

## 需求依赖减排水平和价格的供应链决策与协调机制

徐春明, 赵道致, 杜其光

(天津大学 管理与经济学部, 天津 300072)

**摘要:** 针对由一个低碳产品制造商与一个零售商组成的供应链, 考虑需求同时受减排水平和销售价格的影响, 分别研究寄售契约、收益共享契约以及收益共享与减排成本共担3种契约下供应链企业的优化决策, 并进一步探讨当需求的不确定部分为和式、随机部分服从均匀分布时的供应链系统的最优决策. 从理论上证明了制造商与零售商之间的合作利于促进减排水平的提升, 也利于供应链系统期望总利润的增加. 最后, 探讨了不同参数对协调供应链绩效的影响.

**关键词:** 低碳; 减排; 价格; 供应链模型; 契约

**中图分类号:** C934; F253.4

**文献标志码:** A

## Decision and coordination models for supply chain with carbon emissions reduction level and price dependent demand

XU Chun-ming, ZHAO Dao-zhi, DU Qi-guang

(College of Management and Economics, Tianjin University, Tianjin 300072, China. Correspondent: XU Chun-ming, E-mail: xucm2012@126.com)

**Abstract:** Based on three different contracts (i.e. consignment, revenue sharing, and revenue sharing with reduction-cost-sharing), decision models are developed in the supply chain, which consists of a low carbon manufacturer and a retailer, and meanwhile the customer demand is affected by emissions reduction level and selling price. Furthermore, assuming that the deterministic component of the demand is linear form and the random component of the demand follows a uniform distribution, the optimal decisions are explored under centralized and decentralized systems respectively. The results show that supply chain cooperation can raise the emissions reduction level and increase the expected total profit. Finally, the effects of different parameters on the coordination of supply chain's performance are discussed.

**Keywords:** low carbon; carbon emissions reduction; price; supply chain model; contract

### 0 引言

气候变暖已成为人类社会以及自然生态系统所面临的极具威胁的问题之一. 近年来, 各国政府、企业和学者已形成共识: 导致大气中可观测的温室气体的浓度增加的主要根源是经济活动中所产生的二氧化碳的过度排放<sup>[1]</sup>. 为了有效地减少二氧化碳的排放, 1992年, 世界各国在联合国环境发展大会上签署了《联合国气候变化框架公约》, 确立了“共同但有区别”的公约, 鼓励发达国家缔约方率先减排. 而作为当代制造业的大国, 中国在2009年的哥本哈根会议上承诺, 到2020年, 单位人均GDP二氧化碳排放量将比2005年下降40%~45%<sup>[2]</sup>. 低碳经济时代的到来, 企业有责任和义务参与节能减排. 在此背景下, 建立低碳产品的基本需求, 构筑销售渠道, 提高顾客对新产

品的接受度, 对厂商力争市场份额、打开市场至关重要. 因此, 从低碳产品制造商运营和零售商低碳宣传的角度来探讨企业减排问题具有重要的现实意义.

近年来, 国内外研究者已针对低碳环境下供应链节点企业的运营优化进行了研究. 如Shi等<sup>[3]</sup>考虑碳排放因素, 提出了一种针对生产和运营过程所产生的碳排放的评价方法. 在碳排放权可交易的环境下, 杜少甫等<sup>[4]</sup>考虑政府配额、市场交易和净化处理的情形, 研究了制造企业的生产优化问题. Hua等<sup>[5]</sup>则探讨了企业的订购批量问题, 通过与经典的经济订货批量模型(EOQ)进行比较, 分析了碳排放价格、碳配额对最优订购策略的影响. Zhang等<sup>[6]</sup>在顾客需求随机的环境下, 研究了一类生产批量依赖排放权的优化问题. Gong等<sup>[7]</sup>则进一步研究了离散型随机需求的多周期

收稿日期: 2014-12-31; 修回日期: 2015-03-29.

基金项目: 国家自然科学基金项目(71072155, 71472134).

作者简介: 徐春明(1980—), 男, 讲师, 博士生, 从事物流与供应链管理、库存模型及优化的研究; 赵道致(1956—), 男, 教授, 博士生导师, 从事物流与供应链管理、运营管理等研究.

订货批量模型,得到了最优的生产库存量及碳排放的最优策略.从减少运输过程碳排放的角度出发, Demir等<sup>[8]</sup>考虑了运输时间和燃料消耗均最小的双目标车辆调度问题.李进等<sup>[9]</sup>基于能耗和碳排放建立了非满载运输方式下具有固定车辆数的多车型低碳路径优化模型. Wahab等<sup>[10]</sup>考虑了生产和配送过程的碳排放,建立了一个期望成本最小化的两级供应链模型.上述文献大多是在碳排放权交易机制下对供应链企业的成本构成和盈利模式等进行的研究,并未考虑减排对需求的影响.

Laroche等<sup>[11]</sup>指出,减排不但会影响需求,而且随着消费者环保意识的逐渐增强,愈来愈多的消费者更愿意为环保产品支付更高的价格.同时, Plambeck<sup>[12]</sup>的实证研究表明,厂商主动披露其产品减排等相关信息会增加消费者的信任和增大产品市场的销售份额.此外, Liu等<sup>[13]</sup>的研究结果也表明,下游的零售商,通过低碳的推广和宣传等手段来增强消费者的环保意识,可以激励更多的消费者向环保型转变.最近,国内学者也对低碳环境下减排影响需求的问题给予了关注.王芹鹏等<sup>[14]</sup>在零售商主导的供应链系统中,考虑减排影响需求,运用微分博弈理论,研究了不合作、成本分担以及合作3个契约对供应链成员的影响.赵道致等<sup>[15]</sup>则在碳排放交易和碳总量限制情形下探讨了竞争制造商的动态博弈.以上研究大多假定销售价格为外生变量且忽略了需求与销售价格的相关性,更为重要的是,对自愿节能减排制造企业运营及零售企业低碳宣传相结合的协调机制研究还非常缺乏.

鉴于此,本文假定销售价格为内生决策变量,且考虑需求同时受减排水平和销售价格的影响,分别研究寄售契约、收益共享契约以及收益共享与减排成本共担3种契约下的供应链企业的优化决策,并在此基础上探讨了需求的确定部分为线性、随机部分服从均匀分布时的供应链系统的最优决策.最后,分析了外生参数的变动对协调供应链绩效的影响,所得结论对于低碳产品上市以及供应链企业的合作提供了理论依据和管理启示.

## 1 问题描述、符号说明及基本假设

### 1.1 问题描述

注意到在现实中,沃尔玛、国美和苏宁等大型零售商与制造企业联合,通过在商场设计专区,或以海报的形式对制造商的低碳产品进行教育推广,引导消费者低碳意识,以此增加低碳产品的需求<sup>[16-17]</sup>.为探讨制造商运营及零售商低碳宣传的契约机制设计,本文拟考虑由一个制造商与一个零售商组成的供应链.假定消费者群体具有潜在的低碳意识,产品的市场需求随机且依赖于减排水平和销售价格.制造商受

消费者低碳意识的影响自愿节能减排,其生产的产品以寄售(consignment)的方式在零售商处销售,零售商为引导低碳产品的销售进行低碳宣传,但事先从制造商处收取固定的单位产品服务费用(包括进场费、铺货费和其他销售服务的成本费等)作为补偿.在销售季节开始前,制造商依据市场的需求信息及零售商提供的寄售产品服务费用来确定寄售的产品数量、销售价格和产品的减排量.销售周期结束后,未销售的产品存在一定的残值.

### 1.2 符号说明

$D$ 表示零售商所面对的不确定性需求; $p$ 表示由制造商决定的销售价格; $I$ 表示零售商的单位宣传成本; $\eta$ 表示制造商的减排水平; $\omega$ 表示零售商所收取的单位产品服务费用; $c$ 表示单位产品的生产成本; $v$ 表示销售期末未销出的单位产品的市场残值.

### 1.3 基本假设

1) 市场需求由确定性和随机性两部分构成.假定需求的确定部分为非负函数 $r(p, \eta)$ ,其中, $r(p, \eta)$ 是关于销售价格 $p$ 的严格单减函数,即 $\partial r(p, \eta)/\partial p < 0$ ;同时,由于消费者低碳意识的存在,其需求随制造商减排水平的提高而逐渐增大,但增大的速度递减,即 $\partial r(p, \eta)/\partial \eta > 0, \partial^2 r(p, \eta)/\partial \eta^2 \leq 0$ .其次,需求的随机部分由随机变量 $\varepsilon$ 来描述,并设 $\varepsilon$ 的取值区间为 $[A, B] \subset (-\infty, +\infty)$ ,且具有已知的密度函数 $f(\cdot)$ 和分布函数 $F(\cdot)$ , $F(\cdot)$ 为连续可微的算子.为便于分析和讨论,本文仅假定市场需求 $D$ 的表达形式为 $D = r(p, \eta) + \varepsilon$ .

2) 考虑到实际情况,假定制造商的减排投资支出为 $m(\eta)$ ,该投资成本与减排水平 $\eta$ 相关.具体而言,随着减排水平的提升,减排投资的支出将增大,且随着减排难度的增大其投资支出会越来越来大<sup>[18]</sup>,即 $m'(\eta) > 0, m''(\eta) > 0$ .

3) 在正常情况下,制造商的定价 $p$ 不会无限大,也不会低于产品的成本(包括生产成本和运输过程中产生的成本).不失一般性,在整合供应链的环境下,假定 $p \in [c + I, \bar{p}]$ ,其中 $\bar{p} < \infty$ 为某一足够大的定价上限.在分散环境下,制造商的定价显然应大于 $\omega + c$ ,否则无利可图,因此还应有 $p \in [\omega + c, \bar{p}]$ .制造商和零售商均为风险中性和完全理性,且双方所拥有的信息为完全信息.同时考虑现实中的情景,本文假定 $p > c > v > 0$ .

## 2 整合供应链的决策模型

基于上述模型的描述和假设,考虑在整合式供应链(IS)中,制造商与零售商之间是完全合作的,需从整合角度进行优化决策.为使整合式供应链期望利润达到最优,决策者需集中决定寄售量 $q_{IS}^*$ 、销售价格

$p_{IS}^*$  和减排水平  $\eta_{IS}^*$ . 记整合式供应链的期望利润函数为  $\Pi_{IS}(q, p, \eta)$ , 令零售商面对不确定性需求  $D$  的取值为  $x(x \geq 0)$ , 对于任意给定的  $p$  和  $\eta$ , 作如下变换:

$$\begin{aligned}\Phi(x | (p, \eta)) &= F(x - r(p, \eta)), \\ \phi(x | (p, \eta)) &= f(x - r(p, \eta)),\end{aligned}$$

则有

$$\begin{aligned}\Pi_{IS}(q, p, \eta) &= \\ pE[\min(q, x)] &+ \\ v \int_0^q (q-x)d\Phi(x | (p, \eta)) &- (c+I)q - m(\eta).\end{aligned}\quad (1)$$

其中:  $pE[\min(q, x)]$  表示售出所获得的期望总收益,  $v \int_0^q (q-x)d\Phi(x | (p, \eta))$  表示销售期末未售出的产品的期望残值. 将式(1)整理, 可得

$$\begin{aligned}\Pi_{IS}(q, p, \eta) &= \\ (p-c-I)q - (p-v) \int_0^q \Phi(x | (p, \eta))dx &- m(\eta).\end{aligned}\quad (2)$$

为寻求  $\Pi_{IS}(q, p, \eta)$  的最优解, 易得其一阶最优性条件如下:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \Pi_{IS}(q, p, \eta)}{\partial q} &= \\ (p-c-I) - (p-v)\Phi(q | (p, \eta)) &= 0,\end{aligned}\quad (3)$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial \Pi_{IS}(q, p, \eta)}{\partial p} &= \\ q - \int_0^q \Phi(x | (p, \eta))dx - \\ (p-v) \int_0^q \frac{\partial \Phi(x | (p, \eta))}{\partial p} dx &= 0,\end{aligned}\quad (4)$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial \Pi_{IS}(q, p, \eta)}{\partial \eta} &= \\ (p-v) \int_0^q \frac{\partial \Phi(x | (p, \eta))}{\partial \eta} dx - m'(\eta) &= 0.\end{aligned}\quad (5)$$

依据供应链协调的定义<sup>[19]</sup>, 满足方程组(3)~(5)的解是供应链实现完美协调的必要条件, 为方便讨论不同契约下供应链的协调性, 以整合供应链系统的最优决策为基准标杆, 现假定方程组(3)~(5)存在有限非负的最优解向量  $(q_{IS}^*, p_{IS}^*, \eta_{IS}^*)$  使得  $\Pi_{IS}(q_{IS}^*, p_{IS}^*, \eta_{IS}^*)$  最大. 需要说明的是, 这一假设有其存在的理论基础, 根据期望利润函数  $\Pi_{IS}(q, p, \eta)$  的连续性, 在紧致策略空间上一定存在最优的行动策略.

### 3 分散情形下基于不同契约的协调性分析

针对分散供应链(DS)情形, 本节首先针对分散式供应链在传统契约环境(寄售契约和收益共享契约)下进行协调性的分析, 然后设计收益共享与减排投资成本共担契约, 并给出该契约可实现供应链完美协调的条件.

#### 3.1 寄售契约

在寄售契约下, 零售商的寄售服务价格  $\omega$  事先给定, 制造商确定寄售量  $q$ 、销售价格  $p$  和减排水平  $\eta$ .

采用上述构建整合供应链期望利润相类似的方法, 可得制造商的期望利润函数为

$$\begin{aligned}\Pi_{DS}^M(q, p, \eta) &= \\ (p-c-\omega)q - (p-v) \int_0^q \Phi(x | (p, \eta))dx &- m(\eta).\end{aligned}\quad (6)$$

类似于前述方法, 可以得到制造商期望利润函数  $\Pi_{DS}^M(q, p, \eta)$  的一阶最优性条件(具体推导从略). 令  $(q_{DS}^*, p_{DS}^*, \eta_{DS}^*)$  为  $\Pi_{DS}^M(q, p, \eta)$  的最优解, 与整合供应链情形相比较, 即验证  $q_{DS}^* = q_{IS}^*$ ,  $p_{DS}^* = p_{IS}^*$  及  $\eta_{DS}^* = \eta_{IS}^*$ , 可以得知, 仅当制造商将  $\omega = I$  时, 寄售量  $q_{DS}^* = q_{IS}^*$  才会实现, 而此时零售商获取的期望利润为 0. 换言之, 当  $\omega > I$  成立时, 制造商确定的寄售量无法达到整合供应链最优的寄售量. 因此, 仅通过寄售契约无法协调供应链.

#### 3.2 收益共享契约

在寄售契约中, 由于零售商无利润空间, 导致无法实现供应链的协调. 为提升零售商的期望利润值, 需进一步探究供应链可能存在的协调性. 现假定零售商提供较低的寄售服务价格, 同时分享制造商一部分收益, 即研究收益共享契约下供应链的协调问题. 令  $\lambda$  ( $0 < \lambda < 1$ ) 为制造商分享给零售商销售收益的比重,  $1 - \lambda$  为制造商保留销售收益的比重. 在收益共享契约下, 制造商在收益共享契约下的期望利润函数为

$$\begin{aligned}\Pi_{DS}^M(q, p, \eta, \lambda) &= \\ [(1-\lambda)p-c-\omega]q - \\ (1-\lambda)(p-v) \int_0^q \Phi(x | (p, \eta))dx &- m(\eta),\end{aligned}\quad (7)$$

采用前述相似的方法, 容易得到制造商期望利润函数  $\Pi_{DS}^M(q, p, \eta, \lambda)$  的一阶最优性条件(此处推导略). 在忽略减排水平影响需求的情况下, 仅就制造商的最优寄售量  $q_{DS}^*$  和最优的销售价格  $p_{DS}^*$  而言, 当收益共享比例  $\lambda$  满足  $\omega = (1-\lambda)I - \lambda c$  时, 收益共享契约可以实现供应链的协调. 但当减排水平影响需求时, 分散情形的制造商的最优减排水平  $\eta_{DS}^*$  不满足整合供应链总的期望利润关于  $\eta$  的一阶最优性条件, 故收益共享契约亦无法协调供应链. 其原因在于制造商将自己的部分销售收益分享给了零售商, 而自己却承担了全部的减排投资成本.

#### 3.3 收益共享与减排投资成本共担契约

为避免在收益共享契约中出现的制造商减排投入成本过大且收益过小致使供应链无法实现协调的情况, 本节在 3.2 节的基础上, 进一步考虑收益共享与减排投资成本共担契约下供应链的协调性. 为激励制造商提高减排水平, 假定零售商愿意承担部分减排投资成本, 令  $\rho$  ( $0 < \rho < 1$ ) 为零售商承担制造商减排投资成本的比例, 则  $1 - \rho$  为制造商所承担的减排投

资成本的比例. 在收益共享与减排投资成本共担契约下, 制造商和零售商的期望利润函数分别为

$$\begin{aligned} \Pi_{DS}^M(q, p, \eta, \lambda) = & (1 - \lambda) \left\{ pE[\min(q, x)] + \right. \\ & \left. v \int_0^q (q - x) d\Phi(x | (p, \eta)) \right\} - (\omega + c)q - \rho m(\eta), \quad (8) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Pi_{DS}^R(\rho) = & \lambda \left\{ pE[\min(q, x)] + v \int_0^q (q - x) d\Phi(x | (p, \eta)) \right\} + \\ & (\omega - I)q - (1 - \rho)m(\eta). \quad (9) \end{aligned}$$

基于式(8)和(9), 给出如下定理.

**定理 1** 在收益共享与减排投资成本共担契约下, 若契约参数满足

$$\begin{cases} \omega = (1 - \lambda)I - \lambda c, \\ \rho = 1 - \lambda, \end{cases} \quad (10)$$

则供应链系统能够实现完美协调.

同前述方法, 容易得到  $\Pi_{DS}^M(q, p, \eta, \lambda)$  对  $q, p$  及  $\eta$  的一阶条件, 然后与整合供应链期望利润的一阶最优性条件(如式(3)~(5))相比较, 即可推得定理1成立, 此处证明略.

将式(10)分别代入式(8)和(9), 可得如下关系式:

$$(\Pi_{DS}^M, \Pi_{DS}^R) = ((1 - \lambda)\Pi_{IS}(q, p, \eta), \lambda\Pi_{IS}(q, p, \eta)). \quad (11)$$

式(11)表明, 调整契约参数  $\lambda$  或  $\rho$  的大小可以实现供应链系统最优期望利润在制造商与零售商之间的任意分配. 同时, 定理1说明, 如果零售商愿意分担制造商的部分投资减排成本, 则制造商只需让利部分收益来弥补零售商的利益损失, 便可达到制造商和零售商的任意协调. 实际上, 对于一般的函数  $\Phi(\cdot)$  和  $\phi(\cdot)$  而言, 仅依靠推理分析的方式来探究供应链系统最优决策将非常困难, 但如果供应链所面临的需求形式、 $\Phi(x | (p, \eta))$  以及  $\phi(x | (p, \eta))$  等一旦给定, 则供应链企业各参数对其期望利润的影响即可明确判断.

#### 4 需求的确部分为和式、随机部分服从均匀分布时的供应链决策优化

以下假定需求  $r(p, \eta) = a - bp + k\eta$ . 其中:  $a > 0, b > 0, k \geq 0$ . 随机需求变量  $\varepsilon$  服从均匀分布, 即  $\varepsilon \sim U[A, B]$ , 令随机变量  $\varepsilon$  的取值为  $\xi (\xi = x - r(p, \eta))$ , 其密度函数  $f(\xi) = 1/(B - A)$ , 分布函数  $F(\xi) = (\xi - A)/(B - A), \xi \in [A, B]$ . 减排投资成本函数<sup>[18]</sup>为  $m(\eta) = M\eta^2/2, M > 0$ .

##### 4.1 整合式供应链的决策

由式(2), 得到整合供应链的期望利润函数为

$$\begin{aligned} \Pi_{IS}(q, p, \eta) = & (p - c - I)q - (p - v) \times \\ & \int_{a-bp+k\eta+A}^q \frac{x - (a - bp + k\eta) - A}{B - A} dx - \frac{M\eta^2}{2}. \quad (12) \end{aligned}$$

对于给定的  $p, \eta$ , 最优的寄售量  $q_{IS}^*$  应满足一阶条件

$$\frac{\partial \Pi_{IS}(q, p, \eta)}{\partial q} = (p - c - I) - (p - v) \frac{q - (a - bp + k\eta) - A}{B - A} = 0,$$

解得

$$q_{IS}^* = \frac{(p - c - I)(B - A)}{p - v} + (a - bp + k\eta) + A,$$

同时

$$\frac{\partial^2 \Pi_{IS}(q, p, \eta)}{\partial q^2} \Big|_{q=q_{IS}^*} = -(p - v) < 0.$$

于是, 制造商最优的寄售量  $q_{IS}^*$  由一阶条件唯一决定. 将  $q_{IS}^*$  代入式(12), 得到

$$\begin{aligned} \Pi_{IS}(q_{IS}^*, p, \eta) = & \frac{(p - c - I)^2(B - A)}{2(p - v)} + \\ & (p - c - I)(a - bp + k\eta + A) - M\eta^2/2. \quad (13) \end{aligned}$$

对于任意给定的  $p \in [c + I, \bar{p}]$ , 制造商最优的减排水平  $\eta_{IS}^*$  满足一阶条件

$$\frac{\partial \Pi_{IS}(q_{IS}^*, p, \eta)}{\partial \eta} = k(p - c - I) - M\eta = 0.$$

解得  $\eta_{IS}^* = \frac{k(p - c - I)}{M}$ , 同时有二阶条件小于0, 即

$$\frac{\partial^2 \Pi_{IS}(q_{IS}^*, p, \eta)}{\partial \eta^2} \Big|_{\eta=\eta_{IS}^*} = -M < 0,$$

故制造商最优的减排水平  $\eta_{IS}^*$  由一阶条件唯一决定. 将  $\eta_{IS}^*$  代入式(13), 并令  $\Pi_{IS}(p) = \Pi_{IS}(q_{IS}^*, p, \eta_{IS}^*)$ , 得到  $\Pi_{IS}(p)$  的一阶最优性条件为

$$\begin{aligned} \frac{d\Pi_{IS}(p)}{dp} = & \frac{\partial \Pi_{IS}(q_{IS}^*, p, \eta_{IS}^*)}{\partial p} + \\ & \frac{\partial \Pi_{IS}(q_{IS}^*, p, \eta_{IS}^*)}{\partial \eta_{IS}^*} \frac{d\eta_{IS}^*}{dp} = R(p) = 0. \quad (14) \end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned} R(p) = & \frac{(p - c - I)(p + c + I - 2v)(B - A)}{2(p - v)^2} + \\ & (a - bp + A) + (k^2/M - b)(p - c - I). \end{aligned}$$

于是有下面的引理.

**引理 1** 1) 若  $R'(p) > 0$ , 则  $\Pi_{IS}(p)$  存在唯一的最优解  $p_{IS}^* = \bar{p}$ ;

2) 若  $R'(p) \leq 0$ , 当  $R(\bar{p}) \geq 0$  时, 则  $\Pi_{IS}(p)$  存在唯一的最优解  $p_{IS}^* = \bar{p}$ ; 当  $R(\bar{p}) < 0$ , 则  $\Pi_{IS}(p)$  存在唯一的最优解  $p_{IS}^*$  且满足式(14).

**证明** 由前面的分析, 整合供应链下制造商的定价  $p \in [c + I, \bar{p}]$ , 经计算  $R(c + I) \geq 0$ . 1) 若  $R'(p) > 0$ , 则  $R(p) > R(c + I) \geq 0, p \in [c + I, \bar{p}]$ . 因此有  $d\Pi_{IS}(p)/dp = R(p) > R(c + I) \geq 0$ , 从而有  $\Pi_{IS}(p)$  在  $[c + I, \bar{p}]$

上为严格单增函数, 故  $\Pi_{IS}(q_{IS}^*, p, \eta_{IS}^*)$  存在唯一的最优解  $p_{IS}^* = \bar{p}$ .

2) 若  $R'(p) \leq 0$ , 则  $d\Pi_{IS}(p)/dp = R(p) > R(\bar{p}) \geq 0$ ,  $\Pi_{IS}(p)$  存在唯一的最优解  $p_{IS}^* = \bar{p}$ . 若  $R(\bar{p}) < 0$ , 则由连续函数的介值定理, 至少存在一点  $p \in (c + I, \bar{p})$  使得  $R(p) = 0$ . 因  $R(p)$  是单调的, 故存在唯一的一点  $p \in (c + I, \bar{p})$  使得  $R(p) = 0$ . 根据极值的必要条件,  $\Pi_{IS}(p)$  的最优解必满足  $d\Pi_{IS}(p)/dp = R(p) = 0$ , 故  $\Pi_{IS}(p)$  存在唯一的最优解  $p_{IS}^*$  满足式 (14).  $\square$

由上述对整合供应链均衡解的讨论, 将  $p_{IS}^*$  代入  $\Pi_{IS}(p)$ 、 $q_{IS}^*$  和  $\eta_{IS}^*$ , 可得到如下整合供应链的期望最优利润以及制造商寄售量和减排水平:

$$\begin{aligned} \Pi_{IS}(p_{IS}^*) &= \\ & \frac{(p - c - I)^2}{2} \left( \frac{B - A}{p_{IS}^* - v} + \frac{k^2}{M} \right) + \\ & (p_{IS}^* - c - I)(a - bp_{IS}^* + A), \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} q_{IS}^* &= \\ & (p_{IS}^* - c - I) \left( \frac{B - A}{p_{IS}^* - v} + \frac{k^2}{M} \right) + \\ & a - bp_{IS}^* + A, \end{aligned} \quad (16)$$

$$\eta_{IS}^* = k(p_{IS}^* - c - I)/M. \quad (17)$$

**定理 2** ( $q_{IS}^*, p_{IS}^*, \eta_{IS}^*$ ) 即为整合供应链的均衡解,  $\Pi_{IS}(p_{IS}^*)$  为整合供应链的最大期望利润.

## 4.2 分散式供应链的决策

下面以寄售契约为例, 对分散式供应链的决策进行优化. 为追求各自最大的期望利润进行决策, 零售商事先给定寄售服务价格, 制造商确定寄售数量、减排水平和销售价格, 利用与 4.1 节相似的方法, 令  $\Pi_{DS}^M(p) = \Pi_{DS}^M(q_{DS}^*, p, \eta_{DS}^*)$ , 得到如下引理.

**引理 2** 1) 若  $L'(p) \geq 0$ , 则  $\Pi_{DS}^M(p)$  存在唯一的最优解  $p_{DS}^* = \bar{p}$ .

2) 若  $L'(p) < 0$ , 当  $L(\bar{p}) \geq 0$  时, 则  $\Pi_{DS}^M(p)$  存在唯一的最优解  $p_{DS}^* = \bar{p}$ ; 当  $L(\bar{p}) < 0$  时, 则  $\Pi_{DS}^M(p)$  存在唯一的最优解  $p_{DS}^*$  满足  $L(p) = 0$ , 其中

$$\begin{aligned} L(p) &= \\ & \frac{(p - c - \omega)(p + c + \omega - 2v)(B - A)}{2(p - v)^2} + \\ & (a - bp + A) + (k^2/M - b)(p - c - \omega). \end{aligned}$$

于是, 制造商的最优期望利润、最优寄售量、减排水平以及零售商的最优期望利润分别为

$$\begin{aligned} \Pi_{DS}^M(p_{DS}^*) &= \\ & \frac{(p_{DS}^* - c - \omega)^2}{2} \left( \frac{B - A}{p_{DS}^* - v} + \frac{k^2}{M} \right) + \\ & (p_{DS}^* - c - \omega)(a - bp_{DS}^* + A), \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} q_{DS}^* &= \\ & (p_{DS}^* - c - \omega) \left( \frac{B - A}{p_{DS}^* - v} + \frac{k^2}{M} \right) + \\ & a - bp_{DS}^* + A, \end{aligned} \quad (19)$$

$$\eta_{DS}^* = \frac{k(p_{DS}^* - c - I)}{M}, \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \Pi_{DS}^R &= \\ & (\omega - I) \left[ (p_{DS}^* - c - \omega) \left( \frac{B - A}{p_{DS}^* - v} + \frac{k^2}{M} \right) + \right. \\ & \left. a - bp_{DS}^* + A \right]. \end{aligned} \quad (21)$$

**定理 3** ( $q_{DS}^*, p_{DS}^*, \eta_{DS}^*$ ) 即为分散供应链的均衡解,  $(\Pi_{DS}^M(p_{DS}^*), \Pi_{DS}^R)$  为分散制造商和零售商的最大期望利润.

由式 (17) 和 (20), 可得如下推论.

**推论 1** 1)  $\eta_{DS}^*$  随着  $p_{DS}^*$  增大而增大,  $\eta_{IS}^*$  随着  $p_{IS}^*$  增大而增大.

2)  $\eta_{DS}^*$  随着  $I$  增大而减小; 但  $\eta_{IS}^*$  和  $\eta_{DS}^*$  均随着  $k$  的增大而增大, 均随着  $M$  的增大而减小.

推论 1 的 1) 表明, 无论是整合供应链系统还是分散系统, 最优的减排水平均受最优销售定价的影响, 并呈正相关性, 这与文献 [11] 所得结论基本一致, 即消费者愿意为低碳产品支付更高的价格是激励制造商提升减排水平的重要因素.

推论 1 的 2) 表明, 合作供应链系统中零售商投入的宣传成本越高, 越不利于减排, 保持合理的低碳宣传和教育推广投入, 对供应链系统的期望利润至关重要; 同时不管是整合系统还是分散系统, 最优减排水平均随减排需求影响因子  $k$  的增大而增大, 随减排投资成本  $M$  的增大而减小, 这说明消费者低碳意识的增加, 越多的减排量意味着越多的商机, 但减排成本的提升也会抑制决策者最终的减排水平. 因此, 为了防止在低碳环境下利益相关方采用极端的决策行为, 需要供应链成员企业中相对优势的决策者牺牲部分利益, 以激励相对弱势一方选择更优的决策行为.

通过对比整合供应链和寄售契约下的决策, 可得如下 2 个推论.

**推论 2** 若  $\Pi_{IS}(p)$  在支撑集  $(c + I, \bar{p})$  上是关于  $p$  的拟凹 (quasi-concave) 函数且  $\Pi_{DS}^M(p)$  在支撑集  $(c + \omega, \bar{p})$  上是关于  $p$  的拟凹函数, 且  $b > k^2/M + (B - A)/(I - v)$ , 则整合供应链中制造商的最优减排水平将大于寄售契约下制造商的最优减排水平, 即  $\eta_{IS}^* > \eta_{DS}^*$ .

**推论 3** 整合供应链的期望总利润总大于寄售契约下的制造商和零售商期望利润之和, 即  $\Pi_{IS}(p_{IS}^*) > \Pi_{DS}(p_{DS}^*) = \Pi_{DS}^M(p_{DS}^*) + \Pi_{DS}^R$ .

推论 2 的证明方法是比较  $R(p) = 0$  和  $L(p) = 0$ , 然后利用隐函数求导法加以证明; 推论 3 的证明方法

是合并后根据已有关系进行不等式关系的放大. 限于篇幅, 推论2和推论3的证明从略.

推论2表明, 制造商和零售商在某一特定范围内的合作有利于减排水平的提升, 从而激励具有低碳意识的顾客群体的需求, 为低碳产品入市扩大市场份额创造条件. 同时推论3也表明, 制造商和零售商处于协调时供应链整体期望利润将大于两者各自为政的期望利润总和, 即制造商与零售商合作更利于供应链系统期望总利润的提升. 因此, 推论1和推论2可以作为制造商与零售商有动机合作的理论依据.

### 5 数值分析

设供应链各参数如下:  $a = 200, b = 10, k = 10, A = -50, B = 50, M = 50, \omega = 3, c = 5, I = 0.5, v = 0.5$ . 当分享收益的比例参数  $\lambda$  在  $[0, 1]$  变化时, 图1给出了分散情形和协调情形的供应链各情况的期望利润变化; 图2~图4分别给出了  $\lambda = 0.4$  时, 减排投资成本参数  $M$ 、减排量影响需求因子  $k$  以及低碳宣传成本参数  $I$  对协调供应链各成员利润的影响.

由图1可以看出, 整合供应链的期望总利润总大

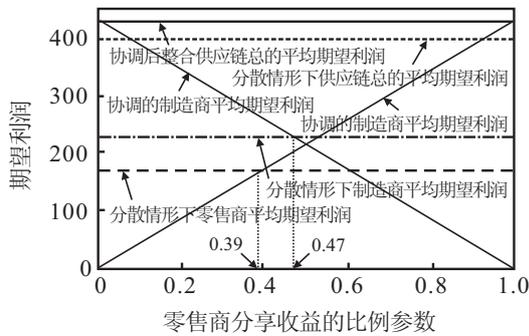


图1 分享收益参数对供应链期望利润的影响

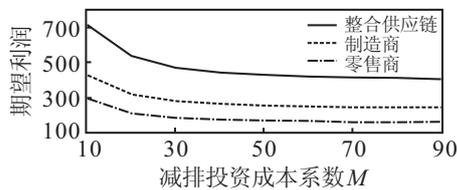


图2 减排投资成本参数对协调供应链期望利润的影响

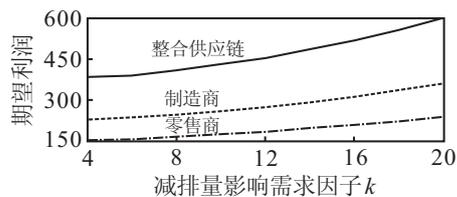


图3 减排量影响需求因子对协调供应链期望利润的影响

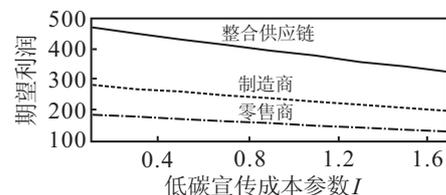


图4 低碳宣传成本参数对协调供应链期望利润的影响

于分散情形(寄售契约)的制造商和零售商期望利润之和, 验证了推论3的理论. 另外, 随着零售商分享收益比例的提升, 零售商利润增长明显, 而制造商的期望利润却逐渐减少. 究其原因, 在收益共享与减排投资成本共担契约下, 随着零售商分享收益比例的提升, 制造商让利给零售商的收益会逐步增大, 同时需承担更多的减排投资成本, 故其获得的利润下降. 此种情况与现实中在没有全面掌握销售渠道下, 制造商让利给零售商的情形一致, 建立在收益共享与减排成本共担模式下对零售商的让利, 可以激励其在销售环节加大对低碳产品的推广力度, 刺激消费者需求, 进而更有利于低碳产品上市; 同时, 无论是制造商还是零售商, 都能从需求的增长中获利. 正如图1所示, 当零售商分享收益的比例在  $(0.39, 0.47)$  内变化时, 制造商和零售商均实现了双方利润的 Pareto 改进, 即都高于其在分散情形时各自的期望利润水平, 实现了双赢.

由图2可以看出: 随着减排投资成本参数逐渐增大, 无论是整合的供应链期望利润, 还是制造商或零售商的期望利润均逐渐减少; 当减排投资成本参数取较小值时, 对制造商、零售商和整合供应链期望利润水平的影响更加显著. 考虑在实际中, 减排成本取决于制造商的减排技术以及为此所付出的努力, 也可能存在制造商和零售商共同协商制定的情形, 故在现实操作中, 应准确评估减排成本对供应链绩效的影响.

对于图3, 随着减排量影响需求因子逐渐增大, 整合的供应商、制造商及零售商的期望利润均逐渐增大; 而在图4中, 随着低碳宣传成本参数逐渐增大, 整合的供应商、制造商及零售商的期望利润均逐渐减小. 实际上, 由于减排水平影响需求与零售商在销售阶段对产品的宣传和推广程度有密切关系, 在实际操作中, 可以激励零售商将低碳营销宣传能力和低碳推广水平保持在最佳的水平, 但也要注意, 零售商为此面临投入成本过大的压力, 如何权衡取决于契约机制的再设计以及双方的议价能力等.

此外, 从图2~图4还可以观察到, 在收益共享与减排投资成本共担契约下, 制造商的期望利润水平总是高于零售商, 从某种程度上说明, 当零售商分享收益的比率  $\lambda = 0.4$  时, 供应链渠道协调使得制造商比零售商更有收益.

### 6 结论及展望

在全球气候变暖的背景下, 本文针对企业自愿节能减排的情形, 从供应链的视角探讨了低碳产品制造商运营及零售商低碳宣传的契约机制设计, 对低碳产品上市和供应链企业的合作提供了参考. 具体有以下结论与启示.

1) 相对于寄售契约和收益共享契约, 收益共享与

减排成本共担契约可以实现此类供应链的完美协调,同时,低碳产品制造商与低碳宣传的零售商合作能够促进整体减排水平的提升,也利于供应链期望利润的增加。

2) 保持合理的低碳宣传和教育推广投入对供应链系统的期望利润至关重要。同时,为了预防在低碳市场中利益相关方采用极端的决策行为,需要供应链成员企业中相对优势的决策者牺牲部分利益,以激励相对弱势一方选择更优的决策行为。

3) 建立在收益共享与减排成本模式下对零售商的让利,能够激励其对低碳产品的宣传推广力度,刺激消费者需求,进而更有利于低碳产品上市,且无论是制造商还是零售商,均能从需求的增长中获利。

本文考虑了制造企业自愿减排以及减排水平和销售价格对需求的影响,并针对低碳产品制造商和零售商在低碳市场可能出现的经济关系进行了探讨。但本文并未考虑碳排放权市场的交易对供应链节点企业的影响,以及当面临政府强制减排时力量不对等企业的决策行为等,这些均可以作为进一步研究的方向。

#### 参考文献(References)

- [1] IPCC. Climate change 2001: The 3rd assessment report of the intergovernmental panel on climate change[M]. London: Cambridge University Press, 2001: 45-50.
- [2] 人民网. 国务院: 2020年单位GDP二氧化碳排放量降40%至45%[EB/OL]. <http://finance.people.com.cn/GB/10461522.html>. (People's daily online. The state council: In 2020, carbon dioxide emissions of per unit GDP will have a fall of about 40% to 50%[EB/OL]. <http://finance.people.com.cn/GB/10461522.html>.)
- [3] Shi X, Meier H. Carbon emission assessment to support planning and operation of low-carbon production systems[J]. *Procedia CIRP*, 2012, 3: 329-334.
- [4] 杜少甫, 董骏峰, 梁樑, 等. 考虑排放许可与交易的生产优化[J]. *中国管理科学*, 2009, 17(3): 81-86. (Du S P, Dong J F, Liang L, et al. Optimal production policy with emission permits and trading[J]. *Chinese J of Management Science*, 2009, 17(3): 81-86.)
- [5] Hua G, Cheng T, Wang S. Managing carbon footprints in inventory management[J]. *Int J of Production Economics*, 2011, 132(2): 178-185.
- [6] Zhang J, Nie T, Du S. Optimal emission-dependent production policy with stochastic demand[J]. *Int J of Society Systems Science*, 2011, 3(1): 21-39.
- [7] Gong X, Zhou S. Optimal production planning with emissions trading[J]. *Operations Research*, 2013, 61(4): 908-924.
- [8] Demir E, Bektas T, Laporte G. The bi-objective pollution-routing problem[J]. *European J of Operational Research*, 2014, 232(3): 464-478.
- [9] 李进, 傅培华. 具有固定车辆数的多车型低碳路径问题及算法[J]. *计算机集成制造系统*, 2013, 19(6): 1351-1362. (Li J, Fu P H. Heterogeneous fixed fleet low-carbon routing problem and algorithm[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2013, 19(6): 1351-1362.)
- [10] Wahab M, Mamun S, Ongkunaruk P. EOQ models for a coordinated two-level international supply chain considering imperfect items and environmental impact[J]. *Int J of Production Economics*, 2011, 134(1): 151-158.
- [11] Laroche M, Bergeron J, Barbaro-Forleo G. Targeting consumers who are willing to pay more for environmentally friendly products[J]. *J of Consumer Marketing*, 2001, 18(6): 503-520.
- [12] Plambeck E. Reducing greenhouse gas emissions through operations and supply chain management[J]. *Energy Economics*, 2012, 34(S): 64-74.
- [13] Liu Z, Anderso T, Cruz J. Consumer environmental awareness and competition in two-stage supply chains[J]. *European J of Operational Research*, 2012, 218(3): 602-613.
- [14] 王芹鹏, 赵道致. 两级供应链减排与促销的合作策略[J]. *控制与决策*, 2014, 29(2): 307-314. (Wang Q P, Zhao D Z. Cooperative strategy of carbon emissions reduction and promotion in a two-echelon supply chain[J]. *Control and Decision*, 2014, 29(2): 307-314.)
- [15] 赵道致, 原白云, 夏良杰, 等. 碳排放约束下考虑制造商竞争的供应链动态博弈[J]. *工业工程与管理*, 2014, 19(1): 65-71. (Zhao D Z, Yuan B Y, Xia L J, et al. Dynamic game study in supply chain with manufacturers' competition under the constraint of productions' emission[J]. *Industrial Engineering and Management*, 2014, 19(1): 65-71.)
- [16] 中国低碳网. 沃尔玛中国“环保低碳”社区公益教育启动[EB/OL]. <http://www.ditan360.com/GongYi/Info-77368.html>. 2011-1-6/2012-11-20. (China low carbon online. WAL-MART starts “environmental protection and low carbon” community education in China[EB/OL]. <http://www.ditan360.com/GongYi/Info-77368.html>. 2011-1-6/2012-11-20.)
- [17] 胡怡琳. 苏宁: 渠道商的影响力[N]. *经济观察报*, 2010-07-17. (Hu Y L. Suning: Channel dealers' influence[N]. *The Economic Observer*, 2010-07-17.)
- [18] Nordhaus W. To slow or not to slow: The economics of the greenhouse effect[J]. *The Economic J*, 1991, 101(407): 920-937.
- [19] Cachon G. Supply chain coordination with contracts[J]. *Handbooks in Operations Research and Management Science*, 2003, 11: 227-339. (责任编辑: 李君玲)