$
$BWE^{NIS}_{\text{inventory}}$	1	2.236 8	2.581 8	3.109 4	3.933 8	5.215 7	7.134 3	9.741 5	12.455 7	12.490 7	0.856 9	13.172 5
	3	2.414 9	2.985 9	3.812 6	5.040 3	6.848 4	9.371 7	12.455 2	15.034 8	13.742 2	0.834 1	15.311 2
	5	2.442 2	3.047 0	3.916 3	5.197 9	7.070 3	9.657 9	12.776 5	15.311 4	13.860 4	0.831 5	15.547 6
	7	2.450 3	3.065 2	3.947 1	5.244 6	7.135 6	9.741 3	12.869 1	15.390 1	13.893 6	0.830 7	15.615 3
	9	2.453 8	3.072 9	3.960 2	5.264 2	7.163 0	9.776 2	12.907 7	15.422 8	13.907 3	0.830 4	15.643 4
		ρ										
	b	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	$\rho_{\max}$	$BWE_{\max}$
$BWE^{IS}_{\text{inventory}}$	1	2.223 3	2.509 6	2.891 4	3.413 1	4.127 1	5.071 7	6.194 5	7.123 5	6.502 2	0.830 8	7.210 2
	3	2.400 4	2.902 6	3.546 2	4.378 1	5.436 1	6.703 1	7.994 0	8.700 0	7.246 9	0.800 6	8.700 0
	5	2.427 5	2.961 9	3.642 8	4.515 5	5.614 0	6.911 8	8.207 1	8.869 1	7.317 3	0.796 9	8.870 1
	7	2.435 6	2.979 7	3.671 5	4.556 2	5.666 3	6.972 6	8.268 4	8.917 2	7.337 0	0.795 9	8.918 9
	9	2.439 1	2.987 1	3.683 6	4.573 4	5.688 3	6.998 1	8.294 1	8.937 2	7.345 1	0.795 4	8.939 3

表 4 当 $L_1 = L_2/2 = 2$ 时，不同参数组合对制造商库存量牛鞭效应的影响分析

Table 4 The influence on manufacturer's inventory BWE by different combinations of variables when $L_1 = L_2/2 = 2$

		ρ										
	b	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	$\rho_{\max}$	$BWE_{\max}$
$BWE^{NIS}_{\text{inventory}}$	1	4.458 9	5.079 6	5.953 0	7.211 3	9.027 6	11.567 3	14.787 5	17.795 2	16.933 6	0.843 8	18.306 1
	3	4.812 9	5.864 1	7.255 0	9.116 3	11.580 7	14.681 1	18.066 7	20.323 8	17.488 3	0.813 8	20.373 5
	5	4.867 1	5.982 5	7.447 0	9.387 6	11.927 7	15.079 4	18.454 9	20.595 0	17.540 7	0.812 6	20.622 2
	7	4.883 4	6.018 0	7.504 1	9.467 9	12.029 7	15.195 4	18.566 8	20.672 1	17.555 4	0.809 2	20.694 2
	9	4.890 2	6.032 9	7.528 3	9.501 7	12.072 6	15.244 0	18.613 5	20.704 2	17.561 5	0.808 8	20.724 2
		ρ										
	b	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	$\rho_{\max}$	$BWE_{\max}$
$BWE^{IS}_{\text{inventory}}$	1	4.445 3	5.005 2	5.721 4	6.641 1	7.803 4	9.199 1	10.656 9	11.535 6	9.882 5	0.805 3	11.539 0
	3	4.798 4	5.780 3	6.986 0	8.444 8	10.144 0	11.960 5	13.512 8	13.854 3	10.855 4	0.769 8	13.973 4
	5	4.852 4	5.897 3	7.172 5	8.701 7	10.462 1	12.313 7	13.850 9	14.103 0	10.947 3	0.765 4	14.260 0
	7	4.868 6	5.932 3	7.228 0	8.777 8	10.555 7	12.416 6	13.948 4	14.173 7	10.973 1	0.764 1	14.342 8
	9	4.875 5	5.947 1	7.251 4	8.809 8	10.594 9	12.459 7	13.989 0	14.203 1	10.983 7	0.763 6	14.377 3

4）在命题3的3）和命题4的3）中，已经得出在 $L_1 = L_2 = 1$ 时，库存量牛鞭效应沿供应链逐级放大．这里设定 $\sigma = \delta = 1$，$b = 5$，$\rho \in (0,1)$，在 $L_1 = 2$，$L_2 = 4$ 和 $L_1 = 4$，$L_2 = 2$ 两种情况下继续探讨这一问题．（如图1所示．图中实线为零售商库存量牛鞭效应，虚线为制造商库存量牛鞭效应．图例中 BWE_R 代表零售商库存量牛鞭效应，BWE_NIS 代表无信息共享下制造商库存量牛鞭效应，BWE_IS 代表信息共享下制造商库存量牛鞭效应）

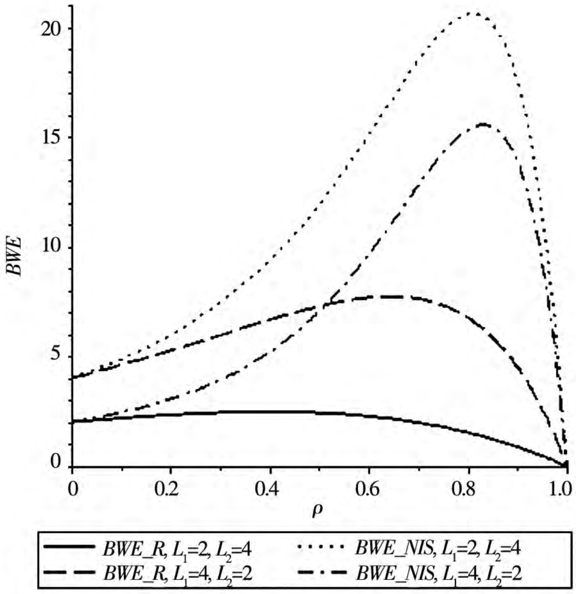

图1a　零售商库存量牛鞭效应与无信息共享下的制造商库存量牛鞭效应

Fig. 1a The retailer's inventory *BWE* and the manufacturer's inventory *BWE* without information sharing

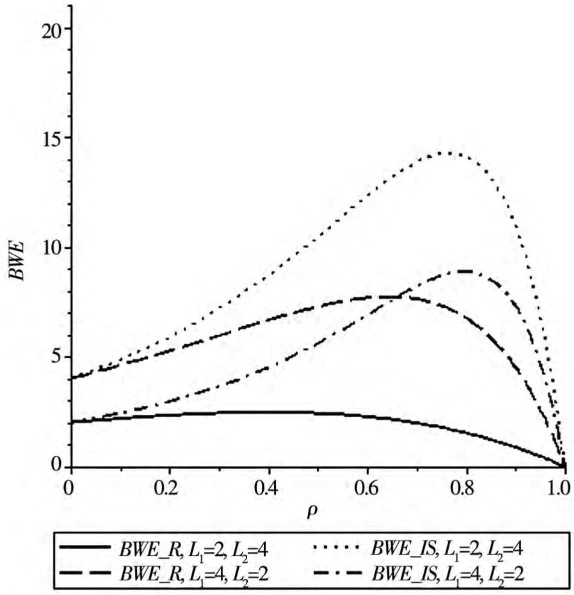

图1b　零售商库存量牛鞭效应与信息共享下的制造商库存量牛鞭效应

Fig. 1b The retailer's inventory *BWE* and the manufacturer's inventory *BWE* with information sharing

由图1可以得出如下结论．

1）对比图1a和图1b中的虚线及点画线，验证了定理4，即信息共享减弱了制造商库存量牛鞭效应；

2）无论信息共享与否，当制造商提前期相对于零售商提前期较大时（$L_1 < L_2$），都有 $BWE^2_{\text{inventory}} > BWE^1_{\text{inventory}}$，即库存的波动沿供应链逐级放大．（虚线高于实线）

3）无论信息共享与否，当制造商提前期相对于零售商提前期较小时（$L_1 > L_2$），只有当价格与时间的相关性更大时，即 ρ 更大，才会有 $BWE^2_{\text{inventory}} > BWE^1_{\text{inventory}}$．（点画线与短线交错）这是因为零售商库存量牛鞭效应只受零售商提前期 L_1 的影响，不受 L_2 的影响．同时由本节的1）可知"制造商提前期 L_2 比零售商提前期 L_1 对制造商库存量牛鞭效应的影响更大"．因此，当 L_1 增大时，会显著增加零售商的库存量牛鞭效应，但是对制造商牛鞭效应的影响却没有那么大．所以会出现在部分情况下，制造商库存量牛鞭效应小于零售商库存量牛鞭效应的情况．

5　结束语

传统的牛鞭效应研究都是聚焦在对供应链上游的考量，缺乏对供应链下游或本级供应链的分析，本文通过讨论库存量牛鞭效应，从供应链下游或本级供应链的角度考察了零售商和制造商的库存波动．从这个角度出发，研究了没有信息共享以及终端需求和订单信息共享两种模式下零售商和制造商库存量的牛鞭效应以及他们的影响因素．在需求函数方面采用了需求是价格的函数，而价格满足一阶自回归的形式，其中包含了市场规模、价格敏感系数、价格自相关系数、价格冲击、市场冲击等具有现实意义的参数．这样就避免了之前研究中需求函数里的参数缺乏管理学意义的问题，使得研究的结果更具有现实意义．

从库存量牛鞭效应的角度,发现信息共享在不影响零售商订货量牛鞭效应的同时却显著降低了制造商的库存量牛鞭效应,这是因为信息共享使制造商对于提前期内零售商需求的预测更加准确,从而降低了库存的波动. 零售商和制造商的库存量牛鞭效应都不受市场规模的影响. 另外,当零售商的提前期为 1 时,零售商不存在库存量牛鞭效应. 制造商的库存量牛鞭效应随着提前期 L_1 和 L_2 的增加而增加,但是制造商的生产提前期 L_2 对他的影响更为明显. 当在 $L_1 = L_2 = 1$ 的特殊情况下时,不同信息共享模式下的制造商库存量牛鞭效应与价格敏感性系数 b ,市场冲击 σ^2 和价格冲击 δ^2 的关系随着价格自相关系数 ρ 的不同有着截然相反的表现. 当 L_1 和 L_2 处于一般情况时,不同信息共享模式下的制造商库存量牛鞭效应随着价格敏感性系数 b 的增大而增大,随着价格自相关系数 ρ 的增大先增大后减小,当 ρ 较大时即价格与时间高度相关时,制造商的库存量牛鞭效应容易取到最大值,同时随着价格敏感性系数 b 的增加,使得牛鞭效应取得最大值的价格自相关系数在逐渐减小.

最后,本文只考虑了较为常用的 order-up-to 库存策略以及 MMSE 预测技术,下一步的研究考虑采用不同的库存策略如 (S,s) ,(r,Q) ,以及不同的预测技术如指数平滑(ES) 、移动平均(MA) 时,各个参数对零售商和制造商库存量牛鞭效应的影响.

参 考 文 献:

[1] Chen L, Lee H L. Bullwhip effect measurement and its implications [J]. Operations Research, 2012, 60(4): 771 – 784.

[2] Lee H L, Padmanabhan V, Whang S. The bullwhip effect in supply chains [J]. Sloan Management Review, 1997, 38(3): 93 – 102.

[3] Bray R L, Mendelson H. Production smoothing and the bullwhip effect [J]. M&Som-Manufacturing & Service Operations Management, 2015, 17(2): 208 – 220.

[4] Lee H L, Padmanabhan V, Whang S J. Information distortion in a supply chain: The bullwhip effect [J]. Management Sience, 1997, 43(4): 546 – 558.

[5] Zhang X, Zhao Y. The impact of external demand information on parallel supply chains with interacting demand [J]. Production and Operations Management, 2010, 19(4): 463 – 479.

[6] 褚宏睿, 冉 伦, 张 冉, 等. 基于前景理论的报童问题: 考虑回购和缺货惩罚 [J]. 管理科学学报, 2015, 18(12): 47 – 57.

Chu Hongrui, Ran Lun, Zhang Ran, et al. Prospect theory for newsvendor problems: Considering buyback and stockout penalty [J]. Journal of Management Sciences in China, 2015, 18(12): 47 – 87. (in Chinese)

[7] 聂佳佳. 需求信息预测对制造商回收再制造策略的价值 [J]. 管理科学学报, 2014, 17(1): 35 – 47.

Nie Jiajia. Value of demand information forecast on remanufacturing strategy of manufacturer [J]. Journal of Management Sciences in China, 2014, 17(1): 35 – 47. (in Chinese)

[8] Choi T, Li J, Wei Y. Will a supplier benefit from sharing good information with a retailer? [J]. Decision Support Systems, 2013, 56: 131 – 139.

[9] Cui R, Allon G, Bassamboo A, et al. Information sharing in supply chains: An empirical and theoretical valuation [J]. Management Science, 2015, 61(11): 2803 – 2824.

[10] 肖静华, 汪鸿昌, 谢 康, 等. 信息共享视角下供应链信息系统价值创造机制 [J]. 系统工程理论实践, 2014, 34(11): 2862 – 2871.

Xiao Jinghua, Wang Hongchang, Xie Kang, et al. The mechanism of value creation by supply chain information systems: A perspective of information sharing [J]. Systems Engineering: Theory & Practice, 2014, 34(11): 2862 – 2871. (in Chinese)

[11] Ma Y，Wang N，Che A，et al. The bullwhip effect on product orders and inventory：A perspective of demand forecasting techniques [J]. International Journal of Production Research，2013，51(1)：281 –302.

[12] Lee H L，So K C，Tang C S. The value of information sharing in a two-level supply chain [J]. Management Science，2000，46(5)：626 –643.

[13] Gaur V，Giloni A，Seshadri S. Information sharing in a supply chain under ARMA demand [J]. Management Science，2005，51(6)：961 –969.

[14] Raghunathan S. Information sharing in a supply chain：A note on its value when demand is nonstationary [J]. Management Science，2001，47(4)：605 –610.

[15] Ma Y，Wang N，Che A，et al. The bullwhip effect under different information-sharing settings：A perspective on price-sensitive demand that incorporates price dynamics [J]. International Journal of Production Research，2013，51(10)：3085 –3116.

[16] Disney S M，Farasyn I，Lambrecht M，et al. Taming the bullwhip effect whilst watching customer service in a single supply chain echelon [J]. European Journal of Operation Research，2006，173(1)：151 –172.

[17] Dhahri I，Chabchoub H. Nonlinear goal programming models quantifying the bullwhip effect in supply chain based on ARIMA parameters [J]. European Journal of Operational Research，2007，177(3)：1800 –1810.

[18] Gilbert K. An ARIMA supply chain model [J]. Management Science，2005，51(2)：305 –310.

[19] Agrawal S，Sengupta R N，Shanker K. Impact of information sharing and lead time on bullwhip effect and on-hand inventory [J]. European Journal of Operation Resrarch，2009，192(2)：576 –593.

[20] Pereira J，Takahashi K，Ahumada L，et al. Flexibility dimensions to control the bullwhip effect in a supply chain [J]. International Journal of Production Research，2009，47(22)：6357 –6374.

[21] Chen F，Drezner Z，Ryan J K，et al. Quantifying the bullwhip effect in a simple supply chain：The impact of forecasting，lead times，and information [J]. Management Scienve，2000，46(3)：436 –443.

[22] Leng M，Parlar M. Allocation of cost savings in a three-level supply chain with demand information sharing：A cooperative-game approach [J]. Operations Research，2009，57(1)：200 –213.

[23] Chen F，Ryan J K，Simchi-Levi D. The impact of exponential smoothing forecasts on the bullwhip effect [J]. Naval Research Logistics，2000，47(4)：269 –286.

[24] Zhang X L. The impact of forecasting methods on the bullwhip effect [J]. International Journal of Production Economics，2004，88(1)：15 –27.

[25] Sodhi M S，Tang C S. The incremental bullwhip effect of operational deviations in an arborescent supply chain with requirements planning [J]. European Journal of Operational Research，2011，215(2)：374 –382.

[26] Vassian H J. Application of discrete variable servo theory to inventory control [J]. Journal of the Operations Research Society of America，1955，3(3)：272 –282.

[27] Gavirneni S，Kapuscinski R，Tayur S. Value of information in capacitated supply chains [J]. Management Science，1999，45(1)：16 –24.

[28] Hosoda T，Disney S M. On variance amplification in a three-echelon supply chain with minimum mean square error forecasting [J]. Omega-International Journal of Management Science，2006，34(4)：344 –358.

[29] Hosoda T，Disney S M. A delayed demand supply chain：Incentives for upstream players [J]. Omega-International Journal of Management Science，2012，40(4)：478 –487.

[30] Benjaafar S，Cooper W L，Mardan S. Production-inventory systems with imperfect advance demand information and updating [J]. Naval Research Logistics (NRL)，2011，58(2)：88 –106.

[31] 范体军，张李浩，吴 锋，等. RFID 技术压缩提前期对供应链收益的影响与协调 [J]. 中国管理科学，2013，21(2)：114 –122.

Fan Tijun，Zhang Lihao，Wu Feng，et al. Effect of RFID technology on lead-time compression and coordination of supply chain's revenue [J]. Chinese Journal of Management Science, 2013, 21(2): 114 – 122. (in Chinese)

Factors affecting bullwhip effect of inventory under information sharing

LU Ji-zhou[1,2], *FENG Geng-zhong*[1,2], *WANG Neng-min*[1,2], *MA Yun-gao*[3]

1. The School of Management, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. The Key Lab of the Ministry of Education for Process Control & Efficiency Engineering, Xi'an 710049, China;
3. State Grid Energy Research Institute, Beijing 102209, China

Abstract: Many studies investigate the traditional bullwhip effect from the viewpoint of the upstream inventory plan. However, this paper studies the inventory bullwhip effect from the supply chain downstream perspective and derives new managerial implications. More practical factors, such as market scale, price sensitivity coefficient, etc. are modeled into the demand function. A simple supply chain including one retailer and one manufacturer is constructed, who adopts the order-up-to policy and MMSE technique. There are two types of information sharing between the retailer and the manufacturer. The expressions of inventory bullwhip effects of the manufacturer with different types of information sharing are given, and the factors influencing bullwhip effects are analyzed. A numerical analysis is applied to test our model and some new findings are derived. The results indicate that: 1) information sharing can significantly reduce the manufacturer's bullwhip effect of inventory, 2) neither the retailer's bullwhip effect of inventory nor the manufacturer's is influenced by the market scale, 3) the retailer's bullwhip effect of inventory will not exist under some special conditions, 4) compared with the retailer's lead time, the manufacturer's lead time affects the manufacturer's bullwhip effect of inventory more dramatically, 5) the price sensitivity coefficient and price correlation coefficient also have impacts on the bullwhip effect.

Key words: information sharing; inventory; bullwhip effect