第 19 卷第 6 期
2016 年 6 月
管理科学学报
JOURNAL OF MANAGEMENT SCIENCES IN CHINA
Vol. 19 No. 6
Jun. 2016

一种减少供应链牛鞭效应的资产组合管理方法①

陈长彬[1,2]，盛　鑫[3*]，梁永奕[3]
(1. 清华大学现代物流研究中心，北京 100083; 2. 电子科技大学中山学院，中山 528402;
3. 中山大学岭南学院，广州 510275)

摘要: 考虑一个由单个供应商和多个零售商组成的供应链系统，零售商面临无促销活动和有促销活动两种动态需求环境，采用周期性检查库存策略，基于当前市场需求信息向供应商订货. 同时，市场中的零售商由于订货决策行为的相互影响而存在一定的相关性. 本文探讨零售商之间具有不同相关性订货决策时，运用资产组合管理方法调整零售商之间的供应量，减少订货的总方差，实现减少订货所产生牛鞭效应. 随后，通过对比分析零售商订货量调整前后库存水平、库存成本、缺货损失和利润，验证了零售商调整订货量的动机和积极性. 数值算例的结果表明，运用资产组合管理方法能够减少供应商的总方差，同时能够激励具有不同相关系数的零售商调整订货量，在一定程度上减少供应链中的牛鞭效应. 零售商之间的相关系数越大，供应链中牛鞭效应减少的效果就越显著; 且在同一相关系数下，零售商对市场需求预测的方差越大，运用资产组合管理方法所达到的牛鞭效应减少的效果就越大.

关键词: 供应链; 依据水准订货策略; 牛鞭效应; 资产组合管理方法
中图分类号: F270　**文献标识码**: A　**文章编号**: 1007 -9807(2016)06 -0033 -16

0 引　言

牛鞭效应最早由宝洁公司的研究人员所发现，是指供应链中的需求变异放大现象，这种现象的存在及其对供应链的影响迅速引起了许多研究者的广泛关注，牛鞭效应主要是由于信息在供应链中传递过程的扭曲而产生的逐级放大效应，在定量模型中通常用方差变大来表示. 从 20 世纪中期至今，许多学者为探讨牛鞭效应的存在及成因，做了大量深入的研究. Lee 等提出了牛鞭效应概念的分析框架，根据该框架，牛鞭效应这个现象可从两个方面来证明，即行为层面和操作层面[1]. 行为层面主要是通过案例研究或实验室环境来验证，如系统动力学方法和啤酒游戏就是通过实验室的模拟仿真工具来进行实证分析; 操作层面则包括 16 个主要的因素，即: 需求预测，订货批量，价格波动，理性与短缺博弈[2]，提前期[3]，库存策略[4]，补货策略[5]，不当的控制系统，乘数效应[6]，缺乏透明度[7,8]，节点数，生产能力限制[9,10]，缺乏同步[11]，回馈误觉，没有全局视野的局部优化，公司流程[12].

达庆利等在前人研究的基础上，总结了减轻和削弱牛鞭效应的多种对策[13]，如信息共享[1]、VMI[14]、采购承诺和数量柔性等其他方法. Chen 等也证明了通过把需求信息集中化可以部分减少牛鞭效应[15]，万杰等也从生产商和零售商利用各自库存策略处理信息的结果得到类似的结论[16]. 近年来，关于牛鞭效应的研究也引入了控制论等

---

① 收稿日期: 2013 -06 -19; 修订日期: 2014 -10 -03.
基金项目: 广东省自然科学基金资助项目(2014A030313643); 浙江省科技计划一般软科学资助项目(2010C35004); 浙江省教育厅资助重点项目(Z200908711); 杭州市哲学社会科学重点研究基地资助项目(2012JD26); 杭州市科技计划软科学资助项目(20110934M29); 浙江省社会科学界联合会“民生调研协作攻关”专项课题资助项目(2011XN03).
通讯作者: 盛　鑫(1982—)，男，安徽亳州人，讲师，博士. Email: shengxinzsu@163.com

新方法，部分学者通过运用控制论以及 H_∞ 鲁棒控制方法探讨削减牛鞭效应的具体途径[17-21]. 有学者则从反牛鞭效应的角度来研究如何减少牛鞭效应，如李刚等最早提出并验证了供应链中反牛鞭效应的存在，为削弱牛鞭效应开辟了一个新途径[22]. 庄伟卿等也进一步从博弈论的角度论证了反牛鞭效应在减少牛鞭效应中的作用[23]. 此外，从预测方法的角度，主要探讨各种预测技术对牛鞭效应的影响[24,28].

在以往关于牛鞭效应研究中，大部分假设包含单个供应商和单个零售商所组成的两级供应链，但实际上，在许多供应链中，供应商通常面对多个零售商的订货需求，而零售商在进行订货决策时往往都要考虑彼此的决策行为，在同一市场中零售商的订货决策行为之间存在着一定的相关性. 因此，可以考虑存在多个理性的零售商向供应商订货决策时，零售商在确定市场需求时需要同时考虑彼此订货量的相互影响. 零售商之间订货量的调整可能在一定程度上减少向供应商订货的总方差，从而有利于削弱牛鞭效应，这是本文研究的主要目的. 本文将探讨存在单个供应商和多个零售商的两级供应链中，当零售商之间具有不同相关性的情况下向供应商订货的决策，并运用资产组合管理方法来减少零售商向供应商订货时所产生的牛鞭效应，这也是本文与其他研究的区别所在.

1 基本模型构建

1.1 零售商无促销活动下的模型构建

在动态需求环境下，考虑一个由单个供应商和多个零售商组成的供应链系统，零售商采用周期性检测库存策略，基于当前市场需求信息向供应商订货. 假设零售商没有采取促销行为，根据 Kahn 提出的市场需求预测模型，其基本思想认为未来的需求必然与当前的需求存在着某种关系[29]，这种关系可以表示为如下模型

$$D_{i,t} = d_i + \rho D_{i,t-1} + \varepsilon_{i,t}, \quad i = 1,2,\cdots,n \tag{1}$$

式中表示需求是一个简单的 1 阶自相关过程(AR(1)). d_i 为一个非负常数 d，ρ 为自相关系数，且 $0 < \rho < 1$；$D_{i,t}$ 表示无促销情况下第 i 个零售商在第 t 期末的需求量，$\varepsilon_{i,t}$ 表示第 i 个零售商在第 t 期的随机扰动项，且服从于 $N(0,\sigma_i^2)$ 的正态分布. 另外，为了保证避免出现负的市场需求，假设 $d_i \gg \sigma_i$. 根据上述条件，可得

$$Cov(D_{i,t}, D_{i,t-l}) = \frac{\rho^l}{1-\rho^2}\sigma_i^2 \tag{2}$$

$$Var(D_{i,t}) = \frac{\sigma_i^2}{1-\rho^2}, \ i = 1,2,\cdots,n \tag{3}$$

由 Heyman 和 Sobel 的研究结果可知[30]，对具有如式(1)所表示的需求特征的产品来说，当第 i 个零售商在时期 t 末决定订货量为 $Q_{i,t}$ 时，为了达到从订货到需求发生这段时期内的库存与缺货成本的期望值最小，即使从订货到需求发生这段时间内的利润达到最大，应采取 order-up-to(依据水准订货)的订货策略来确定该时期零售商的订货水平 $S_{i,t}$. 当零售商获知第 t 期的市场需求量 $D_{i,t}$ 后，应确定 $S_{i,t}$，并根据如下公式来确定订货量 $Q_{i,t}$，即

$$Q_{i,t} = D_{i,t} + (S_{i,t} - S_{i,t-1}) \tag{4}$$

其中

$$S_{i,t} = m_{i,t} + k\sigma\sqrt{v} \tag{5}$$

且

$$m_{i,t} = \frac{d_i}{(1-\rho)^2}\left\{(l+1) - \sum_{j=1}^{l+1}\rho^j\right\} + \frac{\rho(1-\rho^{l+1})}{1-\rho}D_{i,t} \tag{6}$$

$$v = \frac{1}{(1-\rho)^2}\sum_{i=1}^{l+1}(1-\rho^i)^2, \ k = F_S^{-1}\left(\frac{p}{p+h}\right)$$

在上述各式中，p 表示单位产品的销售利润损失，h 表示在该周期内单位产品未及时售出而需要付出的保管费用. $F_S^{-1}(\cdot)$ 表示标准正态分布函数的反函数.

由 Heyman 和 Sobel 的推导结果可知，零售商订货的最优订货依据水准应为

$$S_{R_i,t}^* = \mu_{R_i,t} + \alpha_{R_i}\sqrt{v_{R_i,t}}, \quad i = 1,2,3,\cdots,n \tag{7}$$

其中 $\mu_{R_i,t}$ 和 $v_{R_i,t}$ 分别表示基于第 t 期的市场需求量 $D_{i,t}$ 的均值和方差，则

$$\mu_{R_i,t} = E\left(\sum_{j=1}^{l+1} D_{i,t+j}/D_{i,t}\right) =$$

$$d\sum_{j=1}^{l+1}\frac{1-\rho^j}{1-\rho}+\frac{\rho(1-\rho^{l+1})}{1-\rho}D_{i,t} \quad (8)$$

$$v_{R_i,t}=Var\left(\sum_{j=1}^{l+1}D_{i,t+j}/D_{i,t}\right)=\frac{\sum_{j=1}^{l+1}(1-\rho^j)^2}{(1-\rho)^2}\sigma_i^2 \quad (9)$$

$\alpha_{R_i}=F_{R_i}^{-1}\left(\frac{p-c_{R_i}}{p-c_{R_i}+h_{R_i}}\right)$，$h_{R_i}$ 为零售商在单位时间内单位产品的保管与储存费用，$F_{R_i}^{-1}\left(\frac{p-c_{R_i}}{p-c_{R_i}+h_{R_i}}\right)$ 则为零售商所面对的市场需求量的标准正态分布函数的反函数. 从式(9)可以看出，$v_{R_i,t}$ 与期间 t 的具体取值无关，根据式(4)和式(5)，可以得到订货量 $Q_{i,t}$ 与需求量 $D_{i,t}$ 之间的关系表达式为

$$Q_{i,t}=\left(1+\frac{\rho(1-\rho^{l+1})}{1-\rho}\right)D_{i,t}-\frac{\rho(1-\rho^{l+1})}{1-\rho}D_{i,t-l},\quad i=1,2,\cdots,n \quad (10)$$

进一步地，将式(1)代入式(10)，可得

$$Q_{i,t}=\rho^{l+1}D_{i,t}+\frac{1-\rho^{l+1}}{1-\rho}(d_i+\varepsilon_{it})$$

且

$$E(Q_{i,t})=\frac{d}{1-\rho} \quad (11)$$

其中 $E(D_t)=\frac{d}{1-\rho}$.

由式(11)，零售商可以根据分析和预测的市场需求量依次决定各个期间所决定的订货数量.

1.2　零售商有促销活动下的模型构建

根据 Raghunathan 的研究结果，当零售商在前一期有促销行为时，该市场需求特征可表示为

$$DP_{i,t}=d_i+\rho D_{i,t-1}+qX_{i,t-1}+\varepsilon_{i,t-1}\quad i=1,2,\cdots,n \quad (12)$$

$DP_{i,t}$ 表示在零售商有促销活动下的市场需求，d_i 和 ρ 等参数与式(1)含义相同，q 表示当前期的需求与前一期的促销行为因素的相关性，且 $-1<q<1$，$X_{i,t-1}$ 定量地表示第 i 个零售商在第 $t-1$ 期间促销行为所导致的需求量的变化，该促销行为将影响到下一期的市场需求，设 $X_{i,t}$ ($t=1,2,3,\cdots,n$) 为一个服从正态分布的随机变量，且 $X_{i,t}\sim N(\mu_{X_i},\sigma_{X_i}^2)$，在各个不同的期间 $X_{i,t}$ 相互独立，$X_{i,t}$ 不仅影响到下一期的市场需求量，而且使得供应商不能仅仅根据所掌握的本期与前一期的市场需求信息来准确地推测下一期间的市场需求. 所以，存在多个零售商的情况下，式(1)和式(12)这两种需求特征都应该被考虑到. 根据式(12)的需求特征，零售商仍旧采取 order-up-to(依据水准订货)的订货策略，订货的最优订货依据水准应为

$$\hat{S}_{R_i,t}^*=\hat{\mu}_{R_i,t}+\alpha_{R_i}\sqrt{\hat{v}_{R_i,t}}\quad i=1,2,3,\cdots,n \quad (13)$$

在满足式(12)下，零售商是基于 $DP_{i,t}$ 和 $X_{i,t}$ 已知的条件下预测 $\sum_{j=1}^{l+1}DP_{i,t+j}$，因而，同样地，可把 $\hat{\mu}_{R_i,t}$ 和 $\hat{v}_{R_i,t}$ 分别表示为

$$\mu_{R_i,t}=E\left(\sum_{j=1}^{l+1}DP_{i,t+j}/(DP_{i,t},X_{i,t})\right)=d\sum_{j=1}^{l+1}\frac{1-\rho^j}{1-\rho}+\frac{\rho(1-\rho^{l+1})}{1-\rho}DP_{i,t}+\frac{q(1-\rho^{l+1})}{1-\rho}X_{i,t}+\sum_{j=1}^{l}\frac{q(1-\rho^j)}{1-\rho}\mu_{X_i} \quad (14)$$

$$v_{R_i,t}=Var\left(\sum_{j=1}^{l+1}DP_{i,t+j}/(DP_{i,t},X_{i,t})\right)=\frac{\sum_{j=1}^{l+1}(1-\rho^j)^2}{(1-\rho)^2}\sigma_i^2+\frac{q^2\sum_{j=1}^{l}(1-\rho^j)^2}{(1-\rho)^2}\sigma_{X_i}^2 \quad (15)$$

其中 μ_{X_i} 和 $\sigma_{X_i}^2$ 分别表示零售商促销所引起销售量变化的均值和方差.

$$\sum_{j=1}^{l+1}DP_{i,t+j}=d\sum_{j=1}^{l+1}\frac{1-\rho^j}{1-\rho}+\frac{\rho(1-\rho^{l+1})}{1-\rho}DP_{i,t}+\sum_{j=1}^{l+1}\frac{1-\rho^j}{1-\rho}\varepsilon_{i,t+l+2-j}+\sum_{j=1}^{l+1}\frac{q(1-\rho^j)}{1-\rho}X_{i,t+l+1-j} \quad (16)$$

与式(1)需求分布特征类似，由零售商订货量 $Q_{i,t}$ 与需求量 $DP_{i,t}$ 之间的关系表达式可得

$$\hat{Q}_{i,t}=\rho^{l+1}DP_{i,t}+\frac{1-\rho^{l+1}}{1-\rho}(d+qX_{i,t}+\varepsilon_{i,t}) \quad (17)$$

且 $E(\hat{Q}_{i,t})=\frac{d+q\mu_i}{1-\rho}$，同样地，零售商也可以分别根据分析和预测的需求量以及促销影响因素进行预测并决定每一期的订货数量.

1.3　零售商订货量方差分析

零售商无论是否有促销行为，根据 order-up-to level 策略进行订货量的决策，订货数量与实际的市场需求均会产生一定的方差，具体方差的产生取决于多个方面的因素，为简化分析，不妨以无促销活动下的市场需求特征为例来分析，根据式(1)、式(3)和式(4)，零售商订货量的方差可表示为

$$Var(Q_{i,t}) = \left(1 + \left(\frac{2\rho(1-\rho^{l+1})}{1-\rho} + \frac{2\rho^2(1-\rho^{l+1})^2}{(1-\rho)^2}\right)(1-\rho^l)\right)Var(D_{i,t})$$

$$i = 1,2,\cdots,n \tag{18}$$

从方程(5)可以看出，当零售商采用最优库存策略时，也就是零售商进行所谓“理性决策”将会造成信息的扭曲，即产生“牛鞭效应”. 供应链末端需求的方差将会通过提前期、订货周期、零售商之间订货的相关系数以及各个预测的参数等多个变量不断放大.

从式(10)可以得出所有零售商向供应商的总订货量为

$$Q_{R,t} = \sum_{i=1}^{n}\left(\left(1+\frac{\rho(1-\rho^{l+1})}{1-\rho}\right)D_{i,t} - \frac{\rho(1-\rho^{l+1})}{1-\rho}D_{i,t-l}\right) \tag{19}$$

方差为

$$Var(Q_{R,t}) = \left(1 + \left(\frac{2\rho(1-\rho^{l+1})}{1-\rho} + \frac{2\rho^2(1-\rho^{l+1})^2}{(1-\rho)^2}\right)(1-\rho^l)\right)\frac{1}{1-\rho^2}\sum_{i=1}^{n}\sigma_i^2 + 2\left(1+\frac{2\rho(1-\rho^{l+1})}{1-\rho}+\frac{2\rho^2(1-\rho^{l+1})^2}{(1-\rho)^2}\right)\times \sum_{i=1}^{n-1}\sum_{j=i+1}^{n}\frac{r_{ij}\sigma_i\sigma_j}{1-\rho^2} \tag{20}$$

方程(20)说明了零售商总订货量的方差取决于零售商需求量的相关性而不是每个零售商订货量之间的相关性. 当相关系数 r_{ij} 为正值时，零售商总订货量的方差将增加，反之，零售商总订货量的方差将下降. 实际上，当市场需求处于高增长时期，r_{ij} 一般取正值，但市场需求处于较平稳的时期，r_{ij} 一般取负值，原因在于较为成熟的市场增长不快，零售商要提高自己销售额，就必然从其他的零售商吸引顾客，从而构成了零和博弈. 因而，不同零售商的订货量必然有升有降，这主要取决于零售商的促销行为，但对供应商来说总订货量可能是不变的. 根据以上分析，又因为

$$\sum_{i=1}^{n}Var(Q_{i,t}) + 2\sum_{i=1}^{n-1}\sum_{j=i+1}^{n}Cov(Q_{i,t},Q_{j,t}) \leqslant \sum_{i=1}^{n}Var(Q_{i,t}) + 2\sum_{i=1}^{n-1}\sum_{j=i+1}^{n}\sqrt{Var(Q_{i,t})}\sqrt{Var(Q_{j,t})}$$

所以，可得

$$\sqrt{Var\left(\sum_{i=1}^{n}Q_{i,t}\right)} \leqslant \sum_{i=1}^{n}\sqrt{Var(Q_{i,t})} \tag{21}$$

在市场需求是随机的情况下，零售商总订货量的方差将会减小. Zinn 等认为，对于供应商来说，必须把所有零售商的需求量加总来估计总订货量方差[31]. 该理论的根据是所有零售商都是采用同一种市场促销策略，但这与实际并不相符，所以，基于所有零售商总需求量数据进行的市场预测比基于单个零售商需求量数据进行预测的结果还更不准确.

2 减少牛鞭效应的资产组合管理方法

2.1 牛鞭效应的衡量及资产组合管理方法的运用

根据 Simchi-Levi 等人的研究结果[32]，可以用式(22)衡量牛鞭效应的大小.

$$BE = \frac{Var\left(\sum_{i=1}^{n}Q_{i,t}\right) - Var\left(\sum_{i=1}^{n}D_{i,t}\right)}{Var\left(\sum_{i=1}^{n}D_{i,t}\right)} \tag{22}$$

从式(18)可以看出，当 $BE \leqslant 0$ 时，供应商需求量的方差将会减小. 进一步地，将式(18)和式(20)代入式(22)，可得

$$BE = A\left(1 - \frac{\rho^l\sum_{i=1}^{n}\sigma_i^2}{\sum_{i=1}^{n}\sigma_i^2 + 2\sum_{i=1}^{n-1}\sum_{j=i+1}^{n}r_{ij}\sigma_i\sigma_j}\right) \tag{23}$$

其中 $A = \frac{2\rho(1-\rho^{l+1})}{1-\rho} + \frac{2\rho^2(1-\rho^{l+1})^2}{(1-\rho)^2}$.

由于 $\rho > 0$，对于任何两个零售商之间的相关系数均为负值，即对于所有零售商，当 $i \neq j$ 时，所有的 $r_{ij} = -1$，从式(23)可以看出，供应商的需求量方差存在着一个最小值.

由以上分析可知，对于供应商来说，通过零售商彼此之间的信息共享可以在一定程度上减少牛鞭效应. 但是，供应商对于那些来自零售商的促销

行为等因素所产生的需求量方差却无法采取有效的措施,这将导致严重的牛鞭效应. 因而,为有效减少供应链中的牛鞭效应,可以考虑在保持市场中所有零售商订货总量不变的条件下,对每个零售量的订货数量进行调整,本文运用资产投资组合方法确定每个零售商在订货时应增加或减少的订货数量,从而通过对零售商订货数量的重新分配达到减少牛鞭效应的目的. 其原理在于根据资产投资组合理论,投资者应该进行多元化组合投资,可以产生最大的预期收益和最小的方差,借鉴该理论,要最大程度地减少供应链中的牛鞭效应可以通过最小化零售商的订货方差来实现,具体如下:

令 X_i 为第 i 个零售商的一个正的调节系数,在第 t 期,市场中实际的供应数量可以表示为 $X_iQ_{i,t}$,目标的库存量水平为 $X_iS_{i,t}$. 根据资产组合管理理论,可以通过设定一系列调节系数 X_i,$i=1,2,\cdots,n$,使总订货量的方差达到最小. 基本模型如下式所示

$$\min Var(Q_{R,t}) = Var(X_1Q_{1,t} + X_2Q_{2,t} + \cdots + X_nQ_{n,t}) \tag{24}$$

$$\text{s.t.}\begin{cases} E(X_1S_{1,t}+X_2S_{2,t}+\cdots+X_nS_{n,t}) = E(S_{1,t}+S_{2,t}+\cdots+S_{n,t}) \\ Q_{i,t} = D_{i,t} + (S_{i,t} - S_{i,t-1}) \\ \widehat{Q}_{i,t} = DP_{i,t} + (\widehat{S}_{i,t} - \widehat{S}_{i,t-1}) \end{cases}$$

$$X_i > 0, i = 1,2,\cdots,n$$

由于 $X_i > 0$,则

$$X_i < \frac{E(\sum_{i=1}^{n} S_{i,t})}{E(S_{i,t})} \quad i=1,2,\cdots,n \tag{25}$$

否则,当 $X_i < 0$ 时,则

$$X_iE(S_{i,t}) > E(\sum_{i=1}^{n} S_{i,t}) \tag{26}$$

从式(26)可知,所有其他的供货数量将为负数或 0,而这显然是不可能的.

由于两种需求特征不同的市场订货量分别可表示为

$$Q_{i,t} = D_{i,t} + (S_{i,t} - S_{i,t-1}) = \rho^{l+1}D_{i,t} + \frac{1-\rho^{l+1}}{1-\rho}(d+\varepsilon_{i,t})$$

$$\widehat{Q}_{i,t} = DP_{i,t} + (\widehat{S}_{i,t} - \widehat{S}_{i,t-1}) = \rho^{l+1}(D_{i,t}+qX_{i,t-1}) + \frac{1-\rho^{l+1}}{1-\rho}(d+qX_{i,t}+\varepsilon_{i,t})$$

则显然可知 $Var(\widehat{Q}_{i,t}) > Var(Q_{i,t})$,即通过式(1)订货所产生的牛鞭效应小于式(12)的订货的牛鞭效应,也就是零售商在前一期无促销活动情况下所确定的订货量的牛鞭效应小于有促销活动的情况. 由此可知,订货量方差还取决于前一期促销活动引起的销售量变化情况,而一般情况下,销售量变化越大,方差自然就越大. 因此,在多个零售商的情况下,零售商在前一期采取促销行为等策略来提高销售量往往导致下一期更大的牛鞭效应.

假设存在单个供应商与 R_1 和 R_2 两个零售商,正常情况下 R_1 的销售量更大,但 R_2 在 $t-1$ 期单方采取促销行为来提高需求量的情况下,如何预测本期双方的市场需求量和和决定订货量以及减小由此而产生的牛鞭效应就成了本文要研究的主要问题.

2.2　在零售商 R_2 促销条件下双方需求量相等时的模型

根据以上假设,当 R_2 在前一期通过促销手段使得两个零售商的市场平均需求量相等,即: 令 $d_i = E(Q_{i,t}) = d$,$i=1,2$. 因而,两个零售商的期望订货量是相等的. 在零售商双方独立决策的情况下,R_2 会根据式(12)的市场需求特征模型决定订货量. 在两种不同需求特征情况下,有促销活动的 R_2 订货量的方差会高于无促销活动的 R_1,即 $Var(Q_{2,t}) > Var(Q_{1,t})$,因而,从式(20)可得

$$\min Var(Q_{R,t}) = Var(X_1Q_{1,t} + X_2Q_{2,t}) \tag{27}$$

$$\text{s.t.}\begin{cases} E(X_1S_{1,t}+X_2S_{2,t}) = E(S_{1,t}+S_{2,t}) \\ 0 < X_i < \dfrac{E(S_{1,t}+S_{2,t})}{E(S_{i,t})}, i=1,2 \\ Var(Q_{2,t}) > Var(Q_{1,t}) \end{cases}$$

由于假设每个零售商的平均订货数量都是相等的,即

$$\frac{E(S_{1,t}+S_{2,t})}{E(S_{i,t})} = 2, \quad i=1,2 \tag{28}$$

把式(28)代入式(27),可得

$$\min Var(Q_{R,t}) = Var(X_1Q_{1,t} + X_2Q_{2,t}) \tag{29}$$

$$\text{s.t.}\begin{cases} X_1 + X_2 = 2 \\ 0 < X_i < 2, i=1,2 \\ Var(Q_{2,t}) > Var(Q_{1,t}) \end{cases}$$

相应地,可知总订货量 $Q_{R,t}$ 的方差为

$$Var(Q_{R,t}) = X_1^2 Var(Q_{1,t}) + (2-X_1)^2 Var(Q_{2,t}) + 2X_1(2-X_1)Cov(Q_{1,t},Q_{2,t}) \tag{30}$$

由式(29)、式(30),可得

$$X_1^* = \frac{2Var(Q_{2,t}) - 2Cov(Q_{1,t},Q_{2,t})}{Var(Q_{1,t}) + Var(Q_{2,t}) - 2Cov(Q_{1,t},Q_{2,t})} \tag{31}$$

$$X_2^* = \frac{2Var(Q_{1,t}) - 2Cov(Q_{1,t},Q_{2,t})}{Var(Q_{1,t}) + Var(Q_{2,t}) - 2Cov(Q_{1,t},Q_{2,t})} \tag{32}$$

由于 $Var(Q_{2,t}) > Var(Q_{1,t})$,所以必有 $X_1^* > X_2^*$.

2.3 在零售商 R_2 促销条件下需求量不同的模型

在式(38)中是假定 R_2 在通过促销行为销售量得到提高,因而使得原来 R_2 在需求量小于 R_1 的情况下实现双方的市场平均需求量相同,从而所有零售商向供应商订货的数量是相同的.但实际上,每个零售商的订货数量通常取决于顾客的需求量大小,如果 R_1 需求量远大于 R_2,R_2 即使通过促销手段获得一定的销售量增加,在短期内也难以在市场中获得与 R_1 平起平坐的地位.因而,R_2 可能从 R_1 夺取一部分的市场需求量,但总体上,R_2 的需求量还是要比 R_1 小.当两个零售商的订货量不同的情况下,对供应商供货数量也相应地产生影响.

假设 $d_1 \neq d_2$,$d_i = E(S_{i,t})$,由于 $E(X_1S_{1,t} + X_2S_{2,t}) = E(S_{1,t} + S_{2,t})$,可以推出 $X_1d_1 + X_2d_2 = d_1 + d_2$,所以,式(24)可重新表示为

$$\min Var(Q_{R,t}) = Var(X_1Q_{1,t} + X_2Q_{2,t}) \tag{33}$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} X_1d_1 + X_2d_2 = d_1 + d_2 \\ 0 < X_i < \dfrac{d_1 + d_2}{d_i}, i = 1,2 \\ Var(Q_{2,t}) > Var(Q_{1,t}) \end{cases}$$

由式(33)可解得

$$X_1^* = \frac{\frac{d_1}{d_2}Var(Q_{2,t}) + \frac{d_1^2}{d_2^2}Var(Q_{2,t}) - \left(1 + \frac{d_1}{d_2}\right)Cov(Q_{1,t},Q_{2,t})}{Var(Q_{1,t}) + \frac{d_1^2}{d_2^2}Var(Q_{2,t}) - \frac{2d_1}{d_2}Cov(Q_{1,t},Q_{2,t})} \tag{34}$$

$$X_2^* = \frac{\frac{d_1}{d_2}Var(Q_{1,t}) + \frac{d_1^2}{d_2^2}Var(Q_{1,t}) - \left(1 + \frac{d_1}{d_2}\right)Cov(Q_{1,t},Q_{2,t})}{Var(Q_{1,t}) + \frac{d_1^2}{d_2^2}Var(Q_{2,t}) - \frac{2d_1}{d_2}Cov(Q_{1,t},Q_{2,t})} \tag{35}$$

从式(34)、式(35)可以看出,对于零售商订货量的分配比率取决于期望订货量和订货方差.不失一般性,为简化分析,本文以零售商之间的订货需求量相等时为例来讨论.

由于式(31)、式(32)都应满足 $X_1^* > 0$,$X_2^* > 0$,又 $Var(Q_{2,t}) > Var(Q_{1,t})$,则可得到

$$r_{12} < \frac{[1 + A(1 - \rho^l)]\sigma_1}{(1 + A)\sigma_2} \tag{36}$$

从式(36)可以看出,当市场上最终消费者的需求彼此高度正相关时,即当 $r_{12} \to 1$ 时,式(34)和式(35)中无法找到一个可行解来减少总需求的方差.

根据式(31)和式(32),令 $X_1^* + X_2^* = 2$,且 $Var(Q_{2,t}) > Var(Q_{1,t})$,可以得到 $X_1^* > 1 > X_2^*$.该式说明由于 R_2 的方差比 R_1 的方差更大,结果 R_2 的实际供应量比它原来的订货量少,而 R_1 的实际供应量则比它原来的订货量大,这显然是由于前一期双方对 R_2 的促销行为所引起需求量波动而引起的本期订货量决策偏差所造成的.

2.4 采用资产组合管理方法前后零售商的分析与比较

2.4.1 调整订货量前后零售商平均总库存水平与单个零售商库存水平的分析与比较

根据 Silver 和 Peterson 的研究结果[33],对于采取 order-up-to level 策略来制定订货依据水准 $S_{i,t}^*$ 的零售商来说,由 $S_{i,t}^*$ 所引发的库存量平均水平 $I_{i,t}$ 可以近似地表示为

$$E(I_{i,t}) = S_{i,t} - E\left(\sum_{j=1}^{l+1} D_{i,t+j}\right) + \frac{E(Q_{i,t})}{2} \tag{37}$$

其中 $E\left(\sum_{j=1}^{l+1} D_{i,t+j}\right)$ 为制定 $S_{i,t}^*$ 时所考虑的需求量

$\sum_{j=1}^{l+1} D_{i,t+j}$ 的均值，$Q_{i,t}$ 仍为第 i 个零售商在第 t 期的订货量，根据上式可以推得在调整订货量前后的零售商平均总库存水平，分别表示如下

$$\sum_{i=1}^{2} E(I_R/S_{i,t}) \approx \sum_{i=1}^{2}\left(S_{i,t}-\frac{d}{1-\rho}\left(l_R+\frac{1}{2}\right)\right) \tag{38}$$

$$\sum_{i=1}^{2} E(I_R'/S_{i,t}) \approx \sum_{i=1}^{2}\left(X_i^* S_{i,t}-\frac{X_i^* d}{1-\rho}\left(l_R+\frac{1}{2}\right)\right) \tag{39}$$

由式(38)、式(39)可得 $E(I_R)-E(I_R')=0$，因而可知零售商在调整了订货量后，平均总库存水平仍然保持不变. 但对于订货量调整后每个零售商即零售商 R_1 和零售商 R_2 的平均库存水平来说，可得

$$E(I_{R_1}'/S_{1,t}) \approx X_1^*\left(S_{1,t}-\frac{d}{1-\rho}\left(l_{R_1}+\frac{1}{2}\right)\right),$$

$$E(I_{R_2}'/S_{2,t}) \approx X_2^*\left(S_{2,t}-\frac{d}{1-\rho}\left(l_{R_2}+\frac{1}{2}\right)\right)$$

由于订货量调整前零售商 R_1 和零售商 R_2 的平均库存水平分别为

$$E(I_{R_1}/S_{1,t}) \approx S_{1,t}-\frac{d}{1-\rho}\left(l_{R_1}+\frac{1}{2}\right),$$

$$E(I_{R_2}/S_{2,t}) \approx S_{2,t}-\frac{d}{1-\rho}\left(l_{R_2}+\frac{1}{2}\right)$$

且 $X_1^*>1>X_2^*>0$，所以可知 $E(I_{R_1}'/S_{1,t})>E(I_{R_1}/S_{1,t})$，$E(I_{R_2}'/S_{2,t})<E(I_{R_2}/S_{2,t})$ 即在调整订货量后，R_1 的平均库存水平增加了，而 R_2 则降低了. 由此可见，根据库存水平的大小，R_2 更有积极性调整订货量的数量. 但实际上库存成本只是其中一个部分，零售商更全面考虑的是库存机会成本，包括库存成本与缺货损失的成本之和. 因而，以下综合讨论零售商在调整订货量前后的库存机会成本.

2.4.2 调整订货量前后零售商库存机会成本的分析与比较

R_1 在未调整订货量前的库存成本与短缺损失的表达式为

$$E(C_{R_1}(Q_{1,t}))=h_R\int_0^{S_{1,t}}(S_{1,t}-Q_{1,t})f(Q_{1,t})\,dQ_{1,t}+(p-c_R)\int_{S_{1,t}}^{\infty}(Q_{1,t}-S_{1,t})f(Q_{1,t})\,dQ_{1,t} \tag{40}$$

由正态分布的性质，令 $\alpha_{R_1}=\frac{S_{1,t}-\mu_{R_1t}}{\sqrt{v_{R_1t}}}$，则

$$E(C_{R_1}(Q_{1,t}))=[(p-c_{R_1})+h_{R_1}]\times[\alpha_{R_1}F_{R_1}(\alpha_{R_1})+f_{R_1}(\alpha_{R_1})]\sqrt{v_{R_1t}}-2(p-c_{R_1})\alpha_{R_1}\sqrt{v_{R_1t}} \tag{41}$$

该式即为 R_1 在未调整订货量时库存成本与缺货损失的均值，而 $S_{1,t}$ 是使 R_1 库存成本与缺货损失的均值达到最小的最优订货水准. 同样地，$S_{1,t}$ 也是使得零售商在调整订货量后的最优订货水准，则 R_1 在调整订货量后的库存成本与短缺损失成本的表达式为

$$E(C_{R_1}'(X_1Q_{1,t}))=h_R\int_0^{S_{1,t}}(S_{1,t}-X_1Q_{1,t})f(X_1Q_{1,t})\,d\times(X_1Q_{1,t})+(p-c_R)\int_{S_{1,t}}^{\infty}(X_1Q_{1,t}-S_{1,t})f(X_1Q_{1,t})\,d(X_1Q_{1,t})$$

令 $\alpha_{R_1}'=\frac{S_{1,t}-X_1\mu_{R_1t}}{\sqrt{v_{R_1t}'}}$，则

$$E(C_{R_1}'(X_1Q_{1,t}))=[(p-c_{R_1})+h_{R_1}]\times[\alpha_{R_1}'F_{R_1}(\alpha_{R_1}')+f_{R_1}(\alpha_{R_1}')]\sqrt{v_{R_1,t}'}-2(p-c_{R_1})\alpha_{R_1}'\sqrt{v_{R_1,t}'} \tag{42}$$

对于 R_1 在未调整订货量时需求量的期望值应为 $\mu_{R_1,t}$，方差应为 $v_{R_1,t}$，而 R_1 在调整订货量后的订货量期望值应为 $X_1\mu_{R_1,t}$，方差应为 $v_{R_1,t}'$，因而，由上述两式可以分别得到

$$E(C_{R_1}(Q_{1,t}))=[(p-c_{R_1})+h_{R_1}]\times f_{R_1}(\alpha_{R_1})\sqrt{v_{R_1t}}\ \text{且}\ \alpha_{R_1}=\frac{S_{1,t}-\mu_{R_1t}}{\sqrt{v_{R_1t}}} \tag{43}$$

$$E(C_{R_1}'(X_1Q_{1,t}))=[(p-c_{R_1})+h_{R_1}]\times f_{R_1}(\alpha_{R_1}')\sqrt{v_{R_1,t}'}\quad \text{且}\ \alpha_{R_1}'=\frac{S_{1,t}-X_1\mu_{R_1t}}{\sqrt{v_{R_1t}'}} \tag{44}$$

由于 R_1 在前一期未采取促销手段而导致销售量下降并使得当期在预测市场需求量时方差较大，因而通过调整订货量后，乘以某一调整系数 X_1，且 $X_1>1$，将使得方差显著减小，又可知 $v_{R_1t}'<v_{R_1t}$ 且可以推得 $\alpha_{R_1}'<\alpha_{R_1}$，从而 $f_{R_1}(\alpha_{R_1}')<f_{R_1}(\alpha_{R_1})$，则可知 $E(C_{R_1}'(x))<E(C_{R_1}(x))$，即

当 R_1 在调整订货量后的库存成本与短缺损失小于调整订货量前的库存成本与短缺损失. 重复以上过程,可以同样得到 R_2 在调整订货量前后的库存成本与缺货损失的均值,即

$$E(C_{R_2}(Q_{2,t})) = [2(p-c_{R_2})+h_{R_2}] \times f_{R_2}(\alpha_{R_2})\sqrt{v_{R_2t}} \quad 且 \alpha_{R_2} = \frac{S_{2,t}-\mu_{R_2t}}{\sqrt{v_{R_2t}}} \tag{45}$$

$$E(C'_{R_2}(X_2Q_{2,t})) = [2(p-c_{R_2})+h_{R_2}] \times f_{R_2}(\alpha'_{R_2})\sqrt{v'_{R_2t}}$$

且

$$\alpha'_{R_2} = \frac{S_{2,t}-X_2\mu_{R_2t}}{\sqrt{v'_{R_2t}}} \tag{46}$$

考虑 R_2 在上一期的促销行为导致销售量的明显增加,在本期没有促销行为的正常销售情况下,根据 order-up-to level 策略进行预测,而当期的订货量主要考虑的因素之一是前一期的市场需求量,因而往往导致比平时更大订货量,也就是方差比其他时期要更高. R_2 在进行订货时由于前一期的销售惯性,订货量的均值超过最优订货依据水准,即 $S_{2,t}<\mu_{R_2t}$,因而通过资产组合管理方法,赋予调整系数 X_2,且 $0<X_2<1$,使得订货量均值有所减少,方差相应减小,从而使得 $S_{2,t}-X_2\mu_{R_2t}$ 的绝对值小于 $S_{2,t}-\mu_{R_2t}$ 的绝对值,也就是 $X_2\mu_{R_2t}$ 的订货量均值优于 μ_{R_2t}. 在一般情况下,订货量变动幅度大于方差的变动幅度,所以尽管可知 $v'_{R_2t}<v_{R_2t}$,但由于 $S_{2,t}-X_2\mu_{R_2t}$ 的绝对值变动幅度更大,从而可推得 $\alpha'_{R_2}<\alpha_{R_2}$,使得 $f_{R_2}(\alpha'_{R_2})<f_{R_2}(\alpha_{R_2})$,因此,从以上分析可知,$E(C'_{R_2}(x))<E(C_{R_2}(x))$,即当 R_2 在调整订货量后的库存成本与短缺损失也小于调整订货量前的库存成本与短缺损失.

从以上对 R_1 和 R_2 在调整订货量前后的库存成本与短缺损失来看,通过赋予某个调整因子调整订货量后,R_1 和 R_2 的库存成本与短缺损失均减小了.

2.4.3 调整订货量前后零售商利润的分析与比较

本文用 $\Pi_{R_1}(Q_{R_1t})$、$\Pi_{R_2}(Q_{R_2t})$ 和 $\Pi'_{R_1}(Q_{R_1t})$、$\Pi'_{R_2}(Q_{R_2t})$ 分别表示 R_1 和 R_2 在调整订货量前后的期望利润,则 R_1 在调整订货量前后的期望利润分别为

$$\Pi_{R_1}(Q_{R_1t}) = \int_0^{S_{1,t}} [(p-c_R+h_R)Q_{1,t}-h_RS_{1,t}] \times f(Q_{1,t})\,dQ_{1,t} + \int_{S_{1,t}}^{\infty} [(p-c_R)(2S_{1,t}-Q_{1,t})]f(Q_{1,t})\,dQ_{1,t} \tag{47}$$

则 R_1 在未调整订货量前的期望利润可表示为

$$\Pi_{R_1}(Q_{R_1t}) = (p-c_R)\mu_{R_1t}+2(p-c_R)\alpha_{R_1}\sqrt{v_{R_1t}} - [2(p-c_R)+h_R][\alpha_{R_1}F_R(\alpha_{R_1})+f_R(\alpha_{R_1})]\sqrt{v_{R_1t}} \tag{48}$$

R_1 在调整订货量后的期望利润可表示为

$$\Pi'_{R_1}(Q_{R_1t}) = (p-c_R)X_1\mu_{R_1t}+2(p-c_R)\alpha'_{R_1}\sqrt{v'_{R_1t}} - [2(p-c_R)+h_R][\alpha'_{R_1}F_R(\alpha'_{R_1})+f_R(\alpha'_{R_1})]\sqrt{v'_{R_1t}} \tag{49}$$

由于 R_1 的最优订货依据水准是库存成本与缺货损失的期望值最小,即期望利润最大的订货依据水准. 因而,在单个供应商和单个零售商的供应链中,零售商根据最优订货依据水准 S_t 订货所取得的期望利润是最大的,但在单个供应商和多个零售商的供应链中,由于零售商彼此之间的竞争关系,零售商根据最优订货依据水准 S_t 来进行订货量的决策往往达不到最优,因为零售商之间的决策互相影响,最终经常偏离最优订货量的决策. 在本文中,以两个零售商为例,通过赋予 R_1 调整系数,实现减少与最优订货量的偏差,从而在一定程度削弱了牛鞭效应,并有效地降低了成本,所以可知,$\Pi'_{R_1}(Q_{R_1t})>\Pi_{R_1}(Q_{R_1t})$,即通过调整 R_1 的订货数量,使得其利润比未调整前提高了. 同理,也可得到 $\Pi'_{R_2}(Q_{R_2t})>\Pi_{R_2}(Q_{R_2t})$,即通过调整 R_2 的订货数量,也使其利润比未调整前提高了.

2.4.4 供应商的需求方差

零售商在调整订货量前的供应商需求量方差可以表示为

$$Var(Q_{R,t}) = Var(Q_{1,t}) + Var(Q_{2,t}) + 2Cov(Q_{1,t},Q_{2,t})$$

而在零售商调整订货量后,供应商需求量的方差可表示为

$$Var(Q^*_{R,t}) = X_1^{*2}(Var(Q_{1,t}) + Var(Q_{2,t}) -$$

$$2Cov(Q_{1,t},Q_{2,t})) - 4X_1^*(Var(Q_{2,t}) - Cov(Q_{1,t},Q_{2,t}) + 4Var(Q_{2,t})) \quad (50)$$

把式(31) 代入式(50) ,得

$$Var(Q_{R,t}^*) = \frac{4(Var(Q_{1,t})Var(Q_{2,t}) - (Cov(Q_{1,t},Q_{2,t}))^2)}{Var(Q_{1,t}) + Var(Q_{2,t}) - 2Cov(Q_{1,t},Q_{2,t})} \quad (51)$$

因此,对于供应商的需求量方差的减少数值大小为

$$Var(Q_{R,t}) - Var(Q_{R,t}^*) = \frac{(Var(Q_{1,t}) - Var(Q_{2,t}))^2}{Var(Q_{1,t}) + Var(Q_{2,t}) - 2Cov(Q_{1,t},Q_{2,t})}$$

由上式,可以进一步求得供应商需求量减少的方差的比率为

$$\frac{Var(Q_{R,t}) - Var(Q_{R,t}^*)}{Var(Q_{R,t})} = \frac{(Var(Q_{1,t}) - Var(Q_{2,t}))^2}{(Var(Q_{1,t}) + Var(Q_{2,t}))^2 - 4(Cov(Q_{1,t},Q_{2,t}))^2} \quad (52)$$

基于资产组合方法对零售商的订货量进行调整后,由式(23) 可分别得

$$BE = A\left(1 - \frac{\rho^l(Var(D_{1,t}) + Var(D_{2,t}))}{Var(D_{1,t} + D_{2,t})}\right),$$

$$BE^* = A\left(1 - \frac{\rho^l(Var(X_1^* D_{1,t}) + Var(X_2^* D_{2,t}))}{Var(X_1^* D_{1,t} + X_2^* D_{2,t})}\right)$$

则由式(31) 、式(32) 可得

$$\Delta BE = BE - BE^* = A\rho^l \frac{(8(1+A)(1+A(1-\rho^l))(Cov(D_{1,t},D_{2,t}))^2(Var(D_{2,t}) - Var(D_{1,t}))^2)}{(Var(X_1^* D_{1,t} + X_2^* D_{2,t})Var(D_{1,t} + D_{2,t})(Var(Q_{1,t} - Q_{2,t}))^2)} \geqslant 0$$

其中 $\Delta = 2Cov(D_{1,t},D_{2,t})(X_1^* - X_2^*)(X_1^* Var(D_{1,t}) - X_2^* Var(D_{2,t}))$ 所以,$BE \geqslant BE^*$ (当 $Cov(D_{1,t},D_{2,t}) = 0$ 时,$BE = BE^*$),供应商的需求量方差变小了.

3 算例分析

假设存在单个供应商和两个零售商的供应链,两个零售商分别向供应商订货,订货提前期为 l. 令 $d = 100$,$\rho = 0.5$,$l = 3$,$\sigma_1 = 10$,$\sigma_2 = k\sigma_1$ (k 为大于 1 的实数) ,$r_{12} = -0.5$. 由 $r_{12} = -0.5$ 和式(29) 可知,$r_{12} = -0.5 < 0 < \frac{[1 + A(1-\rho^l)]\sigma_1}{(1+A)\sigma_2}$,可得以下各式:

1) R_1 与 R_2 之间无信息共享的情况下,两个零售商分别就订货量进行独立决策,此时,零售商向供应商订货的总需求量方差用 $Var(Q_{R,t}^N)$ 表示,可得

$$Var(Q_{R,t}^N) = Var(Q_{1,t}) + Var(Q_{2,t}) = \frac{106\,975}{192}(1 + k^2) \quad (53)$$

2) R_1 与 R_2 之间有信息共享的情况下,两个零售商分别就订货量进行决策存在一定的相关性,零售商向供应商订货的总需求量方差用 $Var(Q_{R,t})$ 表示,可得

$$Var(Q_{R,t}) = Var(Q_{1,t}) + Var(Q_{2,t}) + 2Cov(Q_{1,t},Q_{2,t}) = \frac{106\,975}{192}(1 + k^2) - \frac{14\,825}{48}k \quad (54)$$

3) R_1 与 R_2 之间无信息共享的情况下,采用资产组合方法,零售商向供应商订货的总需求量方差用 $Var(Q_{R,t}^*)$ 表示,可得

$$Var(Q_{R,t}^*) = \frac{4\left(\left(\frac{106\,975k}{192}\right)^2 - \left(\frac{14\,825k}{96}\right)^2\right)}{\frac{106\,975}{192}(1 + k^2) + \frac{14\,825}{48}k} \quad (55)$$

进一步地,可以把 r_{12} 的取值推广至一般的情况,分别取各个不同的相关系数,同时其余的参数分别仍旧取原来的值,即 $r_{12} = -0.1 \sim -0.9$ 时,k 分别取 1.2,1.4,1.6,1.8 以及 2.0,如表 1 所示. 同样地,当 $r_{12} = 0.1 \sim 0.9$ 时,k 分别取 1.2,1.4,1.6,1.8 以及 2.0,如表 2 所示. 另外,根据前文的分析

$$r_{12} < \frac{[1 + A(1-\rho^l)]\sigma_1}{(1+A)\sigma_2} \quad (56)$$

即式(56) 必须成立,且满足 $X_1^* > 0$,$X_2^* > 0$,$X_1^* > 1 > X_2^*$,分别代入各个参数,可得

1) 当 $r_{12} < 0$ 时

表 1 数值模拟中的参数设定($r_{12} < 0$)

Table 1 Parameter setting for numeric simulation($r_{12} < 0$)

r	k	$Var(Q_{1,t})$	$Var(Q_{2,t})$	$Var(Q^N_{R,t})$	$Var(Q_{R,t})$	$Var(Q^*_{R,t})$	Δ	$\frac{\Delta}{Var(Q_{R,t})}$	X_1^*	X_2^*
−0.1	1.2	557.161 5	802.312 5	1 359.473 96	1 211.223 96	1 171.363 191	39.860 77	0.032 909	1.162 597	0.837 403
	1.4	557.161 5	1 092.036	1 649.197 92	1 476.239 58	1 319.232 595	157.007	0.106 356	1.293 54	0.706 46
	1.6	557.161 5	1 426.333	1 983.494 79	1 785.828 13	1 439.471 488	346.356 6	0.193 947	1.398 49	0.601 51
	1.8	557.161 5	1 805.203	2 362.364 58	2 139.989 58	1 537.372 588	602.617	0.281 598	1.482 85	0.517 15
	2.0	557.161 5	2 228.646	2 785.807 29	2 538.723 96	1 617.536 761	921.187 2	0.362 854	1.551 119	0.448 881
−0.2	1.2	557.161 5	802.312 5	1 359.473 96	1 062.973 96	1 026.681 701	36.292 26	0.034 142	1.148 04	0.851 96
	1.4	557.161 5	1 092.036	1 649.197 92	1 303.281 25	1 159.885 343	143.395 9	0.110 027	1.268 092	0.731 908
	1.6	557.161 5	1 426.333	1 983.494 79	1 588.161 46	1 270.585 026	317.576 4	0.199 965	1.365 378	0.634 622
	1.8	557.161 5	1 805.203	2 362.364 58	1 917.614 58	1 362.735 915	554.878 7	0.289 359	1.444 599	0.555 401
	2.0	557.161 5	2 228.646	2 785.807 29	2 291.640 63	1 439.847 272	851.793 4	0.371 696	1.509 603	0.490 397
−0.3	1.2	557.161 5	802.312 5	1 359.473 96	914.723 958	881.413 773 7	33.310 18	0.036 416	1.135 876	0.864 124
	1.4	557.161 5	1 092.036	1 649.197 92	1 130.322 92	998.366 438 9	131.956 5	0.116 742	1.246 705	0.753 295
	1.6	557.161 5	1 426.333	1 983.494 79	1 390.494 79	1 097.282 575	293.212 2	0.210 869	1.337 347	0.662 653
	1.8	557.161 5	1 805.203	2 362.364 58	1 695.239 58	1 181.090 926	514.148 7	0.303 29	1.411 964	0.588 036
	2.0	557.161 5	2 228.646	2 785.807 29	2 044.557 29	1 252.435 195	792.122 1	0.387 43	1.473 903	0.526 097
−0.4	1.2	557.161 5	802.312 5	1 359.473 96	766.473 958	735.692 993	30.780 97	0.040 159	1.125 559	0.874 441
	1.4	557.161 5	1 092.036	1 649.197 92	957.364 583	835.157 216 1	122.207 4	0.127 65	1.228 478	0.771 522
	1.6	557.161 5	1 426.333	1 983.494 79	1 192.828 13	920.508 089	272.32	0.228 298	1.313 31	0.686 69
	1.8	557.161 5	1 805.203	2 362.364 58	1 472.864 58	993.875 387 5	478.989 2	0.325 209	1.383 793	0.616 207
	2.0	557.161 5	2 228.646	2 785.807 29	1 797.473 96	1 057.210 07	740.263 9	0.411 836	1.442 878	0.557 122
−0.5	1.2	557.161 5	802.312 5	1 359.473 96	618.223 958	589.615 233 7	28.608 72	0.046 276	1.116 698	0.883 302
	1.4	557.161 5	1 092.036	1 649.197 92	784.406 25	670.606 547 9	113.799 7	0.145 078	1.212 759	0.787 241
	1.6	557.161 5	1 426.333	1 983.494 79	995.161 458	740.954 378 9	254.207 1	0.255 443	1.292 47	0.707 53
	1.8	557.161 5	1 805.203	2 362.364 58	1 250.489 58	802.158 958 9	448.330 6	0.358 524	1.359 227	0.640 773
	2.0	557.161 5	2 228.646	2 785.807 29	1 550.390 63	855.612 108 6	694.778 5	0.448 131	1.415 666	0.584 334
−0.6	1.2	557.161 5	802.312 5	1 359.473 96	469.973 958	443.251 090 8	26.722 87	0.056 86	1.109 006	0.890 994
	1.4	557.161 5	1 092.036	1 649.197 92	611.447 917	504.973 480 1	106.474 4	0.174 135	1.199 064	0.800 936
	1.6	557.161 5	1 426.333	1 983.494 79	797.494 792	559.141 426 9	238.353 4	0.298 878	1.274 23	0.725 77
	1.8	557.161 5	1 805.203	2 362.364 58	1 028.114 58	606.753 912 2	421.360 7	0.409 838	1.337 617	0.662 383
	2.0	557.161 5	2 228.646	2 785.807 29	1 303.307 29	648.748 042 5	654.559 2	0.502 229	1.391 604	0.608 396
−0.7	1.2	557.161 5	802.312 5	1 359.473 96	321.723 958	296.653 696 1	25.070 26	0.077 925	1.102 265	0.897 735
	1.4	557.161 5	1 092.036	1 649.197 92	438.489 583	338.454 393 2	100.035 2	0.228 136	1.187 025	0.812 975
	1.6	557.161 5	1 426.333	1 983.494 79	599.828 125	375.467 114 2	224.361	0.374 042	1.258 132	0.741 868
	1.8	557.161 5	1 805.203	2 362.364 58	805.739 583	408.288 156 5	397.451 4	0.493 275	1.318 46	0.681 54
	2.0	557.161 5	2 228.646	2 785.807 29	1 056.223 96	437.482 359 2	618.741 6	0.585 805	1.370 175	0.629 825
−0.8	1.2	557.161 5	802.312 5	1 359.473 96	173.473 958	149.863 803 9	23.610 15	0.136 102	1.096 309	0.903 691
	1.4	557.161 5	1 092.036	1 649.197 92	265.531 25	171.200 871	94.330 38	0.355 252	1.176 36	0.823 64
	1.6	557.161 5	1 426.333	1 983.494 79	402.161 458	190.241 073 5	211.920 4	0.526 953	1.243 819	0.756 181
	1.8	557.161 5	1 805.203	2 362.364 58	583.364 583	207.254 735 9	376.109 8	0.644 725	1.301 36	0.698 64
	2.0	557.161 5	2 228.646	2 785.807 29	809.140 625	222.500 143 5	586.640 5	0.725 017	1.350 97	0.649 03
−0.9	1.2	557.161 5	802.312 5	1 359.473 96	25.223 958 3	2.913 196 667	22.310 76	0.884 507	1.091 008	0.908 992
	1.4	557.161 5	1 092.036	1 649.197 92	92.572 916 7	3.331 784 807	89.241 13	0.964 009	1.166 845	0.833 155
	1.6	557.161 5	1 426.333	1 983.494 79	204.494 792	3.707 869 658	200.786 9	0.981 868	1.231 009	0.768 991
	1.8	557.161 5	1 805.203	2 362.364 58	360.989 583	4.046 192 925	356.943 4	0.988 791	1.286 003	0.713 997
	2.0	557.161 5	2 228.646	2 785.807 29	562.057 292	4.351 320 22	557.706	0.992 258	1.333 659	0.666 341

其中 $\Delta = Var(Q_{R,t}) - Var(Q^*_{R,t})$

表 2 不同参数(r_{12} < 0) 时的牛鞭效应

Table 2 Bullwhip effect on the condition of various parameters(r_{12} < 0)

r	k	BE	BE^*	ΔBE
−0.1	1.2	3.129 173	3.128 845	0.000 328
	1.4	3.131 267	3.130 208	0.001 059
	1.6	3.133 861	3.131 927	0.001 934
	1.8	3.136 578	3.133 767	0.002 811
	2.0	3.139 224	3.135 598	0.003 626
−0.2	1.2	3.067 502	3.066 133	0.001 37
	1.4	3.072 754	3.068 331	0.004 422
	1.6	3.079 182	3.071 126	0.008 056
	1.8	3.085 827	3.074 142	0.011 684
	2.0	3.092 215	3.077 171	0.015 044
−0.3	1.2	2.988 622	2.985 244	0.003 378
	1.4	2.998 784	2.987 921	0.010 863
	1.6	3.011 043	2.991 344	0.019 699
	1.8	3.023 512	2.995 064	0.028 448
	2.0	3.035 31	2.998 83	0.036 48
−0.4	1.2	2.884 159	2.877 213	0.006 946
	1.4	2.902 301	2.880 104	0.022 198
	1.6	2.923 777	2.883 82	0.039 957
	1.8	2.945 173	2.887 885	0.057 288
	2.0	2.965 016	2.892 025	0.072 991
−0.5	1.2	2.739 258	2.725 841	0.013 417
	1.4	2.771 184	2.728 729	0.042 455
	1.6	2.808 016	2.732 459	0.075 557
	1.8	2.843 718	2.736 559	0.107 159
	2.0	2.875 977	2.740 759	0.135 218
−0.6	1.2	2.524 805	2.498 695	0.026 11
	1.4	2.582 703	2.501 366	0.081 337
	1.6	2.647 08	2.504 828	0.142 252
	1.8	2.707 144	2.508 651	0.198 493
	2.0	2.759 54	2.512 586	0.246 955
−0.7	1.2	2.174 907	2.120 068	0.054 84
	1.4	2.288 672	2.122 252	0.166 42
	1.6	2.408 114	2.125 092	0.283 022
	1.8	2.513 399	2.128 24	0.385 159
	2.0	2.600 763	2.131 494	0.469 27
−0.8	1.2	1.502 028	1.362 844	0.139 185
	1.4	1.765 951	1.364 115	0.401 836
	1.6	2.016 211	1.365 772	0.650 439
	1.8	2.217 084	1.367 614	0.849 47
	2.0	2.371 419	1.369 525	1.001 894
−0.9	1.2	−0.324 36	−0.908 2	0.583 844
	1.4	0.577 947	−0.908 2	1.486 148
	1.6	1.255 457	−0.908 2	2.163 655
	1.8	1.707 422	−0.908 2	2.615 617
	2.0	2.011 021	−0.908 19	2.919 213

2) 当 $r_{12} > 0$ 时

表 3 数值模拟中的参数设定($r_{12} > 0$)

Table 3 Parameter setting for numeric simulation($r_{12} > 0$)

r	k	$Var(Q_{1,t})$	$Var(Q_{2,t})$	$Var(Q_{R,t}^N)$	$Var(Q_{R,t})$	$Var(Q_{R,t}^*)$	Δ	$\frac{\Delta}{Var(Q_{R,t})}$	X_1^*	X_2^*
0.1	1.2	557.161 5	802.312 5	1 359.474	1 507.724	1 458.106	49.618 43	0.032 909	1.202 399	0.797 601
	1.4	557.161 5	1 092.036	1 649.198	1 822.156	1 628.359	193.797 3	0.106 356	1.362 323	0.637 677
	1.6	557.161 5	1 426.333	1 983.495	2 181.161	1 758.131	423.030 5	0.193 947	1.486 705	0.513 295
	1.8	557.161 5	1 805.203	2 362.365	2 584.74	1 856.882	727.857 7	0.281 598	1.583 2	0.416 8
	2.0	557.161 5	2 228.646	2 785.807	3 032.891	1 932.393	1 100.498	0.362 854	1.658 395	0.341 605
0.2	1.2	557.161 5	802.312 5	1 359.474	1 655.974	1 599.435	56.538 58	0.034 142	1.230 628	0.769 372
	1.4	557.161 5	1 092.036	1 649.198	1 995.115	1 775.598	219.516 1	0.110 027	1.410 406	0.589 594
	1.6	557.161 5	1 426.333	1 983.495	2 378.828	1 903.146	475.682	0.199 965	1.547 282	0.452 718
	1.8	557.161 5	1 805.203	2 362.365	2 807.115	1 994.851	812.263 3	0.289 359	1.650 83	0.349 17
	2.0	557.161 5	2 228.646	2 785.807	3 279.974	2 060.821	1 219.153	0.371 696	1.729 383	0.270 617
0.3	1.2	557.161 5	802.312 5	1 359.474	1 804.224	1 738.522	65.701 82	0.036 416	1.268 005	0.731 995
	1.4	557.161 5	1 092.036	1 649.198	2 168.073	1 914.967	253.105 8	0.116 742	1.473 205	0.526 795
	1.6	557.161 5	1 426.333	1 983.495	2 576.495	2 033.192	543.302 8	0.210 869	1.625 081	0.374 919
	1.8	557.161 5	1 805.203	2 362.365	3 029.49	2 110.677	918.812 9	0.303 29	1.736 204	0.263 796
	2.0	557.161 5	2 228.646	2 785.807	3 527.057	2 160.571	1 366.487	0.387 43	1.817 529	0.182 471
0.4	1.2	557.161 5	802.312 5	1 359.474	1 952.474	1 874.064	78.409 75	0.040 159	1.319 843	0.680 157
	1.4	557.161 5	1 092.036	1 649.198	2 341.031	2 042.199	298.832 1	0.127 65	1.558 695	0.441 305
	1.6	557.161 5	1 426.333	1 983.495	2 774.161	2 140.827	633.335	0.228 298	1.728 665	0.271 335
	1.8	557.161 5	1 805.203	2 362.365	3 251.865	2 194.328	1 057.536	0.325 209	1.847 357	0.152 643
	2.0	557.161 5	2 228.646	2 785.807	3 774.141	2 219.815	1 554.326	0.411 836	1.929 907	0.070 093
0.5	1.2	557.161 5	802.312 5	1 359.474	2 100.724	2 003.512	97.212 4	0.046 276	1.396 541	0.603 459
	1.4	557.161 5	1 092.036	1 649.198	2 513.99	2 149.266	364.723 3	0.145 078	1.681 885	0.318 115
	1.6	557.161 5	1 426.333	1 983.495	2 971.828	2 212.695	759.132 8	0.255 443	1.873 398	0.126 602
	1.8	557.161 5	1 805.203	2 362.365	3 474.24	2 228.641	1 245.599	0.358 524	1.998 042	0.001 958
0.6	1.2	557.161 5	802.312 5	1 359.474	2 248.974	2 121.097	127.877 4	0.056 86	1.521 627	0.478 373
	1.4	557.161 5	1 092.036	1 649.198	2 686.948	2 219.056	467.891 5	0.174 135	1.874 768	0.125 232
0.7	1.2	557.161 5	802.312 5	1 359.474	2 397.224	2 210.421	186.803 1	0.077 925	1.761 992	0.238 008

其中 $\Delta = Var(Q_{R,t}) - Var(Q_{R,t}^*)$

表 4　不同参数($r_{12} > 0$) 时的牛鞭效应

Table 4 Bullwhip effect on the condition of various parameters($r_{12} > 0$)

r	k	BE	BE^{*}	ΔBE
0.1	1.2	3.219 377	3.219 035	0.000 342
	1.4	3.217 954	3.216 85	0.001 104
	1.6	3.216 163	3.214 151	0.002 012
	1.8	3.214 249	3.211 332	0.002 918
	2.0	3.212 348	3.208 593	0.003 755
0.2	1.2	3.253 358	3.251 86	0.001 498
	1.4	3.250 954	3.246 137	0.004 818
	1.6	3.247 907	3.239 172	0.008 735
	1.8	3.244 629	3.232 02	0.012 609
	2.0	3.241 346	3.225 187	0.016 158
0.3	1.2	3.282 177	3.278 284	0.003 893
	1.4	3.279 091	3.266 654	0.012 437
	1.6	3.275 157	3.252 786	0.022 372
	1.8	3.270 897	3.238 858	0.032 039
	2.0	3.266 602	3.225 84	0.040 761
0.4	1.2	3.306 928	3.298 389	0.008 539
	1.4	3.303 366	3.276 387	0.026 979
	1.6	3.298 804	3.250 891	0.047 913
	1.8	3.293 835	3.226 061	0.067 775
	2.0	3.288 796	3.203 526	0.085 27
0.5	1.2	3.328 415	3.310 447	0.017 968
	1.4	3.324 523	3.268 788	0.055 735
	1.6	3.319 518	3.222 558	0.096 96
	1.8	3.314 039	3.179 51	0.134 529
0.6	1.2	3.347 243	3.307 596	0.039 647
	1.4	3.343 127	3.224 172	0.118 955
0.7	1.2	3.363 879	3.260 94	0.102 938

从以上结果可知，$r_{12} = 0.5$，$k = 2$ 时，不满足 $r_{12} < \frac{[1 + A(1 - \rho^{l})]\sigma_1}{(1 + A)\sigma_2}$，因而把该数据结果剔除掉，类似地，当 $r_{12} > 0.5$ 时，当 k 的取值越大时，r_{12} 越不满足式(56)，尤其是当 $r_{12} \geqslant 0.8$ 时，无论 k 取何值，均不满足式(56).

从表 1、表 2 的数值计算结果可知，当 $r_{12} \neq 0$ 时，不管 k 的取值是多少，通过资产组合管理方法所确定的调节系数 X_1 和 X_2，均使得 $BE^{*} < BE$，这意味着通过该方法所确定的调节系数使得供应链中由于信息传递扭曲所引起的方差变化的比例减少. 因而，通过利用资产组合管理方法，可以减少供应链中的牛鞭效应. 通过表 3 可以看出，零售商的相关系数越大，对供应链中牛鞭效应的减少值就越大，说明在零售商具有越强的相关性，通过资产组合管理方法对减少牛鞭效应的效果就越大. 在零售商相关系数相同的情况下，零售商对市场需求量预测的方差越大，通过资产组合管理方法所减少的牛鞭效应的效果越显著.

4　结束语

供应链中由于牛鞭效应的存在使得上下游企业往往不能获取准确的需求和供应信息，这将极大地影响供应链的整体绩效，从而无法达到最优水平，因而，不论对于整条供应链，还是供应链中的节点企业，采取有效的措施或设计优化的策略来对其进行协调从而减少牛鞭效应都是十分必要的. 供应链中的上下游企业如果信息无法实现共享，那对双方来说，要么可能导致更高的安全库

存，从而要负担更高的库存成本，要么可能会产生大量的缺货成本. 以往关于供应链信息共享或牛鞭效应的研究主要基于上下游企业双方对市场需求的预测，在本文中，尝试采用资产组合管理方法并结合市场需求的预测信息来减少供应链中的牛鞭效应，同时在此基础上可以改善供应链的整体绩效.

从本研究的分析结果可以看出，通过运用资产组合管理方法可以减少供应商的总方差，对于零售商不论相关系数大于零或小于零，即不管零售商彼此的需求是正相关还是负相关，都能够在一定程度上减少供应链中的牛鞭效应，且相关系数的绝对值越大，减少牛鞭效应的效果就越好，而且在同一相关系数下，零售商对市场需求预测的方差越大，运用资产组合管理方法所减少的牛鞭效应的效果就越大.

参 考 文 献:

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

[2] Lee H L, Padmanabhan V, Whang S. Comments on information distortion in a supply chain: The bullwhip effect [J]. Management Science, 2004, 50: 1887 – 1893.

[3] Heydan J, Kazemzadeh R B, Chaharsooghi S K. A study of lead time variation impact on supply chain performance [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 40: 1206 – 1215.

[4] Aharon B T, Boaz G, Shimrit S. Robust multi-echelon multi-period inventory control [J]. European Journal of Operational Research, 2009, 199: 922 – 935.

[5] Su C T, Wong J T. Design of a replenishment system for a stochastic dynamic production/forecast lot-sizing problem under bullwhip effect [J]. Expert System with Application, 2008, 34: 173 – 180.

[6] Geary S, Disney S M, Towill D R. On bullwhip in supply chains-historical review, present practice and expected future impact [J]. Int. J. Production Economics, 2006, 101: 2 – 18.

[7] Sohn S Y, Lim M. The effect of forecasting and information sharing in SCM for multi-generation products [J]. European Journal of Operational Research, 2008, 186: 276 – 287.

[8] 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 Operational Research, 2009, 192: 576 – 593.

[9] Alony I, Munoz A. The bullwhip effect in complex supply chains [C]. International Symposium on Communications and Information Technologies on IEEE, 2007, 1355 – 1360.

[10] Nepal B, Murat A, Chinnam R B. The bullwhip effect in capacitated supply chains with consideration for product life-cycle aspects [J]. Int. J. Production Economics, 2012, 136: 318 – 331.

[11] Erkan B, Lenny Koh S C, Gunasekarn A, et al. The role of forecasting on bullwhip effect for E-SCM applications [J]. Int. J. Production Economics, 2008, 113: 193 – 204.

[12] Moyaux T, Chaib-draa B, D'Amours S. Information sharing as a coordination mechanism for reducing the bullwhip effect in a supply chain [J]. IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics Part C: Applications and Reviews, 2007, 37: 396 – 409.

[13] 达庆利，张 钦，沈厚才. 供应链中牛鞭效应问题研究 [J]. 管理科学学报，2003，6(3): 86 – 93.
Da Qingli, Zhang Qin, Shen Houcai. Study on bullwhip effect in supply chain [J]. Journal of Management Sciences in China, 2003, 6(3): 86 – 93. (in Chinese)

[14] Disney S M, Towill D R. The effect of vendor managed inventory (VMI) dynamics on the bullwhip effect in supply chains [J]. Int. J. Production Economics, 2003, 85: 199 – 215.

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

[16] 万 杰，寇纪松，李敏强. 需求信息预测与处理中的牛鞭效应 [J]. 天津大学学报，2003，36(3): 369 – 373.
Wan Jie, Kou Jisong, Li Minqiang. Bullwhip effect in demand forecasting and processing [J]. Journal of Tianjin Universi-

ty, 2003, 36(3): 369 - 373. (in Chinese)

[17] Dejonckheere J, Disney S M, Lambrecht M R, et al. Measuring and avoiding the bullwhip effect: A control theoretic approach [J]. European Journal of Operational Research, 2003, 147: 567 - 590.

[18] **黄小原，郭海峰，卢　震. 供应链时滞系统模型及其牛鞭效应的 H_∞ 控制 [J]. 系统工程学报**, 2005, 20(6): 585 - 590.

Huang Xiaoyuan, Guo Haifeng, Lu Zhen. H_∞ control of supply chain time delay system model and its bullwhip effect [J]. Journal of Systems Engineering, 2005, 20(6): 585 - 590. (in Chinese)

[19] **罗　卫，张子刚，欧阳明德. 基于** DE-APIOBPCS **策略的牛鞭效应和库存方差 [J]. 中国管理科学**, 2005, 13(2): 88 - 94.

Luo Wei, Zhang Zigang, Ouyang Mingde. Bullwhip effect and inventory variance based DE-APIOBPCS policy [J]. Chinese Journal of Management Science, 2005, 13(2): 88 - 94. (in Chinese)

[20] **唐　亮，靖　可. H_∞ 鲁棒控制下动态供应链系统牛鞭效应优化 [J]. 系统工程理论与实践**, 2012, 32(1): 155 - 163.

Tang Liang, Jing Ke. Bullwhip effect optimization of dynamic supply chain system based on H_∞ robust control [J]. Systems Engineering: Theory & Practice, 2012, 32(1): 155 - 163. (in Chinese)

[21] **魏永长，王红卫，祁　超，等. 横向调货策略下供应网络中牛鞭效应的鲁棒控制 [J]. 系统工程学报**, 2013, 28(5): 633 - 640.

Wei Yongchang, Wang Hongwei, Qi Chao, et al. Robust control for the bullwhip effect of a supply network under the lateral transshipment policy [J]. Journal of Systems Engineering, 2013, 28(5): 633 - 640. (in Chinese)

[22] **李　刚，汪寿阳，于　刚，等. 牛鞭效应与生产平滑模型有效性问题 [J]. 管理科学学报**, 2004, 7(1): 1 - 18.

Li Gang, Wang Shouyang, Yu Gang, et al. Bullwhip effect and validity of production-smoothing model [J]. Journal of Management Sciences in China, 2004, 7(1): 1 - 18. (in Chinese)

[23] **庄伟卿，刘震宇. 牛鞭效应弱化与反牛鞭效应强化在完美信息下联合作用的博弈 [J]. 数学的实践与认识**, 2012, 42(13): 20 - 31.

Zhuang Weiqing, Liu Zhenyu. Game of the combined effects of bullwhip effect weaken and anti-bullwhip effects strengthen under the perfect information [J]. Mathematics in Practice and Theory, 2012, 42(13): 20 - 31. (in Chinese)

[24] Wright D, Xin Yuan. Mitigating the bullwhip effect by ordering policies and forecasting methods [J]. Int. J. Production Economics, 2008, 113: 587 - 597.

[25] **章　魏，华中生. 多产品供应链的牛鞭效应及其减弱方法 [J]. 系统工程学报**, 2010, 25(4): 479 - 483.

Zhang Wei, Hua Zhongsheng. Bullwhip effect in multi-product supply chain and its weakened method [J]. Journal of Systems Engineering, 2010, 25(4): 479 - 483. (in Chinese)

[26] **马云高，王能民，徐金鹏. 供应链零售商预测技术研究——基于牛鞭效应的视角 [J]. 运筹与管理**, 2013, 22(3): 53 - 60.

Ma Yungao, Wang Nengmin, Xu Jinpeng. Analysis of retailer's forecasting techniques in supply chain: Based on the bullwhip effect [J]. Operations Research and Management Science, 2013, 22(3): 53 - 60. (in Chinese)

[27] Li Qinyun, Stephen M Disney, Gerard Gaalman. Avoiding the bullwhip effect using damped trend forecasting and the Order-Up-To replenishment policy [J]. Int. J. Production Economics, 2014, 149: 3 - 16.

[28] Sanjita Jaipuria, Mahapatra S S. An improved demand forecasting method to reduce bullwhip effect in supply chains [J]. Expert Systems with Applications, 2014, 41: 2395 - 2408.

[29] Kahn J A. Inventories and the volatility of production [J]. Am Econ Rev., 1987, 77(4): 667 - 679.

[30] Heyman D P, Sobel M J. Stochastic Models in Operations Research [M]. Vol. Ⅱ, New York: McGraw-Hill, 1984.

[31] Zinn W, Levy M, Bowersox D J. Measuring the effect of inventory centralization/decentralization on aggregate safety stock: The "square root law" revisited [J]. J. Bus Logist, 1989, 10(1): 1 - 14.

[32] Simchi-Levi D, Kaminsky P, Simchi-Levi E. Designing and Managing the Supply Chain: Concepts, Strategies, and Case Studies [M]. Boston: McGraw-Hill, 2000.

[33] Silver E, Peterson R. Decision Systems for Inventory Management and Production Planning [M]. 2^{nd} edition. New York: John Wiley and Sons, 1985.

Reducing bullwhip effect in supply chain: A portfolio management approach

CHEN Chang-bin[1,2], *SHENG Xin*[3*], *LIANG Yong-yi*[3]

1. Research Centre for Modern Logistics, Tsinghua University, Beijing 100083, China;
2. Zhongshan Institute, University of Electronic Science and Technology of China, Zhongshan 528402, China;
3. Lingnan College, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China

Abstract: In the supply chain system comprising of one supplier and several retailers, retailers are likely to face two kinds of market demand in a dynamic environment: demand under no sales promotion and demand under sales promotion. In this situation, we assume that the retailers adopt the order-up-to level policy to play orders from suppliers according to the information of market demand. On the other hand, the retailers in the same market may take each other's order-decision behavior into account. In this article, we discuss the downstream suppliers' decisions of ordering from upstream suppliers when retailers have different correlations. Furthermore, we investigate the retailers leveraging the portfolio management approach from securities investment theory to adjust the retailers' quantity of ordering which can reduce the total variance of ordering to suppliers and the bullwhip effect. And we investigate the retailers' motivation on order adjustment by analyzing and comparing inventory cost, loss of out of stock and profit which the inventory level before and after order adjustment. Our numerical findings show that portfolio management approach can help to reduce the total variance of ordering to the supplier. Also, this method can reduce the bullwhip effect in the supply chain to some extent when multiple retailers have different correlation coefficients of the decision-making behavior in the same market. The greater the correlation coefficient among the retailers is, the more significant the effect on eliminating the bullwhip effect in supply chain will be. Moreover, at the same correlation coefficient, the greater the variance of the market demand forecasted by the retailers, the greater the effect on reducing the bullwhip effect is with the application of the portfolio management approach.

Key words: supply chain; order-up-to level policy; bullwhip effect; portfolio management approach