

doi:10.16055/j.issn.1672-058X.2022.0003.013

基于消费者低碳偏好和第三方物流参与决策的 供应链协调研究

周继祥, 邱晗光, 甄 杰

(重庆工商大学 管理科学与工程学院, 重庆 400067)

摘 要:针对消费者低碳偏好和第三方物流企业(Third-Party Logistics, 3PL)对供应链决策造成重大影响的现象,为提高供应链整体的效率,提出了采用支撑收益共享契约(Spanning Revenue-Sharing Contract, SRS)来实现供应链协调;基于消费者低碳偏好构建了制造商、3PL 和零售商的 4 个博弈模型,通过求解,得到了不同情形下供应链博弈的均衡解,研究了 3PL 提供物流服务和零售商自营物流下消费者低碳偏好对实际碳排放量的影响;通过数值仿真探讨了不同决策情形下消费者环保意识对实际碳排放量、产品需求、供应链利润和供应链协调的影响。进一步分析发现:初始碳排放量较低时,消费者环保意识的增强可以降低单位产品的实际碳排放量;初始碳排放量较高时,实际碳排放量随着消费者环保意识的增强呈现先降低、后提高的态势。在一定的条件下,无论初始碳排放量高还是低,3PL 提供物流服务可以提高制造商和供应链整体的利润。SRS 契约可以有效协调供应链,实现供应链全体成员的帕累托改进。

关键词:低碳;消费者环保意识;第三方物流;供应链协调

中图分类号:F253.4

文献标志码:A

文章编号:1672-058X(2022)03-0100-13

0 引 言

CO₂ 等温室气体排放所造成的全球气候变暖已严重威胁人类的生存与发展,并引起了全世界的关注。在 2021 年全国两会上,碳达峰和碳中和首次被写入政府工作报告。

在降低碳排放的过程中,消费者的低碳消费理念起着关键性的作用。随着人们对生态系统的逐步重视和低碳消费理念的广泛宣传,消费者低碳偏好逐渐增强,单位产品的碳排放量也开始成为产品的

重要属性之一^[1]。国内外学者研究表明:低碳产品不仅能够增强其竞争性^[2],而且消费者愿意付出更高的价格购买^[3-4]。据报道,国美销售的产品中低碳节能电器占一半以上,而且销售额逐年递增^[5]。兰德公司(Rand)的研究也发现消费者愿意用更高的价格购买碳排放量更低的产品^[6]。低碳经济市场调查及投资分析报告显示,中国有 60% 以上的消费者倾向于购买新能源汽车^[7]。

鉴于消费者低碳偏好对企业碳减排和供应链决策的重要影响,越来越多的学者将其纳入到研究中。一些学者研究了消费者低碳偏好对供应链不同决策

收稿日期:2021-05-27;修回日期:2021-09-03.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(71672015,71602014);重庆市教委科技项目(KJ1600609,KJQN202100844);重庆市教委人文社会科学研究项目(18SKGH066);重庆工商大学高层次人才科研启动项目(950316037);重庆工商大学重点平台开放基金项目(KFJJ2017042).

作者简介:周继祥(1986—),男,江苏徐州人,副教授,博士,从事物流与供应链管理研究.

的影响,如对企业减排投入的影响^[8],对供应链均衡策略的影响^[9-11],对制造商收益的影响^[12],对供应链全体成员帕累托改进的影响^[13],对企业碳排放量和供应链协调的影响^[14-15],对碳减排策略的影响^[16],对零售商和供应链减排、定价、利润的影响^[17]。一些学者研究了碳交易价格对供应链决策的影响,如对供应链均衡策略的影响^[18-20],对碳排放量的影响^[21],对供应链绩效的影响^[22],对供应链成员双赢时低碳技术特征条件的影响^[23]。还有学者研究了碳减排环境下汽车零部件的循环取货路径优化问题^[24]。上述学者从不同角度探讨了消费者低碳偏好、碳交易价格对供应链决策和协调的影响。但是,上述研究都是基于由零售商和供应商构成的两级供应链环境下进行的,没有涉及 3PL,更没有考虑 3PL 提供物流服务和零售商自营物流各自的优势所在。本文将在前人研究基础上对比研究 3PL 提供物流服务对低碳供应链决策的影响,总结 3PL 提供物流服务和零售商自营物流所适用的环境。

一些学者运用了不同供应链契约、价格模型等对低碳供应链进行了协调,如运用在收益共享契约下运用 Rubinstein 议价模型协调低碳供应链^[25],引入两部定价契约实现低碳供应链系统的完美协调^[26-27],运用收益共享寄售契约探讨低碳供应链的协调问题^[28-29],利用回购契约分别研究了碳税、碳限额和碳交易政策下低碳供应链的协调问题^[30],基于成本共担契约研究供应链的协调策略问题^[31]。上述研究运用不同契约实现了低碳供应链的协调,但还未见将 SRS 契约运用到低碳供应链中以实现供应链协调的研究。

鉴于企业面临的竞争越来越激烈,越来越多的企业专注于发展自己的核心业务,将其部分职能外包给 3PL,利用 3PL 的专业能力来提高自身的竞争力的现实,因此,考虑 3PL 参与决策时低碳供应链的优化决策和协调问题具有重要的现实意义。基于此,本文考虑 3PL 参与决策时,消费者低碳偏好对供应链决策、供应链系统和供应链成员绩效的影响,对比分析了零售商自营物流和 3PL 提供物流服务情形下供应链各成员与供应链整体的绩效,设计了

SRS 契约来实现供应链全体成员的帕累托改进和供应链协调。

1 模型描述及假设

在一个由制造商、3PL 和零售商构成的供应链系统中,制造商将产品通过 3PL 运给零售商,3PL 通过提供服务,对每单位产品收取服务费用。由于消费者的低碳意识会影响产品的需求量,进而影响制造商的销售量,假设制造商将通过技术投资来降低产品的碳排放量。出于研究需要,本文有如下假设:

假设 1 制造商以单位成本 c_M 生产产品,以单位价格 w 将产品出售给零售商, w 为决策变量。

假设 2 制造商进行技术投资之前,单位产品的碳排放量为 e_0 ,技术投资之后单位产品的碳排放量为 e 。 e 为决策变量, $0 \leq e \leq e_0$ 。参考 Luo 等^[13]的研究,假设制造商降低产品碳排放量的投资成本为 $t(e - e_0)^2$, $t > 0$,表示减少单位碳排放量的成本。

假设 3 产品的市场需求为价格和碳排放量敏感,假设市场需求为 $d = a - bp - ke$,其中 a 为潜在市场需求量; $b(b > 0)$ 和 $k(k > 0)$ 分别表示消费者对产品价格和碳排放量的敏感系数。 k 越大,表明消费者的环保意识越强; p 表示产品的销售价格,假设零售商销售单位产品的成本为 c_R ,假设 $p > w > c_M$, $p > c_R$ 。

假设 4 政府给予制造商的碳排放配额为 K 。当配额不足或过剩时,制造商可以通过公开市场进行碳排放权的买入或卖出。假设制造商的碳排放交易量为 E ,单位交易价格为 λ 。 $E > 0$ 表示碳排放交易权的买入, $E < 0$ 表示碳排放交易权的卖出。可知, $E = qe - K$, q 为产品的生产量。在确定性需求条件下, $q = d = a - bp - ke$ 。

假设 5 制造商通过 3PL 将产品运送给零售商,3PL 对每单位产品收取物流服务费用 m ,服务费用由零售商支付。假设 3PL 单位产品的服务成本为 c_L , $m > c_L$ 。

假设 6 本文中,博弈各方均为风险中性的,且具有完全信息;上标“*”表示最优,下标“R”、“L”、“M”分别表示零售商、3PL 和制造商;上标“D”、

“C”、“SRS”、“O”分别表示 3PL 提供物流服务时供应链分散决策、集中决策、收益共享契约环境以及零售商自营物流时供应链分散决策。

为了保证碳减排环境下供应链系统可实现利润最大化,假定 $4b(t-\lambda k)-(k-\lambda b)^2 > 0$ 恒成立。

参考 Lee 和 Staelin^[32], Jiang 等^[33]所使用的方法,运用“价格领导关系”,即供应链各成员在决策中可以预见的反应函数进行决策。如制造商根据 3PL 和零售商的反应函数来决策批发价格和减排技术投资后的碳排放量。

2 3PL 参与的供应链决策模型

2.1 分散式决策模型

首先考虑 3PL 参与下分散式低碳供应链的最优决策问题。分散式决策下供应链成员的博弈顺序如下:制造商确定批发价格 w 和减排技术投资后单位产品的碳排放量 e ;根据制造商的决策,3PL 以单位服务价格 m 将产品运至零售商处;零售商根据制造商和 3PL 的决策制定零售价格 p 。综上,各成员的目标函数可以如下表示:

零售商的目标函数为

$$\pi_R^D(p) = (p - c_R - m - w)d \quad (1)$$

$$w^{D*} = \frac{8t(a - b(c_R + c_L - c_M) - (k + \lambda b)e_0) - (k + \lambda b)(\lambda a - \lambda b(c_R + c_L) + kc_M)}{16bt - (k + \lambda b)^2} \quad (7)$$

$$e^{D*} = \frac{16bte_0 - a(k + \lambda b) + bc(k + \lambda b)}{16bt - (k + \lambda b)^2} \quad (8)$$

证明 将零售商和 3PL 的最佳反应函数代入式(3),并分别对 w 和 e 求一阶、二阶偏导数,可得海塞矩阵:

$$H_{\pi_M^D(w,e)} = \begin{vmatrix} -\frac{1}{2}b & -\frac{1}{4}(k-\lambda b) \\ -\frac{1}{4}(k-\lambda b) & -\frac{1}{2}(4t-\lambda k) \end{vmatrix}$$

$$= \frac{1}{16}[4b(4t-\lambda k) - (k-\lambda b)^2]$$

由于 $-\frac{1}{2}(4t-\lambda k) < 0$,可知 π_M^D 是关于 w 和 e 的联合凹函数,令其关于 w 和 e 的一阶导数分别为零,

3PL 的目标函数为

$$\pi_L^D(m) = (m - c_L)d \quad (2)$$

制造商的目标函数为

$$\pi_M^D(w,e) = (w - c_M)d - t(e_0 - e)^2 - \lambda(qe - K) \quad (3)$$

综上,供应链系统的利润函数为

$$\pi(p,e) = (p - c)d - t(e_0 - e)^2 - \lambda(qe - K) \quad (4)$$

其中, $c = c_M + c_L + c_R$ 。

该模型可以通过逆向归纳法进行求解。

命题 1 在批发价格 w 、单位产品实际碳排放量 e 和物流服务价格 m 给定的条件下,零售商的最佳反应函数为

$$p^{D*} = \frac{a - ke + b(c_R + m + w)}{2b} \quad (5)$$

证明 通过对 $\pi_R^D(p)$ 关于 p 分别求一阶和二阶导数,容易验证 $\pi_R^D(p)$ 是关于 p 的凹函数。令其一阶导数为零,求解可得命题 1。

命题 2 在批发价格 w 和单位产品实际碳排放量 e 给定的条件下,3PL 的最佳反应函数为

$$m^{D*} = \frac{a - ke - b(c_R + w - c_L)}{2b} \quad (6)$$

证明过程与命题 1 类似,故略去。

命题 3 制造商的最优批发价格和单位产品实际碳排放量可表示如下:

求解可得制造商的最优决策。

将式(5)、式(8)代入式(1)、式(4),可得分散式决策下零售商、3PL、制造商以及供应链系统的最大利润 π_R^{D*} 、 π_L^{D*} 、 π_M^{D*} 和 π^{D*} 。

推论 1 分散式决策下:

(1) 当 e_0 和 k 满足以下任意一个条件时,消费者环保意识的增强,将会导致制造商单位产品实际碳排放量的降低:

$$\textcircled{1} 0 < e_0 \leq \frac{a - bc}{4\sqrt{bt}}, k < 4\sqrt{bt} - \lambda b$$

$$\textcircled{2} \frac{a - bc}{4\sqrt{bt}} < e_0 < \frac{a - bc}{k}, 0 < k < k_1$$

$$\textcircled{3} \frac{a - bc}{4\sqrt{bt}} < e_0 < \frac{a - bc}{k}, k_2 < k < 4\sqrt{bt} - \lambda b$$

(2) 当 $\frac{a-bc}{4\sqrt{bt}} < e_0 < \frac{a-bc}{k}$, $\max\{k_1, 0\} < k < \min\{k_2, 4\sqrt{bt}-\lambda b\}$ 时, 消费者环保意识的增强, 将会导致制造商单位产品实际碳排放量的提高。

其中:

$$k_1 = \frac{4(4bte_0 - \sqrt{bt[16bte_0^2 - (a-bc)^2]})}{a-bc} - \lambda b$$

$$k_2 = \frac{4(4bte_0 + \sqrt{bt[16bte_0^2 - (a-bc)^2]})}{a-bc} - \lambda b$$

证明 由命题 3 可知:

$$\frac{\partial e^{D*}}{\partial k} = \frac{-(a-bc)(k+\lambda b)^2 + 16bt[2e_0(k+\lambda b) - (a-bc)]}{[16bt - (k+\lambda b)^2]^2}$$

令 $f(k_0) = -(a-bc)k_0^2 + 16bt[2e_0k_0 - (a-bc)]$, 显然, 上述两个式子的符号一致。分析 $f(k_0)$ 可知, 其图像为开口向下 ($a-bc > 0$) 的抛物线, 其根的判别式为 $\Delta_{k_0} = 64[16(bte_0)^2 - bt(a-bc)^2]$ 。当 $\Delta_{k_0} \leq 0$, 即 $e_0 \leq \frac{1}{4\sqrt{bt}}(a-bc)$ 时, $f(k_0) \leq 0$ 恒成立。当 $\Delta_{k_0} > 0$, 即 $e_0 > \frac{a-bc}{4\sqrt{bt}}$ 时, $f(k_0)$ 的图像与横坐标轴有两个交点, 分别为

$$k_{01} = \frac{4(4bte_0 - \sqrt{bt[16bte_0^2 - (a-bc)^2]})}{a-bc}$$

$$k_{02} = \frac{4(4bte_0 + \sqrt{bt[16bte_0^2 - (a-bc)^2]})}{a-bc}$$

可知, 当 $0 < k_0 < k_{01}$ 或 $k_{02} < k_0 < 2\sqrt{bt}$ 时, $f(k_0) < 0$; 当 $k_{01} < k_0 < k_{02}$ 时, $f(k_0) > 0$ 。将 $k_0 = (k+\lambda b)$ 代入上述不等式, 可得推论 1。

根据制造商减排技术投资之前单位产品碳排放量划分, 当初始碳排放量较低, 如 $e_0 \leq \frac{1}{4\sqrt{bt}}(a-bc)$ 时, 称之为清洁型制造商; 当初始碳排放量较高, 如 $e_0 > \frac{1}{4\sqrt{bt}}(a-bc)$ 时, 称之为污染型制造商^[34]。

推论 1 表明: 分散式决策下, 当初始碳排放量较低时, 消费者环保意识的增强将促使清洁型制造商

加大减排技术投资, 降低单位产品的实际碳排放量。一方面, 因为清洁型制造商在生产过程中实际碳排放总量较低, 一般不会超过政府的配给限额, 此时, 随着消费者环保意识的增强, 降低碳排放量可以增加碳交易收益; 另一方面, 因为清洁型制造商降低碳排放量的成本较低, 在消费者环保意识增强时, 较小成本的投资可以换取消费者更强的消费信心, 提高企业在消费者心目中的形象。对于污染型制造商来说, 只有当消费者环保意识很低或很高时, 环保意识水平的提高才能够让制造商加大减排技术投资, 降低单位产品实际碳排放量。否则, 消费者环保意识水平的提高反而会导致单位产品实际碳排放量的增加。一方面, 可能是因为污染型制造商碳排放总量较大, 而且其对碳排放问题管理粗放, 一般会超过政府的配给限额, 需要从碳交易市场购入碳排放权。而消费者环保意识水平较低时, 其产品的需求量较大, 这将会进一步增加其购买碳排放交易权的成本。因此, 加大碳减排技术投资, 降低单位产品实际碳排放量, 可以从一定程度上减少成本。另一方面, 当消费者环保意识水平较高时, 污染型制造商产品的需求量较低, 导致其利润水平较低。此时, 增加减排技术投资, 降低单位产品实际碳排放量可以增加收入。当消费者环保意识水平处于某一区间时, 污染型制造商产品需求量以及购买碳排放交易权的成本都处在其可以接受的区间范围, 增加减排技术投资会减少利润水平。因此, 此时消费者环保意识的增强反而会导致单位产品实际碳排放量的提高。

2.2 集中式决策模型

在集中式决策供应链中, 核心决策者拥有所有的决策权利, 其目标是最大化整个供应链的利润。通过分析式 (4), 可得命题 4。

命题 4 在集中式决策情形下, 供应链系统的最优销售价格和减排技术投资后单位碳排放量可表示如下:

$$p^{C*} = \frac{2t(a+bc - (k-\lambda b)e_0) - (k+\lambda b)(\lambda a + ck)}{4bt - (k+\lambda b)^2} \quad (9)$$

$$e^{C*} = \frac{4bte_0 - (a-bc)(k+\lambda b)}{4bt - (k+\lambda b)^2} \quad (10)$$

证明过程与命题 3 类似,故略去。

将式(9)一式(10)代入式(4),可得集中式决策下供应链系统的最大利润 π^{C*} 。

推论 2 集中式决策下:

(1) 当 e_0 和 k 满足以下任意一个条件时,消费者环保意识的增强,将会导致制造商单位产品实际碳排放量的降低:

① $0 < e_0 \leq \frac{a-bc}{2\sqrt{bt}}, k < 2\sqrt{bt} - \lambda b$

② $\frac{a-bc}{2\sqrt{bt}} < e_0 < \frac{a-bc}{k}, 0 < k < k_3$

③ $\frac{a-bc}{2\sqrt{bt}} < e_0 < \frac{a-bc}{k}, k_4 < k < 2\sqrt{bt} - \lambda b$

(2) 当 $\frac{a-bc}{2\sqrt{bt}} < e_0 < \frac{a-bc}{k}, \max\{k_3, 0\} < k < \min\{k_4,$

$2\sqrt{bt} - \lambda b\}$ 时,消费者环保意识的增强,将会导致制造商单位产品实际碳排放量的提高。

其中,

$$k_3 = \frac{2(2bte_0 - \sqrt{bt[4bte_0^2 - (a-bc)^2]})}{a-bc} - \lambda b$$

$$k_4 = \frac{2(2bte_0 + \sqrt{bt[4bte_0^2 - (a-bc)^2]})}{a-bc} - \lambda b$$

证明过程与推论 1 类似,故略去。推论 2 所反映的现象与推论 1 相同,只是消费者环保意识水平所处区间有所不同,此处不再赘述。

2.3 基于 SRS 契约的供应链协调机制

在 SRS 契约下,零售商与制造商以及 3PL 共享产品的收益,假设收益共享比例分别为 $\gamma_1(0 < \gamma_1 < 1)$ 和 $\gamma_2(0 < \gamma_2 < 1)$ 。SRS 契约下供应链各成员的利润函数表示如下:

零售商的目标函数:

$$\pi_R^{SRS}(p) = (\gamma_0 p - (m + w + c_R))d \tag{11}$$

其中, $\gamma_0 = 1 - \gamma_1 - \gamma_2$ 。

3PL 的目标函数:

$$\pi_L^{SRS}(m) = (m + \gamma_2 p - c_L)d \tag{12}$$

制造商的目标函数:

$$\pi_M^{SRS}(w, e) = (w + \gamma_1 p - c_M)d - t(e_0 - e)^2 - \lambda(qe - K) \tag{13}$$

命题 5 满足如下条件的 SRS 契约完美协调了供应链:

$$m^{SRS*} = \frac{\gamma_2 \pi^{C*}}{d^C} + c_L - \gamma_2 p^{C*}$$
$$w^{SRS*} = \frac{\gamma_1 \pi^{C*} + t(e_0 - e^{C*})^2 + \lambda(d^C e^{C*} - K)}{d^C} + c_M - \gamma_1 p^{C*} \tag{14}$$

证明 在供应链协调时,有 $p^{SRS*} = \frac{2t(a+bc-(k-\lambda b)e_0)-(k+\lambda b)(\lambda a+ck)}{4bt-(k+\lambda b)^2}$ 和 $e^{SRS*} = \frac{4bte_0-(a-bc)(k+\lambda b)}{4bt-(k+\lambda b)^2}$ 成立。将式(14)分别代入式(11)一式(13),可得 SRS 契约下供应链各成员的最优利润如下:

$$\pi_R^{SRS*} = \gamma_0 \pi^{C*}, \pi_L^{SRS*} = \gamma_1 \pi^{C*}, \pi_M^{SRS*} = \gamma_2 \pi^{C*}$$

即供应链中各成员的利润是集中式决策下供应链整体利润的一部分,且各成员的利润和与集中式决策下供应链系统的利润相等,因此,供应链得到协调。

企业“多赢”是实施 SRS 契约的必要条件。如果只是部分企业获利,其他企业“遭殃”,这样的 SRS 契约将无法付诸实施,供应链协调也将无从谈起。供应链中企业“双赢”应同时满足以下条件:

$$\pi_R^{D*} \leq \pi_R^{SRS*}, \pi_L^{D*} \leq \pi_L^{SRS*}, \pi_M^{D*} \leq \pi_M^{SRS*}$$

上述表达式等价于

$$\gamma_1 \geq \frac{\pi_M^{D*}}{\pi^{C*}}, \gamma_2 \geq \frac{\pi_L^{D*}}{\pi^{C*}}, \gamma_1 + \gamma_2 \leq 1 - \frac{\pi_R^{D*}}{\pi^{C*}}$$

令集合 Γ 为

$$\Gamma = \{(\gamma_1, \gamma_2) \mid \gamma_1 \geq \frac{\pi_M^{D*}}{\pi^{C*}}, \gamma_2 \geq \frac{\pi_L^{D*}}{\pi^{C*}}, \gamma_1 + \gamma_2 \leq 1 - \frac{\pi_R^{D*}}{\pi^{C*}}, \}$$

显然,集合 Γ 中的收益共享比例可以使供应链中的企业获得“双赢”的效果。同时,也能够很容易地

证明 Γ 为非空集合。事实上,令 $\gamma_1 = \frac{\pi_M^{D*}}{\pi^{C*}}, \gamma_2 = \frac{\pi_L^{D*}}{\pi^{C*}}$,

则有 $\gamma_1 + \gamma_2 \leq 1 - \frac{\pi_R^{D*}}{\pi^{C*}}$ 成立,可知上述 γ_1 和 γ_2 能够协调供应链,同时使得集合 Γ 非空。

鉴于问题的复杂性,后面将利用数值算例对 SRS 契约进行更进一步分析,以期得到有益的管理意义。

3 零售商自营物流下供应链决策模型

自营物流下,零售商承担物流服务任务。假设零售商的单位物流服务费用为 c_{RL} 。由于 3PL 在物流服务方面更具专业性,假设 3PL 单位物流服务费低于零售商,即 $c_L < c_{RL}$ 。集中式决策下,零售商自营物流与 3PL 提供物流服务的区别仅仅体现在物流成本不同。在供应链最优策略方面,只需用 c_{RL} 替换 c_L 即可得到零售商自营物流下供应链集中决策模型的最优解。因此,本小节只分析零售商自营物流下供应链分散决策模型。

$$w^{0*} = \frac{4t(a-b(c_R+c_{RL}-c_M))-e_0(k-\lambda b)-(k+\lambda b)(\lambda(a-bc_R-bc_{RL})+kc_M)}{8bt-(k+\lambda b)^2} \quad (18)$$

$$e^{0*} = \frac{8bte_0-(k+\lambda b)(a-bc_1)}{8bt-(k+\lambda b)^2} \quad (19)$$

其中, $c_1 = c_R + c_{RL} + c_M$ 。

将式(17)一式(19)代入式(15)和式(16)可得零售商自营物流下零售商和制造商的利润 π_R^{0*} 、 π_M^{0*} ,进一步可得供应链系统的利润 π^{0*} 和市场需求量 d^0 。

推论 3 零售商自营物流下:

(1) 当 e_0 和 k 满足以下任意一个条件时,消费者环保意识的增强,将会导致制造商单位产品实际碳排放量的降低:

$$\begin{aligned} \text{① } e_0 &\leq \frac{1}{2\sqrt{2bt}}(a-bc_1), k < 2\sqrt{2bt}-\lambda b \\ \text{② } \frac{1}{2\sqrt{2bt}}(a-bc_1) &< e_0 < \frac{a-bc_1}{k}, 0 < k < k_5 \\ \text{③ } \frac{1}{2\sqrt{2bt}}(a-bc_1) &< e_0 < \frac{a-bc_1}{k}, k_6 < k < 2\sqrt{2bt}-\lambda b \end{aligned}$$

(2) 当 $\frac{1}{2\sqrt{2bt}}(a-bc_1) < e_0 < \frac{a-bc_1}{k}$, $\max\{k_5, 0\} < k < \min\{k_6, 2\sqrt{2bt}-\lambda b\}$ 时,消费者环保意识的增强,将会导致制造商单位产品实际碳排放量的提高。

其中:

$$k_5 = \frac{2(4bte_0 - \sqrt{2bt[8bte_0^2 - (a-bc_1)^2]})}{a-bc_1}$$

$$k_6 = \frac{2(4bte_0 + \sqrt{2bt[8bte_0^2 - (a-bc_1)^2]})}{a-bc_1}$$

零售商自营物流下供应链各成员的利润函数表示如下:

零售商利润函数:

$$\pi_R^0(p) = (p - (w + c_R + c_{RL}))d \quad (15)$$

制造商利润函数:

$$\pi_M^0(w, e) = (w - c_M)d - t(e_0 - e)^2 - \lambda(qe - K) \quad (16)$$

命题 6 在批发价格 w 和单位产品实际碳排放量 e 给定的条件下,零售商的最佳反应函数为

$$p^{0*} = \frac{a - ke + b(w + c_R + c_{RL})}{2b} \quad (17)$$

命题 7 制造商的最优批发价格和单位产品实际碳排放量可表示如下:

4 算例分析

为了进一步分析 3PL 提供物流服务和零售商自营物流,以及模型中的重要参数对低碳供应链决策和绩效的影响,本节将通过算例对 3PL 提供物流服务和零售商自营物流两种模型进行分析,并对两种情况下供应链成员以及供应链系统利润进行对比分析。基于假设,不妨令 $a = 800, b = 10, k = 30, e_0 = 5, \lambda = 4, c_R = 5, c_L = 5, c_M = 5, c_{RL} = 15, t = 1\,000, K = 100$ 。

4.1 消费者环保意识对实际碳排放量的影响

图 1(a)表明:当初始碳排放量较低($e_0 = 2$)时,无论是 3PL 提供物流服务(包括分散决策和集中决策两种情形),还是零售商自营物流,实际碳排放量都随消费者环保意识的增强而降低。图 1(b)表明,当初始碳排放量较高($e_0 = 5$)时,上述 3 种情形下的实际碳排放量都随消费者环保意识的增强而呈现先降低、后提高的态势。进一步分析可以发现,实际碳排放量变化趋势发生改变的拐点分别为前文得到的 k_1, k_3 和 k_5 ,这也验证了推论 1、推论 2 和推论 3 的正确性。观察图 1 可以发现,不管初始碳排放量高还是低, e^{c*} 总是最低的,特别是在初始碳排放量较低时, e^{c*} 随消费者环保意识的增强呈现快速下降的趋势。对比 3PL 提供物流服务和零售商自营物流情形下单位产品碳排放量可以发现,当初始碳排放量较低时,零售商自营物流能够更好地促使制造商加大减排技术投资,降低单位产品碳排放量;当初始碳排放量较高时,

只有在消费者环保意识处于某一区间(如 $k < 53$)时,零售商自营物流才能够发挥这一作用。

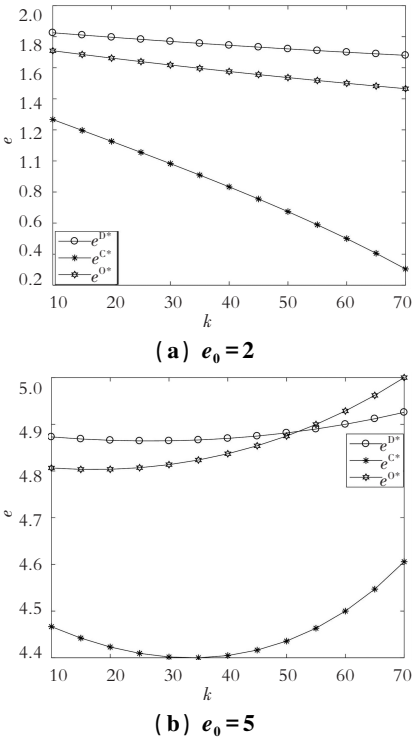


图 1 消费者环保意识对实际碳排放量的影响
Fig. 1 Impact of consumer environmental awareness on actual carbon emissions

4.2 消费者环保意识对需求的影响

图 2 表明,当初始碳排放量较低($e_0 = 2$)时,不论是 3PL 还是零售商提供物流服务,产品需求都会随着环保意识的增强而降低。集中决策情形下,需求将随环保意识的增强呈现先减少、后增加的态势。当初始碳排放量较高($e_0 = 5$)时,上述 3 种情形下的市场需求均随着消费者环保意识的增强而减少。结合图 1 以及需求函数 $d = a - bp - ke$ 可知,无论是初始碳排放量较低,还是较高,集中式决策既可以为消费者带来最大的好处(最低的产品价格),又可以为控制温室气体排放(最低的碳排放量),减缓气候变暖作出最大的贡献。

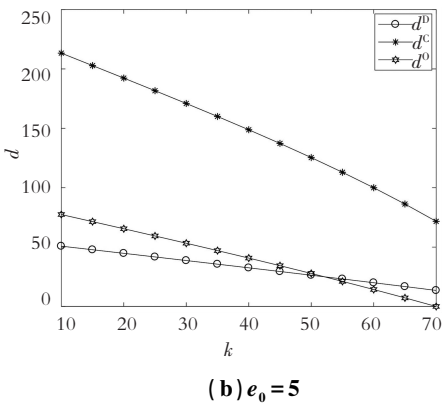
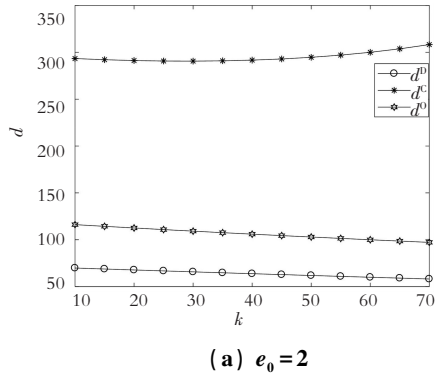


图 2 消费者环保意识对需求的影响
Fig. 2 Impact of consumer environmental awareness on demand

4.3 消费者环保意识对供应链成员以及供应链系统利润的影响

图 3(a)、图 4(a) 和图 5(a) 表明,当初始碳排放量较低($e_0 = 2$)时,无论是对于零售商、制造商,还是供应链系统而言,将物流服务外包给 3PL 都不是一个好的选择。

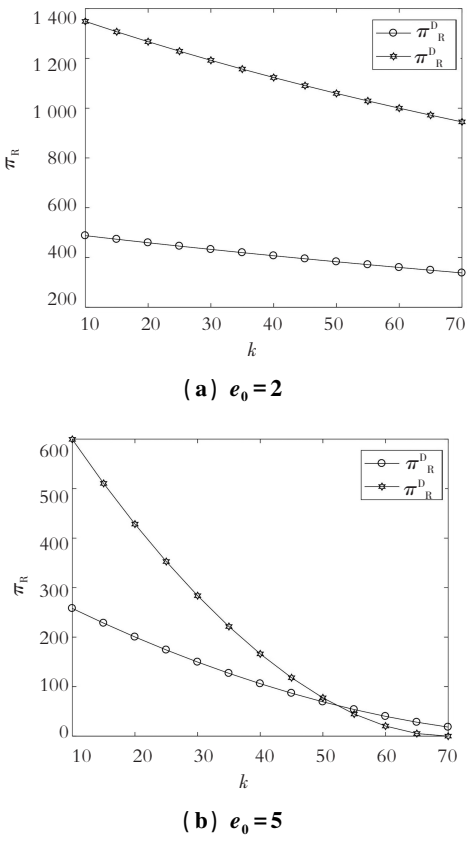
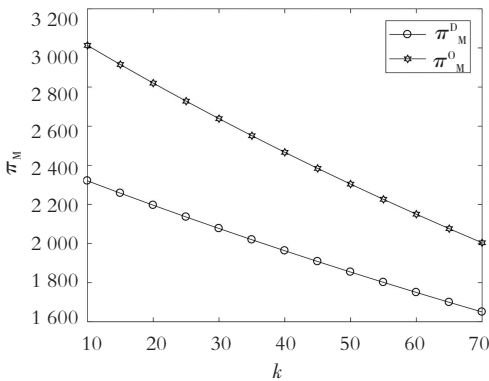


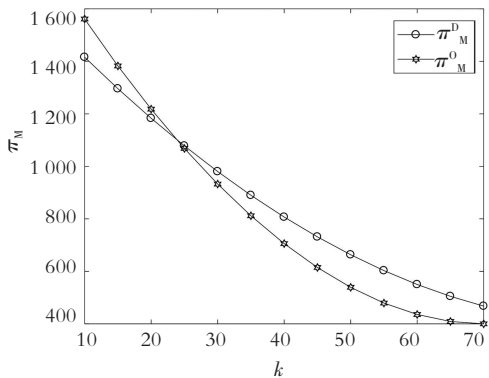
图 3 消费者环保意识对零售商利润的影响
Fig. 3 Impact of consumer environmental awareness on retailer's profits

图 3(b)、图 4(b) 和图 5(b) 表明,当初始碳排放

放量较高($e_0=5$)时,无论是 3PL 提供物流服务,还是零售商自营物流,零售商、制造商、供应链系统(包括集中和分散决策两种情形)的利润都随消费者环保意识的增强而降低。具体而言,对于零售商来说,当初始碳排放量较高,以及消费者环保意识处于某一区间范围(如 $k>52$)时,将物流服务外包给 3PL 是有利可图的,而当消费者环保意识处于其他区间范围时,零售商将会采取自营物流策略。对制造商而言,当消费者环保意识相对较低($k<25$)时,零售商自营物流对其是有利的;当消费者环保意识较高 $k>25$ 时,3PL 提供物流服务能够提高其利润。对供应链系统而言,无论初始碳排放量高还是低,集中式决策下的利润总是最高的。在分散式决策下,当初始碳排放量较低时,零售商自营物流能够提高供应链整体的利润;而当初始碳排放量较高时,恰恰相反,将物流服务外包给 3PL 可以为供应链带来更高的利润。

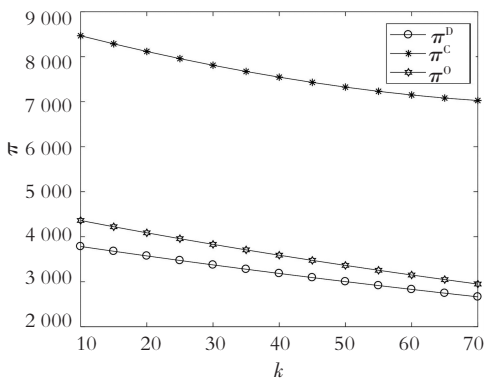


(a) $e_0=2$

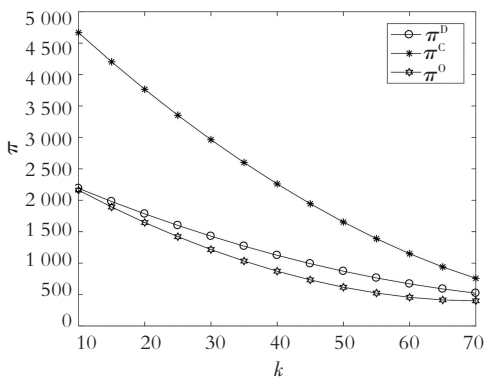


(b) $e_0=5$

图 4 消费者环保意识对制造商利润的影响
Fig. 4 Impact of consumer environmental awareness on manufacturer's profits



(a) $e_0=2$

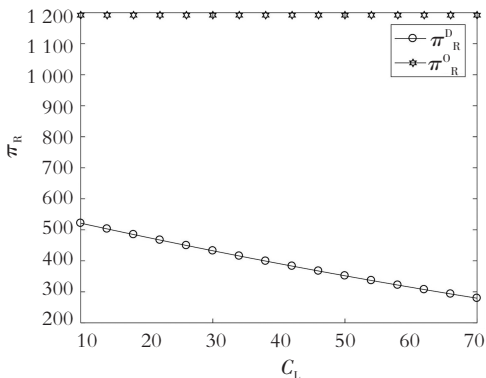


(b) $e_0=5$

图 5 消费者环保意识对供应链利润的影响
Fig. 5 Impact of consumer environmental awareness on supply chain profits

4.4 3PL 物流成本对供应链成员以及供应链系统利润的影响

图 6(a)、图 7(a) 和图 8(a) 表明:当初始碳排放量较低($e_0=2$)时,对于零售商和制造商来说,物流外包都不是一个好的选择;对于供应链系统来说,只有当 3PL 物流服务成本非常低的时候,3PL 提供物流服务才具有微弱的优势。



(a) $e_0=2$

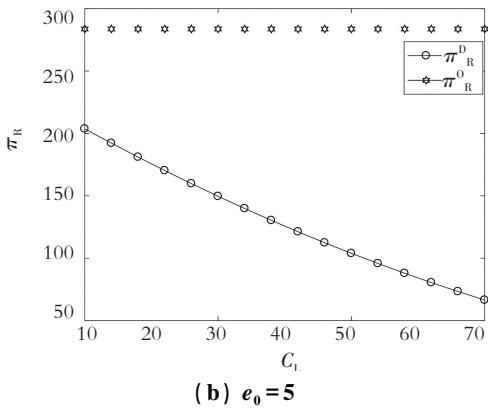


图 6 3PL 物流成本对零售商利润的影响
Fig. 6 Impact of 3PL's logistics cost on retailer's profits

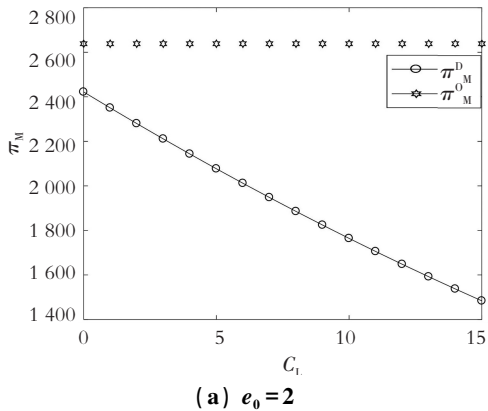


图 7 3PL 物流成本对制造商利润的影响
Fig. 7 Impact of 3PL's logistics cost on manufacturer's profits

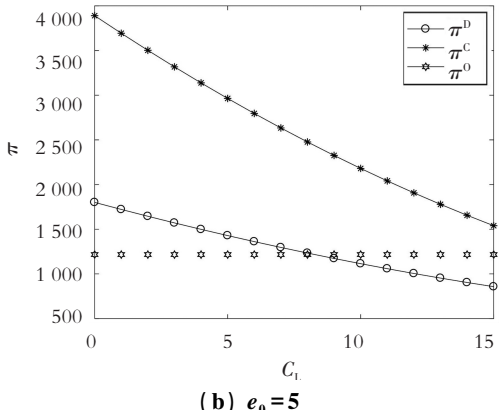
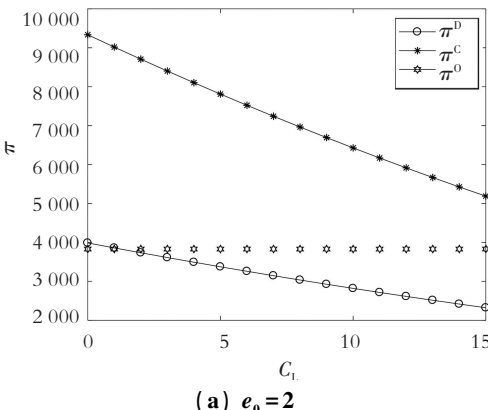


图 8 3PL 物流成本对供应链利润的影响
Fig. 8 Impact of 3PL's logistics cost on supply chain profits

图 6(b)、图 7(b) 和图 8(b) 表明,当初始碳排放量较高($e_0 = 5$)时,对于零售商来说,无论 3PL 的物流成本高还是低,零售商自营物流都是最好的选择;对于制造商来说,当 $0 < c_L \leq 6.2$ 时,物流外包可以增加其利润;对于供应链系统来说,当 $0 < c_L \leq 8$ 时,物流外包可以增加其利润。因此,当初始碳排放量较高时,供应链系统可以在供应链成员利润再分配的前提下将物流服务外包给 3PL,达到增加供应链成员利润,提高供应链竞争力的目标。

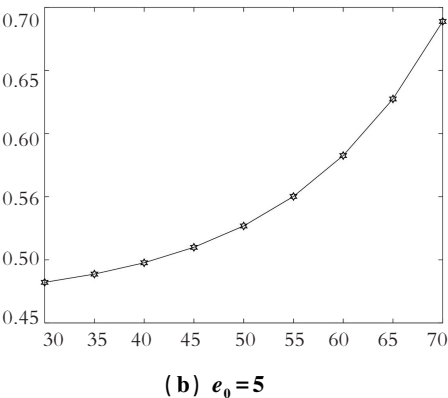
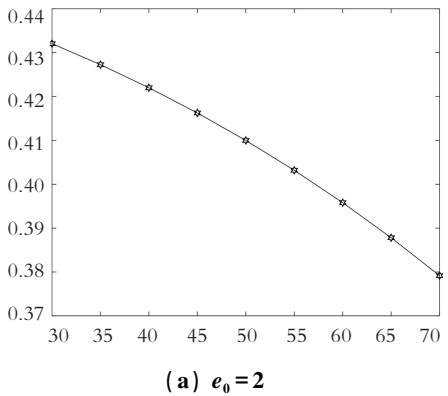


图 9 消费者环保意识对供应链协调的影响
Fig. 9 Impact of consumer environmental awareness on supply chain coordination

4.5 消费者环保意识对供应链协调的影响

图 9 表明,当初始碳排放量较低($e_0=2$)时,3PL 提供物流服务情形下,分散决策与集中决策下,利润的比值随环保意识的增强而降低;当初始碳排放量较高($e_0=5$)时,3PL 提供物流服务情形下,分散决策与集中决策情形下利润的比值随消费者环保意识的增强而提高。对比初始碳排放量高和低两种情形可以发现,初始碳排放量较低时,分散决策与集中决策情形下利润的比值较小,说明此情形下供应链协调可以为供应链成员以及供应链系统带来更大的利润增长。

最后,检验 SRS 契约的有效性。取收益共享比例 $\varphi_1=0.65, \varphi_2=0.2$ 。

观察表 1 发现:当初始碳排放量较低时,零售商、3PL 和制造商的利润分别增加了 170.9%、80.6%和 144.4%;当初始碳排放量较高时,零售商、3PL 和制造商的利润分别增加了 197.3%、98.1%和 100.2%。即:不管初始碳排放量较低还是较高,SRS 契约都能够有效提高供应链成员的利润,实现帕累托改进。

表 1 供应链协调前后各成员利润对比
Table 1 Comparison of each member's profit before and after supply chain coordination

π / e	π_R^{D*}	π_L^{D*}	π_M^{D*}	π_R^{SRS*}	π_L^{SRS*}	π_M^{SRS*}
$e_0=2$	432.49	864.98	2 077.0	1 171.5	1 562.1	5 076.7
$e_0=5$	149.65	299.30	980.27	444.62	592.82	1 962.7

5 结束语

本文在由制造商、3PL 和零售商组成的三级供应链中,基于消费者低碳敏感的假设,探讨了供应链最优决策和协调策略问题,对比分析了零售商自营物流与物流外包的条件。研究发现:当初始碳排放量较低时,无论是零售商自营物流还是 3PL 提供物流服务,消费者环保意识的增强都可以促使制造商降低单位产品的实际碳排放量;当初始碳排放量较高时,无论是零售商自营物流还是 3PL 提供物流服

务,制造商生产单位产品的碳排放量都随着环保意识的增强呈现先降低、后提高的态势;无论初始碳排放量高还是低,供应链集中决策都可以在为消费者提供低价、低碳排放产品的同时,提高供应链的整体竞争力;在一定的条件下,无论初始碳排放量高还是低,3PL 提供物流服务可以提高制造商和供应链整体的利润;SRS 契约可以有效地协调供应链,提高全体供应链成员的利润,实现供应链全体成员的帕累托改进。

根据上述研究结论,可以得到以下管理启示:

对于初始碳排放量较低的产品,政府可以“放任”市场来管理企业;对于初始碳排放量较高的产品,当消费者环保意识增强到一定程度后,政府可以采取征收碳排放税等手段来增加企业碳排放的成本,从而达到降低企业单位产品实际碳排放量的目的。

零售商不能够盲目地选择自营物流,或者将物流服务外包给 3PL,而应该在综合考虑了自身物流成本、3PL 物流成本、消费者环保意识和供应链决策方式的基础上作出于己、与供应链系统有利的选择。

制造商、3PL 和零售商应该统筹合作,通过采用 SRS 契约实现集中决策下的最优决策,这样既能够减少碳排放、增加市场需求、让消费者获利,又能够实现消费者、供应链系统、自然环境和自身多赢的目的。

需要指出的是,本文也存在一定的不足之处。本文只考虑了制造商通过一种渠道销售产品,然而随着互联网和新零售理念的发展,制造商通过多渠道销售产品时供应链成员的决策和协调问题也是一个值得进一步探讨的问题。

参考文献(References):

[1] DU S, ZHU L, LIANG L, et al. Emission-dependent supply chain and environment-policy-making in the “cap-and-trade” system[J]. Energy Policy, 2013, 57(7): 61—67.
[2] LU L, WU C H, KUO T C. Environmental principles applicable to green supplier evaluation by using multi-objective decision analysis[J]. International Journal of Production Research, 2007, 45(18/19): 4317—4331.

- [3] COHEN M A, VANDENBERGH M P. The potential role of carbon labeling in a green economy [J]. *Energy Economics*, 2012, 34(1): 53—63.
- [4] MICHAUD C, LERENA D, JOLY I. Willingness to pay for environmental attributes of non-food agricultural products: a real choice experiment[J]. *European Review of Agricultural Economics*, 2013, 40(2): 313—329
- [5] 林其玲, 刘兰兰. 节能家电双重补贴追踪: 苏宁国美已启动[N]. 新京报, 2011-09-05(3).
- LIN Qi-ling, LIU Lan-lan. Double subsidy tracking of energy-saving home appliances: Suning and Gome has started[N]. *The Beijing News*, 2011-09-05(3).
- [6] TSANG F, BURGE P. Paying for the carbon emissions reduction[R]. Cambridge, UK: Rand Corporation, 2011.
- [7] 中研华泰研究院. 2012-2016 年中国低碳经济市场调查及投资发展分析报告[R]. 北京: 中研华泰研究院, 2012.
- China Research Institute of Huatai Research. China low carbon economy market survey and investment development analysis report (2012-2016) [R]. Beijing: China Research Institute of Huatai Research, 2012.
- [8] YALABIK B, FAIRCHILD R J. Customer, regulatory, and competitive pressure as drivers of environmental innovation[J]. *International Journal of Production Economics*, 2011, 13(12): 519—527.
- [9] GHOSH D, SHAH J. A comparative analysis of greening policies across supply chain structures[J]. *International Journal of Production Economics*, 2012, 135(2): 568—586.
- [10] GHOSH D, SHAH J. Supply chain analysis under green sensitive consumer demand and cost sharing contract[J]. *International Journal of Production Economics*, 2015, 164: 319—329.
- [11] LUO Z, CHEN X, WANG X. The role of co-opetition in low carbon manufacturing [J]. *European Journal of Operational Research*, 2016, 253: 392—403.
- [12] LIU Z, ANDERSON T, CRUZ J. Consumer environmental awareness and competition in two-stage supply chains[J]. *European Journal of Operational Research*, 2012, 218(3): 602—613.
- [13] 孟晓阁, 聂佳佳, 林晴, 等. 消费者碳敏感情形下的竞争性低碳采购策略[J]. *系统工程理论与实践*, 2016, 36(12): 3103—3110.
- MENG Xiao-ge, NIE Jia-jia, LIN Qing, et al. Competitive low-carbon procurement strategy with carbon-sensitive consumers[J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2016, 36(12): 3103—3110.
- [14] 熊中楷, 张盼, 郭年. 供应链中碳税和消费者环保意识对碳排放的影响[J]. *系统工程理论与实践*, 2014, 34(9): 2245—2252.
- XIONG Zhong-kai, ZHANG Pan, GUO Nian. Impact of carbon tax and consumers' environmental awareness on carbon emissions in supply chains[J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2014, 34(9): 2245—2252.
- [15] 熊中楷, 何容瑶. 下游企业监督与政府介入对供应商减排影响的分析[J]. *管理工程学报*, 2017, 31(1): 93—101.
- XIONG Zhong-kai, HE Rong-yao. Analysis of downstream firm's supervising and governmental intervention on supplier's emission reduction[J]. *Journal of Industrial Engineering/Engineering Management*, 2017, 31(1): 93—101
- [16] 孙嘉楠, 肖忠东. 考虑消费者双重偏好的低碳供应链减排策略研究[J]. *中国管理科学*, 2018, 26(4): 49—56.
- SUN Jia-nan, XIAO Zhong-dong. Decision-making of dual-channel supply chain emission reduction based on consumer preference to low-carbon[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2018, 26(4): 49—56.
- [17] 刘名武, 万谧宇, 付红. 碳交易和低碳偏好下供应链低碳技术选择研究[J]. *中国管理科学*, 2018, 26(1): 152—162.
- LIU Ming-wu, WAN Mi-yu, FU Hong. Low-carbon technology selection for supply chain under cap and trade mechanism with low-carbon preference[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2018, 26(1): 152—162.
- [18] GONG X, ZHOU X. Optimal production planning with emissions trading[J]. *Operations Research*, 2013, 61(4): 908—924.
- [19] XU X, ZHANG W, HE P, et al. Production and pricing

- problems in make-to-order supply chain with cap-and-trade regulation[J]. *Omega*, 2017, 66(5-6):248—257.
- [20] HOVELAQUE V, BIEONNEAU L. The carbon-constrained EOQ model with carbon emission dependent demand[J]. *International Journal of Production Economics*, 2015, 164:285—291.
- [21] 陈晓红, 曾祥宇, 王傅强. 碳限额交易机制下碳交易价格对供应链碳排放的影响[J]. *系统工程理论与实践*, 2016, 36(10):2562—2571.
- CHEN Xiao-hong, ZENG Xiang-yu, WANG Fu-qiang. Impacts of carbon trading price on carbon emission in supply chain under the cap-and-trade system[J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2016, 36(10):2562—2571.
- [22] 李媛, 赵道致. 收益共享寄售契约下考虑碳减排的供应链绩效[J]. *管理工程学报*, 2016, 30(3):188—194.
- LI Yuan, ZHAO Dao-zhi. Supply chain preference under consignment contract with revenue sharing considering carbon emission reduction[J]. *Journal of Industrial Engineering/Engineering Management*, 2016, 30(3):188—194.
- [23] 刘名武, 吴开兰, 付红, 等. 消费者低碳偏好下零售商主导供应链减排合作与协调[J]. *系统工程理论与实践*, 2017, 37(12):3109—3117.
- LIU Ming-wu, WU Kai-lan, FU Hong, et al. Cooperation on carbon emission reduction in a retailer-led supply chain with consumer's low-carbon preference[J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2017, 37(12):3109—3117.
- [24] 何茵楠, 王帮俊, 魏宇茜, 等. 碳减排下的汽车零部件循环取货路径优化研究[J]. *重庆工商大学学报(自然科学版)*, 2021, 38(3):71—78.
- HE Yin-nan, WANG Bang-jun, WEI Yu-xi, et al. Research on the optimization of milk-run route of automobile parts based on carbon-emission reduction[J]. *Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition)*, 2021, 38(3):71—78.
- [25] 王芹鹏, 赵道致. 消费者低碳偏好下的供应链收益共享契约研究[J]. *中国管理科学*, 2014, 22(9):106—113.
- WANG Qin-peng, ZHAO Dao-zhi. Revenue-sharing contract of supply chain based on consumer's preference for low carbon products[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2014, 22(9):106—113.
- [26] 程永宏, 熊中楷. 碳标签制度下产品碳足迹与定价决策及协调[J]. *系统工程学报*, 2016, 31(3):386—397, 422.
- CHENG Yong-hong, XIONG Zhong-kai. Product carbon footprint and pricing decisions and coordination under carbon labelling system[J]. *Journal of Systems Engineering*, 2016, 31(3):386—397, 422.
- [27] XU X, HE P, XU H, et al. Supply chain coordination with green technology under cap-and-trade regulation[J]. *International Journal of Production Economics*, 2017, 183:433—442.
- [28] 谢鑫鹏, 赵道致, 刘永军. 需求具有碳排放敏感性的低碳供应链收益共享寄售契约[J]. *系统管理学报*, 2015, 24(1):107—115.
- XIE Xin-peng, ZHAO Dao-zhi, LIU Yong-jun. Revenue sharing consignment contract of low-carbon supply chain with carbon-emission sensitive demand[J]. *Journal of Systems & Management*, 2015, 24(1):107—115.
- [29] 杨惠霄, 骆建文. 碳税政策下的供应链减排决策研究[J]. *系统工程理论与实践*, 2016, 36(12):3092—3102.
- YANG Hui-xiao, LUO Jian-wen. Emission reduction in a supply chain with carbon tax policy[J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2016, 36(12):3092—3102.
- [30] 鲁力, 陈旭. 不同碳排放政策下基于回购合同的供应链协调策略[J]. *控制与决策*, 2014, 29(12):2212—2220.
- LU Li, CHEN Xu. Supply chain coordination with buyback contract under different carbon emission policies[J]. *Control and Decision*, 29(12):2212—2220.
- [31] 支帮东, 陈俊霖, 刘晓红. 碳限额与交易机制下基于成本共担契约的两级供应链协调策略[J]. *中国管理科学*, 2017, 25(7):48—56.
- ZHI Bang-dong, CHEN Jun-lin, LIU Xiao-hong. The coordination strategy for two-tier supply chains with a

cost-sharing contract in the cap-and-trade mechanism[J].
Chinese Journal of Management Science, 2017, 25 (7) :
48—56.

Science, 1997, 45 (5) : 633—640.

[32] LEE E, STAELIN R. Vertical strategic interaction;
implications for channel pricing strategy [J]. Marketing

[33] JIANG L, WANG Y, YAN X. Decision and coordination in
a competing retail channel involving a third-party logistics
provider[J]. Computers & Industrial Engineering, 2014,
76:109—121.

Research on Supply Chain Coordination Based on Consumer’s
Low Carbon Preference and the Third-party Logistics’s
Participation in Decision-making

ZHOU Ji-xiang, QIU Han-guang, ZHEN Jie

(School of Management Science and Engineering, Chongqing Technology and Business University,
Chongqing 400067, China)

Abstract: As consumers’ low-carbon preference and third-party logistics (3PL) have a significant impact on supply chain decision-making, Spanning Revenue-Sharing Contract is proposed to achieve supply chain coordination. Based on consumers’ low-carbon preference, four game models of manufacturer, 3PL and retailer are constructed. By solving the problem, the equilibrium solution of supply chain game under different situations is obtained, and the influence of consumers’ low carbon preference on actual carbon emissions under 3PL logistics service and retailer self-logistics is studied. The effects of consumers’ environmental awareness on actual carbon emissions, product demand, supply chain profit and supply chain coordination under different decision-making situations are discussed by numerical simulation. Further analysis shows that when the initial carbon emission is low, the enhancement of consumers’ environmental awareness can reduce the actual carbon emission per unit product. However, when the initial carbon emission is high, the actual carbon emission first decreases and then increases with the enhancement of consumers’ environmental awareness. Under certain conditions, whether the initial carbon emissions are high or low, 3PL can improve the profits of manufacturers and the whole supply chain by providing logistics services. SRS contract can effectively coordinate the supply chain and achieve Pareto improvement of the supply chain for all members.

Key words: low carbon; consumer environmental awareness; third-party logistics; supply chain coordination

责任编辑:罗姗姗

引用本文/Cite this paper:
周继祥,邱晗光,甄杰. 基于消费者低碳偏好和第三方物流参与决策的供应链协调研究[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2022, 39(3): 100—112.
ZHOU Ji-xiang, QIU Han-guang, ZHEN Jie. Research on supply chain coordination based on consumer’s low carbon preference and the third-party logistics’s participation in decision-making[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2022, 39(3): 100—112.