



碳税政策下考虑三重底线的低碳供应链优化决策及协调

摘要

本文研究了碳税政策下考虑三重底线的低碳供应链优化协调问题.首先研究集中式供应链模型的决策问题,考虑批发价格契约下四种不同的分散式供应链模型:模型 I、模型 II、模型 III 和模型 IV.然后考虑两部定价契约下四种不同的分散式低碳供应链模型:模型 I-LTT、模型 II-LTT、模型 III-LTT 和模型 IV-LTT.研究表明:两部定价契约可以完美协调模型 I-LTT 和模型 III-LTT 下的低碳供应链,同时可以在模型 II-LTT 和模型 IV-LTT 中实现低碳供应链的帕累托改进.最后进行数值分析,分析碳税和碳减排投资系数对契约协调前后供应链的总利润的影响.本文为低碳企业的减排策略和契约选择提供了可靠的理论依据.

关键词

低碳供应链;碳税政策;企业社会责任;碳减排;三重底线;两部定价契约;协调

中图分类号 F274

文献标志码 A

收稿日期 2022-09-20

资助项目 江苏省社会科学基金项目研究成果(21GLB020)

作者简介

马鹏,男,博士,教授,研究方向为物流与供应链管理、行为运营管理等.mapeng88@126.com

0 引言

气候变暖、环境恶化与人类能源需求增加之间的矛盾是一个全球性的难题,而排放过量的二氧化碳等温室气体是造成矛盾的主要原因^[1].各国政府与相关组织比以往任何时候更加注重环境保护,并出台了一系列低碳政策来控制工业生产的碳排放问题^[2].在各种低碳政策中,碳税、碳交易政策和碳限额政策最为有效^[3].与此同时,低碳企业重点关注碳减排,控制整个供应链中生产和销售以及回收过程的碳排放量,实现供应链的低碳化.供应链企业协同减排成为贯彻绿色发展理念的重要举措^[4].比如:在奢侈品行业,开云集团(Kering 集团)正专注于可持续发展,并努力将其发展为企业的核心能力;某些制造企业通过开发更低碳环保的产品,带动供应链上下游的节能减排(比如:华为).消费者在购买产品时会倾向于选择有良好企业社会责任(Corporate Social Responsibility, CSR)角色的企业^[5].通过政府监督、企业培育绿色消费市场和承担 CSR 等方法实现供应链协调,可以达到碳排放总量管控和优化市场资源配置的目的^[6].在政府实施碳税政策时,如何通过企业同时承担碳减排(Carbon Emission Reduction, CER)责任和 CSR 实现供应链协调,提高供应链总效用是一个值得研究的问题.

目前,已经有很多学者开展低碳供应链的相关研究.Du 等^[7]考虑了排放依赖的供应链,发现供应链成员合作能提升利润并降低碳排放量.夏良杰等^[8]探索竞争零售商模型中低碳供应链推广决策问题以及成本信息共享问题.Wesseh 等^[9]指出实施碳税政策大约可以减少 62.5%的排放量,电力部门也可从中获利.夏良杰等^[10]研究了强制碳减排规制对低碳供应链的影响,并设计了新的利润分享契约进行协调.李新军等^[11]研究了政府激励下汽车制造业进行低碳供应链管理时的决策问题.王君等^[12]研究了碳税政策对二级供应链中成员的行为选择的影响.张福安等^[13]研究了不同碳补贴情景下多元需求闭环供应链的减排决策模型.方国昌等^[14]基于系统动力学理论构建了政企碳减排演化博弈模型.相比于其他政策,碳税政策更加直接有效,也得到了更多的关注.

现有的大部分研究仅考虑经济责任和社会责任或仅考虑经济责

¹ 南京信息工程大学 管理工程学院,南京,210044

任和环境效益,很少有学者同时考虑三重责任.英国学者约翰·埃尔金顿最早提出“三重底线”,认为可持续发展的核心在于坚持三重底线,即企业利润、环境效益、社会责任的统一^[15].一些学者研究了三重底线概念的应用.Gimenez 等^[16]发现装配行业内部环境规划对环境、社会和经济绩效有正向影响,装配行业的项目也对社会和环境绩效有正向影响.Bergenwall 等^[17]从三重底线跨学科的角度研究了不同的丰田生产系统流程设计对美国汽车制造商的影响.Lai 等^[18]发现逆向物流的回收、再利用具有经济效益和环境效益.有些学者基于三重底线构建了环境效率评价模型或环境效率指数.Devika 等^[19]建立了基于三重底线概念的通用多目标优化模型.Sarkis 等^[20]提出一种利用三重底线的不同维度来有效识别和选择供应商的方法.Martins 等^[21]在多期规划框架内重新设计了现有的多层次粮食援助供应链网络.有的学者研究了三重底线下的绿色供应链优化问题.Biswas 等^[22]研究了一个供应链成员承担绿色投入,另一个供应链成员承担企业社会责任的情况.林志炳等^[23]研究了零售商 CSR 对政府补贴和供应链减排的影响,并设计了契约对供应链进行协调.然而,目前还没有学者研究低碳供应链中成员同时承担 CER 责任和 CSR 的情形.

很多学者设计契约来协调供应链,缓解分散式决策中的“双重边际效应”.Cachon^[24]指出企业是基于自身利润最大化来做决策的,供应链成员与整个供应链之间存在利益冲突,契约可以缓解此冲突.两部定价契约是指产品在销售时分为两部分进行定价,一部分是向零售商收取的固定费用,另一部分是与销售量相关的可变成本^[1].比如,品牌商想要进入沃尔玛等销售渠道时,除了批发价格之外,还需要额外缴纳场地使用费等^[25].通过两部定价契约机制,供应链可以实现纵向整合的最优结果,并实现成员间利润的任意分配.两部定价契约相对于单一价格契约更有效率,相对于数量折扣契约对制造商更有利,在理论上具有较优表现^[26-27].赵海霞等^[28]建立了风险规避的供应链成员在需求不确定环境下的两部定价契约模型.本文基于碳税政策来考虑三重底线下的低碳供应链决策问题,设计两部定价契约实现供应链的完美协调与帕累托改进.

综上,现有的大部分研究仅考虑经济责任和社会责任或仅考虑经济责任和环境效益,很少有学者在供应链管理中同时考虑三重底线.也没有学者研

究碳税政策对同时承担 CER 责任和 CSR 的低碳供应链运营决策的影响.此外,在低碳政策背景下设计相应契约对考虑三重底线的低碳供应链进行优化与协调是值得研究的问题.在已有研究的基础上,本文主要有如下创新:1)在模型的构建上,基于三重底线来构建供应链成员承担 CER 责任和 CSR 的集中式和分散式决策模型,研究碳税政策对承担 CER 责任和 CSR 的制造商与零售商的影响(以往大部分研究集中在承担 CER 责任的制造商或承担 CSR 的零售商);2)在协调机制上,设计两部定价契约对四种分散式决策模型进行协调,并分别实现完美协调或帕累托改进;3)不仅分析碳税对协调前后供应链总利润的影响,而且考虑碳减排技术投资系数对协调前后供应链总利润的影响.总之,本文将三重底线引入低碳供应链,分别建立四种批发价格契约下分散式供应链模型,得到不同情境下供应链成员的最优定价策略、碳排放量以及利润情况.然后设计四种两部定价契约来实现供应链的协调或帕累托改进,为低碳企业的减排策略和契约选择提供了可靠的理论依据,使企业在满足减排要求的基础上兼顾社会责任并获取可观的利润,具有一定的现实意义.

1 问题描述与模型假设

1.1 模型描述

本文考虑由政府、一个低碳制造商和一个零售商构成的二级低碳供应链.制造商生产低碳产品并将产品批发给零售商,零售商将产品售卖给市场上的顾客.产品的需求由产品价格与减排量决定.为了响应政府鼓励低碳消费的号召,假设供应链成员都可以承担 CER 责任.比如,制造商可以投资低碳技术生产低排放量的产品,零售商可以通过投资智能仓库管理系统等软件系统减少运输或储存货物过程中的碳排放.此外,假设供应链成员在决策时会考虑 CSR,即供应链成员的决策问题由一定比例的利润和 CSR 构成.本文涉及到的相关符号及其含义汇总如表 1 所示.

本文研究三重底线二级低碳供应链的优化决策问题.考虑两种供应链结构形式:1)集中式决策;2)分散式决策.分散式决策首先考虑批发价格契约下四种不同的分散式供应链模型(模型 I、模型 II、模型 III 和模型 IV),然后考虑两部定价契约下四种不同的分散式低碳供应链模型(模型 I-LTT、模型 II-LTT、模型 III-LTT 和模型 IV-LTT).

表 1 模型符号说明

Table 1 Description of model notations

类别	符号	含义
参数	a	产品的潜在市场需求
	b	产品需求的价格弹性系数
	q	产品的实际市场需求量
	k	企业的碳减排系数
	t	碳减排技术投资系数
	e_0	产品的初始碳排放量
	τ	企业社会责任系数
	τ_1	政府征收的碳税
	π	供应链成员的利润
	μ	供应链成员的目标函数
决策变量	w	产品的批发价格
	p	产品的零售价格
	e_1	产品减排后的碳排放量
上标	*	最优解
	I	制造商承担 CER 责任和 CSR
	II	制造商承担 CER 责任, 零售商承担 CSR
	III	制造商承担 CSR, 零售商承担 CER 责任
	IV	零售商承担 CER 责任和 CSR

1.2 模型基本假设

本文模型有如下假设:

假设 1: 假设制造商和零售商是完全理性的, 他们的风险偏好程度是中性的. 二者均以自身的目标函数最大化为目标进行决策.

假设 2: 考虑由政府、一个制造商和一个零售商构成的二级供应链, 制造商生产低碳产品, 零售商销售低碳产品, 且消费者具有低碳偏好.

假设 3: 只考虑供应链在一个周期内的运营状况, 假设制造商的生产能力可以满足所有的市场需求, 所以不考虑货物短缺的情况.

假设 4: 假设供应链成员承担 CER 责任. 制造商在产品的生产过程中进行 CER 技术投资, 零售商在产品的运输、存储和销售的过程中进行低碳投资. CER 成本与碳排放量和对 CER 技术的投资程度有关, 碳排放量越小、CER 技术投资程度越大, 则 CER 成本越高. 假设企业 CER 技术投资成本为 $t(e_0 - e_1)^2$, 其中, e_0 是企业的单位初始碳排放量, e_1 是企业的单位碳排放量, t 代表碳减排技术投资系数^[29-30].

假设 5: 消费者具有低碳偏好, 市场上对于该产品的需求随着产品零售价格的上涨而减少, 同时该产品的市场需求随着碳排放量的增加而减少. 假设需求函数为 $q = a - bp - ke_1$, 其中 $b, k \geq 0$, 且单位产品的零售价格和碳排放量满足 $p, e_1 \geq 0$. 其中, q 表示

该产品的市场需求量, b 表示该产品需求的价格弹性系数, k 表示企业的碳减排系数^[29-31]. 假设产品的供应可以满足市场需求, 即 q 等于零售商的订购数量.

假设 6: 假设企业在追求利润最大化的过程中, 也会关心其他利益相关者的利益, 主动承担一定的社会责任, 具体效用表示为消费者剩余的一部分 ($\tau \in [0, 1]$). $\tau = 0$ 时, 供应链成员是完美的利润最大化者; $\tau = 1$ 时, 供应链成员是一个完美的福利最大化者. 因此, 供应链成员的目标函数可以表示为 $\mu_i = (1 - \tau)\pi_i(\cdot) + \tau\text{CSR}(q)$, 即由 $(1 - \tau)$ 比例的利润 π_i 和 τ 比例的消费者剩余 ($\text{CSR}(q)$) 构成^[22]. 这里企业对消费者剩余的关注代表企业对社会责任的关注.

假设 7: 假设制造商的碳减排成本与生产成本没有关系.

2 集中式供应链决策模型

在集中式供应链中, 整个供应链可以视为一个公司, 并决定最优零售价格、碳减排量. 集中式供应链可以使制造商和零售商能够在没有双重边际化的情况下实现各自的目标. 在传统供应链中, 集中式决策对供应链整体来说是最优的, 可以作为后续研究的基准模型. 集中式供应链的目标函数为

$$\max_{p, e_1} \mu_c = (1 - \tau) \{ (p - c - \tau_1)q - t(e_0 - e_1)^2 \} + \frac{\tau q^2}{2b}. \quad (1)$$

式中: $(p - c - \tau_1)q - t(e_0 - e_1)^2$ 表示供应链的利润函数; $t(e_0 - e_1)^2$ 表示碳减排成本; $\frac{q^2}{2b}$ 为消费者剩余

(在本文中代表企业社会责任); $\frac{\tau q^2}{2b}$ 表示企业承担的相应 CSR. 将产品需求函数代入式(1), 可得:

$$\max_{p, e_1} \mu_c = (1 - \tau) \{ (p - c - \tau_1)(a - bp - ke_1) - t(e_0 - e_1)^2 \} + \frac{\tau(a - bp - ke_1)^2}{2b}. \quad (2)$$

式中: p, e_1 为决策变量. 可以求解最优的决策变量 (p, e_1) , 使得集中式供应链的目标函数得到最大值. 首先, 可得集中式供应链的目标函数关于产品零售价格 p 和碳减排量 e_1 的 Hessian 矩阵如下:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 \mu_c}{\partial p^2} & \frac{\partial^2 \mu_c}{\partial p \partial e_1} \\ \frac{\partial^2 \mu_c}{\partial e_1 \partial p} & \frac{\partial^2 \mu_c}{\partial e_1^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b(3\tau - 2) & k(2\tau - 1) \\ k(2\tau - 1) & \frac{\tau k^2}{b} - 2t(1 - \tau) \end{bmatrix}.$$

目标函数(2) 存在最大值的条件是 Hessian 矩阵负定, 即:

$$1) \frac{\partial^2 \mu_c}{\partial p^2} < 0 \Rightarrow b(3\tau - 2) < 0 \Rightarrow \text{当 } b > 0 \text{ 时, } \tau < \frac{2}{3};$$

$$2) \frac{\partial^2 \mu_c}{\partial e_1^2} < 0 \Rightarrow \frac{\tau k^2}{b} - 2t(1 - \tau) < 0 \Rightarrow t > \frac{\tau k^2}{2b(1 - \tau)};$$

$$3) |H| > 0 \Rightarrow -k^2(1 - \tau)^2 - 2tb(1 - \tau) \times (3\tau - 2) > 0 \Rightarrow t > \frac{k^2(1 - \tau)}{2b(2 - 3\tau)}.$$

$$\text{因为 } \max\left(\frac{k^2(1 - \tau)}{2b(2 - 3\tau)}, \frac{\tau k^2}{2b(1 - \tau)}\right) = \frac{k^2(1 - \tau)}{2b(2 - 3\tau)},$$

由以上条件可得, 当 $\tau \in \left[0, \frac{2}{3}\right)$ 且 $t > \frac{k^2(1 - \tau)}{2b(2 - 3\tau)}$ 时, 该 Hessian 矩阵负定, 此时目标函数存在最优解. 求式(2) 对 p, e_1 的一阶偏导数, 可得:

$$\frac{\partial \mu_c}{\partial p} = (1 - \tau)(a - 2bp - ke_1 + bc + b\tau_1) - \tau(a - bp - ke_1) = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \mu_c}{\partial e_1} = (1 - \tau)[2t(e_0 - e_1) - k(p - c - \tau_1)] - \frac{k\tau}{b}(a - bp - ke_1) = 0. \quad (4)$$

联立式(3)–(4), 可得:

$$p_c^* = c + \tau_1 + \frac{2t(1 - 2\tau)N}{A},$$

$$e_{1c}^* = e_0 - \frac{k(1 - \tau)N}{A}.$$

将最优零售价格和最优碳排放量代入产品的需求函数, 可得最优销售量为 $q_c^* = \frac{2tb(1 - \tau)N}{A}$. 进而, 可得供应链最优利润为 $\pi_c^* = \frac{t(1 - \tau)N^2(A - 2tb\tau)^2}{A^2}$, 供应链应承担的最优企业社会责任为

$$CSR_c^* = 2b\tau \left(\frac{tN(1 - \tau)}{A}\right)^2.$$

其中: $A = 2tb(2 - 3\tau) - k^2(1 - \tau)$; $N = (a - bc - b\tau_1 - ke_0)$.

根据集中式供应链目标函数的 Hessian 矩阵负定的条件, 得到碳减排技术投资系数的下界, 即 CER

投资程度有一个门槛, 企业必须投入一定数额的资金才能获得正利润. 通过对集中式供应链决策最优解的分析, 得到命题 1.

命题 1 在集中式供应链模型中, 有以下结论:

1) q_c^* 和 CSR_c^* 随着 a 的增加而增加; e_{1c}^* 随着 a 的增加而减少; 当 $\tau \in (0, \frac{1}{2})$ 时, p_c^* 随着 a 的增加而增加; 当 $\tau \in (\frac{1}{2}, \frac{2}{3})$ 时, p_c^* 随着 a 的增加而减少; 当 $\tau \in (\frac{1}{2}, \frac{2}{3})$ 时, π_c^* 随着 a 的增加而增加; 当 $\tau \in (0, \frac{1}{2})$ 时, π_c^* 随着 a 的增加而减少.

2) q_c^* 和 CSR_c^* 随着 c 的增加而减少; e_{1c}^* 随着 c 的增加而增加; 当 $\tau \in (0, \frac{1}{2})$ 时, p_c^* 随着 c 的增加而减少; 当 $\tau \in (\frac{1}{2}, \frac{2}{3})$ 时, p_c^* 随着 c 的增加而增加; 当 $\tau \in (0, \frac{1}{2})$ 时, π_c^* 随着 c 的增加而增加; 当 $\tau \in (\frac{1}{2}, \frac{2}{3})$ 时, π_c^* 随着 c 的增加而减少.

证明

1) 分别求 q_c^* 和 CSR_c^* 关于 a 的一阶偏导数, 可得 $\frac{\partial q_c^*}{\partial a} = \frac{2tb(1 - \tau)}{A} > 0$, $\frac{\partial CSR_c^*}{\partial a} = \frac{2bt^2(1 - \tau)^2N}{A^2} > 0$;

求 e_{1c}^* 关于 a 的一阶偏导数, 可得 $\frac{\partial e_{1c}^*}{\partial a} = -\frac{k(1 - \tau)}{A} < 0$;

求 p_c^* 关于 a 的一阶偏导数, 可得 $\frac{\partial p_c^*}{\partial a} = \frac{2t(1 - 2\tau)}{A}$,

因此, 当 $\tau \in (0, \frac{1}{2})$ 时, $\frac{\partial p_c^*}{\partial a} > 0$, 当 $\tau \in (\frac{1}{2}, \frac{2}{3})$ 时, $\frac{\partial p_c^*}{\partial a} < 0$; 求 π_c^* 关于 a 的一阶偏导数, 可得

$$\frac{\partial \pi_c^*}{\partial a} = \frac{2tN(1 - \tau)[4tb(1 - 2\tau) - k^2(1 - \tau)]}{A^2},$$

进而可得, 当 $\tau \in (\frac{1}{2}, \frac{2}{3})$ 时, $\frac{\partial \pi_c^*}{\partial a} > 0$, 当 $\tau \in (0, \frac{1}{2})$ 时, $\frac{\partial \pi_c^*}{\partial a} < 0$.

2) 求 q_c^* 和 CSR_c^* 关于 c 的一阶偏导数, 可得

$$\frac{\partial q_c^*}{\partial c} = -\frac{2tb^2(1 - \tau)}{A} < 0, \quad \frac{\partial CSR_c^*}{\partial c} = -\frac{2t^2b^2(1 - \tau)^2N}{A^2} < 0;$$

求 e_{1c}^* 关于 c 的一阶偏导数, 可得 $\frac{\partial e_{1c}^*}{\partial c} = \frac{k(1-\tau)}{A} > 0$;

求 p_c^* 关于 c 的一阶偏导数, 可得 $\frac{\partial p_c^*}{\partial c} = \frac{(1-\tau)(2tb-k^2)}{A}$, 由此可得, 当 $\tau \in \left(0, \frac{1}{2}\right)$,

$\frac{\partial p_c^*}{\partial c} < 0$, 当 $\tau \in \left(\frac{1}{2}, \frac{2}{3}\right)$ 时, $\frac{\partial p_c^*}{\partial c} > 0$; 求 π_c^* 关于 c

的一阶偏导数, 可得 $\frac{\partial \pi_c^*}{\partial c} = -\frac{2tbN(1-\tau)[4tb(1-2\tau)-k^2(1-\tau)]}{A^2}$, 进而可

得, 当 $\tau \in \left(0, \frac{1}{2}\right)$ 时, $\frac{\partial \pi_c^*}{\partial c} > 0$, 当 $\tau \in \left(\frac{1}{2}, \frac{2}{3}\right)$ 时,

$\frac{\partial \pi_c^*}{\partial c} < 0$.

证毕.

然后, 探究批发价格契约下分散式供应链的均衡情况.

3 分散式供应链决策模型: 批发价格契约

3.1 模型 I (制造商: CER+CSR)

在模型 I 中, 制造商承担 CER 责任和 CSR, 零售商关注利润最优化. 制造商的优化决策问题为

$$\max_{w, e_1} \mu_m = (1-\tau) \left\{ (w-c-\tau_1)q - t(e_0-e_1)^2 \right\} + \frac{\tau q^2}{2b}, \quad (5)$$

s.t.

$$\text{IC: } q = \underset{p}{\operatorname{argmax}} \pi_r(\cdot),$$

$$\text{IR: } \pi_r(\cdot) = (p-w)q \geq \bar{\pi}_r. \quad (6)$$

其中: $(w-c-\tau_1)q - t(e_0-e_1)^2$ 代表制造商的利润; $\frac{\tau q^2}{2b}$ 表示制造商承担的相应 CSR. IC 代表零售商的激励相容约束, IR 代表零售商的理性约束, 即意味着零售商只有在其利润 $((p-w)q)$ 至少等于其预留利润水平 $\bar{\pi}_r$ 时, 零售商才会与制造商合作交易. 求解模型 I 的最优决策, 得到命题 2.

命题 2 当 $\tau \in \left[0, \frac{4}{5}\right)$ 且 $t > \frac{k^2(1-\tau)}{2b(4-5\tau)}$ 时,

最优的批发价格为 $[w^*]^1 = c + \tau_1 + \frac{2tN(2-3\tau)}{A_1}$,

最优的碳排放量为 $[e_1^*]^1 = e_0 - \frac{kN(1-\tau)}{A_1}$, 最优的

零售价格为 $[p^*]^1 = [w^*]^1 + \frac{2tN(1-\tau)}{A_1}$, 制造商

的最优利润为 $[\pi_m^*]^1 = t(1-\tau)(A_1 - 2bt\tau) \left(\frac{N}{A_1}\right)^2$,

零售商的最优利润为 $[\pi_r^*]^1 = \frac{b[2t(1-\tau)N]^2}{A_1^2}$, 供

应链的最优总利润为 $[\pi^*]^1 = [\pi_m^*]^1 + [\pi_r^*]^1 = t(1-\tau)(A_1 + 2bt(2-3\tau)) \left(\frac{N}{A_1}\right)^2$, 最优的社会企

业责任为 $[\text{CSR}^*]^1 = 2b\tau \left(\frac{(1-\tau)tN}{A_1}\right)^2$. 其中, $A_1 = 2bt(4-5\tau) - k^2(1-\tau)$, $N = (a - bc - b\tau_1 - ke_0)$.

证明 求式 (6) 关于 p 的一阶条件, 可得

$$p(w, e_1) = \frac{a - ke_1 + bw}{2b},$$

将该式代入到产品的需求函数中, 可得 $q(w, e_1) = \frac{a - ke_1 - bw}{2}$. 将 $p(w, e_1)$ 和

$q(w, e_1)$ 代入式 (5), 可得:

$$\mu_m = (1-\tau) \left\{ \frac{(w-c-\tau_1)(a-ke_1-bw)}{2} - t(e_0-e_1)^2 \right\} + \frac{\tau(a-ke_1-bw)^2}{8b}.$$

可得制造商的目标函数 (μ_m) 关于产品批发价格 w 和碳减排量 e_1 的 Hessian 矩阵如下:

$$H = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 \mu_m}{\partial w^2} & \frac{\partial^2 \mu_m}{\partial w \partial e_1} \\ \frac{\partial^2 \mu_m}{\partial e_1 \partial w} & \frac{\partial^2 \mu_m}{\partial e_1^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b\left(\frac{5\tau}{4} - 1\right) & k\left(\frac{3\tau}{4} - 1\right) \\ k\left(\frac{3\tau}{4} - 1\right) & \frac{\tau k^2}{4b} - 2t(1-\tau) \end{bmatrix}.$$

目标函数存在最优解的条件是 Hessian 矩阵负定, 即:

$$1) \frac{\partial^2 \mu_m}{\partial w^2} < 0 \Rightarrow b\left(\frac{5\tau}{4} - 1\right) < 0 \Rightarrow \text{当 } b > 0 \text{ 时,}$$

$$\tau < \frac{4}{5};$$

$$2) \frac{\partial^2 \mu_m}{\partial e_1^2} < 0 \Rightarrow \frac{\tau k^2}{4b} - 2t(1-\tau) < 0 \Rightarrow t >$$

$$\frac{\tau k^2}{8b(1-\tau)};$$

$$3) |H| > 0 \Rightarrow t > \frac{k^2(1-\tau)}{2b(4-5\tau)}.$$

马鹏,等.碳税政策下考虑三重底线的低碳供应链优化决策及协调.

因为 $\max\left(\frac{k^2(1-\tau)}{2b(4-5\tau)}, \frac{\tau k^2}{8b(1-\tau)}\right) = \frac{k^2(1-\tau)}{2b(4-5\tau)}$,

由以上条件,可得 $\tau \in \left[0, \frac{4}{5}\right)$ 且 $t > \frac{k^2(1-\tau)}{2b(4-5\tau)}$ 时,该 Hessian 矩阵负定,此时目标函数存在最优解.

求 μ_m 关于 w 和 e_1 的一阶导数,并令其等于零,可得:

$$\frac{\partial \mu_m}{\partial w} = \frac{(1-\tau)(a - ke_1 + bc + b\tau_1 - 2bw)}{2} - \frac{\tau k(a - ke_1 - bw)}{4} = 0,$$

$$\frac{\partial \mu_m}{\partial e_1} = (1-\tau) \left\{ 2t(e_0 - e_1) - \frac{k(w - c - \tau_1)}{2} \right\} - \frac{\tau k(a - ke_1 - bw)}{4b} = 0.$$

联立以上两个方程可得: $[w^*]^I = c + \tau_1 + \frac{2tN(2-3\tau)}{A_1}$ 和 $[e_1^*]^I = e_0 - \frac{kN(1-\tau)}{A_1}$. 其中, $A_1 = 2bt(4-5\tau) - k^2(1-\tau)$, $N = (a - bc - b\tau_1 - ke_0)$. 将产品最优批发价格和最优碳排放量代入利润函数等,可得其他最优解.

证毕.

3.2 模型 II (制造商: CER; 零售商: CSR)

在模型 II 中,制造商承担 CER 责任,零售商承担 CSR 和利润.制造商和零售商的目标函数分别为

$$\max_{w, e_1} \pi_m = (w - c - \tau_1)q - t(e_0 - e_1)^2, \quad (7)$$

s.t.

$$\text{IC: } q = \underset{p}{\operatorname{argmax}} \mu_r(\cdot),$$

$$\text{IR: } \pi_r(\cdot) = (p - w)q \geq \bar{\pi}_r, \quad (8)$$

$$\mu_r(\cdot) = (1-\tau)((p-w)q) + \frac{\tau q^2}{2b}. \quad (9)$$

用逆向归纳法求均衡解可得命题 3.

命题 3 当 $\tau \in \left[0, \frac{2}{3}\right)$ 且 $0 < t < \frac{k^2(1-\tau)}{4b(2-3\tau)}$ 时,最优的批发价格为 $[w^*]^II = c + \tau_1 + \frac{2tN(2-3\tau)}{A_2}$, 最优的碳排放量为 $[e_1^*]^II = e_0 - \frac{kN(1-\tau)}{A_2}$, 最优的零售价格为 $[p^*]^II = [w^*]^II + \frac{2tN(1-2\tau)}{A_2}$, 制造商的最优利润为 $[\pi_m^*]^II = \frac{t(1-\tau)N^2}{A_2}$, 零售商的最优利润为 $[\pi_r^*]^II = b(1 -$

$\tau)(1-2\tau) \left(\frac{2tN}{A_2}\right)^2$, 供应链的最优总利润为 $[\pi^*]^II = [\pi_m^*]^II + [\pi_r^*]^II = t(1-\tau)(A_2 + 2bt(3-4\tau)) \left(\frac{N}{A_2}\right)^2$, 最优社会企业责任为 $[\text{CSR}^*]^II = 2b\tau \left(\frac{tN(1-\tau)}{A_2}\right)^2$. 其中, $A_2 = 4bt(2-3\tau) - k^2(1-\tau)$, $N = (a - bc - b\tau_1 - ke_0)$.

证明与命题 2 类似,此处省略.

3.3 模型 III (制造商: CSR; 零售商: CER)

在模型 III 中,制造商承担 CSR,零售商承担 CER 责任并关注利润.制造商和零售商的优化目标为

$$\max_w \mu_m = (1-\tau)(w-c)q + \frac{\tau q^2}{2b}, \quad (10)$$

s.t.

$$\text{IC: } q = \underset{p, e_1}{\operatorname{argmax}} \pi_r(\cdot),$$

$$\text{IR: } \pi_r(\cdot) = (p - w - \tau_1)q - t(e_0 - e_1)^2 \geq \bar{\pi}_r. \quad (11)$$

用逆向归纳法求均衡解可得命题 4.

命题 4 当 $t > \frac{k^2}{4b}$ 时,最优的批发价格为

$[w^*]^III = c + \frac{N(A - tb\tau)}{2bA_3}$, 最优的碳排放量为 $[e_1^*]^III = e_0 - \frac{kN(1-\tau)}{2A_3}$, 最优的零售价格为 $[p^*]^III = \tau_1 + [w^*]^III + \frac{tN(1-\tau)}{A_3}$, 最优的销售量为 $[q^*]^III = \frac{btN(1-\tau)}{A_3}$, 零售商的最优利润为 $[\pi_r^*]^III =$

$t(4tb - k^2) \left[\frac{(1-\tau)N}{2A_3}\right]^2$, 制造商的最优利润为 $[\pi_m^*]^III = \frac{t(1-\tau)(A_{c3} - tb\tau)}{2} \left(\frac{N}{A_3}\right)^2$, 供应链的最

优总利润为 $[\pi^*]^III = [\pi_m^*]^III + [\pi_r^*]^III = t(1-\tau)(A_3 + bt(8-11\tau) + 4k^2(1-\tau)) \left(\frac{N}{2A_3}\right)^2$, 最优的社会企业责任为 $[\text{CSR}^*]^III = \frac{b\tau}{2} \left[\frac{tN(1-\tau)}{A_3}\right]^2$. 其中, $A_3 = bt(4-5\tau) - k^2(1-\tau)$, $N = (a - bc - b\tau_1 - ke_0)$.

证明与命题 2 类似,此处省略.

3.4 模型 IV (零售商: CER+CSR)

在模型 IV 中,制造商关注利润,零售商承担 CER

责任和 CSR. 制造商和零售商的优化问题为

$$\max_w \pi_m = (w - c)q, \quad (12)$$

s.t.

$$\text{IC: } (p, e_1) = \underset{p, e_1}{\operatorname{argmax}} \mu_r(\cdot),$$

$$\text{IR: } \pi_r(\cdot) = (p - w - \tau_1)q - t(e_0 - e_1)^2 \geq \bar{\pi}_r,$$

$$\mu_r(\cdot) = (1 - \tau)((p - w - \tau_1)q - t(e_0 - e_1)^2) + \frac{\tau q^2}{2b}. \quad (13)$$

用逆向归纳法求均衡解可得命题 5.

命题 5 当 $t > \frac{k^2}{4b}$ 时, 最优的批发价格为

$$[w^*]^N = c + \frac{N}{2b}, \text{ 最优的碳排放量为 } [e_1^*]^N = e_0 - \frac{kN(1 - \tau)}{2A},$$

$$\text{最优的零售价格为 } [p^*]^N = \tau_1 + [w^*]^N + \frac{tN(1 - 2\tau)}{A},$$

$$\text{制造商的最优利润为 } [\pi_m^*]^N = \frac{t(1 - \tau)N^2}{2A},$$

$$\text{零售商的最优利润为 } [\pi_r^*]^N = t(1 - \tau)(A - 2bt\tau) \left(\frac{N}{2A}\right)^2,$$

$$\text{供应链的最优总利润为 } [\pi^*]^N = [\pi_m^*]^N + [\pi_r^*]^N = t(1 - \tau)(A + 2bt(4 - 7\tau) + 4k^2(1 - \tau)) \left(\frac{N}{2A}\right)^2,$$

$$\text{最优的社会企业责任为 } [\text{CSR}^*]^N = \frac{b\tau}{2} \left[\frac{tN(1 - \tau)}{A}\right]^2.$$

$$\text{其中, } A = 2tb(2 - 3\tau) - k^2(1 - \tau), N = (a - bc - b\tau_1 - ke_0).$$

证明与命题 2 类似, 此处省略.

在下一节中, 本文设计了两部定价契约对四种分散式模型进行协调或帕累托改进.

4 两部定价契约协调机制

两部定价契约是指, 制造商在出售产品时, 向零售商收取一定金额的固定费用 (L), 并收取每单位的使用费 (w). 通过两部定价契约协调机制, 可以获得供应链纵向整合的最优结果, 实现供应链成员的利益分配. 下面分别介绍四种模型在两部定价契约下的均衡情况.

4.1 模型 I-LTT (制造商: CER+CSR)

在模型 I-LTT 中, 制造商承担 CER 责任和 CSR, 而零售商关注利润. 通过两部定价契约机制对供应链进行协调, 即制造商先降低批发价格, 激励零

售商购买更多的产品. 此外, 零售商向制造商支付一笔固定费用 ($[L]_{\text{LTT}}^I$) 补偿其损失, 制造商和零售商的决策问题为

$$\max_{w, e_1} \mu_m = (1 - \tau) \left\{ (w - c + \tau_1)q - t(e_0 - e_1)^2 + L \right\} + \frac{\tau q^2}{2b}, \quad (14)$$

s.t.

$$\text{IC: } q = \underset{p}{\operatorname{argmax}} \pi_r(\cdot),$$

$$\text{IR: } \pi_r(\cdot) = (p - w)q - L \geq \bar{\pi}_r. \quad (15)$$

求解均衡解, 并对其进行分析, 得到命题 6.

命题 6 在模型 I-LTT 中, 两部定价契约 ($[w^*]_{\text{LTT}}^I, [L^*]_{\text{LTT}}^I$) 可以有效地协调制造商承担 CER 责任和 CSR、零售商关注利润的供应链. 此时, 供应链的均衡决策与集中式决策下的均衡决策相同, 供应链利润也达到最优.

证明 求式 (15) 关于 p 的一阶条件, 可得

$$p(w, e_1) = \frac{a - ke_1 + bw}{2b}, \text{ 将其代入到产品的需求函}$$

$$\text{数中, 可得 } q(w, e_1) = \frac{a - ke_1 - bw}{2}.$$

将 $p(w, e_1)$ 和 $q(w, e_1)$ 代入式 (15), 可得:

$$\pi_r(\cdot) = \frac{(a - bw - ke_1)^2}{4b} - L. \text{ 假设零售商获取保留}$$

$$\text{利润, 则最优固定费用为 } L^* = \frac{(a - bw - ke_1)^2}{4b} -$$

$$\bar{\pi}_r, \text{ 将其代入式 (14), 可得 } \mu_m = (1 - \tau) \left\{ \frac{(w - c - \tau_1)(a - ke_1 - bw)}{2} - t(e_0 - e_1)^2 + \right.$$

$$\left. \frac{(a - bw - ke_1)^2}{4b} - \bar{\pi}_r \right\} + \frac{\tau(a - ke_1 - bw)^2}{8b}. \text{ 可得 } \mu_m$$

关于 w 和 e_1 的 Hessian 矩阵为

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 \mu_m}{\partial w^2} & \frac{\partial^2 \mu_m}{\partial w \partial e_1} \\ \frac{\partial^2 \mu_m}{\partial e_1 \partial w} & \frac{\partial^2 \mu_m}{\partial e_1^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b \left(\frac{3\tau}{4} - \frac{1}{2} \right) & \frac{\tau k}{4} \\ \frac{\tau k}{4} & \frac{(2 - \tau)k^2}{4b} - 2t(1 - \tau) \end{bmatrix}.$$

当 $\tau \in \left[0, \frac{2}{3}\right)$ 且 $t > \frac{k^2(1 - \tau)}{2b(3 - 2\tau)}$ 时, Hessian 矩

阵负定, 目标函数存在最优解. 求 μ_m 关于 w 和 e_1 的一阶导数, 并令其等于零, 可得:

$$\frac{\partial \mu_m}{\partial w} = -\frac{b(1-\tau)(w-c-\tau_1)}{2} -$$

$$\frac{\tau(a-ke_1-bw)}{4} = 0,$$

$$\frac{\partial \mu_m}{\partial e_1} = (1-\tau) \left\{ 2t(e_0-e_1) - \frac{kb(w-c-\tau_1)+k(a-ke_1-bw)}{2b} \right\} -$$

$$\frac{\tau k(a-ke_1-bw)}{4b} = 0.$$

联立方程得到最优的批发价格和最优的碳排放量分别为 $[w^*]_{LTT}^I = c + \tau_1 + \frac{2\tau tN}{A}$, $[e_1^*]_{LTT}^{c1} = e_0 - \frac{kN(1-\tau)}{A}$. 进而可得, $[p^*]_{LTT}^I = [w^*]_{LTT}^{c1} + \frac{2tN(1-\tau)}{A}$, $[q^*]_{LTT}^I = \frac{2tbN(1-\tau)}{A}$, $[L^*]_{LTT}^I = \frac{1}{4b} \times \left[a + \frac{b(2t\tau(a-ke_0) - (1-\tau)(c+\tau_1)(4tb-k^2))}{2tb(2-3\tau) - k^2(1-\tau)} + \frac{k(k(1-\tau)(a-bc-b\tau_1) - 2tbe_0(2-3\tau))}{2tb(2-3\tau) - k^2(1-\tau)} \right] - \overline{\pi_r}$. 其中, $A = 2tb(2-3\tau) - k^2(1-\tau)$, $N = (a-bc-b\tau_1-ke_0)$.

通过与集中式决策的最优解对比, 可得: $p_c^* = [p^*]_{LTT}^I = c + \tau_1 + \frac{2\tau tN}{A} + \frac{2tN(1-\tau)}{A}$, $e_{1c}^* = [e_1^*]_{LTT}^I = e_0 - \frac{kN(1-\tau)}{A}$, $[\pi_m^*]_{LTT}^I + [\pi_r^*]_{LTT}^I = \pi_c^* = \frac{t(1-\tau)N^2(A-2tb\tau)^2}{A^2}$.

证毕.

命题6表明, 两部定价契约 $([w^*]_{LTT}^I, [L^*]_{LTT}^I)$ 可以实现制造商承担 CER 责任和 CSR、零售商关注利润的供应链协调. 在该契约下, 供应链总利润与集中式决策时相等, 可以实现制造商与零售商“双赢”.

4.2 模型 II-LTT (制造商: CER; 零售商: CSR)

在模型 II-LTT 中, 制造商承担 CER 责任, 零售商承担 CSR 和利润. 通过两部定价契约机制对供应链进行协调, 即制造商先降低批发价格, 激励零售商购买更多的产品. 此外, 零售商向制造商支付一笔固定费用 $([L]_{LTT}^II)$ 来补偿其损失, 制造商和零售商的

决策问题为

$$\max_{w, e_1} \pi_m = (w-c-\tau_1)q - t(e_0-e_1)^2 + L, \quad (16)$$

s.t.

$$IC: q = \underset{p}{\operatorname{argmax}} \mu_r(\cdot),$$

$$IR: \pi_r(\cdot) = (p-w)q - L \geq \overline{\pi_r}, \quad (17)$$

$$\mu_r(\cdot) = (1-\tau)((p-w)q - L) + \frac{\tau q^2}{2b}. \quad (18)$$

求解式(16)–(18)问题的均衡解, 并对其进行分析, 得到命题7.

命题7 在模型 II-LTT 中, 两部定价契约 $([w^*]_{LTT}^II, [L^*]_{LTT}^II)$ 不能完美地协调制造商承担 CER 责任、零售商承担 CSR 和利润的供应链, 但是可以实现帕累托改进. 此时, 供应链的均衡决策与集中式决策下的均衡决策并不相同, 但当零售商利润等于分散式决策下利润时, 制造商利润可以得到提高.

证明 模型 II-LTT 均衡结果的计算过程与 4.1 节类似, 可得: 当 $\tau \in \left[0, \frac{2}{3}\right]$ 且 $0 < t < \frac{k^2(1-\tau)}{4b(2-3\tau)}$ 时, 最优的批发价格为 $[w^*]_{LTT}^II = c + \tau_1 + \frac{2\tau tN}{(1-\tau)(4tb-k^2)}$, 最优的碳排放量为 $[e_1^*]_{LTT}^II = e_0 - \frac{kN(1-\tau)}{(4tb-k^2)}$, 最优的零售价格为 $[p^*]_{LTT}^II = [w^*]_{LTT}^II + \frac{2tN(1-2\tau)}{(1-\tau)(4tb-k^2)}$, 最优的固定费用为 $[L^*]_{LTT}^II = \frac{1}{b(2-3\tau)^2} \left\{ (1-\tau)(1-2\tau) \left[a + \frac{(b(k^2(1-\tau)(c+\tau_1) - 2tb(2-3\tau)(c+\tau_1) - 2t\tau(a-ke_0))/4tb(1-\tau) - k^2(1-\tau)) + k(k(a-b\tau_1-bc) - 4tbe_0)}{4tb-k^2} \right] \right\} - \overline{\pi_r}$. 其中 $N = (a-bc-b\tau_1-ke_0)$.

通过与集中式决策下的对比分析得到:

1) 将模型 II-LTT 下最优产品的零售价格减去集中式决策下最优产品的零售价格, 可得 $[p^*]_{LTT}^II - p_c^* = \frac{2\tau tN(2tb-k^2)}{A(4tb-k^2)}$, 进而可得: 当 $\tau \in \left(0, \frac{1}{2}\right)$, $t \in \left(\frac{k^2(1-\tau)}{2b\tau(2-3\tau)}, \frac{k^2}{2b}\right)$ 时, $\frac{2\tau tN(2tb-k^2)}{A(4tb-k^2)} < 0$; 当 $\tau \in$

$\left(0, \frac{1}{2}\right)$, $t > \frac{k^2}{2b}$ 时, $\frac{2t\tau N(2tb - k^2)}{A(4tb - k^2)} > 0$; 当 $\tau \in \left(\frac{1}{2}, \frac{2}{3}\right)$ 时, $\frac{2t\tau N(2tb - k^2)}{A(4tb - k^2)} > 0$.

2) 将模型 II-LTT 下最优产品的碳排放量减去集中式决策下最优的碳排放量, 可得 $[e_1^*]_{LTT}^{\parallel} - e_{1c}^* = \frac{2tb\tau kN}{A(4tb - k^2)} > 0$.

3) 当零售商利润等于分散式决策下利润时, $[\pi_r^*]_{LTT}^{\parallel} = \overline{\pi_r} = [\pi_r^*]^{\parallel}$, 可得 $[\pi_m^*]_{LTT}^{\parallel} - [\pi_m^*]^{\parallel} = \frac{t[4tbN(1 - 2\tau)]^2}{(4tb - k^2)A_2^2} > 0$.

证毕.

命题 7 说明, 两部定价契约 $([w^*]_{LTT}^{\parallel}, [L^*]_{LTT}^{\parallel})$ 不能完美协调模型 II 中的低碳供应链, 但是可以实现帕累托改进. 在零售商利润保持与分散式决策时相等的基础上, 实现制造商利润的增加.

4.3 模型 III-LTT (制造商: CSR; 零售商: CER)

在模型 III-LTT 中, 制造商承担 CSR, 零售商承担 CER 责任并关注利润. 通过两部定价契约机制对供应链进行协调, 制造商和零售商的决策问题为

$$\max_w \mu_m = (1 - \tau) \{ (1 - \tau)(w - c)q + L \} + \frac{\tau q^2}{2b}, \quad (19)$$

s.t.

$$\text{IC: } q = \underset{p, e_1}{\operatorname{argmax}} \pi_r(\cdot),$$

$$\text{IR: } \pi_r(\cdot) = (p - w - \tau_1)q - t(e_0 - e_1)^2 - L \geq \overline{\pi_r}, \quad (20)$$

求解式 (19) — (20) 问题的均衡解, 并对其进行分析, 得到命题 8.

命题 8 在模型 III-LTT 中, 两部定价契约 $([w^*]_{LTT}^{\parallel}, [L^*]_{LTT}^{\parallel})$ 可以实现制造商承担 CSR、零售商承担 CER 责任并关注利润下的供应链协调. 此时, 供应链的均衡决策与集中式决策下的均衡决策相同, 供应链利润也达到最优.

证明 计算过程与 4.1 节类似, 可得, 当 $t > \frac{k^2}{4b}$ 时, 最优的批发价格为 $[w^*]_{LTT}^{\parallel} = c + \tau_1 + \frac{2\tau tN}{A}$, 最优的零售价格为 $[p^*]_{LTT}^{\parallel} = \tau_1 + [w^*]_{LTT}^{\parallel} + \frac{2tN(1 - \tau)}{A}$, 最优的碳排放量为 $[e_1^*]_{LTT}^{\parallel} = e_0 -$

$\frac{kN(1 - \tau)}{A}$, 最优的固定费用为 $[L^*]_{LTT}^{\parallel} = \frac{t}{4tb - k^2} [a - b\tau_1 - ke_0 + (b(2t\tau(a - b\tau_1 - ke_0) - c(1 - \tau)(4tb - k^2)) / 2tb(2 - 3\tau) - k^2(1 - \tau))]^2 - \overline{\pi_r}$. 其中, $A = 2tb(2 - 3\tau) - k^2(1 - \tau)$, $N = (a - bc - b\tau_1 - ke_0)$.

通过与集中式决策下的最优解进行对比分析, 得到 $p_c^* = [p^*]_{LTT}^{\parallel} = c + \tau_1 + \frac{2\tau tN}{A} + \frac{2tN(1 - \tau)}{A}$, $e_{1c}^* = [e_1^*]_{LTT}^{\parallel} = e_0 - \frac{kN(1 - \tau)}{A}$, $[\pi_m^*]_{LTT}^{\parallel} + [\pi_r^*]_{LTT}^{\parallel} = \overline{\pi_c} = \frac{t(1 - \tau)N^2(A - 2tb\tau)^2}{A^2}$.

证毕.

命题 8 表明, 两部定价契约 $([w^*]_{LTT}^{\parallel}, [L^*]_{LTT}^{\parallel})$ 可以实现制造商承担 CER 责任和 CSR、零售商关注利润下的供应链协调. 在该契约下, 供应链的总利润与集中式决策时相等, 可以实现制造商与零售商“双赢”.

4.4 模型 IV-LTT (零售商: CER+CSR)

在模型 IV-LTT 中, 零售商承担 CER 责任和 CSR, 而制造商关注利润. 通过两部定价契约机制对供应链进行协调, 制造商和零售商的决策问题为

$$\max_w \mu_m = (w - c)q + L, \quad (21)$$

s.t.

$$\text{IC: } (p, e_1) = \underset{p, e_1}{\operatorname{argmax}} \mu_r(\cdot),$$

$$\text{IR: } \pi_r(\cdot) = (p - w + \tau_1)q - t(e_0 - e_1)^2 - L \geq \overline{\pi_r}, \quad (22)$$

$$\mu_r(\cdot) = (1 - \tau) \{ (p - w + \tau_1)q - t(e_0 - e_1)^2 \} + \frac{\tau q^2}{2b}. \quad (23)$$

求解该模型的均衡解, 然后将其与集中式供应链决策的最优解进行对比分析, 得到命题 9.

命题 9 在模型 IV-LTT 中, 两部定价契约 $([w^*]_{LTT}^{\parallel}, [L^*]_{LTT}^{\parallel})$ 不能完美地协调零售商承担 CER 责任和 CSR、制造商关注利润下的供应链, 但是可以实现帕累托改进. 此时, 供应链的均衡决策与集中式决策下的均衡决策并不相同, 但当零售商利润等于分散式决策下利润时, 制造商利润可以得到提高.

马鹏,等.碳税政策下考虑三重底线的低碳供应链优化决策及协调.

证明 计算过程与 4.1 节类似,可得,当 $t > \frac{k^2}{4b}$ 时, 最优的批发价格为 $[w^*]_{LTT}^V = c + \frac{2\tau tN}{(1-\tau)(4tb-k^2)}$, 最优的零售价格为 $[p^*]_{LTT}^V = \tau_1 + [w^*]_{LTT}^V + \frac{2tN(1-2\tau)}{(1-\tau)(4tb-k^2)}$, 最优的碳排放量为 $[e_1^*]_{LTT}^V = e_0 - \frac{kN}{(4tb-k^2)}$, 最优的固定费用为 $[L^*]_{LTT}^V = \frac{t(1-\tau)(4tb(1-2\tau) - k^2(1-\tau))}{A^2} \times [a - b\tau_1 - ke_0 + (b(ck^2(1-\tau) - 2tbc(2-3\tau) - 2t\tau(a-b\tau_1 - ke_0))/4tb(1-\tau) - k^2(1-\tau))]^2 - \bar{\pi}_r$. 其中, $A = 2tb(2-3\tau) - k^2(1-\tau)$, $N = (a - bc - b\tau_1 - ke_0)$.

通过与集中式决策下的均衡解进行对比分析, 得到:

1) 将模型 IV-LTT 下产品的零售价格减去集中式决策下最优产品的零售价格, 可得 $[p^*]_{LTT}^V - p_c^* = \frac{2t\tau N(2tb-k^2)}{A(4tb-k^2)}$, 进而可得: 当 $\tau \in (0, \frac{1}{2})$, $t \in (\frac{k^2(1-\tau)}{2b\tau(2-3\tau)}, \frac{k^2}{2b})$ 时, $\frac{2t\tau N(2tb-k^2)}{A(4tb-k^2)} < 0$; 当 $\tau \in (0, \frac{1}{2})$, $t > \frac{k^2}{2b}$ 时, $\frac{2t\tau N(2tb-k^2)}{A(4tb-k^2)} > 0$; 当 $\tau \in (\frac{1}{2}, \frac{2}{3})$ 时, $\frac{2t\tau N(2tb-k^2)}{A(4tb-k^2)} > 0$.

2) 将模型 IV-LTT 下产品的最优碳排放量减去集中式决策下最优的碳排放量, 可得 $[e_1^*]_{LTT}^V - e_{1c}^* = \frac{2tb\tau kN}{A(4tb-k^2)} > 0$.

3) 当零售商利润等于分散式决策下利润时, $[\pi_r^*]_{LTT}^V = \bar{\pi}_r = [\pi_r^*]^V$, 可得 $[\pi_m^*]_{LTT}^V - [\pi_m^*]^V = \frac{t[N(A-2tb\tau)]^2}{4(4tb-k^2)A^2} > 0$.

证毕.

命题 9 说明, 两部定价契约 ($[w^*]_{LTT}^V, [L^*]_{LTT}^V$) 不能完美协调模型 IV-LTT 中的低碳供应链, 但是可以实现帕累托改进. 在零售商利润保持在与分散式决策相等的保留利润的基础上, 实现制造商利润的增加.

5 数值分析

该部分通过数值案例对以上模型进行进一步的分析. 首先, 分析碳税对契约协调前后供应链总利润的影响. 其次, 分析碳减排系数对契约协调前后供应链总利润的影响. 结果可为低碳企业的减排策略和契约选择提供了可靠的理论依据.

5.1 碳税对供应链总利润的影响

假设 $a = 150, b = 50, k = 60, e_0 = 5, c = 5, t = 1500$ 以及 $\tau = 0.25^{[30]}$, 分析碳税对两部定价契约协调前后供应链总利润的影响. 图 1 描述了五种情形下碳税对供应链总利润的影响. 首先, 供应链总利润随碳税增加而减少. 其次, 集中式决策时供应链的利润最高. 供应链在模型 IV 中的总利润比在其他分散式模型中的供应链总利润高. 供应链在模型 I 中的总利润最低. 最后, 制造商承担 CSR 时供应链总利润低于零售商承担 CSR 时的供应链总利润. 对于供应链而言, 由零售商承担 CSR 是更好的选择.

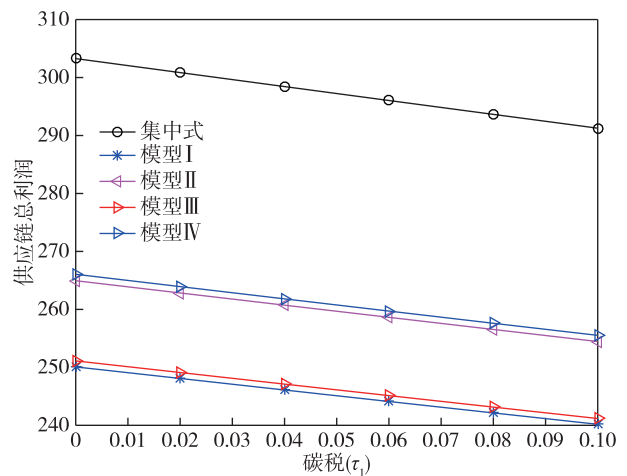


图 1 碳税对供应链总利润的影响

Fig. 1 Impact of carbon tax on total profit of supply chains

图 2 描述了碳税对两部定价契约协调之后供应链总利润的影响. 首先供应链总利润随着碳税的增加而减少. 其次, 由 3.1 节和 3.3 节可知, 供应链在模型 I-LTT 和模型 III-LTT 中的总利润与集中式供应链总利润相等. 但供应链在模型 II-LTT 和模型 IV-LTT 中的总利润高于集中式供应链的总利润. 因为供应链在集中式决策时考虑了 CSR, 目标函数不仅包括利润还包括 CSR, 即基于效用最大化进行决策. 对于供应链而言, 两部定价契约可以缓解分散式决策时的双重边际化现象, 实现供应链的帕累托改进,

提高供应链总利润.从图 2 可以看出:在模型 I-LTT 和模型 III-LTT 中,两部定价契约协调后供应链的总利润最高,从而为低碳企业运营决策提供参考.

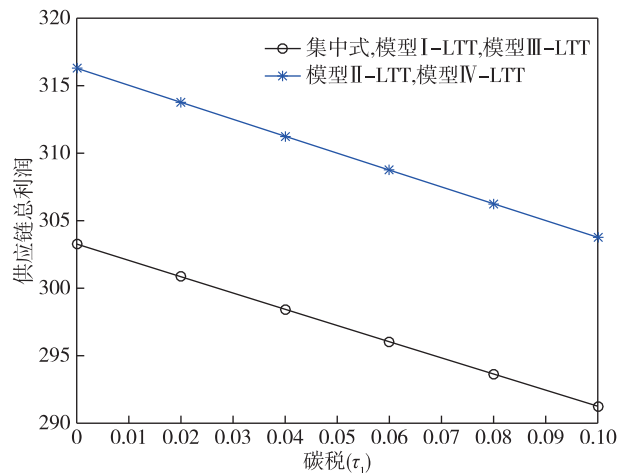


图 2 碳税对协调后供应链总利润的影响
Fig. 2 Impact of carbon tax on total profit of coordinated supply chains

5.2 碳减排投资系数对供应链总利润的影响

令 $\alpha = 150, b = 50, k = 60, e_0 = 5, c = 5, \tau_1 = 3$ 以及 $\tau = 0.25$, 研究碳减排投资系数对协调前后供应链总利润的影响^[30].图 3 描述了五种情形下碳减排投资系数对供应链总利润的影响.首先,碳减排技术投资系数越大,投资程度越高,投资成本也越高,供应链总利润随碳减排投资系数增加而减少,并且五种情形有相同的减缓趋势.其次,供应链在集中式决策时所获利润最高.供应链在模型 IV 中的总利润比在其他分散式模型中所得的总利润高.供应链在模型 I 中的总利润最低.当碳减排投资程度较低时,投资成本较低,供应链在模型 III 的总利润高于模型 II 的总利润.此外,供应链在模型 II 中的总利润高于在模型 III 中的总利润.最后,供应链在制造商承担 CSR (模型 I 和模型 III) 时的总利润低于零售商承担 CSR (模型 II 和模型 IV) 时的总利润.对于供应链而言,由零售商承担 CSR 是更好的选择,当碳减排技术投资系数较高时,制造商承担 CER 责任是更好的选择.

图 4 描述了碳减排技术投资系数对两部定价契约协调后供应链总利润的影响.首先供应链总利润随碳减排技术投资系数增加而减少.其次,由 3.1 节和 3.3 节可知,供应链在模型 I-LTT 和模型 III-LTT 中的总利润与集中式供应链的总利润相等.但供应链在模型 II-LTT 和模型 IV-LTT 中的总利润高于集中式供应链的总利润.对于供应链而言,两部定价契

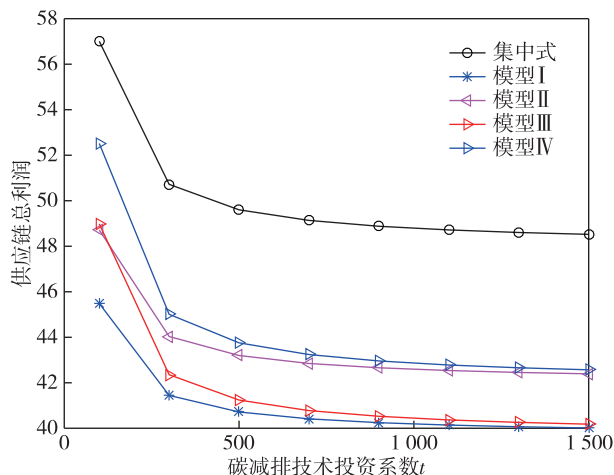


图 3 碳减排技术投资系数对供应链总利润的影响
Fig. 3 Impact of CER investment coefficient on total profit of supply chains

约可以缓解分散式决策时的双重边际化现象,实现供应链的帕累托改进,提高供应链总利润.从图 4 可以看出:在模型 I-LTT 和模型 III-LTT 中,两部定价契约协调后供应链的总利润最高,可以为低碳企业运营决策提供参考.

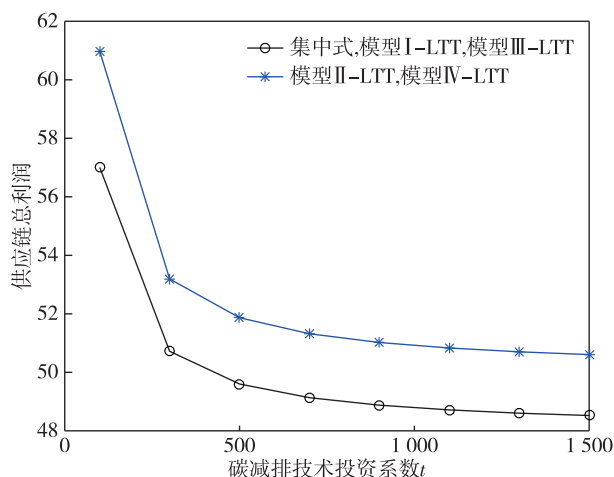


图 4 碳减排技术投资系数对协调后供应链总利润的影响
Fig. 4 Impact of CER investment coefficient on total profit of coordinated supply chains

6 结语

本文研究了碳税政策下基于三重底线的二级低碳供应链的优化与协调问题.首先研究集中式供应链中考虑三重底线的决策问题,其次考虑了批发价格契约下四种不同的分散式供应链模型(模型 I、模型 II、模型 III 和模型 IV),得到了集中式决策和批发

价格契约下分散式供应链模型的最优定价决策与最优减排决策。

为了缓解分散式决策的双重边际现象,本文设计了两部定价契约对不同模型的分散式供应链进行协调,即制造商先降低批发价格、激励零售商购买更多的产品,构建了相应的四种协调模型,即模型 I-LTT、模型 II-LTT、模型 III-LTT 和模型 IV-LTT。此外,为了补偿制造商的损失,零售商需要向制造商支付一笔固定费用。通过对两部定价契约的研究发现:在模型 I-LTT 中,两部定价契约可以实现制造商承担 CER 责任和 CSR、零售商关注利润下的供应链协调;在模型 III-LTT 中,两部定价契约可以实现制造商承担 CSR、零售商承担 CER 责任并关注利润下的供应链协调;在模型 II-LTT 和模型 IV-LTT 中,两部定价契约不能实现供应链的完美协调,但是可以实现帕累托改进,提高制造商的利润,进而提高供应链利润。所以,通过两部定价契约可以实现制造商和零售商的“双赢”。

综合来看,本文对碳税政策下基于三重底线的低碳供应链的决策与优化进行了初步探讨。此外还有一些不足之处:首先,本文未考虑需求不确定的情况,未来可以研究随机需求或供应链成员在信息不对称条件下的决策问题;其次,不同渠道权力结构下基于三重底线的低碳供应链优化也值得进行探讨。

参考文献

References

- [1] 柏庆国,徐贤浩.碳排放政策下二级易变质产品供应链的联合订购策略[J].管理工程学报,2018,32(4):167-177
BAI Qingguo, XU Xianhao. Joint order policy for a two-echelon supply chain with deteriorating items under carbon emission regulations[J]. Journal of Industrial Engineering and Engineering Management, 2018, 32(4):167-177
- [2] 许舒婷,缪朝炜,檀哲,等.碳税制度下企业产品升级及信息披露策略研究[J].管理工程学报,2020,34(2):224-230
XU Shuting, MIAO Zhaowei, TAN Zhe, et al. Product upgrading and information disclosure decisions in the context of carbon tax [J]. Journal of Industrial Engineering and Engineering Management, 2020, 34(2):224-230
- [3] 杨惠霄,欧锦文.收入共享与谈判权力对供应链碳减排决策的影响[J].系统工程理论与实践,2020,40(9):2379-2390
YANG Huixiao, OU Jinwen. The effect of revenue sharing and bargaining power on carbon emission reduction in a supply chain [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2020, 40(9):2379-2390
- [4] 黄帝,张菊亮.不同权力结构下碳税对供应链减排水平的影响[J].中国管理科学,2021,29(7):57-70
HUANG Di, ZHANG Juliang. The impacts of carbon tax on emissions abatement level in a supply chain under different power structures [J]. Chinese Journal of Management Science, 2021, 29(7):57-70
- [5] 曹裕,周默亭,胡韩莉.考虑政府补贴与企业社会责任的两级供应链优化[J].中国管理科学,2020,28(5):101-111
CAO Yu, ZHOU Moting, HU Hanli. Secondary supply chain optimization with social responsibility sensitive consumption under government subsidy [J]. Chinese Journal of Management Science, 2020, 28(5):101-111
- [6] 陈剑.低碳供应链管理研究[J].系统管理学报,2012,21(6):721-728,735
CHEN Jian. Study on supply chain management in a low-carbon era [J]. Journal of Systems & Management, 2012, 21(6):721-728,735
- [7] Du S F, Zhu L L, Liang L, et al. Emission-dependent supply chain and environment-policy-making in the 'cap-and-trade' system [J]. Energy Policy, 2013, 57:61-67
- [8] 夏良杰,白永万,秦娟娟,等.碳交易规制下信息不对称供应链的减排和低碳推广博弈研究[J].运筹与管理,2018,27(6):37-45
XIA Liangjie, BAI Yongwan, QIN Juanjuan, et al. Supply chain's emission reduction and lowcarbon promotion policies in cap-and-trade system: the view of information asymmetry [J]. Operations Research and Management Science, 2018, 27(6):37-45
- [9] Wesseh P K J, Lin B Q. Optimal carbon taxes for China and implications for power generation, welfare, and the environment [J]. Energy Policy, 2018, 118:1-8
- [10] 夏良杰,柳慧,张萌,等.强制减排规制下基于碳减排利润增量分享契约的供应链协调研究[J].运筹与管理,2019,28(5):92-98,107
XIA Liangjie, LIU Hui, ZHANG Meng, et al. Supply chain coordination based on incremental profit sharing contract of carbon emission reduction under mandatory carbon emissions capacity scheme [J]. Operations Research and Management Science, 2019, 28(5):92-98,107
- [11] 李新军,陈美娜,达庆利.碳交易视角下政府管制的汽车制造企业闭环供应链优化决策[J].管理评论,2020,32(5):269-279
LI Xinjun, CHEN Meina, DA Qingli. Optimization decision of government-driving closed-loop supply chain for automobile manufacturers from the perspective of carbon trading [J]. Management Review, 2020, 32(5):269-279
- [12] 王君,程先学,蒋雨珊,等.碳税政策下考虑参考碳排放的供应链成员行为选择研究[J].中国管理科学,2021,29(7):128-138
WANG Jun, CHENG Xianxue, JIANG Yushan, et al. Behavior selection of supply chain members considering reference carbon emission under carbon tax policy [J]. Chinese Journal of Management Science, 2021, 29(7):128-138

- [13] 张福安, 李娜, 达庆利, 等. 基于两种补贴政策的多元需求闭环供应链低碳减排研究[J]. 中国管理科学, 2023, 31(10): 116-127
ZHANG Fuan, LI Na, DA Qingli, et al. Research on low-carbon emission reduction in a closed-loop supply chain with multiple demands under two subsidy policies [J]. Chinese Journal of Management Science, 2023, 31(10): 116-127
- [14] 方国昌, 何宇, 田立新. 碳交易驱动下的政企碳减排演化博弈分析[J]. 中国管理科学, 2024(5): 196-206
FANG Guochang, HE Yu, TIAN Lixin. Evolutionary game analysis of government and enterprises carbon-reduction under the driven of carbon trading [J]. Chinese Journal Management Science, 2024(5): 196-206
- [15] Elkington J. Partnerships from cannibals with forks: the triple bottom line of 21st-century business [J]. Environmental Quality Management, 1998, 8(1): 37-51
- [16] Gimenez C, Sierra V, Rodon J. Sustainable operations: their impact on the triple bottom line [J]. International Journal of Production Economics, 2012, 140(1): 149-159
- [17] Bergenwall A L, Chen C, White R E. TPS's process design in American automotive plants and its effects on the triple bottom line and sustainability [J]. International Journal of Production Economics, 2012, 140(1): 374-384
- [18] Lai K H, Wu S J, Wong C W Y. Did reverse logistics practices hit the triple bottom line of Chinese manufacturers? [J]. International Journal of Production Economics, 2013, 146(1): 106-117
- [19] Devika K, Jafarian A, Nourbakhsh V. Designing a sustainable closed-loop supply chain network based on triple bottom line approach: a comparison of metaheuristics hybridization techniques [J]. European Journal of Operational Research, 2014, 235(3): 594-615
- [20] Sarkis J, Dhavale D G. Supplier selection for sustainable operations: a triple-bottom-line approach using a Bayesian framework [J]. International Journal of Production Economics, 2015, 166: 177-191
- [21] Martins C L, Melo M T, Pato M V. Redesigning a food bank supply chain network in a triple bottom line context [J]. International Journal of Production Economics, 2019, 214: 234-247
- [22] Biswas I, Raj A, Srivastava S K. Supply chain channel coordination with triple bottom line approach [J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2018, 115: 213-226
- [23] 林志炳, 鲍蕾. 企业社会责任对供应链减排决策及政府补贴效率的影响研究[J]. 中国管理科学, 2021, 29(11): 111-121
LIN Zhibing, BAO Lei. Research about the effects of CSR on supply chain emission reduction decision-making and government subsidy efficiency [J]. Chinese Journal of Management Science, 2021, 29(11): 111-121
- [24] Cachon G P. Supply chain coordination with contracts [M]//Supply Chain Management: Design, Coordination and Operation. Amsterdam: Elsevier, 2003: 227-339
- [25] 代建生. 风险规避供应链的最优两部定价契约[J]. 系统工程学报, 2016, 31(1): 66-77
DAI Jiansheng. Optimal two-part pricing contract of a risk-averse supply chain [J]. Journal of Systems Engineering, 2016, 31(1): 66-77
- [26] 石岩然, 肖条军. 一类零售商驱动型供应链契约问题 [J]. 系统工程学报, 2009, 24(6): 680-687
SHI Kuiran, XIAO Tiaojun. Contract problem of the supply chain driven by retailer [J]. Journal of Systems Engineering, 2009, 24(6): 680-687
- [27] Lau A H L, Lau H S, Zhou Y W. Considering asymmetrical manufacturing cost information in a two-echelon system that uses price-only contracts [J]. IIE Transactions, 2006, 38(3): 253-271
- [28] 赵海霞, 艾兴政, 马建华, 等. 风险规避型零售商的链与链竞争两部定价合同 [J]. 系统工程学报, 2013, 28(3): 377-386
ZHAO Haixia, AI Xingzheng, MA Jianhua, et al. Two-part tariffs contract under chain-to-chain competition with risk-averse retailers [J]. Journal of Systems Engineering, 2013, 28(3): 377-386
- [29] Yalabik B, Fairchild R J. Customer, regulatory, and competitive pressure as drivers of environmental innovation [J]. International Journal of Production Economics, 2011, 131(2): 519-527
- [30] Choudhary A, Suman R, Dixit V, et al. An optimization model for a monopolistic firm serving an environmentally conscious market: use of chemical reaction optimization algorithm [J]. International Journal of Production Economics, 2015, 164: 409-420
- [31] Luo Z, Chen X, Wang X J. The role of co-opetition in low carbon manufacturing [J]. European Journal of Operational Research, 2016, 253(2): 392-403

Optimal decision and coordination of low-carbon supply chains considering triple bottom line under carbon tax policy

MA Peng¹ LU Yujia¹

¹ School of Management Science and Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China

Abstract In this article, we investigate the optimization and coordination of the low-carbon supply chain considering triple bottom line under carbon tax policy. First, we examine the decisions of centralized supply chain considering the triple bottom line. Second, we consider four decentralized supply chain models under wholesale price contract, i.

e., Model I, Model II, Model III, and Model IV. Then we study the four models under two-part tariff contracts, i.e., Model I-LTT, Model II-LTT, Model III-LTT, and Model IV-LTT. The results show that the two-part tariff contracts can perfectly coordinate the low-carbon supply chain in Model I-LTT and Model III-LTT, while realize Pareto improvement of the low-carbon supply chain in Model II-LTT and Model IV-LTT. Finally, numerical analysis is conducted to assess the impact of carbon tax and Carbon Emission Reduction (CER) investment coefficient on total profit of supply chain before and after coordination. This study provides reliable theoretical basis for low-carbon enterprises in selecting appropriate CER strategies and contracts.

Key words low-carbon supply chain; carbon tax policy; corporate social responsibility (CSR); carbon emission reduction (CER); triple bottom line; two-part tariff contracts; coordination