

## 高科技易逝品的三层联合定价与订货决策

王苗苗, 朱晓曦, 张 瑞

(南昌大学 经济管理学院, 南昌 330031)

**摘要:** 研究高科技产业背景下三级供应链系统中原材料供应商的最优定价决策、制造商和零售商的最优定价和订货决策. 围绕高科技易逝品的售价和零部件购买价格随时间递减的特点, 分别建立以零售商和供应商为主导的三层联合定价和订货模型, 并设计了三层粒子群算法对模型进行求解. 数值实验验证了所提出算法的有效性. 对模型特点的分析结果表明, 零售商主导下的三层供应链系统能更好地提高整个供应链的效率.

**关键词:** 高科技易逝品; 三层规划; 定价和订货决策; 粒子群优化

**中图分类号:** F272.3; TP18

**文献标志码:** A

### Tri-level joint pricing and lot-sizing decisions for hi-tech perishable product

WANG Miao-miao, ZHU Xiao-xi, ZHANG Rui

(School of Economics and Management, Nanchang University, Nanchang 330031, China. Correspondent: WANG Miao-miao, E-mail: wangmiaomiao@ncu.edu.cn)

**Abstract:** Optimal pricing decisions of the raw material supplier, optimal pricing and lot-sizing decisions of the manufacturer and the retailer are considered in the three echelons supply chain system under the background of the hi-industries. Two tri-level joint pricing and lot-sizing models are established, which are respectively guided by the retailer and the supplier by considering the deteriorating manufacturer's purchase cost and the end-consumer's market price. A tri-level particle swarm optimization algorithm is designed to solve the problems. An example is employed to illustrate the feasibility of the proposed algorithm. The analysis of features of the models show that the retailer guided supply chain performs better than the system guided by the supplier in improving efficiency of the whole supply chain.

**Keywords:** hi-tech perishable product; tri-level programming; pricing and lot-sizing decisions; particle swarm optimization

## 0 引言

随着社会的发展, 高科技产品如电脑、手机等一系列电子产品越来越多地成为人们日常生活中不可或缺的一部分. 另一方面, 由于科技的不断进步及竞争的加剧, 高科技产品呈现出生命周期较短、产品更新快的特征. 这些特征使得高科技产品的市场价格和零部件购买价格随着时间的变化以一定比率不断递减. 一些高科技产品如电脑、通讯产品等的零件成本与市场销售价格以每周1%的比率递减<sup>[1]</sup>. 这表示早一周购买零部件或者晚一周销售产品都将导致1%的损失. Yang等<sup>[2]</sup>提出了一种有限规划周期内基于需求和价格连续递减的快速反应生产策略; Khouja等<sup>[3]</sup>提

出了一种在有限规划周期内购买成本连续递减的最优订货批量模型; 王圣东等<sup>[4]</sup>建立了动态易逝品销售商两阶段订货决策模型, 并通过对模型的最优解进行理论分析得出了一些重要管理启示.

现实中, 供应链是经原材料供应商、制造商、分销商、零售商等上下游企业将产品或服务提供给最终顾客的具有层次的网络结构, 供应链上各成员之间具有复杂的内在竞争关系, 这使得他们在制定决策时很难从供应链的整体利益考虑, 而是以自身利益最大化为目标. 不仅如此, 由于链上其他成员的决策会对其自身的利益产生影响, 他们还需要考虑其他成员的选择. 具有层次结构的问题正是多层规划的研究范畴,

收稿日期: 2014-11-22; 修回日期: 2015-04-29.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61473141); 江西省高校人文社科项目(GL1446, GL1415); 教育部人文社科项目(15YJC630125).

作者简介: 王苗苗(1986-), 女, 讲师, 博士, 从事智能计算及应用、供应链优化等研究; 朱晓曦(1987-), 男, 讲师, 博士, 从事生产运作管理的研究.

供应链的这些特征都决定了多层规划更适合应用于供应链的建模。

马士华等<sup>[5]</sup>采用两层规划建立了供应链多阶段响应周期模型,并通过实际调研例子验证了该模型能够为优化和缩短多阶段响应周期提供一个有效的决策工具;郑称德等<sup>[6]</sup>构建了一个包括生产商、物流中心、中转点和零售商等 4 类节点的多层物流网络选址规划模型,并采用遗传算法进行求解;Qiu 等<sup>[7]</sup>针对干港系统中的集装箱储存价格问题建立了基于两层规划的定价决策模型;Hsueh<sup>[8]</sup>采用两层规划技术对可持续供应链管理中的企业社会责任和供应链上各成员的补偿问题进行了研究;Calvete 等<sup>[9]</sup>针对分布型供应链系统,建立了分配和制造过程的两层规划模型,并提出了一种快速高效的混合演化算法进行模型求解;针对两层规划难以求解的特点,邓胜岳等<sup>[10]</sup>研究了一类上层含约束条件且具有模糊决策变量的二层多随线性规划模型,并利用 Kuhn-Tucker 方法得到了该模型的最优解;郭欢等<sup>[11]</sup>针对漂移型灰色二层多目标线性规划问题,将 Kuhn-Tucker 条件与粒子群优化算法相结合得到原问题的解。

本文以高科技易逝品为研究背景,研究由供应商、制造商和零售商组成的三供应链系统中原材料供应商的最优定价决策、制造商和零售商的最优定价和订货决策问题。围绕高科技易逝品的特点,分别建立了以零售商为主导和以供应商为主导的供应链联合定价和订货决策三层规划模型。针对模型难以采用传统优化方法求解的特点,设计了基于粒子群优化算法的三层智能算法来求解模型,并进行算例分析。

## 1 模型构建

本文假设:制造商和零售商的目标是使各自利润最大化,并且他们都有自己决策的权力;制造商和零售商的补货率是即刻的;每次补货时间间隔相同且不允许缺货;考虑规划期为 12 个月并且假定每月的市场需求率是常数;原材料的购买价格、产品的购买价格以及产品的零售价在单位时间内持续下降;购买间隔时间为常数。

本文的决策变量如下:  $p_{s0}$  为单位原料的初始售价(由供应商决定),  $\beta$  为制造商向供应商订购原材料的次数(由制造商决定),  $p_{m0}$  为单位产品的初始批发价(由制造商决定),  $\alpha$  为零售商在制造商的单位批量里的订货次数(由零售商决定),  $Q$  为零售商的每次订货量(由零售商决定)。

其他相关参数:  $T$  为规划周期的月数,  $D$  为每月的市场需求率,  $r_b$  为零售商购买成本的每月下降率,  $r_v$  为制造商购买成本的每月下降率,  $r_m$  为零售价的每月下降率,  $h_m$  为制造商每月的持有成本率,  $h_r$  为

零售商每月的持有成本率,  $O_m$  为制造商每次订购的订购费用,  $O_r$  为零售商每次订购的订购费用,  $F_r(Q)$  表示批量为  $Q$  的原材料的运输成本(由制造商承担),  $F_p(Q)$  表示批量为  $Q$  的最终产品的运输成本(由零售商承担),  $m_c$  为制造商的单位加工成本,  $p_c$  为供应商的生产成本,  $C$  为单位货车的最大装载量,  $R$  为单位货车的费用,  $TP_s$  为供应商的总利润,  $TP_m$  为制造商的总利润,  $TP_r$  为零售商的总利润。

### 1.1 供应商的总利润

供应商的总利润 = 销售收入 - 生产成本。

$$TP_s = \int_0^T (p_{s0}(1-r_v)^t) D dt - p_c \alpha \beta Q, \quad (1)$$

约束条件为  $p_c \leq p_{s0} \leq p_{m0} - m_c - \frac{F_r(Q)}{Q}$ 。

### 1.2 制造商的总利润

制造商的总利润 = 销售收入 - 购买成本 - 加工费用 - 持有成本 - 订购费用。

规划期内制造商的销售收入为

$$R_m = \sum_{i=0}^{\beta-1} \sum_{j=0}^{\alpha-1} p_{m0}(1-r_b)^{(i+j/\alpha)(T/\beta)} Q,$$

制造商的购买成本为

$$PC_m = \sum_{i=0}^{\beta-1} p_{s0}(1-r_v)^{iT/\beta} \alpha Q,$$

制造商的加工费用为

$$MC_m = m_c \alpha \beta Q.$$

制造商和零售商的整体平均库存水平为  $\alpha Q/2$ , 而零售商的平均库存水平为  $Q/2$ , 则制造商的平均库存水平为  $(\alpha-1)Q/2$ 。制造商的持有成本为

$$HC_m =$$

$$\frac{Th_m}{\beta} \left[ \sum_{i=0}^{\beta-1} p_{s0}(1-r_v)^{iT/\beta} + \frac{F_r(Q)}{Q} \right] \frac{Q}{2} (\alpha-1),$$

制造商的订购费用为

$$OC_m = \beta(O_m + F_r(Q)),$$

制造商在规划期内的总利润为

$$TP_m =$$

$$R_m - PC_m - MC_m - HC_m - OC_m =$$

$$\sum_{i=0}^{\beta-1} \sum_{j=0}^{\alpha-1} p_{m0}(1-r_b)^{(i+j/\alpha)(T/\beta)} Q -$$

$$\sum_{i=0}^{\beta-1} p_{s0}(1-r_v)^{iT/\beta} \alpha Q - m_c \alpha \beta Q -$$

$$\frac{Th_m}{\beta} \left[ \sum_{i=0}^{\beta-1} p_{s0}(1-r_v)^{iT/\beta} + \frac{F_r(Q)}{Q} \right] \frac{Q}{2} (\alpha-1) -$$

$$\beta(O_m + F_r(Q)), \quad (2)$$

约束条件为

$$p_{s0} + m_c + \frac{F_r(Q)}{Q} \leq p_{m0} \leq p_{r0} - \frac{F_p(Q)}{Q}, \quad \beta \in N^+.$$

### 1.3 零售商的总利润

零售商的总利润 = 销售收入 - 购买成本 - 持有成本 - 订购费用。

零售商在规划期内的销售收入为

$$R_r = \int_0^T (p_{r0}(1 - r_m)^t) D dt,$$

零售商的购买成本为

$$PC_r = \sum_{i=0}^{\beta-1} \sum_{j=0}^{\alpha-1} p_{m0}(1 - r_b)^{(i+j/\alpha)(T/\beta)} Q.$$

零售商的平均库存为  $Q/2$ ，单位购买成本依次为  $p_{m0}$ ,  $p_{m0}(1 - r_b)^{T/\alpha\beta}$ ,  $p_{m0}(1 - r_b)^{2T/\alpha\beta}$ , ...,  $p_{m0}(1 - r_b)^{(\beta-1+(\alpha-1)/\alpha)T/\beta}$ .

零售商规划周期内的持有成本为

$$HC_r =$$

$$\frac{Th_r}{\alpha\beta} \left[ \sum_{i=0}^{\beta-1} \sum_{j=0}^{\alpha-1} p_{m0}(1 - r_b)^{(i+j/\alpha)(T/\beta)} + \frac{F_p(Q)}{Q} \right] \frac{Q}{2},$$

零售商的订购费用为

$$OC_r = \alpha\beta(O_r + F_p(Q)),$$

零售商在规划期内的总利润为

$$\begin{aligned} TP_r &= R_r - PC_r - HC_r - OC_r = \\ &\int_0^T (p_{r0}(1 - r_m)^t) D dt - \\ &\sum_{i=0}^{\beta-1} \sum_{j=0}^{\alpha-1} p_{m0}(1 - r_b)^{(i+j/\alpha)(T/\beta)} Q - \\ &\frac{Th_r}{\alpha\beta} \left[ \sum_{i=0}^{\beta-1} \sum_{j=0}^{\alpha-1} p_{m0}(1 - r_b)^{(i+j/\alpha)(T/\beta)} + \right. \\ &\left. \frac{F_p(Q)}{Q} \right] \frac{Q}{2} - \alpha\beta(O_r + F_p(Q)), \end{aligned} \quad (3)$$

约束条件为  $\alpha \in N^+$ .

### 1.4 三层模型构建

在作定价和订货决策时，若优先考虑零售商利润，则可建立以零售商为主导的三层定价和订货模型

$$\begin{aligned} &\max_{\alpha} TP_r, \\ &s.t. \alpha \in N^+; \\ &\max_{\beta, p_{m0}} TP_m, \\ &s.t. \beta \in N^+, \\ &p_{s0} + m_c + \frac{F_r(Q)}{Q} \leq p_{m0} \leq p_{r0} - \frac{F_p(Q)}{Q}; \\ &\max_{p_{s0}} TP_s, \\ &s.t. p_c \leq p_{s0} \leq p_{m0} - \frac{F_r(Q)}{Q} - m_c. \end{aligned} \quad (4)$$

在模型(4)中，零售商、制造商和供应商分别控制他们各自的变量，在各自相应的约束条件下最大化自己的利润。零售商是上层决策者，制造商是中层决策者，供应商是下层决策者。

如果优先考虑供应商的利润，则可以建立如下的

以供应商为主导的三层定价和订货模型：

$$\begin{aligned} &\max_{p_{s0}} TP_s, \\ &s.t. p_c \leq p_{s0} \leq p_{m0} - \frac{F_r(Q)}{Q} - m_c; \\ &\max_{\beta, p_{m0}} TP_m, \\ &s.t. \beta \in N^+, \\ &p_{s0} + m_c + \frac{F_r(Q)}{Q} \leq p_{m0} \leq p_{r0} - \frac{F_p(Q)}{Q}; \\ &\max_{p_{s0}} TP_s, \\ &s.t. \alpha \in N^+. \end{aligned} \quad (5)$$

在模型(5)中，供应商、制造商和零售商分别控制他们各自的变量，在各自相应的约束条件下使自己的利润最大化。此时，供应商是上层决策者，制造商是中层决策者，零售商是下层决策者。

其中，订货批量与订货次数存在如下替换关系：

$$Q = \frac{TD}{\alpha\beta}. \quad (6)$$

$F_r(Q)$  和  $F_p(Q)$  的值按如下方式<sup>[12]</sup>计算：

$$F_r(Q) = F_p(Q) = \left\lceil \frac{Q}{C} \right\rceil R. \quad (7)$$

由于上述非线性三层规划问题是 NP-hard 问题，传统优化方法很难求解，这里采用粒子群优化算法来求解上述模型。

## 2 3层粒子群算法

### 2.1 基本粒子群算法

粒子群优化算法 (PSO) 是一种基于群智能的演化计算方法，由 Eberhart 等<sup>[13]</sup>于 1995 年提出。该算法以其特有的优点 (收敛速度快、参数设置少、易于编程实现) 受到了国内外学者的广泛关注，并在众多领域中得到了成功应用<sup>[14-15]</sup>。粒子群优化算法将原问题的每个解看作一个没有质量、没有体积的粒子，每个粒子以一定速度在原问题的搜索空间中飞行，同时根据自己的既定飞行方向、自身所经历的最好位置和整个种群所经历的最好位置来调整自己下一步的飞行方向。假设种群规模为  $N$ ，搜索空间的维数为  $D$ ，第  $i$  个粒子的位置记为  $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})$ ，速度为  $v_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})$ ，该粒子目前搜索到的最优位置记为  $p_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD})$ ，整个种群目前搜索到的最优位置记为  $p_g = (p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gD})$ 。种群中的每个粒子根据如下公式更新自己下一步的速度和位置：

$$\begin{aligned} v_{id}(t+1) &= \\ &wv_{id}(t) + c_1r_1(p_{id}(t) - x_{id}(t)) + c_2r_2(p_{gd}(t) - x_{id}(t)), \end{aligned} \quad (8)$$

$$x_{id}(t+1) = x_{id}(t) + v_{id}(t+1). \quad (9)$$

其中： $1 \leq d \leq D$ ;  $1 \leq i \leq N$ ;  $c_1$  和  $c_2$  为非负常数，称为学习因子； $r_1$  和  $r_2$  为服从均匀分布的  $(0, 1)$  之间的随机数； $v_{id} \in [-v_{\max}, v_{\max}]$ ， $v_{\max}$  为预先设定的最大

速度, 如果  $|v_{id}| > v_{\max}$ , 则令  $|v_{id}| = v_{\max}$ ;  $w$  为惯性权重, 能够调节算法的全局搜索能力和局部寻优能力, 是控制粒子搜索范围的一个比较重要的参数, 为了使算法在全局和局部搜索能力之间达到平衡, 惯性权重的选取显得尤为重要.

Shi 等<sup>[16]</sup>和 Clerc 等<sup>[17]</sup>先后采用线性递减的惯性权重和引入压缩因子的方式确保算法的加速收敛, 但这两种方式会导致算法一旦陷入局部陷阱就难以跳出, 以至于出现早熟收敛现象. 针对这一问题, 本文采用如下自适应调节惯性权重方法:

$$w(i) = \frac{\lambda |f_i(t) - f_{\text{best}}(t)|}{\left| \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f_i(t) - f_{\text{best}}(t) \right|}. \quad (10)$$

其中:  $f_i(t)$  为粒子在第  $i$  代的适应度;  $f_{\text{best}}(t)$  为整个种群在第  $t$  代的最优值;  $\lambda$  为  $(0, 1)$  之间的常数, 通过试验, 本文取  $\lambda = 0.1$ . 该动态自适应惯性权重使得算法在迭代过程中可以根据每个粒子的适应值变化动态调节惯性权重, 从而较好地平衡算法的全局搜索性能和局部搜索性能.

## 2.2 柯西随机分布

柯西分布中的随机数由正切函数产生, 即

$$c + d(\tan(\pi(\text{rand}(0, 1) - 0.5))), \quad (11)$$

其中  $c$  和  $d$  是控制参数.

由于正切函数的斜率增长极其迅速, Yao 等<sup>[18]</sup>得出结论: 即使是在求解复杂问题时, 基于柯西分布的进化算法的收敛速度都要快于基于高斯分布的进化算法; 另外, Sinha 等<sup>[19]</sup>也通过实验得出, 基于柯西分布的 PSO 算法所得结果的标准差比基于高斯分布的 PSO 算法所得结果要小. 因此, 本文通过柯西分布产生 PSO 算法中的随机数.

## 2.3 约束处理机制

上述模型中, 单独的上层、中层和下层规划问题均是标准约束优化问题. 约束处理机制的选择对约束优化问题是非常重要的, 本文采用罚函数处理约束.

不失一般性, 将下层规划问题看作一个单独的约束优化问题来描述本节的约束处理机制, 假定上层的决策变量和中层的决策变量均是给定的, 在搜索空间中, 满足约束条件的粒子称作可行粒子, 否则称为不可行粒子, 即考虑如下的约束优化问题:

$$\begin{aligned} \min & f(x_0, y_0, z), \\ \text{s.t.} & g_i(x_0, y_0, z) \leq 0, \quad i = 1, 2, \dots, p. \end{aligned}$$

其中:  $p$  为约束条件的个数;  $S$  为搜索空间,  $x_0, y_0, z \in S, S \subseteq R^n$ .

由下式计算粒子的适应度:

$$\text{fit}(x_0, y_0, z) = \begin{cases} f(x_0, y_0, z), & z \in \Omega(x_0, y_0); \\ F(x_0, y_0, z), & z \in S \setminus \Omega(x_0, y_0). \end{cases} \quad (12)$$

$$F(x_0, y_0, z) =$$

$$f(x_0, y_0, z) + M \sum_{i=1}^p (\max\{g_i(x_0, y_0, z), 0\})^2. \quad (13)$$

其中:  $\Omega(x_0, y_0)$  为下层规划问题的可行集;  $M$  为惩罚因子, 是预先设定的足够大的正数.

## 2.4 TPSO 算法框架

算法 1: PSO 求解单层优化问题的流程见图 1.

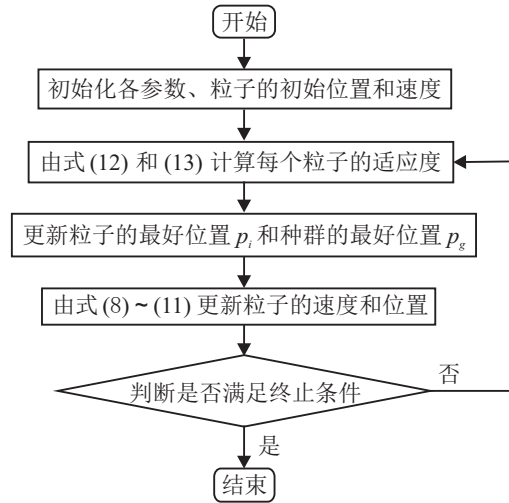


图 1 PSO 算法流程

算法 2: TPSO 求解三层规划模型的步骤 (以零售商主导模型为例) 如下.

Step 1: 初始化种群规模  $N$ , 最大迭代次数  $T_{\max}$ , 学习因子  $c_1$  和  $c_2$ , 最大惯性权重  $w_{\max}$  和最小惯性权重  $w_{\min}$ , 惩罚因子  $M$ . 分别根据上层、中层、下层问题决策变量的取值范围随机产生上、中、下三层问题的初始解: 零售商最优订货次数  $\alpha^{(0)}$ , 制造商最优订货次数  $\beta^{(0)}$  和单位产品的初始批发价  $p_{m0}^{(0)}$ , 单位原材料的初始批发价  $p_{s0}^{(0)}$ .

Step 2: 初始化迭代次数  $t = 0$ .

Step 3: 对于每个给定的  $\alpha^{(0)}$ 、 $\beta^{(0)}$  和  $p_{m0}^{(0)}$ , 采用 PSO 算法求解下层模型, 得到最优单位原材料初始批发价格  $p_{s0}^{(0)}$ .

Step 4: 将  $p_{s0}^{(0)}$  代入中层模型, 采用 PSO 求解中层模型, 得到制造商的最优订货次数  $\beta^{(t)}$  和单位产品的初始批发价  $p_{m0}^{(t)}$ .

Step 5: 将  $p_{s0}^{(0)}$ 、 $\beta^{(t)}$  和  $p_{m0}^{(t)}$  分别代入上层模型, 采用 PSO 求解上层模型, 得到新的零售商最优订货次数  $\alpha^{(t)}$ .

Step 6: 循环计算. 在新的  $\alpha^{(t)}$ 、 $\beta^{(t)}$  和  $p_{m0}^{(t)}$  的基础上采用 PSO 求解下层模型, 得到新的解  $p_{s0}^{(t+1)}$ , 将新的  $p_{s0}^{(t+1)}$  代入中层模型, 通过 PSO 得到新的  $\beta^{(t+1)}$  和  $p_{m0}^{(t+1)}$ , 再将新的  $p_{s0}^{(t+1)}$ 、 $\beta^{(t+1)}$  和  $p_{m0}^{(t+1)}$  代入上层模型, 通过 PSO 得到新的解  $\alpha^{(t+1)}$ .

Step 7: 收敛性判断. 如果  $t \leq T_{\max}$ , 则停止计算, 输出最终结果; 否则, 令  $t = t + 1$ , 转 Step 3.

### 3 算例分析

采用 TPSO 对所建模型进行求解, 并对求解结果进行分析, 3 层模型和算法 TPSO 的参数设置见表 1.

表 1 参数设置

模型(4)和(5)中的参数设置	算法 TPSO 中参数设置
$p_{r0} = 10$	种群规模 $N = 30$
$D = 2000$	最大迭代次数 $T_{max} = 100$
$r_b = r_v = r_m = 0.005$	学习因子 $c_1 = c_2 = 2.0$
$p_c = 3$	最大速度 $v_{max} = 10$
$m_c = 1$	惩罚因子 $M = 10^5$
$T = 12$	
$h_r = h_m = 0.001$	
$O_r = 200$	
$O_m = 2000$	
$R = 200$	
$C = 500$	

对每个模型独立运行 20 次 TPSO 并记录下最好结果和平均结果, 见表 2. 根据表 2 中的最好求解结果绘制图 2.

表 2 模型求解结果

参数	最好结果		平均结果	
	模型(4)	模型(5)	模型(4)	模型(5)
$\alpha$	2	4	5	5
$\beta$	2	5	2	3
$p_{m0}$	6.3700	8.7806	6.6837	8.8935
$p_{s0}$	3.4030	4.8990	3.3587	4.5747
$TP_r$	72806	12053	64682	10259
$TP_m$	36108	52928	46542	67365
$TP_s$	7264	42110	6232	34555
总利润	116178	107091	117456	112179

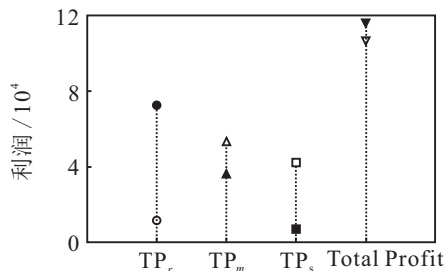


图 2 基于表 2 的最好结果

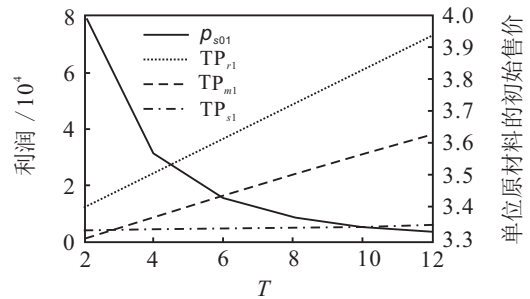
在图 2 中: 实心的圆、正三角、正方形、倒三角分别表示  $TP_{r1}$ 、 $TP_{m1}$ 、 $TP_{s1}$ 、Total Profit1; 空心的圆、正三角、正方形、倒三角分别表示  $TP_{r2}$ 、 $TP_{m2}$ 、 $TP_{s2}$ 、Total Profit2.

由表 2 和图 2 可以看出, 零售商占主导时的利润比其处于下层时的利润要高很多, 供应商占主导时的利润也比其处于下层时的利润高很多, 这说明三层规划模型很大程度上增加了供应链主导者的利润.

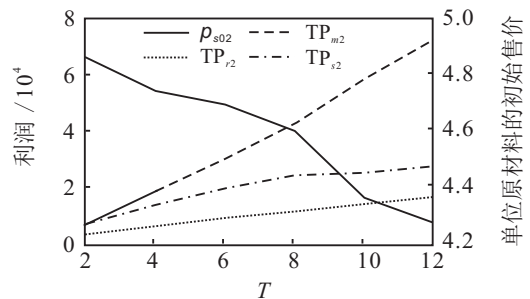
为了进一步验证算法的有效性, 在固定其他决策变量 ( $\alpha, \beta, p_{m0}$ ) 的基础上, 分别对零售商和供应商主导下的原材料供应商定价和供应链上各成员利润随规划周期  $T$  的变化情况给出了具体算例分析, 对每个模型独立运行 20 次, 取平均值, 见表 3, 在表 3 所得数据的基础上绘制图 3.

表 3 供应商对原材料定价及各成员利润随  $T$  变化分析

$T$	模型(4)				模型(5)					
	$(\alpha = \beta = 2, p_{m0} = 6.3700)$	$p_{s0}$	$TP_r$	$TP_m$	$TP_s$	$(\alpha = \beta = 2, p_{m0} = 8.7806)$	$p_{s0}$	$TP_r$	$TP_m$	$TP_s$
2	3.9949	12009	641	3900	4.8613	2408	6789	7348		
4	3.5742	24599	8514	4309	4.7393	5477	18376	13536		
6	3.4324	36970	16274	4575	4.6903	8409	29884	19445		
8	3.3704	49127	23760	4860	4.5953	11205	42334	24070		
10	3.3375	61071	31033	5105	4.3550	13863	58228	24954		
12	3.3212	72805	38045	5359	4.2635	16390	72303	27308		



(a) retailer-leader



(b) supplier-leader

图 3 基于表 3 的结果

在图 2 和图 3 中:  $TP_{r1}$ 、 $TP_{m1}$ 、 $TP_{s1}$ 、 $p_{s01}$  以及 Total Profit 1 分别为零售商主导下的零售商、制造商、供应商、原材料初始价格和供应链的总利润;  $TP_{r2}$ 、 $TP_{m2}$ 、 $TP_{s2}$ 、Total Profit 2、 $p_{s02}$  分别为供应商主导下的零售商、制造商、供应商、供应链的总利润和原材料初始价格.

表 3 分别给出了零售商和供应商主导下的供应商对原材料的初始定价和供应链上各成员(供应商、制造商、零售商)的利润随规划周期增加的变化情况.

由图 3 可以直观地看出, 随着规划周期数的增加, 一方面, 由于高科技产品市场价格递减率的存在, 供应商对原材料的初始定价逐渐减少, 另一方面, 规划周期的增加导致了总的市场需求量增加, 因此供应链上各成员的总利润均逐渐增加, 此结果进一步验证了本文所提出算法的有效性.

### 4 结 论

本文在高科技易逝品的背景下, 研究了在生产实际中常见的三层供应链中原材料供应商的最优定价决策、制造商和零售商的最优定价和订货决策问

题. 围绕高科技产品价值易逝性特点, 分别建立了以零售商为主导和以供应商为主导的供应链定价和订货决策三层规划模型, 并设计了三层粒子群算法来求解相应模型. 计算结果验证了算法的有效性, 说明该算法可应用于相关高科技产业的三级供应链系统领域. 此外, 本文构建设置的模型参数和数例实验表明, 从供应链整体利益最大化的角度考虑, 零售商主导的供应链比供应商主导的供应链的整体利润大. 这可以解释为在一些特定情况下(例如沃尔玛等比较强势的大型零售商), 零售商更贴近市场, 对市场信息了解更多, 零售商优先做决策, 能够根据销售情况订购产品, 减少产品的库存及持有成本, 因而更能提高整个供应链的效率.

现实中存在如苹果等占据供应链主导地位的供应商, 也存在如沃尔玛之类的强势零售商, 他们在供应链生产和销售环节中占据主导地位, 拥有优先决策权和最终决策权. 因此, 不仅要对应供应商主导的供应链进行研究, 零售商主导的供应链的研究也具有十分重要的现实意义. 另外, 本文主要考虑定价及订货决策问题, 当供应链下游的需求不确定时, 在 VMI 情形下如何确定供应商的投产决策是值得研究的问题, 可以作为进一步的研究方向.

#### 参考文献(References)

- [1] Yang P C, Wee H M, Yu J C P. Collaborative pricing and replenishment policy for hi-tech industry[J]. *J of the Operational Research Society*, 2007, 58(7): 894-900.
- [2] Yang P C, Wee H M. A quick response production strategy to market demand[J]. *Product Planning Control*, 2001, 12(4): 326-334.
- [3] Khouja M, Park S. Optimal lot sizing under continuous price decrease[J]. *Omega*, 2003, 31(6): 539-545.
- [4] 王圣东, 汪俊萍, 周永务. 两阶段需求相关的动态易逝品最优订货策略[J]. *控制与决策*, 2013, 28(4): 579-584. (Wang S D, Wang J P, Zhou Y W. Optimal order policy for dynamic perishable product with demand correlation between two periods[J]. *Control and Decision*, 2013, 28(4): 579-584.)
- [5] 马士华, 杨文胜, 李莉. 基于二层规划的供应链多阶响应周期决策模型[J]. *管理科学学报*, 2005, 8(6): 51-59. (Ma S H, Yang W S, Li L. Supply chain multi-stage response time decision-making model based on bi-level programming[J]. *J of Management Sciences in China*, 2005, 8(6): 51-59.)
- [6] 郑称德, 黄达. 客户需求驱动的多层物流网络选址规划模型与算法[J]. *系统管理学报*, 2009, 18(2): 232-236. (Zheng C D, Huang D. A location-allocation model and its algorithm of multi-echelon logistics systems based on customer demand[J]. *J of Systems & Management*, 2009, 18(2): 232-236.)
- [7] Qiu X, Lam J S L, Huang G Q. A bilevel storage pricing model for outbound containers in a dry port system[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2015, 73: 65-83.
- [8] Hsueh C F. A bilevel programming model for corporate social responsibility collaboration in sustainable supply chain management[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2015, 73: 84-95.
- [9] Calvete H I, Galé C, Iranzo J A. Planning of a decentralized distribution network using bilevel optimization[J]. *Omega*, 2014, 49: 30-41.
- [10] 邓胜岳, 周立前, 汪新凡. 上层含约束条件且具有模糊决策变量的二层多随线性规划[J]. *控制与决策*, 2014, 29(10): 1803-1808. (Deng S Y, Zhou L Q, Wang X F. Bi-level multiple followers linear programming with upper constraint and fuzzy decision variables[J]. *Control and Decision*, 2014, 29(10): 1803-1808.)
- [11] 郭欢, 肖新平, Jeffrey Forrest. 灰色二层多目标线性规划问题及其解法[J]. *控制与决策*, 2014, 29(7): 1193-1198. (Guo H, Xiao X P, Forrest Jeffrey. Problem of grey bilevel multi-objective linear programming and its algorithm[J]. *Control and Decision*, 2014, 29(7): 1193-1198.)
- [12] Yildirimaz C, Karabatı S, Sayın S. Pricing and lot-sizing decisions in a two-echelon system with transportation costs[J]. *OR Spectrum*, 2009, 31(3): 629-650.
- [13] Kennedy J, Eberhart R C. Particle swarm optimization[C]. *Proc of IEEE Int Conf on Neural Networks*. Perth: IEEE Press, 1995: 1942-1948.
- [14] 伍大清, 郑建国. 基于混合策略自适应学习的并行粒子群优化算法[J]. *控制与决策*, 2013, 28(7): 1087-1093. (Wu D Q, Zheng J G. Improved parallel particle swarm optimization algorithm with hybrid strategy and self-adaptive learning[J]. *Control and Decision*, 2013, 28(7): 1087-1093.)
- [15] Cheng R, Jin Y. A social learning particle swarm optimization algorithm for scalable optimization[J]. *Information Sciences*, 2015, 291: 43-60.
- [16] Shi Y, Eberhart R. Empirical study of particle swarm optimization[C]. *Int Conf on Evolutionary Computation*. Washington: IEEE Press, 1999: 1945-1950.
- [17] Clerc M, Kennedy J. The particle swarm: Explosion stability and convergence in a multi-dimensional complex space[J]. *IEEE Trans on Evolutionary Computation*, 2002, 6(1): 58-73.
- [18] Yao X, Liu Y, Lin C. Evolutionary programming made faster[J]. *IEEE Trans on Evolutionary Computation*, 1999, 3(2): 82-102.
- [19] Sinha A K, Aditya H K, Tiwari M K, et al. Agent oriented petroleum supply chain coordination: Co-evolutionary particle swarm optimization based approach[J]. *Expert Systems with Applications*, 2011, 38(5): 6132-6145.