第 31 卷 第 7 期
Vol. 31 No. 7

控 制 与 决 策
Control and Decision

2016 年 7 月
Jul. 2016

文章编号: 1001-0920 (2016) 07-1258-07 DOI: 10.13195/j.kzyjc.2015.0699

基于延迟定价策略的供应链分散与集中决策

陈 炜[a], 杨以雄[b], 郑 洁[c], 田 原[a]
(东华大学 a. 旭日工商管理学院，b. 服装学院，c. 理学院，上海 200051)

摘 要: 针对消费者市场需求不确定性大的特征, 采用延迟定价策略应对需求波动和实现产品售罄. 基于供应商和零售商的两级供应链, 探讨最优零售价格的确立, 分别建立分散决策下的零售商利润函数模型和集中决策下的供应链系统利润函数模型, 通过函数单峰性分析证明最优订货量的存在性和唯一性, 并求得最优解. 比较和数值分析表明, 在分散决策下, 采用延迟定价策略虽然未必能达到集中决策时的供应链系统最优, 但相比固定售价, 可以显著提高供应链的总利润.

关键词: 延迟定价；供应链；残值；分散决策；集中决策
中图分类号: TP273 **文献标志码:** A

Decentralized and centralized decision-making of supply chain based on price-postponement strategy

CHEN Wei[a], *YANG Yi-xiong*[b], *ZHENG Jie*[c], *TIAN Yuan*[a]
(a. Glorious Sun School of Business and Management，b. Fashion Institute，c. College of Science，Donghua University，Shanghai 200051，China．Correspondent：YANG Yi-xiong，E-mail：yyx@dhu.edu.cn)

Abstract: For the uncertainty of consumer demand, price-postponement is considered to be an effect measure to cope with demand fluctuation and facilitate market clearing. Based on the two-echelon supply chain consisting of a supplier and a retailer, the optimal retail price is proposed, then the retailer profit function of the decentralized supply chain and the supply chain profit function model of the centralized supply chain are established, respectively. The existence and uniqueness of order quantity are proved by unimodality conditions, and optimal solutions are obtained. Comparative and numerical analysis show that, using price-postponement can significantly increase the gross profit of the decentralized supply chain compared to the fixed price, although the income is lower than that of the centralized supply chain.

Keywords: price-postponement；supply chain；salvage value；decentralized decision-making；centralized decision-making

0 引 言

当前市场环境下, 消费者需求呈现个性化、多元化和波动性大的特点, 如何有效匹配供求关系、顺应市场波动性开展营销活动是一个亟待解决的问题. 由于消费需求难以精准把握, 商业竞争激烈, 纺织服装、电子、汽车等行业的销售企业通常会在销售季节期间, 根据实际销售情况, 通过打折促销调整产品售价. 目前, 零售业信息化、网络化程度不断提升, 也为各种售中打折促销模式的信息联网和开展提供了契机. 如优衣库部分产品会在销售期内经历3次以上的降价, 并且始终保持线上线下同款同价, 其中前两次降价后又会根据销售情况恢复原价, 而3次以后的降价幅度较大且不会调回原价, 直至产品售罄. 这种在纺织服装等零售业存在的调价形式可视为延迟定价策略的一种潜在表现. 延迟定价是延迟策略的一种派生理念, 是指将产品的销售定价活动延后, 直到获悉明确的市场需求信息之时, 能有效应对需求的不确定性, 降低库存和缺货风险[1]. 延迟策略是以客户需求为导向, 强调将生产等活动延迟至市场需求信息确定为止, 使产品与客户需求相互匹配, 从而提高销售额、降低库存[2-3]. 延迟策略按特定对象可大致分为延迟生产和延迟定价两类, 分别表示在获得明确的需

收稿日期: 2015-06-03；**修回日期:** 2015-10-26.
基金项目: 中央高校基本科研业务费专项基金项目(CUSF-DH-D-2014068)；东华大学非线性科学研究所专项基金项目(INS-1401)；上海高校知识服务平台 (海派时尚设计及价值创造知识服务中心) 项目(13S1070241).
作者简介: 陈炜(1985−), 男, 博士生, 从事供应链延迟策略的研究；杨以雄(1953−), 男, 教授, 博士生导师, 从事服装供应链管理等研究.

求信息之后再进行产品的生产和定价活动. 与延迟生产具有生产调控功能不同, 延迟定价能有效调节顾客需求, 零售商在获得准确的需求信息后进行定价决策活动, 进而根据需求特性、库存产品类别和数量做出产品售价的决断[4], 达到产品供给与之相匹配的目的, 从而有效应对市场供求关系的不确定性, 实现产品出清和供求均衡.

徐和等[5]认为, 延迟定价可分为反应性定价和清仓定价 (一种特殊的延迟定价) 两类, 当需求不确定性低时, 清仓定价模式可以降低管理成本, 当需求不确定性高时, 采用反应性定价方式可以有效规避风险. Aydin 等[6]研究了在单周期、随机需求环境下多产品无延迟供货和定价策略. Bish 等[7]假定一个市场垄断生产商能够在统一产能约束下生产两种需求随机的产品, 研究发现可以在市场信息完全暴露后的确定性环境下施行定价决策并决定两种产成品的产量. Goyal 等[8]在两类产品的基础上建立分析模型, 发现生产延迟和定价延迟有助于降低产品总需求量的不确定性. Lus 等[9]研究一个采用延迟生产和延迟定价混合策略的生产商, 制造的产品之间具有替代性或互补性, 并且产品间的替代性变动会影响需求截距间的相关性变化, 采用数值分析的方法同样得出生产商实行延迟定价和生产混合策略下得到的收益高于仅实施延迟生产时获取的收益. Bish 等[10]通过数值分析研究发现, 在生产延迟中加入延迟定价策略可以进一步提高收益. Li[11]构建了一个两级供应链延迟定价模型, 并分析供应链和节点企业的利润表现, 研究结果显示延迟策略可以提高各自企业的收益, 尤其在市场需求对价格比较敏感的情况下, 集中式供应链系统中的表现也要优于分散式供应链系统, 但并没有考虑未售出产品的残值. Surti 等[12]设计了两种情境下采用延迟定价和非延迟定价零售商期望利润的比较分析, 分别为依赖价格的随机需求环境和依赖价格的确定性需求环境, 结果表明采用延迟定价策略的期望利润均高于非延迟定价情形, 但研究没有涉及供应链上其他节点企业的收益问题. 覃燕红等[13]认为市场需求波动大会造成生产不利和利润降低, 而实施延迟定价可以应对这一问题并提高利润. 张克勇等[14]构建随机需求下的延迟定价模型, 通过博弈论和数值分析得到了相似的结论, 认为延迟定价可以有效降低销售风险, 增加供应链利润, 降低库存, 当中间渠道利润较低时更有优势.

分散和集中控制是供应链决策的两种典型模式, 两者的比较分析是本研究的重点. 鉴于此, 本文考虑一个两级供应链的订货决策问题, 需求函数为依赖价格的加法形态, 库存产品残值较低. 在分散决策下构建零售商利润函数, 在集中决策下构建供应链的期望利润函数, 力图通过利润函数的单峰性分析证明最优订货量的存在性和唯一性.

1　假设和参数说明

考虑市场不确定性需求条件下, 包含一个供应商 (品牌企业, 含制造、批发) 和一个零售商的两级供应链. 依据延迟定价策略, 讨论分散决策 (单一批发价格契约) 和集中决策两种情况下供应链的协同和决策问题. 本文仅以生产和销售季节为周期进行解析, 即为单周期决策问题, 相关参数说明如下: c 为供应商单位产品生产成本; w 为供应商单位产品批发价格; Q 为零售商向供应商订货的数量; p 为单位产品的零售价格; s 为季末单位库存产品减去库存成本后的残值; D 为产品的市场需求函数, 通常采用加法形态[14-16] $D=X(p)+\varepsilon$, $X(p)$ 为确定性需求部分, 且单调递减、p 非负, ε 为不确定性需求部分, 服从随机分布函数, $\varepsilon\in[\alpha,\beta]$, $\alpha\geqslant 0$, $\beta\leqslant\infty$, 设其累积分布函数为 $F(\varepsilon)$, 概率密度函数为 $f(\varepsilon)$.

当需求确定时, 定义 $i(p)$ 为产品售罄时的零售商收益函数, 得到

$$i(p)=pX(p),\ p\in(s,+\infty]. \tag{1}$$

同样当需求确定时, 定义 $I(p)$ 为产品售罄时以 Q 为自变量的零售商收益函数, 可得

$$I(p)=Qp(Q)=QX^{-1}(Q), \tag{2}$$

其中 $X^{-1}(Q)$ 为 $X(p)$ 的反函数, 因为 $X(p)$ 随 p 单调递减, 所以 $X^{-1}(Q)$ 随 Q 单调递减.

引理 1　若 $X(p)$ 是 p 的凸函数, 则 $X^{-1}(Q)$ 是 Q 的凸函数, 且 $I(Q)$ 是 Q 的凸函数.

证明　$X(p)$ 为严格单调递减的凸函数, 所以 $X'(p)\leqslant 0$, $X''(p)\leqslant 0$, 因 $X^{-1\prime\prime}(Q)=-X''(p)/[X'(p)]^3$, 故 $X^{-1\prime\prime}(Q)\leqslant 0$, 即 $X^{-1}(Q)$ 为凸函数.

因为 $I''(Q)=2X^{-1\prime}(Q)+QX^{-1\prime\prime}(Q)$, 由 $Q\geqslant 0$, $X^{-1\prime}(Q)\leqslant 0$, $X^{-1\prime\prime}(Q)\leqslant 0$, 易得 $I''(Q)\leqslant 0$, $I(Q)$ 为 Q 的凸函数. □

由引理 1, 利用文献 [17] 对于延迟定价的推导方法, 给定订货量 Q, ε 的真值为 $\hat{\varepsilon}$, 可以得到采用延迟定价的最优零售价格为

$$p^*=\begin{cases}p^*(\hat{\varepsilon}),\ Q\geqslant X(p^*(\hat{\varepsilon}))+\hat{\varepsilon};\\ X^{-1}(Q-\hat{\varepsilon}),\ Q\leqslant X(p^*(\hat{\varepsilon}))+\hat{\varepsilon}.\end{cases} \tag{3}$$

其中 p^* 为零售商收益 $p(X(p)+\hat{\varepsilon})$ 取得最大值时的价格, 即 $p^*(\hat{\varepsilon})=\arg\max_p\{p(X(p)+\hat{\varepsilon})\}$, 且 $p>s$.

引理 2　若 $X(p)$ 为凸函数, 则 $X(p^*(\hat{\varepsilon}))+\hat{\varepsilon}$ 随 $\hat{\varepsilon}$ 单调递增.

证明　容易证明 $i(p)=pX(p)$ 为凸函数, 可以得

到 $p(X(p)+\hat{\varepsilon})$ 也为 p 的凸函数, 由关于 p 的一阶导数等于零, 即 $X(p)+\hat{\varepsilon}+pX'(p^*)=0$, 可求得 $\hat{\varepsilon}(p^*)=-X(p^*)-p^*X'(p^*)$. 因为 $\hat{\varepsilon}'(p^*)=-2X'(p^*)-p^*X''(p^*)\geqslant 0$, 所以 $\hat{\varepsilon}(p^*)$ 是 p^* 的增函数, 进而 $p^*(\hat{\varepsilon})$ 是 $\hat{\varepsilon}$ 的增函数, 即 $p^{*\prime}(\hat{\varepsilon})\geqslant 0$.

同样, 由 $X(p)+\hat{\varepsilon}+pX'(p)=0$ 可求得 $X(p^*(\hat{\varepsilon}))+\hat{\varepsilon}=-p^*(\hat{\varepsilon})X'(p^*(\hat{\varepsilon}))$, 其一阶偏导数

$$\partial[X(p^*(\hat{\varepsilon}))+\hat{\varepsilon}]/\partial\hat{\varepsilon}=$$
$$-p^{*\prime}(\hat{\varepsilon})X'(p^*(\hat{\varepsilon}))-p^*(\hat{\varepsilon})X''(p^*(\hat{\varepsilon}))p^{*\prime}(\hat{\varepsilon})\geqslant 0,$$

可以证得 $X(p^*(\hat{\varepsilon}))+\hat{\varepsilon}$ 随 $\hat{\varepsilon}$ 单调递增. □

当 $Q=X(p^*(\hat{\varepsilon}))+\hat{\varepsilon}$ 时, 定义 $\hat{\varepsilon}=\gamma(Q)$, 由引理 2 和式 (3) 可得

$$p^*=\begin{cases}p^*(\hat{\varepsilon}),\ \hat{\varepsilon}\leqslant\gamma(Q);\\ X^{-1}(Q-\hat{\varepsilon}),\ \hat{\varepsilon}\geqslant\gamma(Q).\end{cases}\tag{4}$$

2 分散决策情形

分散决策情形是指供应商和零售商只有单一批发价格契约时的两阶段运营决策 (图 1). 第 1 阶段: 不确定性随机需求出现之前, 供应商提供单位生产成本 c 和单位批发价格 w 的产品, 然后零售商决定订单量 Q, $w>c>0$. 第 2 阶段: 不确定性需求显现, 零售商行使价格决策权, 决定最优价格使自己利润最大化. 季末未出售产品的单位残值为 s, 考虑零售产品的一般情况, 设 $c>s>0$.

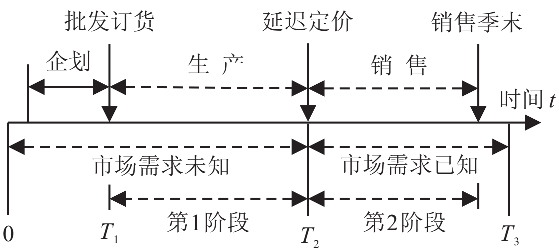

图 1 延迟定价策略的两阶段分散决策模型

1) 供应商利润函数. 给定订货量 Q, 且已知 c、w, 供应商的利润函数为

$$\Pi_S^D(Q)=(w-c)Q.\tag{5}$$

2) 零售商利润函数. 同样给定订货量 Q, 根据式 (3) 和 (4) 求得最优零售价格, 在不确定需求下, 零售商的期望利润函数为

$$\Pi_R^D(Q)=$$
$$\int_\alpha^{\gamma(Q)}\{[p^*(\varepsilon)-s][X(p^*(\varepsilon))+\varepsilon]+sQ\}f(\varepsilon)\mathrm{d}\varepsilon+$$
$$\int_{\gamma(Q)}^{\beta}X^{-1}(Q-\varepsilon)Qf(\varepsilon)\mathrm{d}\varepsilon-wQ.\tag{6}$$

零售商期望利润函数关于 Q 的一阶导数为

$$\partial\Pi_R^D/\partial Q=$$
$$\gamma'(Q)\{p^*(\gamma(Q))[X[p^*(\gamma(Q))]+\gamma(Q)]\}f(\gamma(Q))-$$
$$\gamma'(Q)[X^{-1}(Q-\gamma(Q))Q]f(\gamma(Q))+$$
$$\int_{\gamma(Q)}^{\beta}\Big[X^{-1}(Q-\varepsilon)+\frac{Q}{X'[X^{-1}(Q-\varepsilon)]}\Big]f(\varepsilon)\mathrm{d}\varepsilon-$$
$$\gamma'(Q)sX[p^*(\gamma(Q))+\gamma(Q)]f(\gamma(Q))+w-$$
$$\int_\alpha^{\gamma(Q)}sf(\varepsilon)\mathrm{d}\varepsilon+\gamma'(Q)sQf(\gamma(Q)).$$

当 $\hat{\varepsilon}=\gamma(Q)$ 时, 由式 (3) 和 (4) 可知

$$p^*(\hat{\varepsilon})=X^{-1}(Q-\hat{\varepsilon}),\ Q=X(p^*(\hat{\varepsilon}))+\hat{\varepsilon},$$

上式简化为

$$\partial\Pi_R^D/\partial Q=$$
$$\int_{\gamma(Q)}^{\beta}\Big[X^{-1}(Q-\varepsilon)+\frac{Q}{X'[X^{-1}(Q-\varepsilon)]}\Big]f(\varepsilon)\mathrm{d}\varepsilon+$$
$$\int_\alpha^{\gamma(Q)}sf(\varepsilon)\mathrm{d}\varepsilon-w.$$

零售商期望利润函数关于 Q 的二阶导数为

$$\partial^2\Pi_R^D/\partial Q^2=$$
$$-\gamma'(Q)\Big[X^{-1}(Q-\gamma(Q))+$$
$$\frac{Q}{X'[X^{-1}(Q-\gamma(Q))]}\Big]f(\gamma(Q))+$$
$$\int_{\gamma(Q)}^{\beta}\Big[\frac{2}{X'[X^{-1}(Q-\varepsilon)]}-$$
$$\frac{QX''[X^{-1}(Q-\varepsilon)]}{\{X'[X^{-1}(Q-\varepsilon)]\}^3}\Big]f(\varepsilon)\mathrm{d}\varepsilon+\gamma'(Q)sf(\gamma(Q))=$$
$$-\gamma'(Q)\Big[\frac{X^{-1}(Q-\gamma(Q))X'[X^{-1}(Q-\gamma(Q))]+Q}{X'[X^{-1}(Q-\gamma(Q))]}\Big]\times$$
$$f(\gamma(Q))+\int_{\gamma(Q)}^{\beta}\Big[\frac{2}{X'[X^{-1}(Q-\varepsilon)]}-$$
$$\frac{QX''[X^{-1}(Q-\varepsilon)]}{\{X'[X^{-1}(Q-\varepsilon)]\}^3}\Big]f(\varepsilon)\mathrm{d}\varepsilon+\gamma'(Q)sf(\gamma(Q))=$$
$$-\gamma'(Q)\Big[\frac{[X^{-1}(Q-\gamma(Q))-s]X'[X^{-1}(Q-\gamma(Q))]+Q}{X'[X^{-1}(Q-\gamma(Q))]}\Big]\times$$
$$f(\gamma(Q))+\int_{\gamma(Q)}^{\beta}\Big[\frac{2}{X'[X^{-1}(Q-\varepsilon)]}-$$
$$\frac{QX''[X^{-1}(Q-\varepsilon)]}{\{X'[X^{-1}(Q-\varepsilon)]\}^3}\Big]f(\varepsilon)\mathrm{d}\varepsilon.$$

当 $\hat{\varepsilon}=\gamma(Q)$ 时, 已知 $p^*(\hat{\varepsilon})=X^{-1}(Q-\hat{\varepsilon})$, $Q=X(p^*(\hat{\varepsilon}))+\hat{\varepsilon}$. 因为零售商利润函数为 $\Pi_R^D(p,Q)=p(X(p)+\hat{\varepsilon})-wQ+(Q-(X(p)+\hat{\varepsilon}))s$, 利润函数关于 p 的一阶导数在最优解 $p^*(\hat{\varepsilon})$ 处等于零, 即

$$[X^{-1}(Q-\gamma(Q))-s]X'[X^{-1}(Q-\gamma(Q))]+Q=$$
$$(p^*(\hat{\varepsilon})-s)X'(p^*(\hat{\varepsilon}))+X(p^*(\hat{\varepsilon}))+\hat{\varepsilon}=$$
$$\partial\Pi_R^D(p^*,Q)/\partial p^*=0.$$

所以期望利润函数关于 Q 的二阶导数公式可化简为

$$\frac{\partial^2\Pi_R^D}{\partial Q^2}=\int_{\gamma(Q)}^{\beta}\Big[\frac{2}{X'[X^{-1}(Q-\varepsilon)]}-$$
$$\frac{QX''[X^{-1}(Q-\varepsilon)]}{\{X'[X^{-1}(Q-\varepsilon)]\}^3}\Big]f(\varepsilon)\mathrm{d}\varepsilon=$$

$$\int_{\gamma(Q)}^{\beta}\Big[\frac{2}{X'[X^{-1}(Q-\varepsilon)]}-\frac{(Q-\varepsilon+\varepsilon)X''[X^{-1}(Q-\varepsilon)]}{\{X'[X^{-1}(Q-\varepsilon)]\}^3}\Big]f(\varepsilon)\mathrm{d}\varepsilon=$$
$$\int_{\gamma(Q)}^{\beta}\Big[((Q-\varepsilon)X^{-1}(Q-\varepsilon))_Q''-\frac{\varepsilon X''[X^{-1}(Q-\varepsilon)]}{\{X'[X^{-1}(Q-\varepsilon)]\}^3}\Big]f(\varepsilon)\mathrm{d}\varepsilon=$$
$$\int_{\gamma(Q)}^{\beta}[((Q-\varepsilon)X^{-1}(Q-\varepsilon))_Q''+\varepsilon(X^{-1}(Q-\varepsilon))_Q'']f(\varepsilon)\mathrm{d}\varepsilon\leqslant 0. \tag{7}$$

式 (7) 的证明过程如下: 由引理 1 可知, $X^{-1}(Q)$ 是 Q 的凸函数, 所以 $\varepsilon(X^{-1}(Q-\varepsilon))_Q''\leqslant 0$, 又因为 $X^{-1}(Q)$ 随 Q 单调递减, 所以有

$$((Q-\varepsilon)X^{-1}(Q-\varepsilon))_Q''=[2(X^{-1}(Q-\varepsilon))_Q'+(Q-\varepsilon)(X^{-1}(Q-\varepsilon))_Q'']\leqslant 0,$$

进而有

$$\int_{\gamma(Q)}^{\beta}[((Q-\varepsilon)X^{-1}(Q-\varepsilon))_Q''+\varepsilon(X^{-1}(Q-\varepsilon))_Q'']f(\varepsilon)\mathrm{d}\varepsilon\leqslant 0.$$

定理 1　若 $X(p)$ 是 p 的凸函数时, 则 $X^{-1}(Q)$ 是 Q 的凸函数, $\Pi_R^D(Q)$ 也是 Q 的凸函数.

根据

$$\partial\Pi_R^D/\partial Q=\int_{\gamma(Q)}^{\beta}\Big[X^{-1}(Q-\varepsilon)+\frac{Q}{X'[X^{-1}(Q-\varepsilon)]}\Big]f(\varepsilon)\mathrm{d}\varepsilon+\int_{\alpha}^{\gamma(Q)}sf(\varepsilon)\mathrm{d}\varepsilon-w=0,$$

在供应链分散决策下, 最优订货量 Q_D^* 为

$$w=\int_{\gamma(Q_D^*)}^{\beta}\Big[X^{-1}(Q_D^*-\varepsilon)+\frac{Q_D^*}{X'[X^{-1}(Q_D^*-\varepsilon)]}\Big]f(\varepsilon)\mathrm{d}\varepsilon+\int_{\alpha}^{\gamma(Q_D^*)}sf(\varepsilon)\mathrm{d}\varepsilon.$$

故分散决策下, 供应链的期望总利润为

$$\Pi_{SC}^D(Q_D^*)=\Pi_R^D(Q_D^*)+\Pi_S^D(Q_D^*). \tag{8}$$

3　集中决策情形

在集中决策条件下, 供应链系统集中控制, 供应商与零售商是一个利益共同体, 集中管控、统一协作, 所以供应链的期望利润最优, 零售商的订货量也为最优. 从供应链整体最优角度看, 集中决策是一种最理想的情况, 虽然很少能够实现, 但却是供应链协调的最高准则, 可作为分散决策下实现全局最优的参考标准.

在集中决策下, 由式 (3) 和 (4) 求得最优零售价格, 则供应链的期望利润函数为

$$\Pi_{SC}^C(Q)=\int_{\alpha}^{\gamma(Q)}\{[p^*(\varepsilon)-s][X(p^*(\varepsilon))+\varepsilon]+sQ\}f(\varepsilon)\mathrm{d}\varepsilon+\int_{\gamma(Q)}^{\beta}X^{-1}(Q-\varepsilon)Qf(\varepsilon)\mathrm{d}\varepsilon-cQ. \tag{9}$$

供应链期望利润函数关于 Q 的一阶导数为

$$\partial\Pi_{SC}^C/\partial Q=\gamma'(Q)\{p^*(\gamma(Q))[X[p^*(\gamma(Q))]+\gamma(Q)]\}f(\gamma(Q))-\gamma'(Q)[X^{-1}(Q-\gamma(Q))Q]f(\gamma(Q))+\int_{\gamma(Q)}^{\beta}[X^{-1}(Q-\varepsilon)+\frac{Q}{X'[X^{-1}(Q-\varepsilon)]}]f(\varepsilon)\mathrm{d}\varepsilon-c-\gamma'(Q)sX[p^*(\gamma))+\gamma(Q)]f(\gamma(Q))+\int_{\alpha}^{\gamma(Q)}sf(\varepsilon)\mathrm{d}\varepsilon+\gamma'(Q)sQf(\gamma(Q)).$$

因为当 $\hat{\varepsilon}=\gamma(Q)$ 时, 有

$$p^*(\hat{\varepsilon})=X^{-1}(Q-\hat{\varepsilon}),\ Q=X(p^*(\hat{\varepsilon}))+\hat{\varepsilon},$$

所以一阶导数简化为

$$\partial\Pi_{SC}^C/\partial Q=\int_{\gamma(Q)}^{\beta}\Big[X^{-1}(Q-\varepsilon)+\frac{Q}{X'[X^{-1}(Q-\varepsilon)]}\Big]f(\varepsilon)\mathrm{d}\varepsilon+\int_{\alpha}^{\gamma(Q)}sf(\varepsilon)\mathrm{d}\varepsilon-c.$$

供应链期望利润函数的二阶导数为

$$\partial^2\Pi_{SC}^C/\partial Q^2=-\gamma'(Q)\Big[X^{-1}(Q-\gamma(Q))+\frac{Q}{X'[X^{-1}(Q-\gamma(Q))]}\Big]f(\gamma(Q))+\int_{\gamma(Q)}^{\beta}\Big[\frac{2}{X'[X^{-1}(Q-\varepsilon)]}-\frac{QX''[X^{-1}(Q-\varepsilon)]}{\{X'[X^{-1}(Q-\varepsilon)]\}^3}\Big]f(\varepsilon)\mathrm{d}\varepsilon+\gamma'(Q)sf(\gamma(Q))=$$
$$-\gamma'(Q)\Big[\frac{[X^{-1}(Q-\gamma(Q))-s]X'[X^{-1}(Q-\gamma(Q))]+Q}{X'[X^{-1}(Q-\gamma(Q))]}\Big]\times f(\gamma(Q))+\int_{\gamma(Q)}^{\beta}\Big[\frac{2}{X'[X^{-1}(Q-\varepsilon)]}-\frac{QX''[X^{-1}(Q-\varepsilon)]}{\{X'[X^{-1}(Q-\varepsilon)]\}^3}\Big]f(\varepsilon)\mathrm{d}\varepsilon.$$

当 $\hat{\varepsilon}=\gamma(Q)$ 时, 有

$$p^*(\hat{\varepsilon})=X^{-1}(Q-\hat{\varepsilon}),\ Q=X(p^*(\hat{\varepsilon}))+\hat{\varepsilon}.$$

供应链利润函数

$$\Pi_{SC}^C(p,Q)=p(X(p)+\hat{\varepsilon})-cQ+(Q-(X(p)+\hat{\varepsilon}))s$$

关于 p 的一阶导数在最优解 $p^*(\hat{\varepsilon})$ 处等于零, 所以有

$$[X^{-1}(Q-\gamma(Q))-s]X'[X^{-1}(Q-\gamma(Q))]+Q=(p^*(\hat{\varepsilon})-s)X'(p^*(\hat{\varepsilon}))+X(p^*(\hat{\varepsilon}))+\hat{\varepsilon}=\partial\Pi_{SC}^C(p^*,Q)/\partial p^*=0.$$

因此供应链期望利润函数的二阶导数可简化为

$$\partial^2\Pi_{SC}^C/\partial Q^2=\int_{\gamma(Q)}^{\beta}\Big[\frac{2}{X'[X^{-1}(Q-\varepsilon)]}-\frac{QX''[X^{-1}(Q-\varepsilon)]}{\{X'[X^{-1}(Q-\varepsilon)]\}^3}\Big]f(\varepsilon)\mathrm{d}\varepsilon.$$

上式与分散决策下零售商利润函数的二阶导数公式相同, 可得 $\partial^2\Pi_{SC}^C/\partial Q^2\leqslant 0$, 由此得到定理 2.

定理 2 若 $X(p)$ 是 p 的凸函数, 则 $\Pi_{SC}^C(Q)$ 是 Q 的凸函数.

根据

$$\partial\Pi_{SC}^C/\partial Q=\int_{\gamma(Q)}^{\beta}\Big[X^{-1}(Q-\varepsilon)+\frac{Q}{X'[X^{-1}(Q-\varepsilon)]}\Big]f(\varepsilon)\mathrm{d}\varepsilon+\int_{\alpha}^{\gamma(Q)}sf(\varepsilon)\mathrm{d}\varepsilon-c=0,$$

在集中控制下, 最优订货量 Q^* 为

$$c=\int_{\gamma(Q^*)}^{\beta}\Big[X^{-1}(Q^*-\varepsilon)+\frac{Q^*}{X'[X^{-1}(Q^*-\varepsilon)]}\Big]f(\varepsilon)\mathrm{d}\varepsilon+\int_{\alpha}^{\gamma(Q^*)}sf(\varepsilon)\mathrm{d}\varepsilon. \tag{10}$$

故集中决策下, 供应链的期望总利润为 $\Pi_{SC}^C(Q^*)$.

4 比较分析

通过比较延迟定价的分散决策和集中决策模型, 得到两种情形下最优订货量之间的关系. 由前文已知

$$\partial^2\Pi_R^D/\partial Q^2\leqslant 0,\ \partial^2\Pi_{SC}^C/\partial Q^2\leqslant 0,$$

所以 $\partial^2\Pi_R^D/\partial Q^2$ 和 $\partial^2\Pi_{SC}^C/\partial Q^2$ 随 Q 单调递减, 可得

$$\int_{\gamma(Q_D^*)}^{\beta}\Big[X^{-1}(Q_D^*-\varepsilon)+\frac{Q_D^*}{X'[X^{-1}(Q_D^*-\varepsilon)]}\Big]f(\varepsilon)\mathrm{d}\varepsilon+\int_{\alpha}^{\gamma(Q_D^*)}sf(\varepsilon)\mathrm{d}\varepsilon$$

随 Q_D^* 单调递减;

$$\int_{\gamma(Q^*)}^{\beta}\Big[X^{-1}(Q^*-\varepsilon)+\frac{Q^*}{X'[X^{-1}(Q^*-\varepsilon)]}\Big]f(\varepsilon)\mathrm{d}\varepsilon+\int_{\alpha}^{\gamma(Q^*)}sf(\varepsilon)\mathrm{d}\varepsilon$$

随 Q^* 单调递减. 又因为

$$w=\int_{\gamma(Q_D^*)}^{\beta}\Big[X^{-1}(Q_D^*-\varepsilon)+\frac{Q_D^*}{X'[X^{-1}(Q_D^*-\varepsilon)]}\Big]f(\varepsilon)\mathrm{d}\varepsilon+\int_{\alpha}^{\gamma(Q_D^*)}sf(\varepsilon)\mathrm{d}\varepsilon,$$

$$c=\int_{\gamma(Q^*)}^{\beta}\Big[X^{-1}(Q^*-\varepsilon)+\frac{Q^*}{X'[X^{-1}(Q^*-\varepsilon)]}\Big]f(\varepsilon)\mathrm{d}\varepsilon+\int_{\alpha}^{\gamma(Q^*)}sf(\varepsilon)\mathrm{d}\varepsilon,$$

且 $w>c$, 得到如下推论 1.

推论 1 $Q_D^*<Q^*$.

基于延迟定价策略, 在供应链分散控制情形下进行决策, 零售商的最优订货量总是比供应链集中决策时实现的最优订货量小, 即造成了供应链的“双边际化”效益.

5 数值分析

对某服装品牌企业经销数据进行分析, 设供应商生产成本 $c=100$ 元/件, 供应商提交零售商的批发价格为 $w=200$ 元/件, 产品残值为 $s=50$ 元/件, 确定性需求函数 $X(p)=10\,000-10p$, 不确定性需求 ε 呈均匀分布, 取值区间为 $[0,5\,000]$. 求得

$$X^{-1}(Q)=(10\,000-Q)/10,$$

$$\hat{\varepsilon}=\gamma(Q)=2Q-10\,000,$$

从而采用延迟的零售价格为

$$p^*=\begin{cases}\dfrac{10\,000+\hat{\varepsilon}}{20},\ \hat{\varepsilon}\leqslant 2Q-10\,000;\\[2mm]\dfrac{10\,000+\hat{\varepsilon}-Q}{10},\ \hat{\varepsilon}\geqslant 2Q-10\,000.\end{cases}$$

5.1 算例计算结果

利用 Matlab 求解, 将上述各参数代入式 (7), 求得分散决策下最优订货量 $Q_D^*=5\,297$ 件, 再将最优订货量依次代入式 (5)、(6) 和 (8), 求得供应商期望利润为 $\Pi_S^D(Q_D^*)=52.97$ 万元, 零售商期望利润为 $\Pi_R^D(Q_D^*)=275.726\,1$ 万元, 供应链期望总利润为 $\Pi_{SC}^D(Q_D^*)=328.696\,1$ 万元. 同样, 将上述各参数代入式 (10), 集中决策下最优订货量 $Q^*=6\,104$ 件, 进一步求得供应链期望利润为 $\Pi_{SC}^C(Q_D^*)=332.384\,8$ 万元. 由以上分析可知, 分散决策下的最优订货量小于集中决策下的最优订货量, 且分散决策下供应链的总利润略低于集中决策下的供应链总利润.

5.2 供应链各方利润随生产成本的变化情况

在两种决策条件下, 分析生产成本 c 对订货量和供应链各方利润的影响. 分散决策下, 由 $w>c>s$ 可知 $c\in(50,200)$, 设集中决策下 c 的变化范围相同, c 的步长取 12.5, 其余参数不变, 代入各公式, 得到生产成本 c 与供应商、零售商、供应链总利润和订货量之间的关系如图 2 所示.

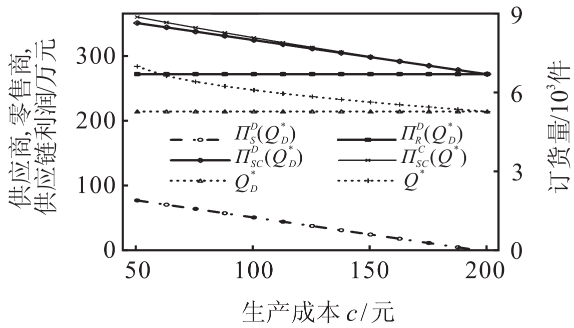

图 2 生产成本变化对订货量与各方利润的影响

由结果可知: 在分散式供应链下, 最优订货量和零售商期望利润不随 c 的变化而变化; 供应商的期望利润随生产成本的上升而下降, 因此供应链的期望总利润也随之下降. 所以, 降低生产成本有助于供应商和供应链总利润的增加. 在集中式供应链下, 最优订货量和供应链期望利润均随 c 的增大而减小. 通过两种决策条件的对比发现, c 越大, 分散式供应链的总利润与集中式供应链利润的差距越小 (尽管差距始终不大), 在极端情况 $c = w$ 时, 两者相等. 即采用延迟定价策略, 生产成本越高, 分散决策下供应链的总利润越接近集中决策时的理论最优值.

5.3　供应链各方利润随残值的变化情况

在分散和集中决策下, 分析残值 s 对供应链各方利润的影响. 由 $c > s > 0$ 可知 $s \in (0, 100)$, 以 10 为步长, 其余参数不变, 代入各公式, 得到残值 s 与供应商、零售商、供应链总利润和订货量之间的关系如图 3 所示.

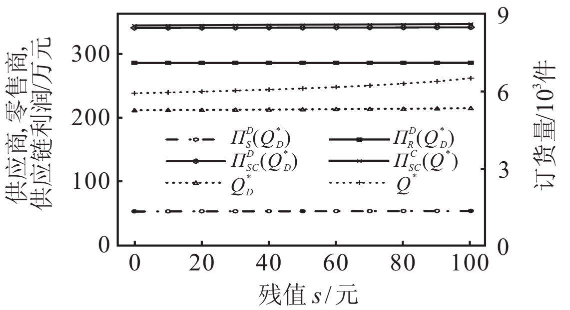

图 3　残值变化对订货量与各方利润的影响

由结果可知: 在分散式供应链下, 残值 s 越大时, 供应商、零售商、供应链期望总利润和最优订货量也越大. 由图 3 可见, 供应商、零售商、供应链期望总利润几乎呈水平直线, 表明在延迟定价策略下, 残值大小的变化对供应链各方利润的影响很小. 在集中式供应链下, s 增大虽然会使 Q_D^* 较为明显地增加, 但供应链期望总利润的增加却很缓慢. 通过两种决策条件的比较发现, s 越小, 分散式供应链的总利润与集中式供应链利润的差距越小 (尽管差距始终不大). 换言之, 采用延迟定价策略, 产品残值越低, 分散决策下供应链的总利润越接近理论最优值.

5.4　供应链各方利润随批发价的变化情况

因为集中决策无需考虑 w 取值, 以下仅讨论在分散决策下, 批发价格变化对订货量和供应链各方利润的影响. $\hat{\varepsilon}$ 随 Q_D^* 单调递增, Q_D^* 随 w 单调递减, 所以 $\hat{\varepsilon}$ 随 w 单调递减. 为使不确定性需求 $\hat{\varepsilon} \geqslant 0$, 由 $\hat{\varepsilon} = 2Q - 1\,0000 \geqslant 0$ 可得 Q_D^* 的最小取值为 5 000 件, 代入式 (7), 求得 $w_{\max} = 250$ 元, 又因为 $w \geqslant c$, 所以 $w_{\min} = 100$元. 批发价格 w 以 10 为步长, 其余参数不变, 代入各公式, 结果见图 4.

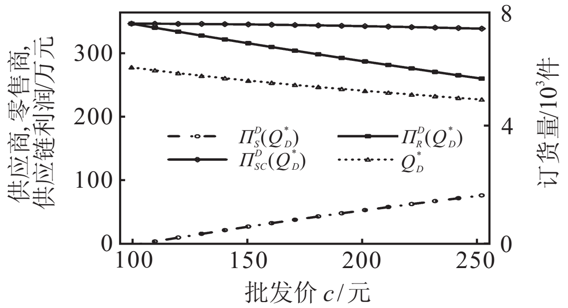

图 4　批发价格变化对订货量与各方利润的影响

由图 4 可见, 在不确定性需求存在的情况下, 随着批发价格的提高, 最优订货量、零售商期望利润、供应链期望总利润均下降, 供应商的期望利润上升. 这表明, 供应商从自身收益优化的角度考虑, 会倾向于提高批发价格, 但会造成订货量的减少, 使零售商和供应链的总利润减少. 从图中供应链期望总利润 $\Pi_{SC}^D(Q_D^*)$ 和订货量 Q_D^* 两条曲线的走势可以看出, 相比订货量的减少幅度, 采用延迟定价策略可有效降低供应链总利润的减少幅度, 比固定零售价更有优势. 这一结果表明: 在不确定性需求和分散式供应链下, 采用延迟定价策略虽然不能实现集中式供应链下的最优全局利润, 但相比固定售价, 可以显著提高供应链的总利润, 且批发价格越高效果越明显. 较高的批发价符合供应商的自身利益, 若订货环节供应商处于强势地位, 则供应商会自发追逐较高的批发价; 在零售环节, 零售商握有定价权, 能够根据市场需求信息确定最优售价, 实现零售环节的效益最优. 总之, 延迟定价不失为一种有效的供应链协调策略.

6　结　论

延迟定价策略是解决需求不确定性、提高客户满意度、降低库存风险的有效措施. 本文基于随机需求环境, 以供应链的分散和集中控制为决策条件, 引入延迟定价策略进行供应链各方利润函数的建模和求解. 由两种决策条件下数理模型的推理比较可知, 分散决策下的最优订货量低于集中决策情形. 但是, 现代企业更多的是基于分工合作和优势互补, 在分散式供应链下进行生产和定价决策; 集中决策虽然可以使订货量和供应链利润最大化, 但要求企业拥有完整的产业链, 一般难以实现, 不过可以作为供应链高度协调的目标准则. 集中决策与分散决策下, 生产成本和残值参数变化对供应链各方利润影响的数值分析表明: 在分散决策下, 越高的生产成本或越低的产品残值可使供应链的总利润与集中决策时的理论最优值越接近, 此时采用延迟定价策略更有优势. 通过批发价格参数变化对分散式供应链各方利润影响的分析表明: 采用延迟定价策略虽然仍不能达到集中决策时的供应链系统最优, 但相比固定售价, 可以显著提

高供应链的总利润. 所以, 在基于批发价格契约的供应链下采用延迟定价, 供应链伙伴各自获得相应决策权, 是一种有效的供应链协同策略.

本文仅研究了两级供应链这一最典型情形, 未来可进行复杂的多层级供应链延迟决策探讨. 本文仅考虑单一季节 (周期) 情形, 多季节、多周期产供销模式是后续的研究方向.

参考文献(**References**)

[1] Yang B, Yang Y, Wijngaard J. Postponement: An inter-organizational perspective[J]. Int J of Production Research, 2007, 45(4): 971-988.

[2] Alderson W. Marketing efficiency and the principle of postponement[J]. Cost and Profit Outlook, 1950, 3(4): 15-18.

[3] Fisher M L, Hammond J H, Obermeyer W R, et al. Making supply meet demand in an uncertain world[J]. Harvard Business Review, 1994, 72(3): 83-93.

[4] Van Mieghem J A, Dada M. Price versus production postponement: Capacity and competition[J]. Management Science, 1999, 45(12): 1639-1649.

[5] 徐和, 顿彩霞, 邹旭霞. 基于异质性顾客群的零售商补货及反应性定价策略研究[J]. 中国管理科学, 2011, 19(5): 115-121.
(Xu H, Dun C X, Zou X X. The retailer's optimal replenishment and responsive pricing strategies in a heterogeneous market[J]. Chinese J of Management Science, 2011, 19(5): 115-121.)

[6] Aydin G, Porteus E L. Joint inventory and pricing decisions for an assortment[J]. Operations Research, 2008, 56(5): 1247-1255.

[7] Bish E K, Liu J, Suwandechochai R. Optimal capacity, product substitution, linear demand models, and uncertainty[J]. The Engineering Economist, 2009, 54(2): 109-151.

[8] Goyal M, Netessine S. Volume flexibility, product flexibility, or both: The role of demand correlation and product substitution[J]. Manufacturing & Service Operations Management, 2011, 13(2): 180-193.

[9] Lus B, Muriel A. Measuring the impact of increased product substitution on pricing and capacity decisions under linear demands[J]. Production and Operations Management, 2009, 18(1): 95-113.

[10] Bish E K, Suwandechochai R. Optimal capacity for substitutable products under operational postponement[J]. European J of Operational Research, 2010, 207(2): 775-783.

[11] Li J. The implications of postponement on contract design and channel performance[J]. European J of Operational Research, 2012, 216(2): 356-366.

[12] Surti C, Hassini E, Abad P. Pricing and inventory decisions with uncertain supply and stochastic demand[J]. Asia-Pacific J of Operational Research, 2013, 30(6): 1-25.

[13] 覃燕红, 李宇雨. 需求不确定情形下采用延迟定价的延迟生产系统最优生产决策[J]. 运筹与管理, 2014, 23(4): 102-116.
(Qin Y H, Li Y Y. The postponement model of substitutable products under uncertain demand[J]. Operations Research and Management Science, 2014, 23(4): 102-116.)

[14] 张克勇, 侯世旺, 周国华. 不确定需求下供应链定价延迟策略研究[J]. 管理工程学报, 2014, 28(1): 195-201.
(Zhang K Y, Hou S W, Zhou G H. Price postponement strategy in the supply chain under uncertain demand[J]. J of Industrial Engineering/Engineering Management, 2014, 28(1): 195-201.)

[15] Granot D, Yin S. Price and order postponement in a decentralized newsvendor model with multiplicative and price-dependent demand[J]. Operations Research, 2008, 56(1): 121-139.

[16] Song Y, Ray S, Li S. Structural properties of buyback contracts for price-setting newsvendors[J]. Manufacturing and Service Operations Management, 2008, 10(1): 1-18.

[17] Xu Y, Bisi A. Wholesale-price contracts with postponed and fixed retail prices[J]. Operations Research Letters, 2012, 40(4): 250-257.

(责任编辑：郑晓蕾)