

# 基于消费偏好的供应链上下游联合减排 协调契约博弈模型

王一雷, 朱庆华, 夏西强

(大连理工大学管理与经济学部, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 供应链角度的碳减排问题受到了广泛的关注. 在考虑消费者的低碳偏好对市场需求影响的基础上, 建立了三种不同的契约模型, 对供应链系统中制造商和零售商的联合减排机制及供应链利润协调问题开展了研究. 分析结果表明, 约束批发价格的成本分摊契约可以实现供应链利润的协调, 并在一定条件下其减排效果最好; 而批发价格契约和成本分摊契约不能实现供应链利润的协调, 其中成本分摊契约在满足一定条件时其产品的碳减排水平最高.

**关键词:** 供应链协调; 联合减排; 低碳偏好; 契约模型

中图分类号: F205

文献标识码: A

文章编号: 1000-5781(2017)02-0188-11

doi: 10.13383/j.cnki.jse.2017.02.005

## Supply chain upstream and downstream joint coordination contract game model based on consumer preference

Wang Yilei, Zhu Qinghua, Xia Xiqiang

(Faculty of Management and Economics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** Carbon reduction from the perspective of supply chains has received widespread attention. Considering consumers' low-carbon preference that affects the market demand for a product, this paper establishes three different contract models, and studies the joint carbon emission reduction mechanism between a manufacturer and a retailer in the supply chain system and the profit coordination of the supply chain. The analysis shows that the cost sharing contract under constraint wholesale price can coordinate the supply chain's profit effectively and results in the best carbon emission reduction under certain conditions, that the wholesale price contract and the cost sharing contract cannot coordinate the supply chain's profit, and that the cost sharing contract can result in the highest level of carbon emission reduction for a product when certain conditions are met.

**Key words:** supply chain coordination; joint carbon emission reduction; low-carbon preference; contract model

## 1 引言

目前, 温室气体排放导致全球变暖问题是人类面临的最严重的挑战之一. 根据联合国气候变化专门委员会(IPCC)的调查显示: 全球气候变暖以及极端气候频繁出现的主要原因是人类活动产生的温室气体排放<sup>[1]</sup>.

收稿日期: 2014-03-17; 修订日期: 2014-04-28.

基金项目: 国家杰出青年科学基金资助项目(71025002); 国家重点基础研究发展计划资助项目(2011CB013406); 国家自然科学基金重点资助项目(71033004); 国家社会科学基金重大资助项目(13&ZD147).

为应对气候变化, 寻求可持续发展的经济发展模式, 1992 年全球多个国家联合签署了《联合国气候变化框架公约》, 在此基础上通过了《京都议定书》, 并于 2009 年的哥本哈根会议商讨《京都议定书》到期后的后续合作方案, 有效地减少了全球范围内的温室气体排放. 在具体减排的实践过程中, 多数国家将减排目标分解后下放到各工业实体, 而这种环境方面的压力促使制造企业采取绿色供应链管理作为其核心的环境策略, 并通过和供应链上下游企业的合作达到减少其产品碳排放的目的<sup>[2]</sup>.

随着各国碳减排行动的实施, 目前消费者的低碳消费偏好日益增强, 单位产品的碳排放也逐渐成为产品的重要属性之一<sup>[3]</sup>. 国内外学者的研究表明, 低碳产品不仅能增强其竞争性<sup>[4]</sup>, 同时消费者愿意付出更高的价格对其进行购买<sup>[5,6]</sup>. 据埃森哲一项全球性的调研显示, 超过 80% 的被调研者在购买产品时对产品的碳足迹有所考虑<sup>[7]</sup>. 为引导消费者的低碳消费理念, 各国政府采取了种种补贴和税收政策. 例如, 我国发改委于 2009 年推动实施了“节能产品惠民工程”, 对消费者购买节能环保产品给予一定的财政补贴, 极大地促进了低碳产品的销售.

为达到减少温室气体排放的目标, 企业开展了碳减排的相关行动, 会产生一定的成本; 而在消费者低碳偏好的影响下, 产品碳排放的降低能够提高其市场需求<sup>[8,9]</sup>, 进而增加产品终端(零售商)销售的收入. 针对上述情况, 如果仅从企业个体的角度研究难以分析消费者的低碳偏好对供应链产生的整体影响, 因此有必要从供应链整体的角度研究企业和零售商进行产品碳减排的相关合作, 从而降低产品的碳排放. 基于此, 本文从供应链系统角度研究上下游企业的联合减排机制, 建立了三种不同的契约模型并对供应链的利润和产品的碳排放大小开展分析和讨论, 探索能兼顾供应链成员利润和产品碳减排的契约模型, 以期为提高企业减排行为的积极性、降低产品的碳排放提供决策支持.

本文的研究领域主要涉及供应链角度的碳减排问题以及消费者的低碳消费理念两方面内容, 相关的文献综述也从这两方面开展.

近年来, 供应链角度的碳减排问题受到了国内外学者的广泛关注, 相关的研究取得了一定的进展. 例如, 在 2009 年运筹与管理学研究协会(INFORMS)的年度会议上, Stermann<sup>[10]</sup>和 Lee<sup>[11]</sup>分别就环境及碳排放领域研究做了专门报告; 2010 年, 美国国家科学基金会就低碳足迹供应链的相关议题召开了专题讨论会, 诸多著名学者如 Management Science 的主编 Cachon 等对此议题表达了高度关注. 此外, Benjaafar 等<sup>[12]</sup>将碳排放约束与多种供应链模型相结合, 并讨论其对供应链中采购、生产和库存管理以及政府的环境政策带来的影响. 赵道致等<sup>[13]</sup>和 Du 等<sup>[14]</sup>的研究引入了碳排放约束与交易机制, 进而对供应链成员的博弈行为和决策进行分析. 在此碳约束与交易系统中, 碳排放成为企业产品的关键性指标之一. Cachon<sup>[15]</sup>分析了碳排放约束对零售商以及消费者成本产生的影响, 并对供应链下游零售商如何布局开展相关研究. Du 等<sup>[3]</sup>建立了一个制造商和一个碳交易许可供应商的“碳约束及交易”系统, 对供应链成员的决策以及社会福利的大小进行研究. Chen 等<sup>[16]</sup>建立了 EOQ(经济订货批量)模型, 分析供应链系统成员的成本和排放的相关因素, 并对如何降低碳排放开展研究. 赵道志等<sup>[17]</sup>构建了以制造商占主导供应商跟随的 Stackelberg 微分博弈模型, 对制造商和供应商的合作减排策略对产品碳排放的影响开展分析.

另一方面, 目前国内外学者对消费者的低碳消费偏好与行为也开展了相关研究. Amache 等<sup>[8]</sup>和 Ibanez 等<sup>[9]</sup>认为, 环境友好的低碳产品会带来更高的市场占有率. 根据 Chitra<sup>[18]</sup>的研究表明, 消费者的环境偏好越强, 其购买低碳产品时愿意支付的价格越高. Wei 等<sup>[19]</sup>分析了低碳消费的影响因素, 并对低碳消费的具体方式开展研究. 朱庆华等<sup>[20]</sup>建立了三阶段博弈模型, 分析了消费者的环境偏好对政府的补贴政策和企业生产产品绿色度的影响. Liu 等<sup>[21]</sup>从供应链的角度出发, 结合消费者的环境偏好, 对供应链制造商和零售商的决策行为以及利润水平进行了相关分析.

上述供应链角度碳减排的研究<sup>[3,10-17]</sup>多从碳约束与交易机制入手, 并将产品的碳排放许可视为企业一项必要的资产对供应链碳减排进行进一步的分析. 与此同时, 关于消费者低碳偏好的研究多从个体或企业角度出发<sup>[8,9,18,19]</sup>, 供应链中消费者低碳偏好的相关研究尚处于初级阶段<sup>[20,21]</sup>, 更是鲜有文献分析消费者低

碳偏好对供应链碳减排产生的影响. 基于此, 本文考虑了消费者低碳偏好对产品市场需求产生的影响, 建立不同的契约模型研究供应链成员如何在追求利润目标的同时降低产品的碳排放, 进而对供应链上下游企业联合减排机制进行分析.

## 2 联合减排博弈模型数

模型符号的说明如下:

$m$  为产品制造商;

$r$  为产品零售商;

$e_0$  为产品初始的碳排放水平;

$e$  为产品最终的碳排放水平;

$k$  为产品的碳减排水平,  $k = e_0 - e$ ;  $p$  为产品的零售价格;

$a$  为产品的市场规模;

$w$  为产品的批发价格;

$c$  为制造商的产品成本;

$q$  为零售商的进货量, 假设与市场需求相同;

$c(e)$  为产品的碳减排成本;

$\varepsilon$  为产品的碳减排成本系数, 其值越大说明碳减排行为带来的成本越高;

$\beta$  为成本分摊契约中, 碳减排成本零售商分摊的比例,  $\beta \in [0, 1]$ ;

$\beta_1$  为约束批发价格契约中, 碳减排成本零售商分摊的比例  $\beta_1 \in [0, 1]$ ;

$\beta_2$  为约束批发价格契约中, 批发价格  $w$  表达式中的参数,  $\beta_2 \in [0, 1]$ ;

$\lambda$  为产品碳减排水平的市场能力系数, 它的大小度量了产品的碳减排水平对市场需求带来的影响.

借鉴 Gurnani 等<sup>[22]</sup>的市场需求函数模型, 考虑了供应链协调收益以及产品碳减排水平的双重目标. 本文考虑的供应链为包括一个制造商( $m$ )和一个零售商( $r$ )的二级供应链. 具体的决策过程如图 1 所示.

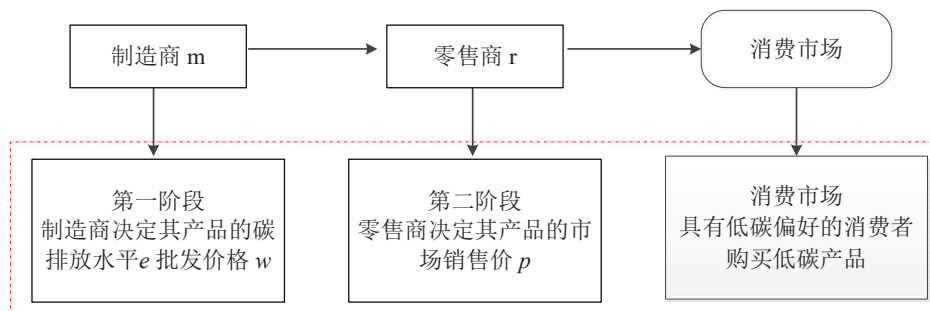


图 1 供应链成员决策示意图

Fig. 1 The members' decision schematic diagram of the supply chain

制造商对产品的碳排放进行控制, 确定产品的碳排放水平  $e$ , 产品初始的碳排放水平为  $e_0$ , 相应地降低产品碳排放的行为带来碳减排成本  $c(e)$ , 而后制造商以批发价格  $w$  将产品卖给零售商.

零售商根据市场需求  $D$  从制造商处进货, 其中进货量为  $q$ , 然后将产品以价格  $p$  销售给最终消费者. 在整个博弈过程中, 制造商占据主动地位, 博弈双方的信息对称并且都是完全理性, 并且基于自身利润最大化的原则进行决策.

假设市场需求  $D$  是产品价格  $p$  以及产品碳减排水平  $k$  的线性函数<sup>[22,23]</sup>, 即

$$D = a - p + \lambda k. \quad (1)$$

在借鉴文献[20]中对绿色研发成本的设定的基础上(研发成本与绿色度提升水平成二次方关系), 假定碳减排成本与产品碳排放降低水平成二次方关系, 即

$$c(e) = \frac{\varepsilon k^2}{2} = \frac{\varepsilon(e_0 - e)^2}{2}. \quad (2)$$

## 2.1 供应链集中决策

在集中式决策模型下, 零售商和制造商作为一个整体系统进行决策, 以供应链系统的利润总和最大化为决策目标, 则该系统的决策目标函数为

$$\pi_c = (p - c)(a - p + \lambda k) - \frac{\varepsilon k^2}{2}, \quad (3)$$

对式(3)分别对  $p$  和  $k$  求偏导并令其为 0, 可得

$$\frac{\partial \pi_c}{\partial p} = a - 2p + \lambda k + c = 0, \quad (4)$$

$$\frac{\partial \pi_c}{\partial k} = \lambda(p - c) - \varepsilon k = 0, \quad (5)$$

其 Hesse 矩阵为

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 \pi_c}{\partial p^2} & \frac{\partial^2 \pi_c}{\partial p \partial k} \\ \frac{\partial^2 \pi_c}{\partial k \partial p} & \frac{\partial^2 \pi_c}{\partial k^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2 & \lambda \\ \lambda & -\varepsilon \end{bmatrix}. \quad (6)$$

由式(6)可以看出, 当  $\lambda$  和  $\varepsilon$  满足条件  $2\varepsilon - \lambda^2 > 0$  时, Hesse 矩阵  $\mathbf{H}$  的行列式负定, 则目标函数  $\pi_c$  存在最大值.

为使下面的讨论有意义(供应链利润、价格和产品碳排放均为非负), 假设  $2\varepsilon - \lambda^2 > 0$ ,  $a - c > 0$  且  $4\varepsilon(1 - \beta) - \lambda^2 > 0$ .

对式(4)和式(5)进行联立求解, 可得

$$p_c = \frac{\varepsilon(a + c) - c\lambda^2}{2\varepsilon - \lambda^2}, \quad k_c = \frac{\lambda(a - c)}{2\varepsilon - \lambda^2}, \quad (7)$$

将式(7)代入式(3)中, 则集中决策模式下供应链的最大利润为

$$\pi_c = \frac{\varepsilon(a - c)^2}{2(2\varepsilon - \lambda^2)}. \quad (8)$$

## 2.2 分散决策

### 2.2.1 批发价格契约

在此契约模型中, 制造商首先将产品以批发价格  $w$  销售给零售商, 同时确定其产品的碳排放水平  $e$ ; 然后零售商以价格  $p$  将产品卖给最终消费者. 则此时制造商和零售商的利润函数分别为

$$\pi_m = (w - c)(a - p + \lambda k) - \frac{\varepsilon k^2}{2}, \quad (9)$$

$$\pi_r = (p - w)(a - p + \lambda k). \quad (10)$$

在分散决策情况下, 制造商和零售商都根据自身收益最大化原则进行决策. 对式(10)求  $p$  的导数并令其为 0, 可得

$$a - 2p + \lambda k + w = 0, \quad (11)$$

由式(10)得零售商销售产品的价格  $p$  为

$$p = (a + \lambda k + w)/2. \quad (12)$$

将式(12)代入到式(9)里, 则制造商的利润函数可转化为

$$\pi_m = ((w - c)(a + \lambda k - w) - \varepsilon k^2)/2. \quad (13)$$

令  $\pi_m$  对  $w$  和  $k$  的偏导数为 0 并联立求解, 可得

$$w^{1*} = (2\varepsilon(a + c) - c\lambda^2)/(4\varepsilon - \lambda^2), \quad (14)$$

$$k^{1*} = (\lambda(a - c))/(4\varepsilon - \lambda^2). \quad (15)$$

将式(14)和式(15)代入式(12)中, 可得

$$p^{1*} = (3\varepsilon a + \varepsilon c - c\lambda^2)/(4\varepsilon - \lambda^2). \quad (16)$$

将式(14)~式(16)代入到式(9)和式(10)中, 可得批发价格契约模型下制造商, 零售商以及供应链的利润函数分别为

$$\pi_m^{1*} = \frac{\varepsilon(a - c)^2}{2(4\varepsilon - \lambda^2)}, \quad (17)$$

$$\pi_r^{1*} = \frac{\varepsilon^2(a - c)^2}{(4\varepsilon - \lambda^2)^2}, \quad (18)$$

$$\pi_s^{1*} = \pi_m^{1*} + \pi_r^{1*} = \frac{\varepsilon(6\varepsilon - \lambda^2)(a - c)^2}{2(4\varepsilon - \lambda^2)^2}. \quad (19)$$

比较集中决策和批发价格契约下供应链的利润, 可得如下命题.

**命题 1** 在批发价格契约中, 分散决策不能实现供应链的协调; 并且当  $\varepsilon$  趋近于无穷大时, 批发价格契约的供应链利润与集中决策时供应链利润之比趋近于 3/4.

**证明** 由式(8)和式(19)可得

$$\pi_c - \pi_s^{1*} = \frac{\varepsilon(a - c)^2}{2(2\varepsilon - \lambda^2)} - \frac{\varepsilon(6\varepsilon - \lambda^2)(a - c)^2}{2(4\varepsilon - \lambda^2)^2} = \frac{4\varepsilon^3(a - c)^2}{2(2\varepsilon - \lambda^2)(4\varepsilon - \lambda^2)^2}. \quad (20)$$

由上式可知当  $2\varepsilon - \lambda^2 > 0$  时, 批发价格契约下供应链利润小于集中决策时供应链的利润, 即批发价格契约不能实现供应链的协调.

假设  $\varphi$  为批发价格契约和集中决策时供应链收益比, 并且  $0 < \varphi < 1$ , 则有

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow \infty} \varphi = \lim_{\varepsilon \rightarrow \infty} \frac{(6\varepsilon - \lambda^2)(2\varepsilon - \lambda^2)}{(4\varepsilon - \lambda^2)^2} = \frac{3}{4}. \quad \text{证毕.}$$

### 2.2.2 成本分摊契约

在批发价格契约模型的基础上, 此契约模型中制造商的碳减排成本  $c(e)$  与零售商进行分摊, 其中零售商分摊的比例为  $\beta$ , 制造商分摊的比例为  $1 - \beta$ , 并且  $\beta \in [0, 1]$ , 则在此情况下制造商和零售商的利润函数分别为

$$\pi_m = (w - c)(a - p + \lambda k) - (1 - \beta)\varepsilon k^2/2, \quad (21)$$

$$\pi_r = (p - w)(a - p + \lambda k) - \beta\varepsilon k^2/2. \quad (22)$$

将式(22)对价格  $p$  求导并令其为 0, 可得

$$p = (a + \lambda k + w)/2. \quad (23)$$

将式(23)代入式(21), 令式(21)关于  $w$  和  $k$  的一阶偏导为 0 并联立求解, 可得

$$w^{2*} = \frac{2\varepsilon(a+c)(1-\beta) - c\lambda^2}{4\varepsilon(1-\beta) - \lambda^2}, \quad (24)$$

$$k^{2*} = \frac{\lambda(a-c)}{4\varepsilon(1-\beta) - \lambda^2}. \quad (25)$$

将式(24)和式(25)代入式(23), 得到

$$p^{2*} = \frac{\varepsilon(3a+c)(1-\beta) - c\lambda^2}{4\varepsilon(1-\beta) - \lambda^2}. \quad (26)$$

将式(24)至式(26)代入到式(21)和式(22)中, 得到

$$\pi_m^{2*} = \frac{\varepsilon(a-c)^2(1-\beta)}{2(4\varepsilon(1-\beta) - \lambda^2)}, \quad (27)$$

$$\pi_r^{2*} = \frac{\varepsilon(a-c)^2(2\varepsilon(1-\beta)^2 - \beta\lambda^2)}{2(4\varepsilon(1-\beta) - \lambda^2)^2}, \quad (28)$$

$$\pi_s^{2*} = \pi_m^{2*} + \pi_r^{2*} = \frac{\varepsilon(a-c)^2(6\varepsilon(1-\beta)^2 - \lambda^2)}{2(4\varepsilon(1-\beta) - \lambda^2)^2}. \quad (29)$$

比较集中决策和成本分摊下的供应链利润, 可得命题如下.

**命题 2** 成本分摊契约模型也不能实现供应链利润的协调, 其供应链利润小于集中决策时的供应链利润.

**证明** 令  $B = 1 - \beta$  且  $B \in [0, 1]$ , 则有

$$\pi_c - \pi_s^{2*} = \frac{\varepsilon^2(a-c)^2((2\varepsilon + 3\lambda^2)B^2 - 4B\lambda^2 + \lambda^2)}{(2\varepsilon - \lambda^2)(4\varepsilon B - \lambda^2)^2}. \quad (30)$$

令  $M = (2\varepsilon + 3\lambda^2)B^2 - 4B\lambda^2 + \lambda^2$  并视  $M$  为  $B$  的一元二次方程, 则  $M$  的轨迹为开口向上的抛物线, 并且其  $\Delta = 16\lambda^4 - 4\lambda^4(2\varepsilon + 3\lambda^2) = 4\lambda^2(\lambda^2 - 2\varepsilon)$ . 由于  $2\varepsilon - \lambda^2 > 0$ , 则有  $\Delta < 0$ , 又因为抛物线  $M$  开口向上, 则其与  $x$  轴无交点, 进一步得到  $M > 0$  恒成立, 从而推出  $\pi_c > \pi_s^{2*}$ , 即成本分摊契约下供应链利润小于成集中决策时供应链的利润. 证毕.

### 2.2.3 约束批发价格的成本分摊契约

在成本分摊模型的基础上, 此约束批发价格的成本分摊契约(以下简称为“约束批发价格契约”)模型中制造商首先令产品的批发价格为  $w = \beta_2 p + (1 - \beta_2)c$ , 并且碳减排成本  $c(e)$  制造商分摊的比例为  $1 - \beta_1$ , 零售商分摊的比例为  $\beta_1$ , 其中  $\beta_1, \beta_2 \in [0, 1]$ , 则制造商和零售商的利润函数分别为

$$\pi_m = \beta_2(p-c)(a-p+\lambda k) - \frac{(1-\beta_1)\varepsilon k^2}{2}, \quad (31)$$

$$\pi_r = (1-\beta_2)(p-c)(a-p+\lambda k) - \frac{\beta_1\varepsilon k^2}{2}. \quad (32)$$

令式(32)关于  $p$  的一阶导数为 0, 解得

$$p = \frac{a+c+\lambda k}{2}. \quad (33)$$

将式(33)代入式(31)后对  $k$  求一阶导数, 并令其为 0, 解得

$$k^{3*} = \frac{\lambda\beta_2(a-c)}{2\varepsilon(1-\beta_1) - \beta_2\lambda^2}. \quad (34)$$

将式(34)代入式(33), 可得

$$p^{3*} = \frac{a+c}{2} + \frac{\beta_2(a-c)\lambda^2}{2(2\varepsilon(1-\beta_1) - \beta_2\lambda^2)}. \quad (35)$$

通过比较式(34)、式(35)和式(7), 易知当  $1 - \beta_1 = \beta_2$  时,  $k^{3*} = k_c$  且  $p^{3*} = p_c$ , 此时供应链的利润  $\pi_s^{3*} = \pi_c = (p - c)(a - p + \lambda k) - \frac{\varepsilon k^2}{2} = \frac{\varepsilon(a - c)^2}{2(2\varepsilon - \lambda^2)}$ , 即此契约可以实现供应链的协调。

进一步地, 为保证此契约能够被制造商和零售商接受, 约束批发价格契约下制造商和零售商的利润应分别大于批发价格契约下制造商和零售商的利润, 即需要满足  $\pi_m^{3*} \geq \pi_m^{1*}$  且  $\pi_r^{3*} \geq \pi_r^{1*}$ , 即

$$\beta_2 \frac{\varepsilon(a - c)^2}{2(2\varepsilon - \lambda^2)} \geq \frac{\varepsilon(a - c)^2}{2(4\varepsilon - \lambda^2)}, \quad (36)$$

$$(1 - \beta_2) \frac{\varepsilon(a - c)^2}{2(2\varepsilon - \lambda^2)} \geq \frac{\varepsilon^2(a - c)^2}{(4\varepsilon - \lambda^2)^2}. \quad (37)$$

根据式(36)和式(37), 可得  $\frac{2\varepsilon - \lambda^2}{4\varepsilon - \lambda^2} \leq \beta_2 \leq 1 - \frac{2\varepsilon(2\varepsilon - \lambda^2)}{(4\varepsilon - \lambda^2)^2}$ .

#### 2.2.4 三种契约下产品碳排放水平 $e$ 和供应链利润 $\pi_s$ 的比较

由 5.1 节~5.3 节可知, 供应链三种契约模型下产品的碳排放水平  $e$  和供应链的利润  $\pi_s$  如表 2 所示。

表 2 不同契约下产品碳排放水平  $e$  和供应链利润  $\pi_s$

Table 2 The carbon emission level  $e$  of the product and the supply chain profit  $\pi_s$  under different contracts

| 变 量           | 批发价格契约                                                                                 | 成本分摊契约                                                                                                         | 约束批发价格契约                                                   |
|---------------|----------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| 碳排放水平 $e$     | $e_0 - \frac{\lambda(a - c)}{4\varepsilon - \lambda^2}$                                | $e_0 - \frac{\lambda(a - c)}{4\varepsilon(1 - \beta) - \lambda^2}$                                             | $e_0 - \frac{\lambda(a - c)}{2\varepsilon - \lambda^2}$    |
| 供应链利润 $\pi_s$ | $\frac{\varepsilon(6\varepsilon - \lambda^2)(a - c)^2}{2(4\varepsilon - \lambda^2)^2}$ | $\frac{\varepsilon(a - c)^2(6\varepsilon(1 - \beta)^2 - \lambda^2)}{2(4\varepsilon(1 - \beta) - \lambda^2)^2}$ | $\frac{\varepsilon(a - c)^2}{2(2\varepsilon - \lambda^2)}$ |

通过比较三种契约模式下产品碳排放水平  $e$  的大小, 可得如下命题。

**命题 3** 三种契约模式下产品碳减排水平  $e^{1*}$ ,  $e^{2*}$  和  $e^{3*}$  的大小排列顺序与  $\beta$  有关, 具体比较结果如表 3 所示。

表 3 三种契约模式下产品排放水平  $e$  的比较结果

Table 3 The results of the carbon emission level  $e$  of the product under three contracts

| 参数 $\beta$                | 产品碳排放水平的比较                 | 产品碳排放水平最低的契约  |
|---------------------------|----------------------------|---------------|
| $0 < \beta < \frac{1}{2}$ | $e^{1*} > e^{2*} > e^{3*}$ | 约束批发价格契约      |
| $\beta = \frac{1}{2}$     | $e^{1*} > e^{2*} = e^{3*}$ | 约束批发价格和成本分摊契约 |
| $\frac{1}{2} < \beta < 1$ | $e^{1*} > e^{3*} > e^{2*}$ | 成本分摊契约        |

**证明** 由表 2 可知  $e^{1*} = e_0 - \frac{\lambda(a - c)}{4\varepsilon - \lambda^2}$  并且  $e^{3*} = e_0 - \frac{\lambda(a - c)}{2\varepsilon - \lambda^2}$ , 而  $4\varepsilon - \lambda^2 > 2\varepsilon - \lambda^2$ , 则  $e^{1*} > e^{3*}$ ; 当  $0 < \beta < 1/2$  时有  $4\varepsilon - \lambda^2 > 4\varepsilon(1 - \beta) - \lambda^2 > 2\varepsilon - \lambda^2$ , 进而可得  $e^{1*} > e^{2*} > e^{3*}$ ; 当  $\beta = 1/2$  时, 有  $4\varepsilon - \lambda^2 > 4\varepsilon(1 - \beta) - \lambda^2 = 2\varepsilon - \lambda^2$ , 则有  $e^{1*} > e^{2*} = e^{3*}$ ; 当  $1/2 < \beta < 1$ , 有  $4\varepsilon - \lambda^2 > 2\varepsilon - \lambda^2 > 4\varepsilon(1 - \beta) - \lambda^2$ , 可得  $e^{1*} > e^{3*} > e^{2*}$ . 证毕。

由命题 3 可知, 能使供应链利润最大化的约束批发价格契约不一定有最低的产品碳排放水平, 只有当  $0 < \beta \leq 1/2$ , 在三种协契约中约束批发价格契约的产品碳排放水平最低; 而当  $1/2 < \beta < 1$  时, 不能使供应链利润最大化的成本分摊契约拥有最低的产品碳排放水平。

通过比较三种契约模式下产品供应链利润  $\pi_s$  的大小, 可得如下命题。

**命题 4** 1) 当  $2\varepsilon - \lambda^2 > 0$  时,  $\pi_s^{3*} > \pi_s^{1*}$  并且  $\pi_s^{3*} > \pi_s^{2*}$ ;  
2) 当  $0 < \beta < \frac{2\lambda^2 - 8\varepsilon}{3\lambda^2 - 16\varepsilon}$  时,  $\pi_s^{2*} > \pi_s^{1*}$ ; 当  $\frac{2\lambda^2 - 8\varepsilon}{3\lambda^2 - 16\varepsilon} \leq \beta < 1$  时,  $\pi_s^{2*} \leq \pi_s^{1*}$ 。

**证明** 1) 根据命题 1 所得结论, 当  $2\varepsilon - \lambda^2 > 0$  时,  $\pi_s^{3*} - \pi_s^{1*} = \frac{4\varepsilon^3(a - c)^2}{2(2\varepsilon - \lambda^2)(4\varepsilon - \lambda^2)^2} > 0$ , 即约

束批发价格契约的供应链利润大于批发价格契约的供应链利润; 由命题 2 可知, 当  $2\varepsilon - \lambda^2 > 0$  时, 有  $\pi_s^{3*} - \pi_s^{2*} = \pi_c - \pi_s^{2*} = \frac{\varepsilon^2(a-c)^2((2\varepsilon+3\lambda^2)B^2-4B\lambda^2+\lambda^2)}{(2\varepsilon-\lambda^2)(4\varepsilon B-\lambda^2)^2} > 0$ , 即约束批发价格契约的供应链利润大于成本分摊契约的供应链利润。

2) 令  $B = 1 - \beta$  且  $B \in (0, 1)$ , 则有

$$\pi_s^{2*} - \pi_s^{1*} = \frac{\varepsilon^2\lambda^2(a-c)^2((3\lambda^2-16\varepsilon)B^2+4(6\varepsilon-\lambda^2)B+\lambda^2-8\varepsilon)}{(4\varepsilon B-\lambda^2)^2(4\varepsilon-\lambda^2)^2}. \quad (38)$$

令  $N(B) = (3\lambda^2 - 16\varepsilon)B^2 + 4(6\varepsilon - \lambda^2)B + \lambda^2 - 8\varepsilon$ , 则在  $B \in [0, 1]$  的范围内  $N$  的图象为开口向下的抛物线, 并且其  $\Delta = 4(4\varepsilon - \lambda^2)^2 > 0$ , 一元二次方程  $N(B) = 0$  的解为  $B_1 = \frac{\lambda^2 - 8\varepsilon}{3\lambda^2 - 16\varepsilon} \in (0, 1)$  和  $B_2 = 1$ , 因此在区间  $\left(0, \frac{\lambda^2 - 8\varepsilon}{3\lambda^2 - 16\varepsilon}\right]$  范围内  $N \leq 0$ , 在区间  $\left(\frac{\lambda^2 - 8\varepsilon}{3\lambda^2 - 16\varepsilon}, 1\right)$  范围内  $N > 0$ . 进一步可得当  $0 < \beta < \frac{2\lambda^2 - 8\varepsilon}{3\lambda^2 - 16\varepsilon}$  时,  $\pi_s^{2*} > \pi_s^{1*}$ ; 当  $\frac{2\lambda^2 - 8\varepsilon}{3\lambda^2 - 16\varepsilon} \leq \beta < 1$  时,  $\pi_s^{2*} \leq \pi_s^{1*}$ . 证毕。

由命题 4 可知, 三种契约方式中约束批发价格契约下供应链的利润最大, 高于成本分摊契约和批发价格契约的供应链利润; 同时成本分摊契约和批发价格契约的供应链利润大小关系不确定, 与  $\beta$  的取值有关。

### 3 实例仿真分析

在本章中某型号打印机为例, 对产品碳减排水平的市场能力系数  $\lambda$  和产品的碳减排成本系数  $\varepsilon$  对不同契约下产品碳排放水平  $e$  及供应链利润  $\pi_s$  的产生的影响进行仿真分析。

#### 3.1 参数 $\varepsilon$ 对产品碳排放水平 $e$ 的影响

在本节中以佳能 LBP7100Cw 型打印机为例, 通过数值仿真分析碳减排成本系数  $\varepsilon$  对该产品碳排放水平  $e$  的影响. 该型号打印机目前的碳足迹(即碳排放水平)为  $390 \text{ kg-CO}_2\text{e}^{[24]}$ , 其市场售价约为 2 200 元. 进一步地, 对上述模型中该产品的其他参数进行假设, 其中产品市场容量  $a = 3\,000$ , 产品成本  $c = 1\,300$ , 产品市场能力系数  $\lambda = 2$ , 成本分摊比例  $\beta = 0.4$ , 则仿真结果如图 2 所示。

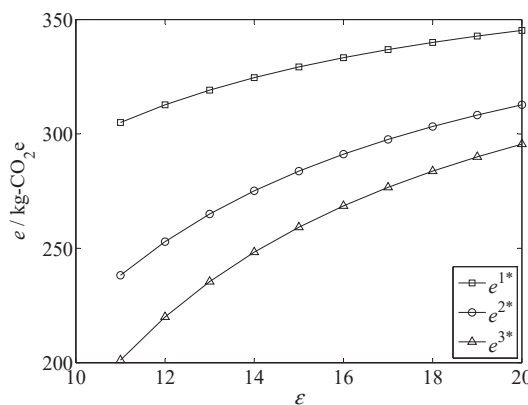


图2 碳减排成本系数  $\varepsilon$  对产品碳排放水平  $e$  的影响

Fig. 2 The effect of carbon reduction cost coefficient  $\varepsilon$  on the carbon emission level  $e$  of the product

由图 2 可以看出, 三种契约下产品的碳排放水平与初始水平相比( $390 \text{ kg-CO}_2\text{e}$ )都有所降低, 其中约束批发价格契约的产品碳排放水平最低, 成本分摊契约的产品碳排放水平处于中游, 批发价格契约的产品碳排放水平最高; 并且随着碳减排成本系数的增大, 三种契约下的产品碳排放水平均呈上升趋势。

#### 3.2 参数 $\varepsilon$ 对供应链利润 $\pi_s$ 的影响

与 6.1 节相似, 本节中同样以佳能 LBP7100Cw 型打印机为例, 使用数值仿真分析碳减排成本系数  $\varepsilon$  对

供应链利润  $\pi_s$  产生的影响. 假设  $a = 3\ 000$ ,  $c = 1\ 300$ ,  $\lambda = 2$ ,  $\beta = 0.4$ , 现实中该型号打印机初始的碳排放水平 ( $e_0$ ) 为  $390\text{ kg-CO}_2\text{e}$ , 则具体的仿真结果如图 3 所示. 由图 3 可以看出, 在给定条件下, 三种契约模型中约束批发价格契约的供应链利润最高, 成本分摊契约的供应链利润次之, 批发价格契约的供应链利润最低; 并且随着碳减排成本系数的增大, 三种契约下的供应链利润均呈下降趋势.

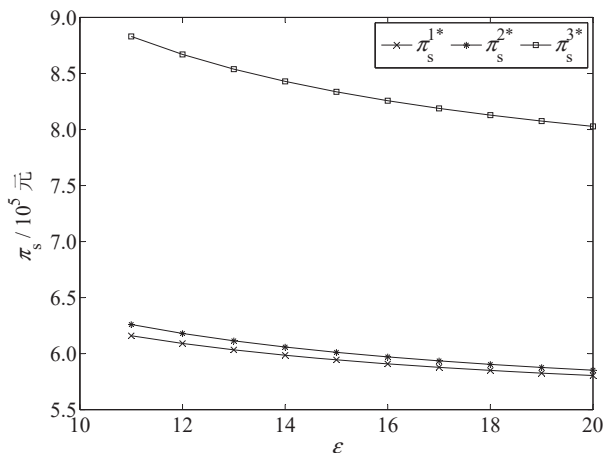


图 3 碳减排成本系数  $\epsilon$  对供应链利润  $\pi_s$  的影响

Fig. 3 The effect of carbon reduction cost coefficient  $\epsilon$  on the supply chain profit  $\pi_s$

### 3.3 参数 $\lambda$ 和参数 $\epsilon$ 对供应链的综合影响

在本节中以佳能 LBP7100Cw 型打印机为例, 主要讨论参数  $\lambda$  和参数  $e$  对供应链的综合影响. 其中  $e_0 = 390$ , 假设  $a = 3\ 000$ ,  $c = 1\ 300$ ,  $\lambda = 2$ ,  $\beta = 0.4$ , 则参数  $\lambda$  和参数  $e$  对产品碳排放水平  $e$  的综合影响如图 4 所示.

由图 4 可知, 在给定条件下批发价格契约下产品碳排放水平最高, 约束批发价格契约下产品的碳排放水平最低, 成本分摊契约下产品碳排放水平处于中间位置, 并且市场能力系数  $\lambda$  对产品碳排放水平的影响程度大于碳减排成本系数  $\epsilon$  对产品碳排放水平的影响程度.

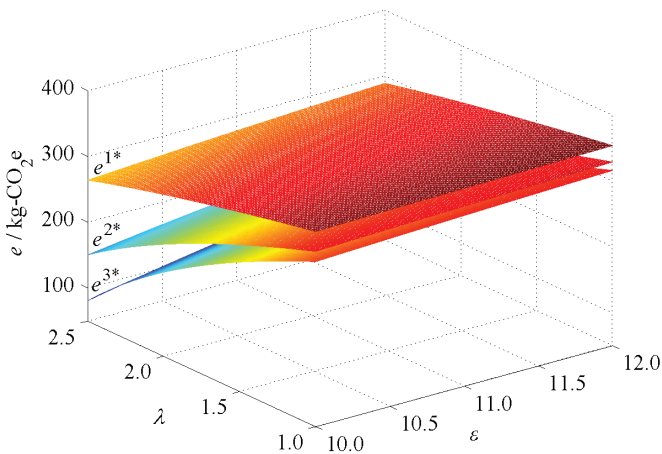
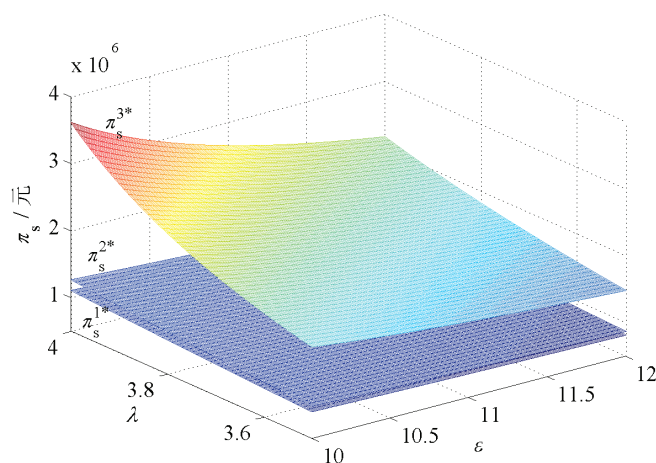


图 4 参数  $\lambda$  和参数  $\epsilon$  对产品碳排放水平  $e$  的综合影响

Fig. 4 The comprehensive effect of  $\lambda$  and  $\epsilon$  on the carbon emission level  $e$  of the product

参数  $\lambda$  和参数  $e$  对供应链利润  $\pi_s$  的综合影响如图 5 所示.

图5 参数  $\lambda$  和参数  $\varepsilon$  对对供应链利润  $\pi_s$  的综合影响Fig. 5 The comprehensive effect of  $\lambda$  and  $\varepsilon$  on the supply chain profit  $\pi_s$ 

从图5可以看出,在给定条件下约束批发价格契约下供应链的利润最高,成本分摊契约下供应链的利润次之,批发价格契约下的供应链利润最低,并且市场能力系数  $\lambda$  对供应链利润的影响程度同样大于碳减排成本系数  $\varepsilon$  对供应链利润的影响程度。

#### 4 结束语

本文运用博弈论的相关方法研究了供应链中制造商和零售商的联合减排机制,建立了三种不同的契约模型,并对其最终的作用和效果进行了分析,分析结果表明,约束批发价格契约能够实现供应链利润的协调,而在三种契约模型下产品的碳减排水平大小与参数  $\beta$  有关。

此外,本文在建立模型时没有考虑消费者的不同偏好、政府补贴、零售商宣传销售努力程度以及碳交易等对产品的碳排放水平和供应链成员决策的影响,未来加入上述约束条件是下一步的研究方向。

本文建立的供应链系统相对简单,在复杂供应链网络以及多级供应链系统对上下游联合减排机制的进一步分析也是未来研究的方向。

#### 参考文献:

- [1] IPCC. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, 2006.
- [2] Zhu Q H, Sarkis J, Lai K H. Examining the effects of green supply chain management practices and their mediations on performance improvements. International Journal of Production Research, 2012, 50(5): 1377–1394.
- [3] Du S F, Zhu L L, Liang L, et al. Emission-dependent supply chain and environment-policy-making in the ‘cap-and-trade’ system. Energy Policy, 2013, 57: 61–67.
- [4] Lu L, Wu C H, Kuo T C. Environmental principles applicable to green supplier evaluation by using multi-objective decision analysis. International Journal of Production Research, 2007, 45(18/19): 4317–4331.
- [5] Cohen M A, Vandenbergh M P. The potential role of carbon labeling in a green economy. Energy Economics, 2012, 34(1): 53–63.
- [6] Michaud C, Llerena D and Joly I. Willingness to pay for environmental attributes of non-food agricultural products: A real choice experiment. European Review of Agricultural Economics, 2013, 40 (2): 313–329.
- [7] Accenture. Only one in 10 companies actively manage their supply chain carbon footprints. <http://newsroom.accenture.com/article-display.cfm?articleid=4801>. 2009.
- [8] Amacher G S, Koskela E, Ollikainen M. Environmental quality competition and eco-labeling. Journal of Environmental Economics and Management, 2004, 47(2): 284–306.

- [9] Ibanez L, Grolleau G. Can eco labeling schemes preserve the environment. *Environmental and Resource Economics*, 2008, 2(40): 233–249.
- [10] Sterman J D. A Banquet of Consequences: Adventures in Climate Policy Modeling // The INFORMS Annual Meeting, San Diego: 2009.
- [11] Lee H L. Socially and Environmentally Responsible Supply Chains // The INFORMS Annual Meeting, San Diego: 2009.
- [12] Benjaafar S, Li Y Z, Daskin M. Carbon footprint and the management of supply chains: Insights from simple models. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2013, 10(1): 99–116.
- [13] 赵道致, 吕金鑫. 考虑碳排放权限制与交易的供应链整体低碳化策略. *工业工程与管理*, 2012(5): 65–71.  
Zhao D Z, Lü J X. Carbon-efficient strategy for intergrated supply chain considering carbon emission rights and trading. *Industrial Engineering and Management*, 2012(5): 65–71. (in Chinese)
- [14] Du S, Ma F, Fu Z, et al. Game-theoretic analysis for an emission-dependent supply chain in a cap-and-trade system. *Annals of Operations Research*, 2011(9): 1–15.
- [15] Cachon G P. Supply Chain Design and the Cost of Greenhouse Gas Emissions. Pennsylvania: The Wharton School, University of Pennsylvania, 2011.
- [16] Chen X, Benjaafar S, Elomri A. The carbon-constrained EOQ. *Operations Research Letters*, 2013, 41(2): 172–179.
- [17] 赵道致, 原白云, 徐春明. 低碳供应链纵向合作减排的动态优化. *控制与决策*, 2014, 29(7): 1340–1344.  
Zhao D Z, Yuan B Y, Xu C M. Dynamic optimization about vertical cooperative on carbon emission reduction in low-carbon supply chain. *Control and Decision*, 2014, 29(7): 1340–1344. (in Chinese)
- [18] Chitra K. In search of the green consumers: A perceptual study. *Journal of Services Research*, 2007, 1(7): 173–191.
- [19] Wei Y, Liu L, Fan Y. The impact of lifestyle on energy use and CO<sub>2</sub> emission: An empirical analysis of china's residents. *Energy Policy*. 2007, 1(35): 247–257.
- [20] 朱庆华, 窦一杰. 基于政府补贴分析的绿色供应链管理博弈模型. *管理科学学报*, 2011(06): 86–95.  
Zhu Q H, Dou Y J. A game model for green supply chain management based on government subsidies. *Journal of Management Science in China*, 2011(6): 86–95. (in Chinese)
- [21] Liu Z L, Anderson T D, Cruz G M. Consumer environmental awareness and competition in two-stage supply chains. *European Journal of Operational Research*. 2012, 3(218): 602–613.
- [22] Gurnani H, Erkoc M. Supply contracts in manufacturer-retailer interactions with manufacturer-quality and retailer effort-induced demand. *Naval Research Logistics*, 2008, 55(3): 200–217.
- [23] Gurnani H, Erkoc M, Luo Y. Impact of product pricing and timing of investment decisions on supply chain cooperation. *European Journal of Operational Research*, 2007, 180(1): 228–248.
- [24] Japan Environmental Management Association For Industry J. Carbon footprint registration information. <http://www.cfp-japan.jp/calculate/verify/permission.php?q=LBP7100C&row=10>. 2013.

#### 作者简介:

王一雷(1985—),男,辽宁大连人,博士生,研究方向: 运营管理,绿色供应链,低碳供应链, Email: wangyileik@163.com;

朱庆华(1970—),女,江苏太仓人,博士,研究方向: 绿色供应链管理,环境管理,运营管理, Email: zhuqh@dlut.edu.cn;

夏西强(1984—),男,河南漯河人,博士生,研究方向: 运营管理,绿色供应链,博弈论, Email: xiaxiqiang@126.com.