

控制与决策

Control and Decision

考虑碳配额和交易的排放依赖型供应链低碳化运营决策

李友东, 谢鑫鹏, 王锋正, 王景峰

引用本文:

李友东, 谢鑫鹏, 王锋正, 等. 考虑碳配额和交易的排放依赖型供应链低碳化运营决策[J]. *控制与决策*, 2020, 35(9): 2236–2244.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0166>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于碳排放限额和低碳销售努力的博弈模型分析及控制

Analysis and control of game model based on carbon emission quota and low carbon sales efforts

控制与决策. 2020, 35(2): 357–366 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.0722>

三级低碳供应链联合减排及宣传促销微分博弈研究

Differential game models for joint carbon emission reduction and promotion in three-echelon low carbon supply chain

控制与决策. 2019, 34(8): 1776–1788 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2017.1752>

基于碳配额政策的两级低碳供应链博弈与优化

Game and optimization of a two-level low-carbon supply chain under the carbon quota policy

控制与决策. 2016, 31(5): 924–928 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2015.0372>

限额与交易下考虑战略顾客行为的供应链决策与协调

Supply chain decisions and coordination with strategic customer behavior under cap-and-trade policy

控制与决策. 2016(3): 477–485 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2014.1909>

面向网购的低碳供应链设计模型及其应用分析

Low-carbon supply chain design model and its application analysis based on online shopping

控制与决策. 2015(4): 655–662 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2014.0136>

考虑碳配额和交易的排放依赖型供应链低碳化运营决策

李友东^{1†}, 谢鑫鹏², 王锋正³, 王景峰¹

(1. 内蒙古财经大学 工商管理学院, 呼和浩特 010070; 2. 中国人民解放军陆军军事交通学院 投送装备保障系, 天津 300161; 3. 内蒙古大学 经济管理学院, 呼和浩特 010021)

摘要: 考虑由排放依赖型产品制造商和碳排放权供应商组成的排放依赖型供应链系统, 该系统不仅受产品碳排放的限制和政府碳排放规则的管制, 还要充分考虑供应商关于碳排放权价格的影响. 通过建立零供两主体的 Stackelberg 博弈模型, 得出它们互为反应函数的 Nash 均衡解. 在此基础上, 讨论并分析产品碳排放量及政府碳排放约束对最优解及最优利润的影响关系. 结果表明: 单位产品碳排放量和政府的碳排放限额对两主体利润的影响是呈反向关系; 零供两主体在充分考虑生产单位易逝品时所产生的碳排放量与政府的碳排放管制下, 仍然有可以提高自身的利润空间. 排放依赖型产品制造商应该有效地治理产品的碳排放量, 政府也应该合理地制定碳排放上限值, 以使得零供两主体的效用增量和达到最优. 最后, 选取合理数据用实例仿真方法验证所给出模型和策略的有效性.

关键词: 碳配额; 政府碳排放管制; 碳排放交易; 排放依赖; 广义递增失效率; 利润分享比例

中图分类号: F274.8

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2019.0166

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



引用格式: 李友东, 谢鑫鹏, 王锋正, 等. 考虑碳配额和交易的排放依赖型供应链低碳化运营决策[J]. 控制与决策, 2020, 35(9): 2236-2244.

Emission-dependent supply chain low-carbonization based behavior of enterprise operation decision under cap-and-trade environment

LI You-dong^{1†}, XIE Xin-peng², WANG Feng-zheng³, WANG Jing-feng¹

(1. School of Business Administration, Inner Mongolia University of Finance and Economics, Hohhot 010070, China; 2. Department of Military Automobile, Military Traffic Institute of PLA, Tianjin 300161, China; 3. School of Economics and Management, Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China)

Abstract: The paper considers an emission-dependent supply chain consisting of one single emission dependent manufacturer and one single emission permit supplier in the government's 'cap-and-trade' regulation. The system will not only be influenced by product carbon footprint and government carbon emissions caps, but also affected by the carbon price decision of the upstream supplier. By the establishment of the two agents Stackelberg game model, their mutual reflecting Nash equilibrium solution can be obtained. On this basis, we discuss and analyze the relationships between product carbon emission, government's 'cap-and-trade' regulation and optimal solution. The results show that the impact of unit product's carbon emission and the government's 'cap-and-trade' regulation on two agents' profit is inversed. Product's carbon emissions and government's carbon regulation can both provide an improvement space for the two agents to get more profits. Manufacturers should effectively control product's carbon emissions, and governments should reasonably determine carbon emissions cap. Only in this way can make the increment of the two agents' utility optimal. At last, a numerical experiment is given to prove the validity of the developed models and policy by selecting reasonable data.

Keywords: carbon emission quota; government regulation of carbon emission; carbon permit trade; emission-dependent; generalized increasing failure rate; profit sharing rate

收稿日期: 2019-02-14; 修回日期: 2019-05-07.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0506703); 国家自然科学基金地区项目(71563033); 教育部创新团队发展计划项目(IRT1258); 教育部人文社会科学研究一般项目(18YJC630179); 内蒙古自然科学基金项目(2018MS07016).

责任编辑: 李勇建.

[†]通讯作者. E-mail: nmglyd@163.com.

0 引言

2009年,联合国气候变化大会通过的《哥本哈根协议》中确立针对全球气候变化“共同但有区别的责任”的原则,同时各国也做出了减排承诺。自然地,各个国家会将减排承诺最终落实到各运作实体,以生产电子类(如电脑、手机等)易逝品的生产制造企业同样面临着减排的压力。在“限额与交易”(cap-and-trade)制度体系下,碳排放权已经成为一种可交易的生产要素,这种要素的出现将影响到企业生产运营的各个环节,成为供应链低碳化运营决策的重要关切点,随之也产生了专门为排放依赖型产品制造商提供所需碳配额的新的企业类型——碳排放权供应商^[1]。在现实经济环境中,碳排放权供应商主要有以下几种表现形式:

1) 碳汇。从事森林碳汇、草原碳汇的组织或企业,为排放依赖型企业提供产品碳排放权,从而实现企业的排放抵消。

2) 清洁发展机制(CDM)。发达国家企业和发展中国家企业通过该形式实现碳排放资源的优化配置。例如,山东东岳集团向新日制铁株式会社、三菱商事株式会社转让CDM项目产生的温室气体排放量,转让期7年,转让价格每吨不低于6.5美元。经过高效运行,取得良好的经济效益和社会效益,仅此项目一年产生的外汇就达1亿美元^[2]。

3) 引入“企业环境污染第三方治理”。企业环境污染第三方治理是指排污企业与专业环境服务公司签订合同协议,通过付费购买污染减排服务,以实现达标排放的目的。

可见,排放依赖型制造商碳排放超出限额部分需通过排放权交易向排放权供应商或绿色组织(如造林组织、环境保护组织)购买额外排放权;而排放权供应商通过运营优化、采用环保技术等手段得到的排放权盈余可通过碳排放权交易平台出售从而获得额外的收益。这便形成了含有排放权供应商的新型供应链形式——排放依赖型供应链^[3]。在这种背景下,企业管理者开始认识到,要想提高本公司在低碳环境下的竞争优势,就要综合考虑如何减少碳排放量和在碳排放权交易中如何获利的管理策略。

本文关注“限额与交易”制度体系下的供应链低碳化运营决策行为的研究,仅对碳交易和排放依赖型供应链等角度回顾相关文献。

碳排放权交易的思想源于科斯认为的要使外部成本内部化就要通过市场交易的方式^[4]。目前,碳交易体系已经成为一种非常有效的治理未来气候变化问题的策略^[5]。排放依赖型企业在碳减排中采取的措施主要针对自身排放减少的角度考虑,如采用新技术、改进工艺以及启动节能项目等,而较少关注通过

供应链合作减排的问题。Benjaafar等^[6]认为通过供应链企业间的协调运营优化可能会带来更为显著的减排效果。

对于供应链企业生产及减排决策方面的研究,主要集中在供应链结构对供应链减排决策的影响^[7]、不同政策(强制性减排、碳税)下企业减排决策问题^[8-9]、产品组合优化问题^[10]以及碳交易对企业生产决策的影响^[11]等。以上文献的研究并没有考虑在排放约束下供应链的最优决策及利润分配问题。李友东等^[12]研究了低碳供应链环境下的企业减排决策行为,比较了分担减排投资成本契约和分享减排所增利润契约对供应链低碳化运营决策的影响。目前,针对排放依赖型供应链的研究较少,一些文献在“限额与交易”制度下分析了企业及供应链低碳化运营决策行为,其中最为相关的主要是Cao等^[13]近几年在该领域的研究。Cao等考虑了由供应商和排放依赖型制造商组成的供应链系统,研究了在限额与交易制度下,碳减排投资的存在对融资模式及排放依赖型供应链运营优化决策的影响。汤春华等^[14]研究了碳配额信息不对称下排放依赖型供应链契约问题,利用委托代理模型分析比较了对称与不对称信息下排放依赖型供应链企业的运营决策和收益等。也有一些学者将易逝品作为对象,研究了低碳供应链环境下的减排和生产运营决策问题^[15]。Zhang等^[16]基于随机需求模型建立了企业依赖碳排放权交易机制下的生产与存储的优化决策模型,但并没有对政府的排放规制及产品自身碳排放量会如何影响制造企业的生产决策进行详细分析。Du等^[17]在考虑存在碳排放权交易的情况下,基于报童模型分析了排放依赖型供应链双方的博弈过程,但是对于政府的排放规制分析,特别是单位产品的碳排放量如何影响最优决策和利润等问题并没有分析。

通过文献梳理可以看出,关于考虑碳配额和交易的供应链契约设计问题已经成为供应链的研究热点之一,但鲜有文献利用报童模型和博弈论方法在“限额与交易”体系中针对低碳供应链尤其是考虑碳排放权供应商和排放依赖型产品制造商之间的低碳运营决策进行研究。本文在已有文献的基础上,研究考虑上下游企业如何在政府碳排放规制下进行最优决策问题,深入讨论政府排放规制及产品排放量对供应链各主体利润的影响以及供应链的利润分配问题。

1 问题描述与模型假设

借鉴报童模型,本文构建在政府环境规制下由单个排放依赖型产品制造商(以下简称“制造商”)和单

个排放权供应商(以下简称“供应商”)所组成的排放依赖型供应链系统.在“限额与交易”制度下,政府要对制造商制造产品过程中的碳排放量进行规制并给定了产品碳排放的上限值,本文通过政府期初免费发放给企业一定数量的碳排放配额作为规制的上限,如果制造商的碳排放上限不能满足当期生产的排放量,则必须通过碳排放权交易市场从供应商处购买其所需的碳配额.该模型假设如下:

1) 制造商生产易逝品且具有易消耗的性质,该产品的需求具有随机性.

2) 制造商所生产的产品及供应商所供给的碳配额均具有单周期性(残值为零),且周期末产品无库存成本和缺货成本^[3,15].

3) 假设政府具有严厉的环境规制,迫使企业在不能满足排放要求时必须从碳排放权交易市场购买不足的碳配额,且供应商可完全满足制造商所需的碳配额数.

4) 制造商单位产品的碳排放量为 e ,其单个周期的总排放量与总产量是线性关系且满足总碳排放量 e_t 与产量 q 线性相关,即 $e_t(q) = eq$.政府配额上限为 \bar{e} ,若当期制造商的碳排放总量超过政府配额要求的上限,则需要在碳排放权交易市场上以排放权价格 p_e 从供应商处购买超量的碳配额 e_s ,即

$$e_s = (eq - \bar{e})^+. \quad (1)$$

5) 供应链双方具有完全理性且信息完备,制造商单位产品的成本 c_m 及产品市场价格 p 均为常量.制造商会根据销售季节内产品的市场需求决策产品产量 q ,市场对产品的需求 Q 为随机变量,其分布函数为 $F(\cdot)$,概率密度函数为 $f(\cdot)$.

文中使用的主要符号说明见表1.

表1 主要符号说明

符号	含义
q	制造商的产量,制造商的决策变量
p_e	碳排放权价格,供应商的决策变量
e	制造商生产单位产品的碳排放量
$e_t(q)$	制造商碳排放总量
\bar{e}	政府要对制造商产生限制其碳排放上限
e_s	制造商需要从供应商处购买所需的碳配额量
c_m	制造商单位产品的生产成本
c_s	供应商向市场提供单位配额的运营成本
p, Q	分别表示产品的市场价格和需求
x	阶段的随机需求量
$F(\cdot), f(\cdot)$	产品市场需求 Q 的分布函数和概率密度函数
$R(x), h(x)$	分别为可靠度函数和失效率函数,其中 $R(x) = 1 - F(x), h(x) = f(x)/[1 - F(x)]$
π_i, σ_i	分别表示制造商、供应商及供应链的利润和边际利润函数,其中 $i = m, s, sc$
$\lambda_{x,y}$	任意两个量 x, y 之间的相关系数

$$记 A = F^{-1}((p - c_m - ep_e)/p), B = F^{-1}((p - c_m)/p).$$

2 排放依赖型供应链生产决策模型

在报童模型背景下,考虑排放依赖型供应链中两个主体的最优决策问题,供应商向制造商出售“碳排放权”.首先建立两主体相互博弈的经济模型,然后根据追求利润最大化原则分别对制造商的最优产量及供应商的最优碳排放权价格进行求解.由于制造商要根据供应商的碳排放权价格决策自己的产量,其决策过程为供应商首先对碳排放权价格 p_e 作决策,随后制造商再根据碳排放权价格及政府规定的碳排放上限 \bar{e} 对产品产量 q 作决策的Stackelberg博弈.

2.1 制造商利润函数

随机需求条件下, $v(q)$ 为产品期望销量.制造商的利润函数在考虑碳交易成本后可得

$$\pi_m(q) = p\left(q - \int_0^q F(x)dx\right) - c_mq - p_e e_s. \quad (2)$$

考虑到产量 q 的取值范围,制造商利润函数为

$$\pi_m(q) = \begin{cases} p\left[q - \int_0^q F(x)dx\right] - c_mq, & q < \bar{e}/e; \\ p\left[q - \int_0^q F(x)dx\right] - c_mq - p_e(eq - \bar{e}), & q \geq \bar{e}/e. \end{cases} \quad (3)$$

由式(3)可知, $\partial^2\pi_m(q)/\partial q^2 = -pf(q) < 0$,因此 q 在所有区间范围内均存在唯一的最优产量 q^* 使得制造商的利润 $\pi_m(q)$ 达到极大值.

情况1 若 $q \leq \bar{e}/e$,则最优产量 q^* 取值可能是边界值0或 \bar{e}/e ,也可能是使 $\partial\pi_m(q)/\partial q = 0$ 的值.当 $q > 0$ 时, $\lim_{q \rightarrow 0^+} \partial\pi_m(q)/\partial q = p - c_m > 0$,表明当产量 q 足够小时, $\pi_m(q)$ 对 q 是单调递增的,故当 $q = 0$ 时, $\pi_m(q)$ 不是最优值.当 $q \leq \bar{e}/e$ 时,可以计算最优产量值为 $q^* = \min[B, \bar{e}/e]$,制造商利润在该点达到最大化.

情况2 若 $q \geq \bar{e}/e$,则最优产量 q^* 或由 $\partial\pi_m(q)/\partial q = 0$ 确定,或等于下边界值 \bar{e}/e ,此时可以计算最优产量值为 $q^* = \max[\bar{e}/e, A]$.

由以上两种情形的分析可知 $A < B$,那么当 $\bar{e} < eA$ 时,必然有 $\bar{e} < eB$.进而可知,当 $q \geq \bar{e}/e$ 时, $q^* = A$ 是该区间的局部最优值.同理,当 $q \leq \bar{e}/e$ 时, $q^* = B$ 是该区间的局部最优值;而当 $eA \leq \bar{e}/e \leq eB$ 时,由情况1和情况2易得 $q^* = \bar{e}/e$.通过以上分析,可得

$$\pi_m(q) = \begin{cases} q^* = A, & \bar{e} < eA; \\ q^* = \bar{e}/e, & eA \leq \bar{e} \leq eB; \\ q^* = B, & \bar{e} > eB. \end{cases} \quad (4)$$

为使利润最大,制造商要从供应商处购买不足的碳配额.若 $\bar{e} < eA$,则购买量为 $e_s = eA - \bar{e}$;若 $eA \leq \bar{e} \leq eB$,则 $e_s = 0$,表明政府给制造商所规定的碳排放上限刚好能满足使利润最大的产量的需要;若 $\bar{e} > eB$,则 $e_s = 0$,即政府规定的企业碳配额上限已超出最优生产所需的排放需求,此时不必向碳配额供应商购买碳配额.

2.2 供应商利润函数

供应商通过为制造商提供碳配额来获得收益,其利润函数表示为

$$\pi_s(p_e) = (p_e - c_s)(eq - \bar{e})^+. \quad (5)$$

当政府规制限额 \bar{e} 为固定值且 $e_s = eA - \bar{e} < 0$ 时,制造商会重新考虑其生产决策,因为此时碳排放权价格 p_e 过高,供应商将无法获利.只有最优碳排放权价格满足 $p_e^* \in (c_s, [p(1 - F(\bar{e}/e)) - c_m]/e)$ 的条件才能保证 $\bar{e} < eA$,从而保证制造商会有从碳交易市场购买碳配额的动机,供应商才有机会获利.

3 模型求解及分析

3.1 最优策略求解

当政府规定的碳排放上限不能满足制造商的生产需要时,由 $q^* = A$ 可以看出:由于 $F(\cdot)$ 为单调递增函数且 $\partial q^*/\partial p_e < 0$,可以得出结论:碳排放权价格 p_e 越高,制造商的最优产量 q^* 越少,二者呈反向关系.将最优产量代入排放权供应商的利润函数中,并关于 p_e 求二阶偏导数,有

$$\frac{\partial^2 \pi_s(p_e)}{\partial p_e^2} = \frac{-e^2}{pf(q^*)} \left[2 + \frac{e(p_e - c_s)f'(q^*)}{pf^2(q^*)} \right]. \quad (6)$$

对于失效率函数 $h(x)$,满足条件 $h'(x) = [f'(x)(1 - F(x)) + f^2(x)]/[1 - F(x)]^2 > 0$ 时,表明 $h(x)$ 有递增性,称其为广义增长失效率函数^[18-19],有

$$\frac{(p_e - c_s)ef'(q^*)}{pf^2(q^*)} \geq \frac{-e(p_e - c_s)}{c_m + ep_e} > -1,$$

故 $\partial^2 \pi_s(p_e)/\partial p_e^2 < 0$,可知存在 p_e^* 使得供应商利润 $\pi_s(p_e)$ 达到最优.令 $\partial \pi_s(p_e)/\partial p_e = 0$,可得最优碳排放权价格为

$$p_e^* = (eq^* - \bar{e})pf(q^*)/e^2 + c_s. \quad (7)$$

考虑到 $\frac{\partial \pi_s(p_e)}{\partial p_e}$ 在边界值满足 $\frac{\partial \pi_s(p_e)}{\partial p_e} \Big|_{p_e=c_s} > 0$ 且 $\frac{\partial \pi_s(p_e)}{\partial p_e} \Big|_{p_e=\frac{p[1-F^{-1}(\bar{e}/e)]-c_m}{e}} < 0$,因此式(7)为供应商的最优碳排放权价格,此时 $e_s^* = eA - \bar{e}$. 供应商(制造商)为了获得最大收益,需要考虑自身及制造商(供应商)的最优策略,因此任何一方都不会单方面偏离最优策略,故所求的最优值 (p_e^*, q^*) 是 Stackelberg 博弈

下唯一的 Nash 均衡解,从而 (p_e^*, q^*) 也就成为供应链唯一的 Nash 均衡点.此时双方的最优利润分别为

$$\pi_m^*(q^*) = pv(q^*) - c_m q^* - p_e^*(eq^* - \bar{e}), \quad (8)$$

$$\pi_s(p_e^*) = (p_e^* - c_s)(eq^* - \bar{e}). \quad (9)$$

3.2 碳排放及规制与最优解关系分析

令 $\Theta = (e, \bar{e})$,最优值 (p_e^*, q^*) 可记为 $p_e^*(\Theta) = p_e^*(e, \bar{e})$ 和 $q^*(\Theta) = q^*(e, \bar{e})$.

命题1 在最优值 $(p_e^*(\Theta), q^*(\Theta))$ 中,最优产量 $q^*(\Theta)$ 随着制造商单位产品碳排放量 e 的增加而减少;最优碳排放权价格 $p_e^*(\Theta)$ 随着制造商单位产品碳排放量 e 的增加而增加.碳排放权价格随单位产品排放量的变化率 $\lambda_{p_e, e} > p_e^*(\Theta)/e$;最优产量随单位产品排放量的变化率的绝对值 $|\lambda_{q, e}| > 2p_e^*(\Theta)/[pf(q^*(\Theta))]$.

证明 对 $q^*(\Theta)$ 和 $p_e^*(\Theta)$ 分别关于单位产品碳排放量 e 求一阶偏导数,化简可得

$$\begin{aligned} \partial p_e^*(\Theta)/\partial e = & [p/e^2 f(q^*(\Theta))q^*(\Theta) - (1 + (q^*(\Theta) - \bar{e}/e) \times \\ & f'(q^*(\Theta))/f(q^*(\Theta)))p_e^*(\Theta)/e]/[2 + \\ & (q^*(\Theta) - \bar{e}/e)f'(q^*(\Theta))/f(q^*(\Theta))]. \end{aligned} \quad (10)$$

根据广义递增失效率函数 $h'(x) > 0$ 的特性,由于

$$\frac{pf(q^*(\Theta))q^*(\Theta)/e^2}{2 + (q^* - \bar{e}/e)f'(q^*(\Theta))/f(q^*(\Theta))} > \frac{p_e^*(\Theta)}{e},$$

结合式(10)可得 $\partial p_e^*(\Theta)/\partial e > 0$,同理易得 $\partial q^*(\Theta)/\partial e < 0$,故 $\lambda_{p_e, e} > p_e^*(\Theta)/e$,从而 $\partial q^*(\Theta)/\partial e < -2p_e^*(\Theta)/[pf(q^*(\Theta))]$. □

命题2 在最优值 $(p_e^*(\Theta), q^*(\Theta))$ 中,最优产量 $q^*(\Theta)$ 随着政府碳配额上限 \bar{e} 的增加而增加,且相关系数为 $\lambda_{q, \bar{e}} = 1/[eg(q^*(\Theta))]$;最优碳排放权价格 $p_e^*(\Theta)$ 随政府碳配额上限 \bar{e} 的增加而减少,且相关系数为 $\lambda_{p_e, \bar{e}} = -pf(q^*(\Theta))/[e^2g(q^*(\Theta))]$.产量随着政府碳配额上限 \bar{e} 的变化率 $\lambda_{q, \bar{e}} < 1/e$;碳排放权价格随政府碳配额上限 \bar{e} 的变化率的绝对值 $|\lambda_{p_e, \bar{e}}| < pf(q^*(\Theta))/e^2$.

证明 对 $q^*(\Theta)$ 关于 \bar{e} 求一阶偏导数,化简可得

$$\partial q^*(\Theta)/\partial \bar{e} = -e/[pf(q^*(\Theta))](\partial p_e^*(\Theta)/\partial \bar{e}). \quad (11)$$

由式(11)易得:最优产量 $q^*(\Theta)$ 随着政府配额上限 \bar{e} 的变化关系与碳排放权价格 $p_e^*(\Theta)$ 随着政府配额上限 \bar{e} 的变化关系呈相反的趋势.由于 $\partial q^*(\Theta)/\partial p_e = -e/[pf(q^*(\Theta))]$,同时结合 $p_e^*(\Theta)$ 关于 \bar{e} 的一阶偏导数可得

$$\partial p_e^*(\Theta)/\partial \bar{e} = -[pf^2(q^*(\Theta))/e^2]/[2f(q^*(\Theta)) +$$

$$(q^*(\Theta) - \bar{e}/e)\partial f(q^*(\Theta))/\partial q]. \quad (12)$$

将式(12)代入(11),得到

$$\partial q^*(\Theta)/\partial \bar{e} = f(q^*(\Theta))/[2ef(q^*(\Theta)) + (eq^*(\Theta) - \bar{e})\partial f(q^*(\Theta))/\partial q]. \quad (13)$$

在式(13)中,设 \bar{e} 的函数为

$$g(q^*(\Theta)) = 2 + \frac{eq^*(\Theta) - \bar{e}}{ef(q^*(\Theta))} \frac{\partial f(q^*(\Theta))}{\partial q}.$$

由于 $p_e^*(\Theta) - c_s = [eq^*(\Theta) - \bar{e}]qf(q^*(\Theta))/e^2$ 成立,有

$$g(q^*(\Theta)) = 2 + \frac{e[p_e^*(\Theta) - c_s]}{pf^2(q^*(\Theta))} \frac{\partial f(q^*(\Theta))}{\partial q^*(\Theta)}.$$

根据函数 $h'(x) > 0$ 的特性,可得不等式

$$g(q^*(\Theta)) > 2 - \frac{e(p_e^*(\Theta) - c_s)}{ep_e^*(\Theta) + c_m} > 0. \quad (14)$$

将不等式(14)代入(13),化简可得 $\partial q^*(\Theta)/\partial \bar{e} = 1/[eg(q^*(\Theta))] > 0$,进而由式(11)得到

$$\partial p_e^*(\Theta)/\partial \bar{e} = -pf(q^*(\Theta))/[e^2g(q^*(\Theta))] < 0. \quad (15)$$

此外,由 $(p_e^*(\Theta) - c_s)/(p_e^*(\Theta) + c_m/e) < 1$ 可得 $g(q^*(\Theta)) > 1$. \square

命题1和命题2表明:当制造商生产易逝品时所产生的碳排放量较低且政府规定的碳配额上限较高时,供应商会选择降低碳排放权价格从而获得更高的收益,同时制造商也会为获得更多的收益而增加产品产量,进而增加对碳排放权的购买量,反之亦然.

下面分析碳配额供需双方最优利润值与单位产品碳排放量 e 及政府碳排放上限 \bar{e} 的关系.记双方利润函数分别为

$$\pi_m(q^*(\Theta)) = pv(q^*(\Theta)) - c_mq^*(\Theta) - p_e^*(\Theta)(eq^*(\Theta) - \bar{e}), \quad (16)$$

$$\pi_s(p_e^*(\Theta)) = (p_e^*(\Theta) - c_s)(eq^*(\Theta) - \bar{e}). \quad (17)$$

推论1 制造商的最优利润 $\pi_m^*(q^*(\Theta))$ 与单位产品碳排放量 e 负相关,与政府的碳配额上限 \bar{e} 正相关;供应商的最优利润 $\pi_s^*(p_e^*(\Theta))$ 与单位产品的碳排放量 e 正相关,与政府的碳配额上限 \bar{e} 负相关.

证明 由命题1可知 $\partial p_e^*(\Theta)/\partial e > p_e^*(\Theta)/e$ 成立,从而化简可得 $\partial \pi_m(q^*(\Theta))/\partial e < 0$,对供应商利润函数 $\pi_s(p_e^*(\Theta))$ 关于 e 求一阶偏导数,化简可得

$$\begin{aligned} \frac{\partial \pi_s(p_e^*(\Theta))}{\partial e} &= \\ e \left[\left(\left(q^*(\Theta) - \frac{\bar{e}}{e} \right) - \frac{p_e^*(\Theta) - c_s}{pf(q^*(\Theta))/e} \right) \frac{\partial p_e^*(\Theta)}{\partial e} + \right. \\ &\left. [p_e^*(\Theta) - c_s] \left[q^*(\Theta) - \frac{ep_e^*(\Theta)}{pf(q^*(\Theta))} \right] \right]. \quad (18) \end{aligned}$$

将 $p_e^*(\Theta) - c_s = (eq^*(\Theta) - \bar{e})pf(q^*(\Theta))/e^2$ 代入式(18),化简并由 $pq^*(\Theta)f(q^*(\Theta)) > ep_e^*(\Theta)$ 可得

$$\partial \pi_s(p_e^*(\Theta))/\partial e > 0.$$

同理,对制造商利润函数 $\pi_m(q^*(\Theta))$ 关于 \bar{e} 求一阶偏导数,并将式(13)代入,化简可得

$$\frac{\partial \pi_m(q^*(\Theta))}{\partial \bar{e}} = c_s + \frac{2p(eq^*(\Theta) - \bar{e})f(q^*(\Theta))}{e^2}. \quad (19)$$

由式(19)易知 $\partial \pi_m(q^*(\Theta))/\partial \bar{e} > 0$.对 $\pi_s(p_e^*(\Theta))$ 关于 \bar{e} 求一阶导数,并将式(12)代入,化简可得

$$\begin{aligned} \frac{\partial \pi_s(p_e^*(\Theta))}{\partial \bar{e}} &= \\ \frac{pf(q^*(\Theta))}{e} [eq^*(\Theta) - \bar{e}] \left[\frac{e\partial q^*(\Theta)}{\partial \bar{e}} - 2 \right]. \quad (20) \end{aligned}$$

由于 $0 < \partial q^*(\Theta)/\partial \bar{e} < 1/e$,易得 $\partial \pi_s(p_e^*(\Theta))/\partial \bar{e} < 0$. \square

显然,制造商的最优利润随着政府碳配额的增加而增加,随着单位产品碳排放的增加而减少;供应商的最优利润随着政府碳配额的增加而减少,随着制造商生产单位产品碳排放的增加而增加.同时,随着环境问题日益严重,政府的碳配额不会无限制地增加并且还可能减少,这就对供应链的运营决策优化和协调提出了更高的要求.

3.3 排放依赖型供应链收益分配与协调

由推论1可知,供应链中制造商和供应商的政府配额上限 \bar{e} 与所生产单位产品碳排放量 e 是相矛盾的,即制造商希望生产过程中尽可能降低碳排放,同时政府制定的碳限额应适度增加;而供应商则希望制造商能够在生产中多排放,同时希望政府能够减少碳排放限额.同理,对制造商单位产品碳排放 e 的分析过程与之类似.因此,需要从供应链合作减排的角度分析政府给制造商的碳排放限额 \bar{e} 对供应链绩效的影响.由制造商和供应商组成两级供应链总利润为 $\pi_{sc}(\Theta) = \pi_m(\Theta) + \pi_s(\Theta)$,即

$$\pi_{sc}(\Theta) = pv(q(\Theta)) - c_mq(\Theta) - c_s(eq(\Theta) - \bar{e}). \quad (21)$$

命题3 当 $\bar{e} \leq eA$ 时,供应链总利润 $\pi_{sc}(\Theta)$ 随着政府排放限额 \bar{e} 的增加而增加,随着单位产品碳排放量 e 的增加而减少.制造商也可以通过出售政府碳配额获利,但是其碳出售价格应大于 $\sigma_m(\bar{e}) = c_s + 2pf(q^*(\Theta))/e^2(eq^*(\Theta) - \bar{e})$,否则,应将所得的政府碳配额全部用于制造产品.

证明 对 $\pi_{sc}(\Theta)$ 关于 \bar{e} 求一阶导数,将 $\overline{F(q^*(\Theta))}$ = $c_m + ep_e^*(\Theta)/p$ 代入,可得

$$\frac{\partial \pi_{sc}(\Theta)}{\partial \bar{e}} = e[p_e^*(\Theta) - c_s] \frac{\partial q^*(\Theta)}{\partial \bar{e}} + c_s.$$

已证 $\partial q^*(\Theta)/\partial \bar{e} > 0$,故有 $\partial \pi_{sc}(\Theta)/\partial \bar{e} > 0$,同理可得 $\partial \pi_{sc}(\Theta)/\partial e > 0$. \square

由式(21)可知,供应链总利润函数 π_{sc} 与碳排放

权价格 p_e 无关,只与产量 q 有关. 由于 $\partial^2 \pi_{sc} / \partial q^2 < 0$, 存在使供应链总利润达到最优的产品产量 q_{sc}^* . 通过 $\partial \pi_{sc}(q) / \partial q = 0$, 可以计算得到

$$q_{sc}^* = F^{-1}((p - c_m - ec_s) / p). \quad (22)$$

由假设 (4) 可得, 制造商碳排放总量极大值为 $eq_{sc}^* = eF^{-1}((p - c_m - ec_s) / p)$. 制造商的实际碳排放量应满足 $e_t(q) = eq < eF^{-1}((p - c_m - ec_s) / p)$, 故政府碳配额也满足 $\bar{e} < eq_{sc}^* = eF^{-1}((p - c_m - ec_s) / p)$. 又因 $p_e^* > c_s$, 故可得 $eF^{-1}((p - c_m - ep_e) / p) < eF^{-1}((p - c_m - ec_s) / p)$. 在集中决策环境下, 当满足 $\bar{e} < eF^{-1}((p - c_m - ec_s) / p)$ 时, 政府碳配额上限 \bar{e} 可能满足 $\bar{e} < e_t(q^*)$ 或者 $e_t(q^*) < \bar{e} < e_t(q_{sc}^*)$, 因此 \bar{e} 的取值范围为 J_1 、 J_2 两部分的并集, 其中

$$J_1 = [0, eF^{-1}((p - c_m - ep_e) / p)],$$

$$J_2 = [eF^{-1}((p - c_m - ep_e) / p), eF^{-1}((p - c_m - ec_s) / p)].$$

在 J_1 中, 制造商边际利润为

$$\frac{\partial \pi_m^*}{\partial q} = \frac{\partial \pi_m^*}{\partial p_e^*} \frac{\partial p_e^*}{\partial q},$$

结合式 (8) 得到 $\partial \pi_m^* / \partial p_e^* = -(eq - \bar{e})$, 因此有 $\partial \pi_m^* / \partial q = -(\partial p_e^* / \partial q)(eq - \bar{e})$.

由式 (7) 可得最优碳排放权价格与产量之间的关系为 $\partial p_e^* / \partial q = p / e^2 [ef(q^*) + (eq^* - \bar{e})f'(q^*)]$. 再依据广义递增失效率函数的特性易知, $\partial p_e^* / \partial q < 0$ 成立, 从而有 $\partial \pi_m^* / \partial q > 0$. 供应商可以通过提高碳排放权价格来提高自身的利润, 当然, 若降低排放权价格则制造商利润相应也增加, 即当产品实际产量小于能使制造商利润最大化的最优产量 q_{sc}^* 时, 制造商和供应商的最优利润都有进一步增加的空间.

在 J_2 中, 政府碳配额需要大于制造商生产所需的碳配额, 同时小于按照能使得供应链利润最大化的产量生产所需的碳配额, 即 $eq^* < \bar{e} < eq_{sc}^*$. 因此, 制造商若要获取更多的利润, 则会继续增加产品的生产以消耗掉剩余的碳配额. 即在 J_2 中, 制造商和供应商同样有使自身利润提高的空间, 故得命题 4.

命题 4 当满足条件 $\bar{e} < eq_{sc}^*$ 时, 制造商和供应商可以通过供应链协调实现各自利润值的增加.

由式 (4), 当政府分配给制造商的碳配额大于或等于自身生产所需的碳配额时, $e_s = 0$. 即当制造商按 $q = \bar{e} / e$ 这一边界量生产时, 供应商获得的利润是零, 此时制造商利润即为供应链的利润, $\pi_m = \pi_{nsc} = pv(\bar{e} / e) - c_m \bar{e} / e$. 而当制造商以 $q_{sc}^* = F^{-1}[(p - c_m - ec_s) / p]$ 生产时, 可使整个供应链利润最大化, 此时供应链利润为 $\pi_{sc} = \pi_w = pv(q_{sc}^*) - c_m q_{sc}^* - c_s(e q_{sc}^* - \bar{e})$. 由

此可以得到上述两种情况下的差值为

$$\Delta \pi_{nsc,w} = (p - c_m - ec_s)(\bar{e} / e - q_{sc}^*) - p \left[\int_0^{\bar{e} / e} F(x) dx - \int_0^{q_{sc}^*} F(x) dx \right]. \quad (23)$$

令

$$F(\xi) = \frac{\left[\int_0^{\bar{e} / e} F(x) dx - \int_0^{q_{sc}^*} F(x) dx \right]}{\bar{e} / e - q_{sc}^*},$$

其中 $\xi \in (\bar{e} / e, q_{sc}^*)$. 因此式 (23) 可化简为

$$\Delta \pi_{nsc,w} = [p \overline{F(\xi)} - c_m - ec_s](\bar{e} / e - q_{sc}^*). \quad (24)$$

式 (24) 中, 由于 $\bar{e} < eq_{sc}^*$, $\Delta \pi_{nsc,w} < 0$, 表明供应商参与决策的供应链最优利润高于供应商没有参与决策的供应链最优利润, 此时供应链两个主体 (供应商和制造商) 将会采取相应的决策提高自身利润. 从这个角度也能验证命题 4 的结论, 进一步可以考虑利润增量 $|\Delta \pi_{nsc,w}|$ 的分配方案.

根据供应链研究成果^[18], 结合最优利润 $\pi^*(\theta) = pv(q_{sc}^*) - c_m q_{sc}^* - c_s(e q_{sc}^* - \bar{e})$, 如果产品制造商和供应商的利润之和恰好等于整个供应链的最优利润, 且设它们各自所占供应链总利润的比例为 $\alpha(\theta)$ 和 $1 - \alpha(\theta)$, 则制造商和供应商的利润函数可以分别表示为 $\pi_m(\theta) = \alpha(\theta)\pi^*(\theta)$, $\pi_s(\theta) = (1 - \alpha(\theta))\pi^*(\theta)$. 但是, 对制造商而言, 若产品制造商按照政府碳配额安排生产, 则供应商会因为无法获利而退出碳排放权交易市场, 此时制造商的利润为 $\pi_{m,r}(\theta) = \pi_{nsc}(\theta) = pv(\bar{e} / e) - c_m \bar{e} / e$, 即当不存在碳排放权交易市场时, 制造商的保有利润应为 $\pi_{m,r}(\theta)$. 当存在碳排放权交易市场, 即碳配额供应商参与决策时, 制造商所获得的实际效用函数应为 $U_m(\theta) = \alpha(\theta)\pi^*(\theta) - \pi_{m,r}(\theta)$. 如果要使 $U_m(\theta) > 0$ 成立, 则利润分享比例 $\alpha(\theta)$ 应满足 $\alpha(\theta) > \pi_{m,r}(\theta) / \pi^*(\theta)$; 对供应商而言, 如果制造商所需碳配额恰好等于政府碳排放上限, 则此时供应商的利润为 $\pi_{s,r}(\theta) = 0$, 即为供应商的保有利润; 同理可得, 供应商的效用函数为 $U_s(\theta) = (1 - \alpha(\theta))\pi^*(\theta)$. 此时制造商和供应商的效用和恰好等于要分配的供应链利润 $|\Delta \pi_{nsc,w}|$, 即 $U_m(\theta) + U_s(\theta) = \pi^*(\theta) - \pi_{m,r}(\theta) = |\Delta \pi_{nsc,w}|$.

由制造商分享供应链总利润比例 $\alpha(\theta)$ 可得

$$\frac{\partial \alpha(\theta)}{\partial \bar{e}} = \frac{\left[\frac{\partial \pi_m(\theta)}{\partial \bar{e}} \pi(\theta) + \pi_m(\theta) \frac{\partial \pi(\theta)}{\partial \bar{e}} \right]}{\pi^2(\theta)}.$$

由 $\partial \pi_m(\theta) / \partial \bar{e} > 0$ 和 $\partial \pi(\theta) / \partial \bar{e} > 0$ 可得 $\partial \alpha(\theta) / \partial \bar{e} > 0$, 这表明制造商的利润分享比例随着政府碳配额上限的增加而增加.

由

$$\frac{\partial \alpha(\Theta)}{\partial e} = \frac{\left[\frac{\partial \pi_m(\Theta)}{\partial e} \pi(\Theta) + \pi_m(\Theta) \frac{\partial \pi(\Theta)}{\partial e} \right]}{\pi^2(\Theta)},$$

$\partial \pi_m(\Theta)/\partial e > 0, \partial \pi(\Theta)/\partial e > 0$, 易得 $\partial \alpha(\Theta)/\partial e < 0$, 进而得到命题5.

命题5 对供应商而言, 政府的碳排放限制越宽松, 其在整个供应链系统中所占有的利润比例便越低, 供应商在与制造商讨价还价中越无力; 反之, 政府碳排放限制越严厉, 则其在供应链系统中的利润比例便越高, 在与制造商的讨价还价中越有力. 制造商单位产品的碳排放量越高, 供应商在整个供应链体系中所占有的利润比例便越高, 其与制造商的讨价还价中越有力; 反之, 其在供应链系统中的利润比例越低, 在与制造商的讨价还价中越无力. 对于制造商而言, 政府碳排放限制和单位产品碳排放量对其影响关系恰好与供应商相反.

推论2 对政府而言, 应该制定使制造商和供应商效用和最大化的碳配额上限 \bar{e} , 即寻找 \bar{e} 使得 $U_m(\Theta) + U_s(\Theta)$ 最大; 对制造商而言, 应该限制产品碳排放水平以使其与供应商的效用和实现最优化, 即寻找 e 使得 $U_m(\Theta) + U_s(\Theta)$ 达到最优化.

4 数值分析

为了验证本文的求解过程和结论, 借鉴文献[12, 14, 16]等数值分析方法并结合本研究的具体实际, 假设随机变量 ε 在区间 $[0, 200]$ 中服从均匀分布, 即 $\varepsilon \sim U[0, 200]$. 该假设满足本文设定广义递增失效率函数的条件. 市场价格为 $p = 100$, 单位产品的碳排放量为 $e = 1.5$, 制造商的单位生产成本为 $c_m = 10$, 供应商的单位运营成本为 $c_s = 5$. 此时, 供应链集中决策时最优产量为 $q_{sc}^* = 165$. 故政府碳配额上限的区间为 $\bar{e} \in (0, 247.5)$. 设政府实际碳配额上限为 $\bar{e} = 80$, 由式(5)和(9)可得供应商的最优碳排放权价格和制造商的最优产量分别为 $(p_e^*, q^*) = (23.61, 109.17)$. 因此当 $\bar{e} = 80$ 时, 制造商需以 $p_e^* = 23.61$ 的碳排放权价格从供应商处购买 $e_s = 83.75$ 数量的碳配额, 此时制造商、供应商及整个供应链的最优利润分别为 $\pi_m^*(q^*) = 4868.30, \pi_s^*(p_e^*) = 1558.67, \pi^*(q^*) = 6426.97$, 制造商利润在供应链利润的比例为 $\alpha = 0.76$.

表2给出了当政府碳配额上限 $\bar{e} \in (0, 247.5)$ 且逐渐增加时, 最优产量、最优碳排放权价格、供需双方最优利润及制造商讨价还价能力的相应数值(限于篇幅, 只列出部分数据). 由表2可见, 随着政府碳配额上限的逐渐增大, 供应商的碳排放权价格会下降, 从而激励制造商购买更多的碳配额, 因为制造商在政

府碳排放约束缩小时最优产量将会提高.

表2 \bar{e} 变化时产品产量、碳交易价格及产量决策

	碳排放 上限	最优 产量	最优碳 价格	购买 配额	制造商讨价 还价能力
1	110	119.17	20.28	68.75	0.85
2	120	122.50	19.17	63.75	0.87
3	130	125.83	18.06	58.75	0.89
4	140	129.17	16.94	53.75	0.91
5	150	132.50	15.83	48.75	0.93

表3为 \bar{e} 各主体利润最优数值表. 由表3可见, 随着政府碳配额上限的增加, 制造商和整个供应链的利润都在增加, 而供应商的利润却会减少, 因此制造商在与供应商的讨价还价中将更具优势. 此外, 无论是产品制造商还是供应商, 其讨价还价能力增减的空间都会随着碳排放上限的增加而减小.

表3 \bar{e} 各主体利润最优数值

	碳排放 上限	制造商 最优利润	供应商 最优利润	供应链 总利润
1	110	5780.73	1050.35	6831.08
2	120	6051.56	903.13	6954.69
3	130	6305.73	767.01	7072.74
4	140	6543.23	642.01	7185.24
5	150	6764.06	528.13	7292.19

表4和表5给出了当单位产品碳排放量 $e \in (1, 2)$ 时, 最优产量、最优碳排放权价格、双方最优利润、制造商讨价还价能力及各主体利润的相应数值.

表4 e 变化时产品产量、碳交易价格及产量决策

	碳排放 上限	最优 产量	最优碳 价格	购买 配额	制造商讨价 还价能力
1	1.3	114.27	22.05	68.55	0.79
2	1.4	111.57	22.81	76.20	0.77
3	1.5	109.17	23.61	83.75	0.76
4	1.6	107.00	24.44	91.20	0.74
5	1.7	105.03	25.28	98.55	0.73

表5 e 各主体利润最优数值表

	碳排放 上限	制造商 最优利润	供应商 最优利润	供应链 总利润
1	1.3	5286.85	1390.27	6677.12
2	1.4	5067.15	1481.23	6548.38
3	1.5	4868.23	1558.68	6426.91
4	1.6	4687.25	1624.50	6311.75
5	1.7	4521.80	1680.30	6202.10

由表4可见, 随着单位产品碳排放量的不断增加, 制造商的最优产量逐渐减少, 同时相对于供应商的讨价还价能力也逐渐减弱, 所需的碳配额会不断增加.

由表5可见, 随着单位产品碳排放量的不断增加, 制造商的最优利润不断减少, 供应商的利润会不断增加, 而整个供应链的利润呈下降趋势. 这与随着政府碳排放上限的变化趋势相反, 结论与前文讨论分析相

吻合。

下面分析双方利润分配和效用提升的情况。限于篇幅,该部分只对 \bar{e} 变化情形下的数据进行分析, e 的变化趋势与 \bar{e} 相反。根据第3.3节的讨论结果可以获

得集中决策时供应链总利润的最优值 π^* 和只存在制造商情况下的利润值(保有利润值) $\pi_{m,r}$,利润分享比例为 α 时制造商及供应商的利润值分别为 $\alpha\pi^*$ 和 $(1-\alpha)\pi^*$ 。具体数据见表6。

表6 各主体利润值及分配情况随碳排放上限变化数据表

	碳排放上限	供应链最优利润	单制造商最优利润	两种情况利润差	按分配比例制造商最优利润	按分配比例供应商最优利润	制造商提高效率	供应商提高效率	总效用提升
1	110	7356.25	5255.56	2100.69	6225.15	1131.10	613.33	1131.10	693737.56
2	120	7406.25	5600.00	1806.25	6444.49	961.76	725.42	961.76	697679.94
3	130	7456.25	5922.22	1534.03	6647.65	808.60	844.49	808.60	682854.61
4	140	7506.25	6222.22	1284.03	6835.55	670.70	969.60	670.70	650310.72
5	150	7556.25	6500.00	1056.25	7009.00	547.25	1099.70	547.25	601810.83

由表6可见,随着政府碳排放上限 \bar{e} 的逐渐增大,集中决策下供应链总利润最优值 π^* 也在增加。假如制造商以政府碳配额上限生产,那么它所获得的利润值 $\pi_{m,r}$ 也会随着 \bar{e} 的增大而提高,但两种情况下的利润差会逐渐减小;就按比例分享供应链利润而言,制造商所获得的利润与 \bar{e} 正相关,供应商所获得的利润与 \bar{e} 负相关。这充分表明制造商保有利润与 \bar{e} 正相关,供应商保有利润与 \bar{e} 负相关,上述结果与命题5和推论2相吻合。另外,随着政府碳排放上限 \bar{e} 的逐渐增大,制造商的效用不断提高,而供应商的效用却不断下降,同时供应链的总体效用提升水平逐渐下降。由于制造商与供应商随着 \bar{e} 的变化关系是反向的,可以找到最优的 \bar{e} 使得 $U_m U_s = (\alpha \cdot \pi^* - \pi_{m,r})(1 - \alpha)$ 在 π^* 达到最优。由表6可见,总效用提升的最优值在 $\bar{e}^* = 120$ 左右。

此外,由于可将 \bar{e}/e 看作是政府分配给制造商的产量,因此对 e 与对 \bar{e} 的分析过程恰好是相反的,所得的关系也是反向的,但其原理和过程是类似的,限于篇幅,这里不再赘述。

5 结论

本文分析了低碳供应链系统利润的最优决策问题。考虑由单一排放依赖型制造商和单一排放权供应商组成的两阶段排放依赖型供应链系统,市场需求随机且制造商产品生产过程中需消耗一定的碳排放权。制造商可以通过获得政府配额和向排放权供应商购买不足的碳排放权两种方式满足环保要求。

本文影响最优决策的两个因素:一是碳排放量,二是政府的碳配额限制。在两个因素的影响下,组成供应链系统的制造商和供应商均有利润提升的空间;制造商的产量随着碳排放量的增加而减少,随着政府碳配额供应限制的放宽而增加;供应商的碳排放权价格随着碳排放量的增加而增加,随着政府碳配额供

应管制的下降而下降。在实际生产运营中,制造商作为主要的碳排放主体,应该有效地治理其产品生产过程中的碳排放量,同时作为环境管制主体的政府也应该合理地制定碳配额的上限值,以使得供需双方的效用增量和达到最优。最后选取合理的数据对相关重要结论进行验证。为受到碳规制影响的制造类企业在低碳环境下作出明智决策及政府制定合理的上限提供参考,同时得出一些有意义的管理启示:

1) 政府环境政策方面:当政府环境政策更加严苛时,制造商的讨价还价能力会下降,相应地供应商的讨价还价能力会增强,此时供应商可以从政府环境政策中获得更多的好处,但是会导致整个供应链利润水平有所下降。政府可以制定更为严苛的环境政策,通过牺牲一定的经济增长来换取环境的改善,同时影响社会资源的配置,进而影响企业的运营决策,使绿色低碳产业从中受益。这一发现也表明了目前中国针对环境改善的一系列措施的正确性。

2) 供应链合作和市场风险共担方面:如果制造商独立承担市场风险,则当其面对的市场风险较大时,制造商会变得更加谨慎,此时制造商会通过改变其生产决策(降低生产规模等)来应对风险;供应商考虑到制造商对待风险的态度和碳排放权价格对制造商决策的影响,为有效防止制造商大幅缩减生产规模,供应商会主动降低碳排放权价格以确保自身利益的最大化,从而形成了供需双方主动分担市场风险的局面,这也是本文研究供应链合作减排的内在机理。

同时,本文还存在一些不足,例如考虑一个具有多个阶段的排放依赖型供应链,在该供应链中,制造商可能被允许在一段时间内转让剩余许可证。此外还可以考虑残值非零的情形以及存在多个制造商或供应商竞争的情形等,今后可从这些方面进行研究,讨论随机需求下或竞争环境下的供应链运营决策问题。

参考文献(References)

- [1] Du S F, Tang W Z, Song M L. Low-carbon production with low-carbon premium in cap-and-trade regulation[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 134: 652-662.
- [2] 佟新华, 段海燕. 中日清洁发展机制项目合作研究[J]. *现代日本经济*, 2007(2): 11-14.
(Tong X H, Duan H Y. A study on sino-japanese project cooperation of CDM[J]. *Contemporary Economy of Japan*, 2007(2): 11-14.)
- [3] Du S F, Ma F, Fu Z L, et al. Game-theoretic analysis for an emission-dependent supply chain in a 'cap-and-trade' system[J]. *Annals of Operations Research*, 2015, 228(1): 135-149.
- [4] Coase R. The problem of social cost[J]. *Journal of Law and Economics*, 1960, 3(1): 1-44.
- [5] Tol R S. The economic impacts of climate change[J]. *Review of Environmental Economics and Policy*, 2018, 12(1): 4-25.
- [6] Benjaafar S, Li Y, Daskin M. Carbon footprint and the management of supply chains: Insights from simple models[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2013, 10(1): 99-116.
- [7] Xia L J, Guo T T, Qin J J, et al. Carbon emission reduction and pricing policies of a supply chain considering reciprocal preferences in cap-and-trade system[J]. *Annals of Operations Research*, 2018, 268(1/2): 149-175.
- [8] Yang H X, Chen W B. Retailer-driven carbon emission abatement with consumer environmental awareness and carbon tax: Revenue-sharing versus cost-sharing[J]. *Omega*, 2018, 78(7): 179-191.
- [9] 李友东, 夏良杰, 王锋正. 基于销售返利契约的低碳供应链协调策略研究[J]. *管理评论*, 2018, 30(9): 218-228.
(Li Y D, Xia L J, Wang F Z. Study on low-carbon supply chain coordination strategy with sales-rebate contract[J]. *Management Review*, 2018, 30(9): 218-228.)
- [10] 宋瑶, 赵道致. 基于低碳经济的制造商产品组合优化[J]. *系统工程*, 2012, 30(9): 75-81.
(Song Y, Zhao D Z. The product portfolio optimization of manufacturers based on low-carbon economy[J]. *Systems Engineering*, 2012, 30(9): 75-81.)
- [11] 马常松, 陈旭, 罗振宇, 等. 随机需求下考虑低碳政策规制的企业生产策略[J]. *控制与决策*, 2015, 30(6): 969-976.
(Ma C S, Chen X, Luo Z Y, et al. Production strategy of considering low carbon emission policies regulation under stochastic demand[J]. *Control and Decision*, 2015, 30(6): 969-976.)
- [12] 李友东, 谢鑫鹏, 营刚. 两种分成契约下供应链企业合作减排决策机制研究[J]. *中国管理科学*, 2016, 24(3): 61-70.
(Li Y D, Xie X P, Ying G. Research on supply chain collaboration sharing contract and decision-making mechanism under the limitation of carbon emission[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2016, 24(3): 61-70.)
- [13] Cao E B, Du L X, Ruan J H. Financing preferences and performance for an emission-dependent supply chain: Supplier vs bank[J]. *International Journal of Production Economics*, 2019, 208(2): 383-399.
- [14] 汤春华, 曹二保, 殷悦. 配额信息不对称时排放依赖型供应链契约[J]. *系统管理学报*, 2017, 26(2): 356-360.
(Tang C H, Cao E B, Yin Y. Contract for emission-dependent supply chain with asymmetric permits information[J]. *Journal of Systems & Management*, 2017, 26(2): 356-360.)
- [15] 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 X P, Zhao D Z, Liu Y J. Revenue sharing consignment contract of low-carbon supply chain with carbon-emission sensitive demand[J]. *Journal of Systems & Management*, 2015, 24(1): 107-115.)
- [16] Zhang J J, Nie T F, Du S F. Optimal emission-dependent production policy with stochastic demand[J]. *International Journal of Society Systems Science*, 2011, 3(1/2): 21-39.
- [17] 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(6): 61-67.
- [18] Chen J. The optimal strategies of risk-averse newsvendor model for a dyadic supply chain with financing service[J]. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2017(2): 1-15.
- [19] Zissis D, Saharidis G K D, Aktas E, et al. Emission reduction via supply chain coordination[J]. *Transportation Research, Part D: Transport and Environment*, 2018, 62(7): 36-46.

作者简介

李友东(1978—), 男, 副教授, 博士, 从事物流与供应链管理、低碳经济等研究, E-mail: nmglyd@163.com;
谢鑫鹏(1982—), 男, 讲师, 博士, 从事物流与供应链管理、低碳经济等研究, E-mail: xiexinpeng2010@yeah.com;
王锋正(1978—), 男, 教授, 博士, 从事企业战略管理、技术创新管理等研究, E-mail: jjxywangfz@sina.com;
王景峰(1978—), 男, 副教授, 博士, 从事企业战略管理等研究, E-mail: w2023@163.com.

(责任编辑: 郑晓蕾)