

doi: 10.19920/j.cnki.jmsc.2024.05.004

碳配额分配方法对授权再制造影响研究^①

朱庆华¹, 夏西强^{2*}, 李梦雅², 巫瑞³

(1. 上海交通大学安泰经济与管理学院, 上海 200030; 2. 郑州大学商学院, 郑州 450001;
3. 中国社会科学院大学继续教育学院, 北京 102488)

摘要: 不同碳配额分配方法直接影响碳交易政策的实施效果, 对制造/再制造生产决策以及碳交易市场运营产生不同影响. 为分析不同碳配额分配方法对制造/再制造影响, 基于两种典型碳配额分配方法(历史排放分配法和基准分配法)构建碳交易下原始制造商与授权再制造商博弈模型. 研究主要得到: 1) 在单位新产品碳排放量、碳交易价格与基准碳配额满足一定条件时, 原始制造商会选择碳减排投资, 且基准分配法更能提高原始制造商碳减排积极性; 2) 当碳配额以及碳交易价格满足一定条件时, 碳交易能够同时促进各方收益增加; 3) 适当提高碳交易价格能推动减排工作顺利进行, 但两种碳配额分配方法下的总环境影响与原始制造商减排投资水平、碳交易价格等相关.

关键词: 碳交易政策; 授权再制造; 历史排放分配法; 基准分配法

中图分类号: F272 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9807(2024)05-0060-16

0 引言

近年来经济高速发展的同时, 世界各地迎来了气候恶化与资源枯竭的巨大挑战, 持续上升的碳排放量严重制约着各国的长远发展. 各国政府逐渐意识到市场自发机制难以实现经济环境相协调, 提出众多干预性政策以引导企业碳减排^[1], 例如碳税、碳限额和碳交易等^[2,3], 其中基于科斯产权定理的碳交易政策能够将环境污染的外部影响内化为企业自身成本, 从而推动制造商主动承担碳减排义务, 成为各国政府进行环境规制的一种有力手段^[4]. 与欧盟等地的碳市场相比, 我国碳交易市场起步较晚, 目前活跃度较为低迷, 未来的建设完善工作任重而道远^[5].

碳配额的初始分配作为政府制定碳交易政策的关键因素, 不仅影响碳市场成交量高低, 还影响制造商的生产决策和资源配置. 目前我国政府主

要采取免费的碳配额分配机制^[6]. 该机制能够有效避免碳排放权恶性竞争, 鼓励企业参与碳交易. 其中, 较为典型的是以企业历史生产碳排放数据为标准制定初始碳配额的历史排放分配法和参照行业整体碳排放水平而设定基准碳配额的基准分配法^[7]. 历史排放分配法对企业生产负面影响较小, 为其投资碳减排提供充足空间, 而基准分配法则对高碳排放企业具有更强限制.

在政府政策与经济效益的双重压力下, 众多高碳排企业开始利用回收再制造方式实现低碳发展. 比如, 海尔通过构造“互联网+回收”网络实现废旧电器回收、拆解、再制造^[8], 此外, 佳能、惠普和戴尔等公司也积极参与了这场低碳转型的生产变革^[9]. 但对于众多受到资金与技术制约而难以独立开展再制造的中小企业而言, 为避免知识产权纠纷、品牌风波等问题, 授权再制造成为一个

① 收稿日期: 2022-09-17; 修订日期: 2024-01-02.

基金项目: 国家自然科学基金资助创新群体项目(72221001); 国家自然科学基金资助重大项目(72192830/72192833); 教育部人文社会科学项目(21YJC630140).

通讯作者: 夏西强(1984—), 男, 河南郑州人, 博士, 教授, 博士生导师. Email: xqxia@zsu.edu.cn

可行选择,即具有低碳优势的第三方支付给原始制造商授权费用以获取专利授权并独立生产销售再制造产品^[10]。该模式下,原始制造商不仅能够通过碳减排投资降低生产碳排放,还能利用授权合理调配自身资源实现收益最大化,而政府通过调整初始碳配额与碳交易价格影响厂商碳交易与生产决策,进而间接干预市场竞争。

综上所述,面临再制造产品竞争以及政府碳排放约束压力,如何进行碳减排投资与授权决策成为原始制造商必须考虑的问题。因此,本研究通过构建不同碳配额分配法下的制造/再制造供应链博弈模型,研究不同碳配额分配方法对原始制造商和授权再制造商运营决策影响,为国家双碳目标下制造商减排与定价决策提供参考依据,并通过分析何种碳配额分配方法更有利于实现产品低碳化,达到政府减排目标,为政府制定最佳碳交易政策提供理论依据。

1 文献综述

目前,与本研究相关的研究主要有三个方面:一是碳配额分配方法研究,二是碳交易政策对制造商运营决策影响,三是授权再制造模式研究。接下来,主要从这三方面对以往文献研究进行回顾梳理。

近年来,各国政府大力推进碳交易市场发展,初始碳配额分配机制作为其核心要素,已成为国内外学者的关注点。首先,以令狐大智^[11]等人为代表较早开始着眼于初始碳配额分配规则,其基于历史排放分配法分析了分配策略及产品碳排放水平对企业决策的影响,发现给予低碳排企业宽松的碳配额能够产生碳减排激励效果。而后众多学者立足于碳配额分配方法研究其政策效果,例如: Peng 等^[7]通过观察中国企业与碳市场数据,进而研究两种碳配额分配方法对碳减排和经济绩效的影响。在此基础上, Xu 等^[12]对比分析基准法与历史排放法对企业生产交货决策、社会福利的影响差异,发现当环境破坏系数较低时,基准分配法更利于碳减排,提高社会福利;同样的, Wang 等^[13]从企业融资方面探究不同碳配额分配法下的最优融资策略;进一步, Chen 等^[14]通过构建博弈模型探究基准法与历史排放法对电力市场可再

生能源投资和营销努力的影响;而后在绿色创新成为我国企业转变经济发展新方式的背景下,宋德勇等^[15]基于企业配额分配数据,考察不同碳配额分配方法对企业绿色创新的影响,研究得出基准法比历史排放法更能激励企业进行绿色创新。

由于政府政策支持和公众环保意识的增强,碳交易市场规模不断扩大,近年来众多学者在碳交易政策对制造商生产运营决策影响方面开展了大量研究并取得了众多创新性的研究成果。首先,张桂涛等^[16]研究发现制定合理碳减排政策有助于实现碳减排与企业利润的双重目标,该结论为学者研究碳交易政策的经济与环境效益提供了充分的理论意义。在此基础上,李璟等^[17]力图寻求碳交易下企业减排定价策略的优化方法,并结合实际市场情况考虑了信息非对称与消费者绿色偏好差异化因素的影响。在此基础上, Liao 等^[18]进一步探究碳交易价格波动情景下企业如何设计均衡可持续发展策略,以减少碳排放并在更低的资源投入下优化经济效率。而后, Yang 等^[19]开始深入分析不同碳交易分配方法的差异,其通过建立企业绿色技术投资与产品定价模型,对比分析不同碳交易分配规则对企业运营决策和总排放量的影响。Ma 等^[20]则通过对比有无碳交易政策下的多渠道供应链利润、碳排放与社会福利,发现基准分配法更有利于激励制造商生产低碳产品获益,同时能够产生更大社会福利。

此外,企业授权再制造模式的相关研究也与本研究联系密切。首先, Jin 等^[21]构建并分析供应链成员之间的合作场景,探究制造商授权合作机制,进而一部分学者在此基础上从双方授权合作机制角度进行探索,例如:曹开颖等^[22]研究原始制造商再制造授权选择与再制造商成本信息披露决策,研究表明再制造成本较低时双方才进行授权再制造合作;而 Zhou 等^[23]考察有无授权再制造情形下的企业最优决策,发现原始制造商实施授权策略的关键是权衡授权的间接收益(例如授权费)是否可以超过再制造产品销售对新产品销售的直接蚕食效应。此外,随着授权再制造模式的推广,学者开始深入实际情形,研究授权模式在不同场景下的应用, Zhou 等^[24]通过构建博弈模型对比分析原始制造商或合同厂商独立决策、双方协商三种不同授权议价场景下的均衡决策;而许

民利等^[25]对比了单位专利许可费与固定专利许可费两种模式下的供应链决策模型,并基于Shapley值设计收益共享契约对供应链进行协调。

表1 相关文献汇总

Table 1 Summary of relevant literature

研究方向	相关文献	研究内容
初始碳配额分配机制	11 ~ 13, 15	从企业层面探究不同碳配额分配方法对企业碳减排、融资以及生产决策的影响
	7, 14	基于行业、政府等宏观视角分析不同碳配额分配方法的低碳减排效果
碳交易政策对制造商生产运营决策影响	16, 17	碳交易机制下的企业生产定价策略以及碳减排行为
	18	碳交易价格波动对企业成本收益及减排动机的影响以及政府碳价合理制定问题
	19, 20	从绿色生产角度研究不同碳交易机制对企业生产与碳排放影响
授权再制造模式	21 ~ 23	供应链双方授权再制造合作条件
	24, 25	不同授权决策机制对供应链成员竞争的影响

通过表1对上述文献的概述可知,众多学者已在相关方面开展广泛研究并取得一定成果,但较少有研究关注不同碳配额分配方法下授权再制造供应链成员合作行为以及产品市场的相互竞争关系,随着碳减排政策推行,有必要分析政府不同碳配额分配方式对授权再制造供应链影响。由此,为弥补上述不足,本研究基于授权再制造,构建博弈模型分析政府历史排放法和基准法两种碳配额分配方式对原始制造商和授权再制造商运营决策影响,并基于环境视角,对比分析两种碳配额分配方式对环境的影响,为政府和制造商决策提供理论依据。

本研究创新点主要有两个:第一,从博弈视角出发,基于授权再制造分析不同碳配额分配方法下的碳交易政策对具有合作与竞争关系的原始制造商和授权再制造商运营决策影响(不同于以往仅分析政府碳交易政策对两者市场竞争的影响)。第二,不仅对比分析政府不同碳交易政策对两种产品制造商最优定价、减排努力和利润的影响,还进一步分析对单位再制造授权费用和环境的影响,剖析授权再制造下两种碳配额分配政策的政策效果与适用条件。

2 模型介绍

2.1 模型描述

本研究基于碳交易政策构建由一个原始制造商和一个再制造商组成的授权再制造博弈模型,其中,原始制造商生产销售新产品,再制造商通过支付授权费用获得废旧产品回收及再制造产品生产与销售的权利。考虑到生产单位再制造产品碳排放量远低于生产单位新产品碳排放量,以斯太尔发动机为例,与新发动机相比,单位再制造发动机可以降低环境影响80%;政府对再制造商往往采取激励政策。因此,为促进再制造产业发展,借鉴文献[27],假设碳交易政策仅约束高碳排放的原始制造商,即单一周期内原始制造商获得定量碳排放配额,生产所需的多余碳配额需在碳交易市场上按给定价格 Q 进行购买。此外,虽然再制造商的生产决策活动不受政府两种碳交易政策直接约束,但是原始制造商能够调整授权费用并利用两种产品的市场竞争作用间接影响再制造商的生产决策。碳交易政策下政府不同的碳配额分配方法对原始制造商产生的约束作用不同,原始制造商为降低碳排放量将进行减排投资。博弈示意图具体见图1。

2.2 符号说明

表2 符号及说明

Table 2 Notations and description

符号	说明
决策变量	
λ_i, z_i	分别表示原始制造商碳减排水平和单位再制造产品授权费用, $i \in \{N, L, U\}$
p_{in}, p_{ir}	分别表示模式 i 下两种产品的单位零售价格, $i \in \{N, L, U\}$
参数	
β	表示原始制造商碳减排投资成本系数
n, r, h	分别表示原始制造商、再制造商和再制造产品碳减排系数
e_n, e_r	分别表示单位新产品、再制造产品碳排放量, $e_r < e_n$
c_n, c_r	分别表示单位新产品、再制造产品的生产成本, $c_r < c_n$
δ, Q	分别表示消费者对再制造产品的偏好和单位碳配额交易价格
π_{in}, π_{ir}	分别表示模式 i 下原始制造商、再制造商的利润, $i \in \{N, L, U\}$
q_{in}, q_{ir}	分别表示模式 i 下两种产品的销售量, $i \in \{N, L, U\}$
N, L, U	分别表示无碳交易、基于历史排放法的碳交易模式、基于基准法的碳交易模式
T, α	表示政府根据历史排放法确定的总量碳配额和根据基准法确定的基准碳配额
τ_i	废旧产品回收率, $i \in \{N, L, U\}$

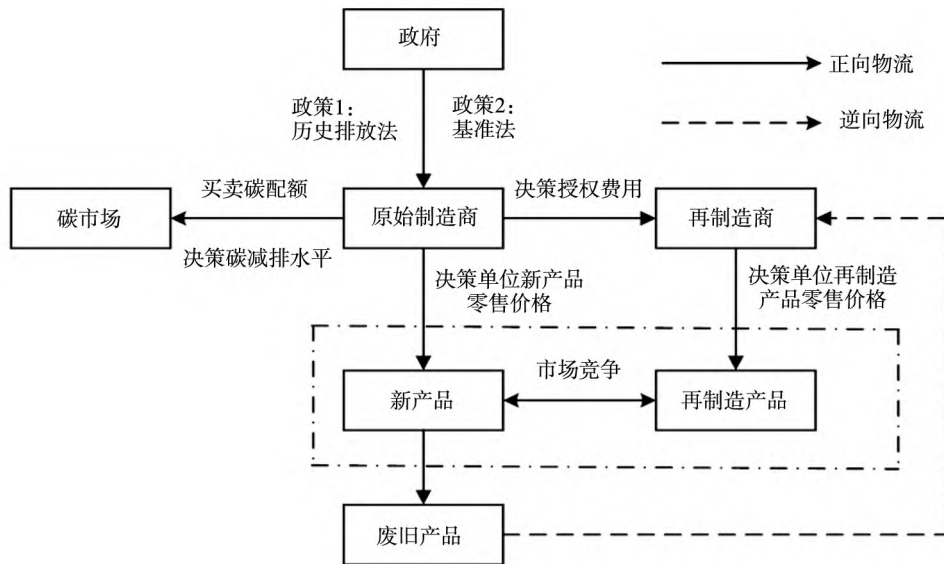


图 1 碳交易政策下授权再制造博弈示意图

Fig. 1 Game diagram of authorized remanufacturing based on the carbon trading policy

2.3 关键假设

1) 本研究采用一个较为成熟的需求函数, 该需求函数已被国内外研究文献广泛应用, 在此不予详细描述. 依据文献 [26] 可知, 新产品和再制造产品的需求量与单位零售价格之间的关系分别为: $p_{in} = 1 - q_{in} - \delta q_{ir}$, $p_{ir} = \delta(1 - q_{in} - q_{ir})$ 其中 $i \in \{N, L, U\}$.

2) 授权再制造商进行再制造时需对废旧产品进行回收利用. 本研究参考文献 [27] 将再制造商回收成本表示为 $\frac{k}{2} (\tau_i q_{in})^2$ 其中 $i \in \{N, L, U\}$, k 为废旧产品回收成本系数. 由回收成本函数可知, 再制造商回收成本与其回收量呈正相关且是回收量的凸函数.

3) 依据文献 [28], 当制造商的减排投资是购买减排设备、升级污染净化装置等一次性投入时, 其减排成本只与减排水平正相关且是减排水平的凸函数, 即原始制造商的减排成本可表示为 $\frac{\beta}{2} \lambda_i^2$ 其中 $i \in \{N, L, U\}$.

4) 参考文献 [11], 假设一个碳排放权能够随时自由买卖的规范性碳交易市场, 且该市场受政府监管, 碳交易价格由政府给定且在固定周期内碳交易价格处于稳定状态.

3 模型建立与求解

3.1 模型建立

1) 无碳交易政策时 (N 模式)

作为一个基准, 首先考虑政府不采取碳交易政策的授权再制造模型. 其中, 原始制造商作为供应链主导者, 可以通过平衡销售新产品利润和收取授权再制造费用来增强自身竞争优势, 再制造商通过生产销售再制造产品获利. 因此, 原始制造商和再制造商利润函数为

$$\pi_{Nn} = (p_{Nn} - c_n) q_{Nn} + z_N q_{Nr} \quad (1)$$

$$\pi_{Nr} = (p_{Nr} - c_r) q_{Nr} - z_N q_{Nr} - \frac{k}{2} q_{Nr}^2 \quad (2)$$

式 (1) 中 $(p_{Nn} - c_n) q_{Nn}$ 表示在不考虑碳交易政策下原始制造商生产销售新产品所获利润, $z_N q_{Nr}$ 表示授权再制造模式下原始制造商所得授权费用. 式 (2) 中 $(p_{Nr} - c_r) q_{Nr} - z_N q_{Nr}$ 表示授权再制造商生产销售再制造产品获得的收益, $\frac{k}{2} q_{Nr}^2$ 表示再制造商回收废旧产品的成本.

2) 基于历史排放分配法的碳交易政策 (L 模式)

历史排放法下, 政府基于“总量控制 - 交易”原则来限制原始制造商碳排放总量, 原始制造商可以通过基于政府分配的免费碳配额调节减排水平、从碳市场中购买的碳配额以及减排节余的碳配额来实现有效的碳排放权调度, 从而增加碳交易利润; 并通过调节授权费用影响再制造决策, 获取再制造利润. 原始制造商和再制造商利润函数为

$$\pi_{Ln} = (p_{Ln} - c_n) q_{Ln} + z_L q_{Lr} - \frac{\beta}{2} \lambda_L^2 -$$

$$[(e_n - h\lambda_L)q_{Ln} - T]Q \quad (3)$$

$$\pi_{Lr} = (p_{Lr} - c_r)q_{Lr} - z_L q_{Lr} - \frac{k}{2}q_{Lr}^2 \quad (4)$$

式(3)中 $\frac{\beta}{2}\lambda_L^2$ 表示原始制造商的减排成本, $(e_n - h\lambda_L)$ 表示历史排放分配法下原始制造商进行减排后生产单位新产品的碳排放量, 当 $(e_n - h\lambda_L)q_{Ln} > T$ 时, $[(e_n - h\lambda_L)q_{Ln} - T]Q$ 表示原始制造商在碳交易市场上购买碳配额的费用, 当 $(e_n - h\lambda_L)q_{Ln} < T$ 时, $[(e_n - h\lambda_L)q_{Ln} - T]Q$ 表示原始制造商在碳交易市场上出售剩余碳配额的收益. 因此式(3)代表原始制造商生产销售新产品、收取授权费用、碳减排支出以及碳交易市场收益之和. 式(4)中 $(p_{Lr} - c_r)q_{Lr} - z_L q_{Lr} - \frac{k}{2}q_{Lr}^2$ 表示历史排放分配法下授权再制造商进行废旧产品回收再制造所得收益.

3) 基于基准分配法的碳交易政策(U模式)

相较于历史排放法, 基准法下政府基于“一个产品 = 一个基准”原则对原始制造商碳排放属性进行界定, 当单位产品碳排放大于基准碳配额时, 也即 $e_n > \alpha$ 时, 原始制造商属于高碳排放企业, 当 $e_n < \alpha$ 时, 原始制造商属于低碳排放企业. 原始制造商分配的总碳排放配额则为基准碳排放值与产品产量的乘积. 该模式下, 原始制造商与再制造商的利润函数为

$$\pi_{Un} = (p_{Un} - c_n)q_{Un} + z_U q_{Ur} - \frac{\beta}{2}\lambda_U^2 - (e_n - h\lambda_U - \alpha)q_{Un}Q \quad (5)$$

$$\pi_{Ur} = (p_{Ur} - c_r)q_{Ur} - z_U q_{Ur} - \frac{k}{2}q_{Ur}^2 \quad (6)$$

式(5)中 $-(e_n - h\lambda_U - \alpha)q_{Un}Q$ 表示基准分配法下原始制造商的碳交易情况, 当 $(e_n - h\lambda_U) > \alpha$ 时, $-(e_n - h\lambda_U - \alpha)q_{Un}Q$ 表示原始制造商在碳交易市场上购买生产所需碳配额的费用, 反之, 当 $(e_n - h\lambda_U) < \alpha$ 时, $-(e_n - h\lambda_U - \alpha)q_{Un}Q$ 表示原始制造商在碳交易市场上出售剩余碳配额所得收益. $(p_{Un} - c_n)q_{Un} + z_U q_{Ur} - \frac{\beta}{2}\lambda_U^2 - (e_n - h\lambda_U - \alpha)q_{Un}Q$ 代表原始制造商生产销售新产品、收取授权费用、碳减排支出以及碳交易市场收益之和. 式(6)中 $(p_{Ur} - c_r)q_{Ur} - z_U q_{Ur} - \frac{k}{2}q_{Ur}^2$ 表示基准分配

法下授权再制造商进行废旧产品回收再制造所得收益.

3.2 模型求解

依据实际情况, 原始制造商的减排投资系数越大, 其减排成本越高. 因此, 本研究假设原始制造商的减排投资系数 $\beta > \frac{(2\delta + k)(hQ)^2}{2(2\delta + k - \delta^2)}$, 否则, 原始制造商减排成本随其减排投资系数增大而降低, 这与实际情况不符.

本研究用逆向归纳法求解上述模型, 再制造商利润 π_{ir} 关于单位再制造产品价格 p_{ir} 是凹函数, 为便于模型求解, 利用两种产品市场需求函数关系 $p_{ir} = \delta(1 - q_{in} - q_{ir})$ 和 $q_{ir} = \tau_i q_{in}$ 可转化为 π_{ir} 关于 τ_i 是凹函数. 原始制造商利润 π_{in} 关于单位新产品零售价格 p_{in} 和单位授权费用 z_i 是凹函数, 根据需求函数 $p_{in} = 1 - q_{in} - \delta q_{ir}$ 可转化为 π_{in} 关于 q_{in} 和 z_i 是凹函数, 其中, $i \in \{N, L, U\}$.

为求得三种模式下最优解, 给出引理1.

引理1 (i) 式(2) π_{Nr} 关于 τ_N 为凹函数, 把式(2)所得最优解代入式(1), 式(1) π_{Nn} 关于 q_{Nn} 与 z_N 为凹函数;

(ii) 式(4) π_{Lr} 关于 τ_L 为凹函数, 把式(4)所得最优解代入式(3), 式(3) π_{Ln} 关于 q_{Ln} 与 z_L 为凹函数, 再将求得的最优解 $q_{Ln}^*(\lambda_L)$ 代入式(3), 得 π_{Ln} 关于 λ_L 是凹函数;

(iii) 式(6) π_{Ur} 关于 τ_U 为凹函数, 把式(6)所得最优解代入式(5), 式(5) π_{Un} 关于 q_{Un} 与 z_U 为凹函数, 再将求得的最优解 $q_{Un}^*(\lambda_U)$ 代入式(5), 得 π_{Un} 关于 λ_U 是凹函数.

引理1及后续结论的证明见附录. 根据引理1, 可得结论1.

结论1 三种不同模式下的最优解, 具体见表3.

3.3 模型分析

命题1 碳交易政策下原始制造商进行碳减排的边界条件.

1) 基于历史排放法分配碳配额时, 原始制造商碳减排的边界条件: $\frac{Wh^2Q}{2(2\delta - \delta^2 + k)\beta} < e_n <$

$$\frac{W}{(2\delta + k)Q};$$

2) 基于基准分配法分配基准碳配额时, 原始

制造商碳减排的边界条件: $\frac{Wh^2Q}{2(2\delta - \delta^2 + k)\beta} +$

$$\alpha < e_n < \frac{W}{(2\delta + k)Q} + \alpha.$$

命题 1 表明, 无论政府基于历史排放法分配总量碳配额, 还是基于基准法分配基准碳配额, 为激励原始制造商减排投资, 必须考虑原始制造商生产单位新产品的碳排放量, 从而制定最佳碳交易价格与碳配额. 另一方面, 过高的初始碳排放造成原始制造商即使提高减排技术也难以达到政府要求或获得预期低碳优势, 因此其将放弃产品生产而倾向于通过出售碳排放权以获得收益. 当单位新产品碳排放小于某一阈值时, 再制造产品低碳优势相对较小, 原始制造商减排投资动机不足,

且该情况下的减排投资成本大于购买额外碳配额支出, 其倾向于在碳市场上购买短缺的碳配额. 因此, 只有当单位新产品的碳排放处于一定的区间范围内, 原始制造商才愿意减排投资增强新产品低碳竞争优势, 带来最大效益.

管理启示: 原始制造商进行减排投资决策将结合自身产品碳排放现状进行综合衡量, 只有当单位新产品碳排放量处于一定范围时, 减排收益大于投资与碳配额购买成本, 原始制造商才会进行减排投资. 同时, 政府应结合企业现状, 合理降低碳价, 扩大企业参与减排的边界条件, 并结合碳减排补贴与技术支持等手段, 减少企业碳减排障碍, 政企合作共同促进碳减排工作的开展.

命题 2 碳减排水平对最优解的影响.

表 3 不同模式下的最优解

Table 3 The optimal solution of different modes

符号	N 模型	L 模型	U 模型
λ_i^*	—	$\frac{[(2\delta - \delta^2 + k) - (2\delta + k)(c_n + e_n Q) + \delta c_r] h Q}{2(2\delta - \delta^2 + k)\beta - (2\delta + k)(h Q)^2}$	$\frac{[(2\delta - \delta^2 + k) - (2\delta + k)(c_n + e_n Q - \alpha Q) + \delta c_r] h Q}{2(2\delta - \delta^2 + k)\beta - (2\delta + k)(h Q)^2}$
p_{in}^*	$\frac{1 + c_n}{2}$	$\frac{1 + c_n + (e_n - h\lambda_i^*) Q}{2}$	$\frac{1 + c_n + (e_n - h\lambda_U^* - \alpha) Q}{2}$
p_{ir}^*	$\delta \left[\frac{1}{2} + \frac{(\delta + k)c_n + (1 - \delta)c_r}{2(2\delta - \delta^2 + k)} \right]$	$\delta \left[\frac{1}{2} + \frac{(\delta + k)[c_n + (e_n - h\lambda_i^*) Q] + (1 - \delta)c_r}{2(2\delta - \delta^2 + k)} \right]$	$\delta \left[\frac{1}{2} + \frac{(\delta + k)[c_n + (e_n - h\lambda_U^* - \alpha) Q] + (1 - \delta)c_r}{2(2\delta - \delta^2 + k)} \right]$
q_{in}^*	$\frac{1}{2} + \frac{\delta c_r - (2\delta + k)c_n}{2(2\delta - \delta^2 + k)}$	$\frac{1}{2} + \frac{\delta c_r - (2\delta + k)[c_n + (e_n - h\lambda_i^*) Q]}{2(2\delta - \delta^2 + k)}$	$\frac{1}{2} + \frac{\delta c_r - (2\delta + k)[c_n + (e_n - h\lambda_U^* - \alpha) Q]}{2(2\delta - \delta^2 + k)}$
q_{ir}^*	$\frac{\delta c_n - c_r}{2(2\delta - \delta^2 + k)}$	$\frac{\delta [c_n + (e_n - h\lambda_i^*) Q] - c_r}{2(2\delta - \delta^2 + k)}$	$\frac{\delta [c_n + (e_n - h\lambda_U^* - \alpha) Q] - c_r}{2(2\delta - \delta^2 + k)}$
z_i^*	$\frac{\delta - c_r}{2}$	$\frac{\delta - c_r}{2}$	$\frac{\delta - c_r}{2}$
π_{in}^*	$\frac{(1 - c_n)^2}{4} + \frac{(\delta c_n - c_r)^2}{4(2\delta - \delta^2 + k)}$	$\frac{[1 - c_n - (e_n - h\lambda_i^*) Q]^2}{4} + \frac{[\delta c_n + \delta(e_n - h\lambda_i^*) Q - c_r]^2}{4(2\delta - \delta^2 + k)} - \frac{\beta}{2} \lambda_i^{*2} + TQ$	$\frac{[1 - c_n - (e_n - h\lambda_U^* - \alpha) Q]^2}{4} + \frac{[\delta c_n + \delta(e_n - h\lambda_U^* - \alpha) Q - c_r]^2}{4(2\delta - \delta^2 + k)} - \frac{\beta}{2} \lambda_U^{*2}$
π_{ir}^*	$\frac{(2\delta + k)(\delta c_n - c_r)^2}{8(2\delta - \delta^2 + k)^2}$	$\frac{(2\delta + k)[\delta c_n + \delta(e_n - h\lambda_i^*) Q - c_r]^2}{8(2\delta - \delta^2 + k)^2}$	$\frac{(2\delta + k)[\delta c_n + \delta(e_n - h\lambda_U^* - \alpha) Q - c_r]^2}{8(2\delta - \delta^2 + k)^2}$
τ_i^*	$\frac{\delta c_n - c_r}{2\delta - \delta^2 + k - (2\delta + k)c_n + \delta c_r}$	$\frac{\delta [c_n + (e_n - h\lambda_i^*) Q] - c_r}{2\delta - \delta^2 + k - (2\delta + k)[c_n + (e_n - h\lambda_i^*) Q] + \delta c_r}$	$\frac{\delta [c_n + (e_n - h\lambda_U^* - \alpha) Q] - c_r}{2\delta - \delta^2 + k - (2\delta + k)[c_n + (e_n - h\lambda_U^* - \alpha) Q] + \delta c_r}$

$$(i) \frac{\partial p_{in}^*}{\partial \lambda_i} < 0, \frac{\partial p_{ir}^*}{\partial \lambda_i} < 0, \frac{\partial q_{in}^*}{\partial \lambda_i} > 0, \frac{\partial q_{ir}^*}{\partial \lambda_i} < 0, \quad 0, \frac{\partial \pi_{ir}^*}{\partial \lambda_i} < 0.$$

$$\frac{\partial (q_{in}^* + q_{ir}^*)}{\partial \lambda_i} > 0, \frac{\partial \tau_i^*}{\partial \lambda_i} < 0, \frac{\partial z_i^*}{\partial \lambda_i} = 0.$$

$$(ii) \text{ 当 } \lambda_i < \lambda_i^* \text{ 时, } \frac{\partial \pi_{in}^*}{\partial \lambda_i} > 0 \text{, 否则, } \frac{\partial \pi_{in}^*}{\partial \lambda_i} \leq$$

命题 2 表明, 原始制造商进行减排投资时, 新产品碳排放量减少, 再制造产品的低碳优势相对减弱, 促使新产品需求量增加, 而作为替代品的再制造产品需求量与废旧产品回收率均降低. 因而

再制造商将降低产品零售价格,以“薄利多销”策略应对新产品的市场竞争压力,市场竞争促使原始制造商采取降价措施吸引消费者,因此激发了消费者对供应链产品的总需求.原始制造商减排水平越高,对再制造商不利影响越大,其收益越低.与文献[27]类似,本研究发现对原始制造商而言,存在一个最佳减排水平使其收益最大,当减排水平大于该最佳值时,原始制造商减排投资的规模效应递减,减排投资收益难以弥补减排成本,因此其总收益随减排水平提高而降低.但文献[27]仅考虑独立再制造情形,本研究则基于授权再制造模式进一步发现,原始制造商为平衡两种产品市场份额,将保持授权费用不变,从而获得新产品与授权再制造两方收益.

管理启示:只要低碳减排效益高于投资成本,原始制造商便会进行减排投资.原始制造商减排有利于提高市场活跃度并促进产品之间的有效竞争,进而激发消费者购买力,增加消费者福利.同时,政府应充分发挥碳交易市场干预及产品市场竞争作用,采取消费者购买补贴、再制造技术补贴等提高再制造商生产积极性,杜绝厂商之间恶性竞争,稳定市场秩序.

命题3 不同碳配额分配方法下,原始制造商减排水平大小: $\lambda_L^* < \lambda_U^*$, 且 $\frac{\partial(\lambda_U^* - \lambda_L^*)}{\partial Q} > 0$.

由命题3可知,相较于历史排放分配法,基准法下原始制造商减排水平更高,且碳交易价格愈高,两种碳配额分配法下的原始制造商减排水平差距愈大.历史排放法根据企业原始碳排放数据确定总碳排放配额,该方法对高碳排原始制造商的减排激励强度较低.原始制造商一方面可以通过减排投资行为减少单位产品碳排放,另一方面能够控制自身产量,并通过调整授权费用分享再制造收益.两种方式均为原始制造商提供了应对政府减排压力的途径.而基准法根据新产品碳排放数据确定单位产品的碳排放基准值,超过该值的原始制造商不得不进行减排投资,因此基准法对原始制造商减排投资的激励效果更强.该结论也在文献[11, 28]中得到证实,但不同的是,本研究进一步发现碳交易价格越高,历史排放法下原

始制造商降低新产品产量而提高授权费用的动机越强,而基准法下减排成本较低的高碳排企业参与减排投资的积极性越强,因此两种方法下企业减排水平之差与碳交易价格呈正相关.

管理启示:政府可以基于基准分配法制定碳排放配额并适当提高碳交易价格,引导原始制造商参与减排投资,从而提高企业减排积极性,达到最佳减排效果.政策制定过程中应进行充分试点工作,具体观测产品实际碳排放数据进行科学有效决策.同时可以依据不同产品特性以及行业整体的减排区间分配差异化碳配额,以提高政策的普适性与科学性.

命题4 两种碳配额分配方法对单位产品零售价格影响.

- (i) 当 $e_n > \alpha + V$ 时, $p_{Nn}^* < p_{Un}^* < p_{Ln}^*, p_{Nr}^* < p_{Ur}^* < p_{Lr}^*$;
- (ii) 当 $V < e_n \leq \alpha + V$ 时, $p_{Un}^* \leq p_{Nn}^* < p_{Ln}^*, p_{Ur}^* \leq p_{Nr}^* < p_{Lr}^*$;
- (iii) 当 $e_n \leq V$ 时, $p_{Un}^* < p_{Ln}^* \leq p_{Nn}^*, p_{Ur}^* < p_{Lr}^* \leq p_{Nr}^*$.

命题4表明,历史排放法下的两种产品单位零售价格均高于基准分配法下的单位零售价格,这是因为历史排放法下生产总碳排放量受到政府约束的原始制造商可以自由选择购买多余碳排放权或减少产品产量,这两种方式均直接导致新产品零售价格提高.而基准分配法下,结合命题3可知,原始制造商生产受到行业基准碳配额影响,其将进行减排投资以降低碳排放,基于长远收益考虑,原始制造商将凭借低碳竞争优势扩展市场份额.因此,新产品单位零售价格在历史排放法下更高,而作为市场竞争方的授权再制造商将随之进行价格调整以维持自身收益.与无碳交易政策时相比,单位新产品碳排放量越高,两种碳配额分配方法下的单位产品零售价格越高,这是因为,单位新产品碳排放量越高,碳交易政策下原始制造商的减排压力越大,高额减排投资费用造成新产品生产成本直接上升.

管理启示:政府对制造商提出碳排放要求并不总是会造成产品价格的提高,增加消费者购买压力.从消费者角度出发,政府应结合企业自身初始生产碳排放能力进行制定基准碳配额分配方

法,并结合碳市场交易机制,为企业生产减排提供多渠道的同时,减少消费者购买负担,提高市场活力。

命题 5 两种碳配额分配方法对两种产品销售量影响。

(i) 当 $e_n > \alpha + V$ 时, $q_{Ln}^* < q_{Un}^* < q_{Nr}^* < q_{Ur}^* < q_{Lr}^*$;

(ii) 当 $V < e_n \leq \alpha + V$ 时, $q_{Ln}^* < q_{Nr}^* \leq q_{Un}^*$, $q_{Ur}^* \leq q_{Nr}^* < q_{Lr}^*$;

(iii) 当 $e_n \leq V$ 时 $q_{Nr}^* \leq q_{Ln}^* < q_{Un}^*$, $q_{Ur}^* < q_{Lr}^* \leq q_{Nr}^*$ 。

与文献[29]中基准法更有利于提高企业产量的观点一致,命题 5 表明相较于历史排放法,基准分配法下新产品的销售量更高,但不同于文献[29]仅考虑碳交易下一个垄断企业的情形,本研究考虑新产品与再制造产品市场竞争关系,进一步发现再制造产品销售量在基准法下更低。结合命题 4 可知,历史排放法下原始制造商更倾向于提高新产品单位零售价格,因而该政策导致新产品需求量减少,再制造产品需求量提高。而在基准分配法下,原始制造商将采取“薄利多销”的策略扩展新产品市场,市场竞争作用将直接导致再制造产品的销售量下降。此外,对比有无碳交易政策下的产品销售量发现,新产品单位碳排放较大时,两种碳配额分配方法下的新产品销售量均低于无碳交易政策时的销售量,而再制造产品销售量则在碳交易下更高。造成这一现象的原因主要是:新产品单位碳排放越高,原始制造商的减排投资压力越大,新产品减排投资导致消费者购买成本上升,再制造产品销售量更高。

管理启示: 授权再制造模式下,虽然占据供应链主导地位的原始制造商能够通过授权费用参与再制造商的生产决策与收益分享,但两个制造商在产品市场上互为竞争对手,共同竞争定量的市场份额,因此原始制造商应结合自身实际碳排放水平与碳交易政策选择最佳减排投资水平,保证自身销售量。

命题 6 两种碳配额分配方法对单位授权费用影响: $z_N^* = z_L^* = z_U^*$ 。

命题 6 说明,政府基于两种碳配额分配方法的碳交易政策不影响原始制造商的授权费用决策。结合命题 2 可知,授权费用与原始制造商减排

水平无关。一方面,当政府实施碳交易政策后,原始制造商首先考虑采取投资减排方式而非调整授权费用,这是因为增加授权费用不仅增加再制品单位生产成本,带来总授权费用降低的风险,而且由于授权决策的作用周期较长,难以及时有效缓解碳排放约束压力。另一方面,原始制造商减排带来的低碳效应有效增强了新产品的低碳竞争优势,加剧了再制造商面临的市场竞争,因此该环境下原始制造商将保持授权费用不变。

管理启示: 原始制造商碳减排投资能够带来额外的市场效益,而再制造商虽然不受碳排放政策直接影响,但新产品的市场挤压作用造成再制造商收益降低。因此,政府应该提高对再制造行业的政策扶持,增加消费者购买补贴,积极宣传低碳环保消费理念,提高全民低碳再利用意识。再制造商也应积极加大宣传投资并构建再制造合作平台,拓展发展渠道与客户群体。

命题 7 原始制造商授权费用决策对其减排水平和再制造商决策影响。

(i) 单位授权费用对原始制造商减排水平影响: $\frac{\partial \lambda_L^*}{\partial z_L^*} = \frac{\partial \lambda_U^*}{\partial z_U^*} < 0$;

(ii) 单位授权费用对再制造商决策影响:

1) $\frac{\partial p_{Nr}^*}{\partial z_N^*} < 0$, $\frac{\partial q_{Nr}^*}{\partial z_N^*} > 0$, $\frac{\partial \pi_{Nr}^*}{\partial z_N^*} > 0$;

2) 当 $1 - \frac{h^2 Q^2}{2\beta} < 0$ 时, $\frac{\partial p_{Lr}^*}{\partial z_L^*} > 0$, $\frac{\partial p_{Ur}^*}{\partial z_U^*} > 0$,

$\frac{\partial q_{Lr}^*}{\partial z_L^*} < 0$, $\frac{\partial q_{Ur}^*}{\partial z_U^*} < 0$;

当 $0 < 1 - \frac{h^2 Q^2}{2\beta} < \delta$ 时, $\frac{\partial p_{Lr}^*}{\partial z_L^*} > 0$, $\frac{\partial p_{Ur}^*}{\partial z_U^*} > 0$,

$\frac{\partial q_{Lr}^*}{\partial z_L^*} > 0$, $\frac{\partial q_{Ur}^*}{\partial z_U^*} > 0$;

当 $\delta < 1 - \frac{h^2 Q^2}{2\beta}$ 时, $\frac{\partial p_{Lr}^*}{\partial z_L^*} < 0$, $\frac{\partial p_{Ur}^*}{\partial z_U^*} < 0$, $\frac{\partial q_{Lr}^*}{\partial z_L^*} >$

0 , $\frac{\partial q_{Ur}^*}{\partial z_U^*} > 0$;

3) 当 $1 - \frac{h^2 Q^2}{2\beta} < 0$ 且 $\lambda_L^* > \frac{\delta(c_n + e_n Q) - c_r}{\delta h Q}$,

或当 $1 - \frac{h^2 Q^2}{2\beta} > 0$ 且 $\lambda_L^* < \frac{\delta(c_n + e_n Q) - c_r}{\delta h Q}$ 时,

$$\frac{\partial \pi_{Lr}^*}{\partial z_L^*} > 0;$$

$$\text{当 } 1 - \frac{h^2 Q^2}{2\beta} < 0 \text{ 且 } \lambda_U^* > \frac{\delta(c_n + e_n Q - \alpha) - c_r}{\delta h Q},$$

$$\text{或当 } 1 - \frac{h^2 Q^2}{2\beta} > 0 \text{ 且 } \lambda_U^* < \frac{\delta(c_n + e_n Q - \alpha) - c_r}{\delta h Q} \text{ 时,}$$

$$\frac{\partial \pi_{Ur}^*}{\partial z_U^*} > 0.$$

由结论1和命题6可知,原始制造商将按照利润最大化准则决策初始授权费用,且该费用将不受政府碳交易政策影响,当政府实施碳交易政策后,原始制造商将依据碳约束条件与自身生产经营策略、市场环境等制定碳减排措施.而作为初始决策变量,授权费用的高低也会影响原始制造商的减排决策.根据命题7可知,原始制造商减排水平与授权费用负相关,且与政府碳配额分配方法无关.这是因为,授权费用越高,再制造产品收益对原始制造商利润的影响越大,原始制造商投资减排增加新产品收益的动机较弱,反之,授权费用越低,其提高减排水平增加新产品收益的积极性越高.同时,授权费用高低直接关系着再制造生产成本与收益大小.当政府采取碳交易政策时,原始制造商碳减排投资带来的低碳效益间接影响了再制造产品的市场需求.在此情况下,授权费用对再制造商最优决策的影响还与原始制造商碳减排投资系数、碳交易价格以及消费者产品偏好等有关,而增加授权费用并不一定代表再制造商收益减少,当原始制造商减排水平处于某一范围时,新产品低碳减排优势不足以影响消费者对再制造产品偏好,再制造商通过合理调整再制造产品零售价格与生产量能够提高自身收益.

管理启示: 政府实施碳交易政策不能影响原始制造商的授权决策,而初始授权费用的高低将影响其投资减排行为以及再制造商的最优决策.授权费用作为授权再制造供应链中二者竞争博弈的关键因素,不仅影响再制造生产成本,还关系着两种产品的市场竞争地位.

命题8 两种碳配额分配方法对两制造商收益影响.

(i) 碳配额分配方法对原始制造商收益影响:

$$\text{当 } T > \frac{\beta \lambda_L^{*2} + (e_n - h \lambda_L^*) [2W - (2\delta + k)(e_n - h \lambda_L^*) Q]}{2Q} + \frac{2W - (2\delta + k)(e_n - h \lambda_L^*) Q}{4(2\delta - \delta^2 + k)}$$

时 $\pi_{Nr}^* < \pi_{Ln}^*$ 否则 $\pi_{Ln}^* \leq \pi_{Nr}^*$;

$$\text{当 } \alpha < e_n - h \lambda_U^* - \frac{2W + \sqrt{R}}{2(2\delta + k)Q} \text{ 时, } \pi_{Nr}^* < \pi_{Un}^* \text{ 否}$$

则 $\pi_{Un}^* \leq \pi_{Nr}^*$;

$$\text{当 } T > \frac{XQ + 2(1 - c_n)Y}{4} + \frac{\delta^2 XQ - 2\delta(\delta c_n - c_r)Y}{4(2\delta - \delta^2 + k)}$$

$$\frac{\beta(\lambda_L^{*2} - \lambda_U^{*2})}{2Q} \text{ 时, } \pi_{Un}^* < \pi_{Ln}^* \text{ 否则 } \pi_{Ln}^* \leq \pi_{Un}^*.$$

(ii) 碳配额分配方法对再制造商收益影响:

当 $e_n > V$ 时, $\pi_{Nr}^* < \pi_{Lr}^*$ 否则 $\pi_{Lr}^* \leq \pi_{Nr}^*$; 当 $e_n > \alpha + V$ 时, $\pi_{Nr}^* < \pi_{Ur}^*$ 否则 $\pi_{Ur}^* \leq \pi_{Nr}^*$; $\pi_{Ur}^* < \pi_{Lr}^*$.

由命题8可知,政府能够通过调整碳配额分配以及碳交易价格等参数影响制造商生产决策,不同碳配额分配方法对两种产品制造商收益影响不同.政府的碳配额约束并不一定导致原始制造商收益减少.这是因为,碳交易政策间接扶持再制造行业发展,原始制造商受到政府碳排放约束以及再制造产品市场挤压的双重作用后,将选择提高减排技术、引进环保设备等方式进行节能减排.这与文献[30]中企业能够通过投资减排技术来提高利润的观点一致.但与文献[30]不同,本研究通过对比不同碳配额分配机制下制造商最佳收益,进一步发现两种碳配额分配方法下的原始制造商收益大小受到自身碳减排投资水平及不同碳配额分配的影响,但原始制造商均能够通过制定合理的碳减排投资水平增加自身收益.对于再制造商而言,政府碳配额分配对其收益的影响主要在于新产品低碳优势造成的市场竞争作用.结合命题4、命题5可知,历史排放分配法下再制造产品的单位零售价格、销售量均高于基准法,因此再制造商收益始终在历史排放法下更高.

管理启示: 碳交易政策对两种产品制造商的影响最终体现在利润分配方面,因此政府碳配额的分配机制至关重要.原始制造商通过碳减排投资及调整产销策略可以在降低碳排放基础上增加收益,市场竞争进一步激励再制造商调整生产行为,最终实现低碳循环发展的同时增加供应链收益.

借鉴文献 [27, 32] 可知, 没有碳交易政策约束时, 两种产品制造商对环境的影响为: $E_N = e_n q_{Nn}^* + e_r q_{Nr}^*$. 原始制造商对新产品进行减排后, 生产单位新产品的碳排放量可减少 $h\lambda_i^*$, 此时两种碳配额分配方法下, 两种产品制造商对环境的影响为: $E_i = (e_n - h\lambda_i^*) q_{in}^* + e_r q_{ir}^*$, $i \in \{L, U\}$.

命题 9 两种碳配额分配方法对环境的影响.

(i) 当 $\Delta_1 > 0$ 且 $\frac{W - 2(2\delta + k)e_n Q + \delta e_r Q - \sqrt{\Delta_1}}{-2(2\delta + k)hQ} < \lambda_L^* < \frac{W - 2(2\delta + k)e_n Q + \delta e_r Q + \sqrt{\Delta_1}}{-2(2\delta + k)hQ}$ 时, $E_L > E_N$, 否则 $E_L \leq E_N$;

(ii) 当 $\Delta_2 > 0$ 且 $\frac{-W + (2\delta + k)(2e_n - \alpha)Q - \delta e_r Q - \sqrt{\Delta_2}}{2(2\delta + k)hQ} < \lambda_U^* < \frac{-W + (2\delta + k)(2e_n - \alpha)Q - \delta e_r Q + \sqrt{\Delta_2}}{2(2\delta + k)hQ}$ 时, $E_U > E_N$, 否则 $E_U \leq E_N$;

(iii) 若 $\lambda_U^* > \frac{(2\delta + k)e_n - \delta e_r}{(2\delta + k)h}$:
 当 $\alpha > \frac{h(\lambda_U^* - \lambda_L^*)Z}{[\delta e_r - (2\delta + k)(e_n - h\lambda_U^*)]Q}$ 时, $E_L > E_U$, 否则 $E_L \leq E_U$;
 若 $\lambda_U^* < \frac{(2\delta + k)e_n - \delta e_r}{(2\delta + k)h}$:
 当 $\alpha < \frac{h(\lambda_U^* - \lambda_L^*)Z}{[\delta e_r - (2\delta + k)(e_n - h\lambda_U^*)]Q}$ 时, $E_L > E_U$, 否则 $E_L \leq E_U$.

命题 9 说明, 两种碳配额分配方法对环境的影响大小受到原始制造商碳减排投资系数、碳交易价格、政府基准碳配额等参数影响. 与文献 [30, 31] 一致, 本研究认为在一定条件下, 高碳配额能够激励制造商减排, 因此政府能够基于基准法设定较高基准碳配额以有效激励原始制造商碳减排投资. 此时基准分配法的环境效益高于历史排放法. 但与文献 [30, 31] 不同, 本研究基于供应链整体角度进一步探究碳减排政策效果, 发现两种碳配额分配方法并不一定能够降低供应链对环境的影响. 只有原始制造商的减排水平满足一定的条件时, 才能有效减少两制造商生产碳排放. 由命题 5 可知, 投资减排增加了新产品低碳优势, 新产品销售量上升, 而再制造产品产量降低所减少

的碳排放难以平衡新产品生产碳排放. 因此, 只有当原始制造商减排水平、新产品单位碳排放、碳交易价格等因素满足一定条件时, 碳配额分配才能减少供应链总环境影响, 达到政府低碳减排目标.

管理启示: 政府实施碳交易政策的目标在于降低行业总碳排放. 无论哪种碳配额分配方法, 政府都能通过设定合理的碳交易价格、碳配额参数来影响制造商生产行为从而减少碳排放污染. 此外, 引导制造商进行碳减排投资能够从根源直接减少碳排放, 达到长远持久的减排效果.

4 数值分析

为进一步验证上述所得结论并深入分析碳交易价格 Q 、消费者偏好 δ 等因素对供应链决策及环境影响, 研究不同碳配额分配方法对授权再制造的影响, 本研究以废旧发动机回收再制造为例, 利用 Matlab 2018 进行数值仿真分析. 参考文献 [32] 知, 较新产品而言, 生产单位再制造产品能够在节约 50% 成本的同时, 降低 80% 环境影响. 因此借鉴文献 [33], 本节假设 $c_n = 0.2$, $c_r = 0.1$, $e_n = 1$, $e_r = 0.2$, $k = 1.1$, $h = 1$, $\alpha = 0.8$, $T = 3$, $\beta = 1.2$.

4.1 碳交易价格和消费者偏好对原始制造商减排水平的影响

根据图 2, 基准分配法下原始制造商的减排水平与碳交易价格呈正相关. 这是因为基准分配法对原始制造商的约束与单位产品碳排放和新产品销售量相关, 且碳交易价格越高, 原始制造商购买碳配额的边际成本越高, 但其减排节约的边际收益增加, 因此, 原始制造商的减排动机随着碳交易价格增加而增强. 而历史排放分配法下原始制造商减排水平随碳交易价格增加呈先增后减趋势, 即存在一个碳交易价格, 使得原始制造商的减排水平达到最高. 这是因为, 在历史排放分配法下, 当碳交易价格高于某一阈值, 减排带来的边际收益降低, 不足以弥补减排成本, 导致收益降低, 因此原始制造商将放弃提高减排水平而选择减少生产并出售碳配额以获取收益. 此外, 由图 2 可知, 历史排放分配法下原始制造商的减排水平始终低于基准分配法下的减排水平, 证实命题 3, 具

体原因分析参照命题3. 由图2可知, 消费者偏好对原始制造商碳减排水平影响, 具体见性质1.

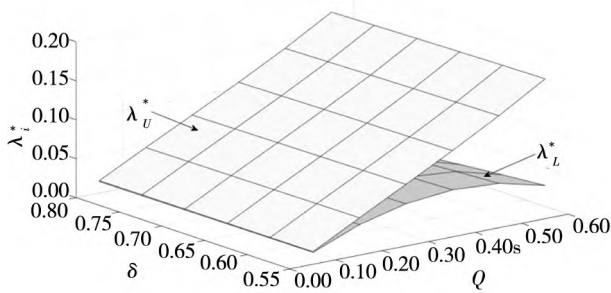


图2 Q和δ对原始制造商碳减排水平影响

Fig. 2 The effect of Q and δ on OEM carbon emission reduction level

性质1 消费者偏好对原始制造商减排水平

影响: $\frac{\partial \lambda_U^*}{\partial \delta} < 0, \frac{\partial \lambda_L^*}{\partial \delta} < 0.$

4.2 碳交易价格和消费者偏好对产品单位零售价格及授权费用影响

由图3和图4可知, 基准分配法下新产品与再制造产品的单位零售价格随碳交易价格上升呈先增后减趋势, 而历史排放分配法下, 两种产品单位零售价格随碳交易价格上升而增加. 历史排放分配法下原始制造商将提高新产品单位零售价格以弥补减排与碳交易成本, 而授权再制造商受到市场竞争作用将跟随原始制造商提高产品单位零售价格. 基准分配法下, 初期原始制造商将提高产品单位零售价格来弥补生产成本, 结合图2可知, 原始制造商减排水平与碳交易价格正相关, 当其减排水平较高时, 减排效应带来的低碳优势增加, 其将会采取降价措施, 通过薄利多销以提高收益. 此外可知, 历史排放分配法下两种产品的单位零售价格均高于基准分配法, 这与命题4一致, 在此不予详细叙述. 结合命题6, 授权费用不受政府碳交易政策的影响, 即原始制造商将通过签订专利授权合同等方式对再制造商收取固定授权费用. 由图3~图5可知, 消费者偏好对单位零售价格和授权费用影响, 具体见性质2.

性质2 消费者偏好对单位零售价格和单位

授权费用的影响: $\frac{\partial p_{Un}^*}{\partial \delta} > 0, \frac{\partial p_{Ln}^*}{\partial \delta} > 0, \frac{\partial p_{Nn}^*}{\partial \delta} = 0,$

$\frac{\partial p_{Ur}^*}{\partial \delta} > 0, \frac{\partial p_{Lr}^*}{\partial \delta} > 0, \frac{\partial p_{Nr}^*}{\partial \delta} > 0, \frac{\partial z_i^*}{\partial \delta} > 0.$

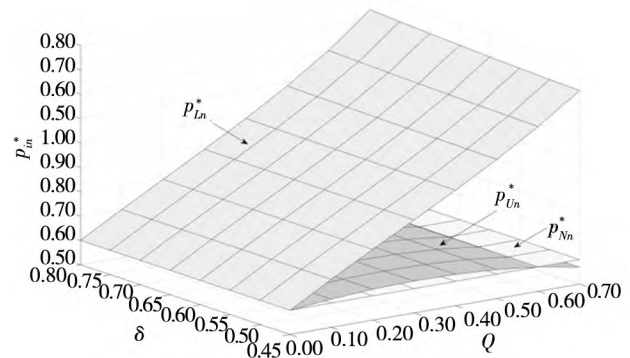


图3 Q和δ对新产品单位零售价格影响

Fig. 3 The effect of Q and δ on the unit retail price of new products

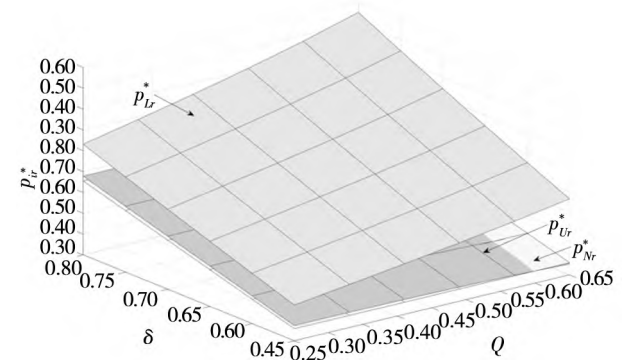


图4 Q和δ对再制造产品单位零售价格影响

Fig. 4 The effect of Q and δ on the unit retail price of remanufactured products

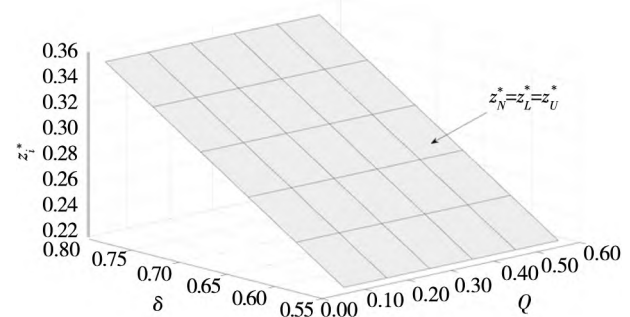


图5 Q和δ对单位授权费用影响

Fig. 5 The effect of Q and δ on the unit licensing fee

4.3 碳交易价格和消费者偏好对产品销售量影响

由图6和图7可知, 历史排放分配法下, 新产品销售量与碳交易价格负相关, 而再制造产品销售量与碳交易价格呈正相关关系. 这是因为碳交易价格上升引起原始制造商提高产品单位零售价格, 新产品销售量降低, 消费者选择更具低碳优势与价格优势的再制造产品代替新产品. 基准分配法下, 新产品销售量随碳交易价格增加呈先减后增趋势, 而再制造产品销售量呈先增后减趋势. 结合图3可知, 基准分配法下新产品单位零售价格随

碳交易价格的增加先增后减,因此新产品销售量与其单位零售价格负相关呈先减后增趋势.同时,与命题 5 所得结论一致,与历史排放法相比,基准分配法下的新产品销售量更高,再制造产品销售量较低.由图 6 和图 7 可知,消费者偏好对销售量影响,具体见性质 3.

性质 3 消费者偏好对销售量影响: $\frac{\partial q_{Un}^*}{\partial \delta} < 0$
 $0, \frac{\partial q_{Ln}^*}{\partial \delta} < 0, \frac{\partial q_{Nn}^*}{\partial \delta} < 0, \frac{\partial q_{Ur}^*}{\partial \delta} > 0, \frac{\partial q_{Lr}^*}{\partial \delta} > 0, \frac{\partial q_{Nr}^*}{\partial \delta} > 0.$

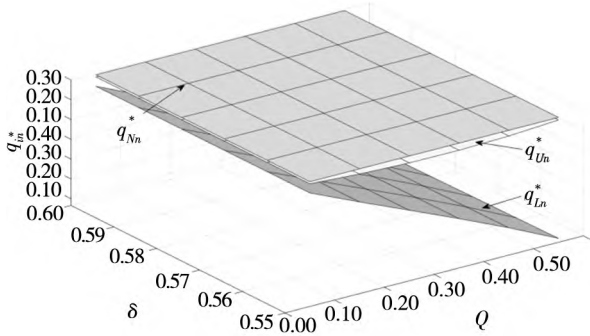


图 6 Q 和 δ 对新产品销售量影响

Fig. 6 The effect of Q and δ on sales volume of new products

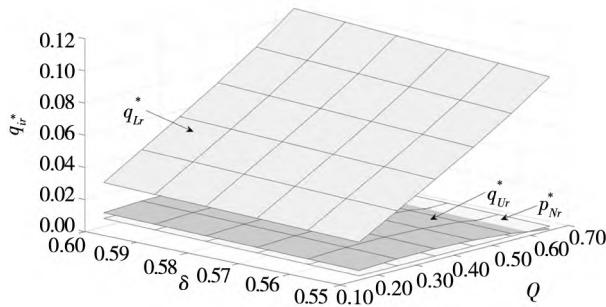


图 7 Q 和 δ 对再制造产品销售量影响

Fig. 7 The effect of Q and δ on sales volume of remanufactured products

4.4 碳交易价格和消费者偏好对制造商收益影响

由图 8 和图 9 可知,历史排放分配法下两种产品制造商收益均随碳交易价格提高而增加.碳交易价格增加,原始制造商可以通过提高碳减排投资水平及减少生产量等方式缓解碳排放成本压力.碳交易价格上升导致新产品单位零售价格提高,同时再制造产品销售量大幅增加导致总授权费用增加.此外,当碳交易价格较高时,原始制造商能够通过减少生产以出售剩余碳配额资源获取碳交易利润.而在授权费用固定的情况下,再制造产品单位零售价格以及销售量的大幅增加直接带

来再制造商收益的提高.基准分配法下,原始制造商收益随碳交易价格上升呈递减趋势,再制造商收益呈递增趋势,但相较于原始制造商而言,再制造商收益受碳交易价格影响不明显.此外,在本节数值假设情况下,基准分配法下的两种制造商收益均最低,这与命题 8 所得一致,具体分析参照命题 8.由图 8 和图 9 可知,消费者偏好对收益影响,具体见性质 4.

性质 4 消费者偏好对收益影响: $\frac{\partial \pi_{Un}^*}{\partial \delta} < 0$,
 $\frac{\partial \pi_{Ln}^*}{\partial \delta} < 0, \frac{\partial \pi_{Nn}^*}{\partial \delta} < 0, \frac{\partial \pi_{Ur}^*}{\partial \delta} > 0, \frac{\partial \pi_{Lr}^*}{\partial \delta} > 0, \frac{\partial \pi_{Nr}^*}{\partial \delta} > 0.$

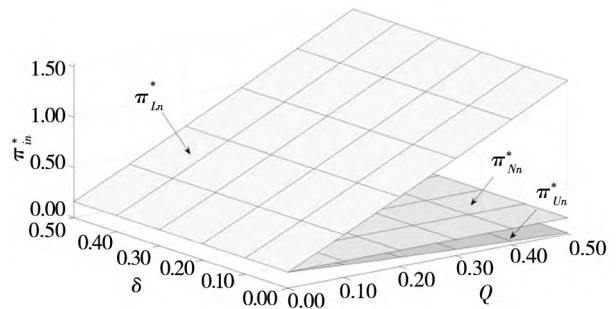


图 8 Q 和 δ 对原始制造商收益影响

Fig. 8 The effect of Q and δ on profit of OEM

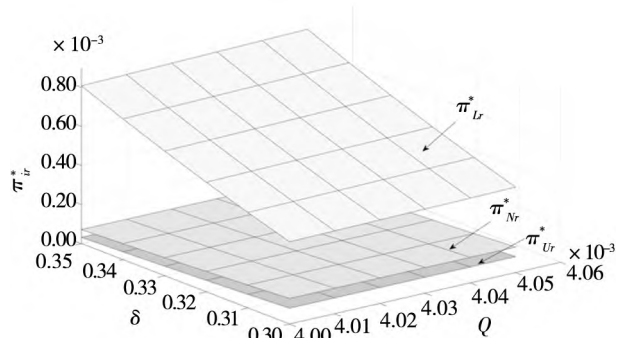


图 9 Q 和 δ 对再制造商收益影响

Fig. 9 The effect of Q and δ on profit of remanufacturer

4.5 碳交易价格和消费者偏好对环境的影响

由图 10 可知,两种碳配额分配方法下,两种产品制造商对环境的总影响均与碳交易价格负相关,也即,政府提高碳交易价格有助于减少企业碳排放污染.这与文献 [32] 所得结论一致.这是因为碳交易政策促使原始制造商进行碳减排投资从而降低单位新产品碳排放.基准分配法下原始制造商减排水平随碳交易价格增加而提高,单位新产品的碳排放大幅降低,而历史排放法下新产品生产量随碳交易价格增加而降低,尽管此时再制

造产品销售量增加,但相较于无碳交易政策而言,原始制造商通过碳减排投资节约的碳排放量足以抵消具有低碳优势的再制造产品产量增加,因此两种政策均有利于减少两种产品制造商对环境的影响。由图 10 可知,消费者偏好对环境造成影响,具体见性质 5。

性质 5 消费者偏好对环境的影响: $\frac{\partial E_U}{\partial \delta} < 0$, $\frac{\partial E_L}{\partial \delta} < 0$, $\frac{\partial E_N}{\partial \delta} < 0$ 。

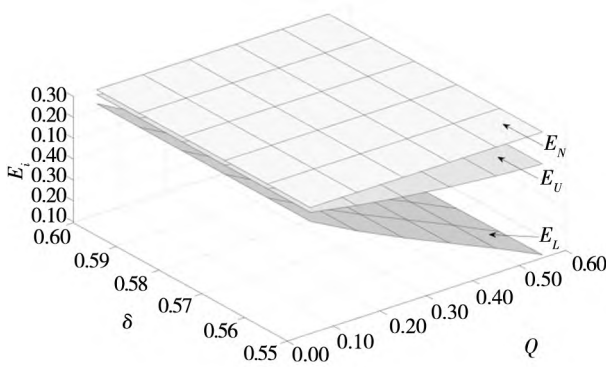


图 10 Q 和 δ 对环境的影响

Fig. 10 The effect of Q and δ on the environment

5 结束语

本研究为探讨政府不同碳配额分配方法对授权再制造供应链的影响,构建了政府不实施碳交易政策、基于历史排放分配法下的碳交易政策、基于基准分配法下的碳交易政策三种情况下原始制造商与授权再制造商的博弈模型,研究主要得出以下结论。

1) 原始制造商提高碳减排投资水平能够降低两种产品单位零售价格,增加市场总需求,但只有单位新产品碳排放量与碳交易价格、基准碳配额满足一定条件时,原始制造商才会进行碳减排投资。基准分配法更有利于增加新产品销售量,减少再制造产品销售量,更能激发原始制造商减排积极性。

2) 政府实施碳交易政策不仅间接影响再制造商生产决策,还影响两种产品制造商的收益分配。当原始制造商减排水平处于某一范围时,再制造商通过调整产品价格与生产量来提高自身收益,且历史排分配法下再制造商收益始终大于基

准分配法。当碳配额以及碳交易价格满足一定条件时,碳交易政策能够促进各方收益共同增加。但两种碳配额分配方法均不一定能降低供应链总环境影响,这与原始制造商碳减排投资水平、碳交易价格等因素相关。

3) 通过数值仿真分析可知,碳交易价格以及消费者对再制造产品偏好也会对两种产品制造商的最优决策产生一定影响,基于基准分配法的碳交易政策更有利于减排工作的顺利开展,合理提高碳交易价格能够增强原始制造商的减排动力,而消费者对再制造产品偏好越强,原始制造商减排动机越弱,其将通过增加授权费用代替自身碳减排投资。

管理启示: 基于政府角度,政策实施碳交易政策时应遵循循序渐进原则,采用渐进式或混合碳配额分配方法,依据阶段性减排目标以及企业碳排放现状合理分配碳配额,初期通过历史排放法减少企业减排压力与抵触情绪,中后期采用基准法激发企业低碳生产动力。此外,在积极进行低碳环保观念宣传引导的同时,完善碳交易市场行业规范与监管体系,充分发挥碳交易市场作用,有效结合政府监管和市场工具,实现降低碳排放量的目标。

基于制造商角度,原始制造商碳减排投资应考虑投入产出比、社会责任以及消费者市场,从而实现可持续发展。作为供应链主导者,其能够通过调整授权费用协调利润分配,为自身碳减排投资提供保障。再制造商应积极进行减排技术研发,提高自身低碳优势稳定顾客群体,或通过低碳技术共享加强供应链合作,促进供应链协同生产,提高整体收益。

虽然本研究在以往文献基础上进行一定突破创新,但仍存在一定的局限。首先,本研究模型建立基于对原始制造商碳减排投资系数的假设基础上,因此本研究关于两种碳配额分配方法对授权再制造影响的讨论仅在一定条件下适用,未来相关研究可以进一步优化假设条件。其次,本研究仅考虑授权再制造模式,未来研究可以从外包再制造等多种再制造模式展开,或基于多周期模型进行深入分析。最后,本研究仅考虑了两种免费碳配额分配方法,未来研究可以拓展研究拍卖机制等有偿配额分配方法。

参考文献:

- [1] Shao Y, Chen Z. Can government subsidies promote the green technology innovation transformation? Evidence from Chinese listed companies [J]. *Economic Analysis and Policy*, 2022, 74: 716 – 727.
- [2] Sun H, Yang J. Optimal decisions for competitive manufacturers under carbon tax and cap-and-trade policies [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2021, 156: 107244.
- [3] Linghu D, Wu X, Lai K-H, et al. Implementation strategy and emission reduction effectiveness of carbon cap-and-trade in heterogeneous enterprises [J]. *International Journal of Production Economics*, 2022, 248: 108501.
- [4] Chen X, Lin B. Towards carbon neutrality by implementing carbon emissions trading scheme: Policy evaluation in China [J]. *Energy Policy*, 2021, 157: 112510.
- [5] 蓝虹, 陈雅函. 碳交易市场发展及其制度体系的构建 [J]. *改革*, 2022, 335(1): 57 – 67.
Lan Hong, Chen Yahan. Development and system construction of carbon trading market [J]. *Reform*, 2022, 335(1): 57 – 67. (in Chinese)
- [6] Shi B, Li N, Gao Q, et al. Market incentives, carbon quota allocation and carbon emission reduction: Evidence from China's carbon trading pilot policy [J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 319: 115650.
- [7] Peng H, Qi S, Cui J. The environmental and economic effects of the carbon emissions trading scheme in China: The role of alternative allowance allocation [J]. *Sustainable Production and Consumption*, 2021, 28: 105 – 115.
- [8] Zhang L, Zhang Z. Dynamic analysis of the decision of authorized remanufacturing supply chain affected by government subsidies under cap-and-trade policies [J]. *Chaos, Solitons & Fractals*, 2022, 160: 112237.
- [9] Zhang W, He Y. Optimal policies for new and green remanufactured short-life-cycle products considering consumer behavior [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 214: 483 – 505.
- [10] Zhao J, Wang C, Xu L. Decision for pricing, service, and recycling of closed-loop supply chains considering different remanufacturing roles and technology authorizations [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2019, 132: 59 – 73.
- [11] 令狐大智, 叶飞. 基于历史排放参照的碳配额分配机制研究 [J]. *中国管理科学*, 2015, 23(6): 65 – 72.
Linghu Dazhi, Ye Fei. Quota allocation mechanism based on historical emission of carbon [J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2015, 23(6): 65 – 72. (in Chinese)
- [12] Xu X, Zhang M, Chen L, et al. The region-cap allocation and delivery time decision in the marketplace mode under the cap-and-trade regulation [J]. *International Journal of Production Economics*, 2022, 247: 108407.
- [13] Wang M, Zhao R, Li B. Impact of financing models and carbon allowance allocation rules in a supply chain [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 302: 126794.
- [14] Chen W, Zhang L F, Du H Y. Impact of cap-and-trade mechanisms on investments in renewable energy and marketing effort [J]. *Sustainable Production and Consumption*, 2021, 28(7): 1333 – 1342.
- [15] 宋德勇, 朱文博, 王班班. 中国碳交易试点覆盖企业的微观实证: 碳排放权交易、配额分配方法与企业绿色创新 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2021, 31(1): 37 – 47.
Song Deyong, Zhu Wenbo, Wang Banban. Micro-empirical evidence based on China's carbon trading companies: Carbon emissions trading, quota allocation methods and corporate green innovation [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2021, 31(1): 37 – 47. (in Chinese)
- [16] 张桂涛, 王广钦, 赵欣语, 等. 碳配额交易体系下闭环供应链网络的生产与碳交易策略研究 [J]. *中国管理科学*, 2021, 29(1): 97 – 108.
Zhang Guitao, Wang Guangqin, Zhao Xinyu, et al. Production and carbon trading strategy of closed-loop supply chain network under cap-and-trade system [J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2021, 29(1): 97 – 108. (in Chinese)
- [17] 李璟, 谢家平, 古丽扎尔·艾赛提. 非对称信息下考虑绿色偏好差异化与碳约束的减排定价策略优化 [J]. *中国管理科学*, 2022, <https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2021.1185>.
Li Jing, Xie Jiaping, Gulizhaer Aisaiti. Optimization of emission reducing and pricing decisions based on differentiated

- green preference and carbon constraints under information asymmetry [J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2022, <https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x>. 2021. 1185. (in Chinese)
- [18] Liao H, Wu D, Wang Y, et al. Impacts of carbon trading mechanism on closed-loop supply chain: A case study of stringer pallet remanufacturing [J]. *Socio-Economic Planning Sciences*, 2022, 81: 101209.
- [19] Yang W, Pan Y, Ma J, et al. Effects of allowance allocation rules on green technology investment and product pricing under the cap-and-trade mechanism [J]. *Energy Policy*, 2020, 139: 111333.
- [20] Ma J, Tian Y, Xu T, et al. Dynamic game study of multi-channel supply chain under cap-and-trade regulation [J]. *Chaos, Solitons & Fractals*, 2022, 160: 112131.
- [21] Jin M, Li G, Reimann M. Team of rivals: How should original equipment manufacturers cooperate with independent remanufacturers via authorisation? [J]. *European Journal of Operational Research*, 2022, 296(3): 837-845.
- [22] 曹开颖, 张壮壮, 徐兵, 等. 在碳交易机制下再制造授权选择以及信息披露研究 [J]. *管理工程学报*, 2022, 36(6): 168-181.
Cao Kaiying, Zhang Zhuangzhuang, Xu Bing, et al. Optimal remanufacturing authorization choice and information disclosure strategies in the context of cap-and-trade policy [J]. *Journal of Industrial Engineering and Engineering Management*, 2022, 36(6): 168-181. (in Chinese)
- [23] Zhou Q, Meng C, Yuen K F, et al. Remanufacturing authorization strategy for an original equipment manufacturer-contract manufacturer supply chain: Cooperation or competition? [J]. *International Journal of Production Economics*, 2021, 240: 108238.
- [24] Zhou Q, Meng C, Yuen K F. Remanufacturing authorization strategy for competition among OEM, authorized remanufacturer, and unauthorized remanufacturer [J]. *International Journal of Production Economics*, 2021, 242: 108295.
- [25] 许民利, 王竟竟, 简惠云. 专利保护与产出不确定下闭环供应链定价与协调 [J]. *管理工程学报*, 2021, 35(3): 119-129.
Xu Minli, Wang Jingjing, Jian Huiyun. Pricing and coordination of closed-loop supply chain under patent protection and random yield [J]. *Journal of Industrial Engineering and Engineering Management*, 2021, 35(3): 119-129. (in Chinese)
- [26] 夏西强, 耿涌, 朱庆华. 外包再制造下制造/再制造竞争与协调策略研究 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2019, 29(6): 168-176.
Xia Xiqiang, Geng Yong, Zhu Qinghua. Study on competition and coordination strategy between OEM and remanufacturer based on outsourcing remanufacturing [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2019, 29(6): 168-176. (in Chinese)
- [27] 夏西强, 路梦圆, 郭磊. 碳交易下碳配额分配方式对制造/再制造影响研究 [J]. *系统工程理论与实践*, 2022, 42(11): 3001-3015.
Xia Xiqiang, Lu Mengyuan, Guo Lei. Studying on the impact of carbon allowance allocation rules on manufacturing/remanufacturing under carbon trading [J]. *Systems Engineering: Theory & Practice*, 2022, 42(11): 3001-3015. (in Chinese)
- [28] 王一雷, 朱庆华. 不同碳排放权配置方式下供应链长期碳减排决策研究 [J]. *系统工程理论与实践*, 2023, 43(7): 2084-2101.
Wang Yilei, Zhu Qinghua. Long-term emission reduction decisions of a supply chain under different carbon emission permit allocation rules [J]. *Systems Engineering: Theory & Practice*, 2023, 43(7): 2084-2101. (in Chinese)
- [29] 徐健腾, 高莹, 柏庆国, 等. 不同碳交易配额分配方法下的鲁棒减排运作策略研究 [J]. *管理工程学报*, 2023, 37(3): 191-200.
Xu Jianteng, Gao Ying, Bai Qingguo, et al. Robust emission reduction strategy under different quota allocation methods of carbon trading policy [J]. *Journal of Industrial Engineering and Engineering Management*, 2023, 37(3): 191-200.
- [30] 骆瑞玲, 范体军, 夏海洋. 碳排放交易政策下供应链碳减排技术投资的博弈分析 [J]. *中国管理科学*, 2014, 22(11): 44-53.
Luo Ruiling, Fan Tijun, Xia Haiyang. The game analysis of carbon reduction technology investment on supply chain under carbon cap-and-trade rules [J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2014, 22(11): 44-53. (in Chinese)

- [31] 杨磊, 张琴, 张智勇. 碳交易机制下供应链渠道选择与减排策略[J]. 管理科学学报, 2017, 20(11): 75–87.
Yang Lei, Zhang Qin, Zhang Zhiyong. Channel selection and carbon emissions reduction policies in supply chains with the cap-and-trade scheme[J]. Journal of Management Sciences in China, 2017, 20(11): 75–87. (in Chinese)
- [32] Xia X, Li C, Zhu Q. Game analysis for the impact of carbon trading on low-carbon supply chain[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 276: 123220.
- [33] Liu H, Kou X, Xu G, et al. Which emission reduction mode is the best under the carbon cap-and-trade mechanism? [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 314: 128053.

The effect of carbon allowance allocation methods on authorized remanufacturing

ZHU Qing-hua¹, XIA Xi-qiang^{2*}, LI Meng-ya², WU Rui³

1. Antai College of Economics & Management, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China;
2. School of Business, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;
3. Institute of Continuing Education, University of Chinese Academy of Social Sciences, Beijing 102488, China

Abstract: Different carbon allowance allocation rules will directly affect the implementation of carbon trading policy, leading to different effects on manufacturers' production decisions and the operation of carbon trading market. This article constructs game models between an original equipment manufacturer (OEM) and an authorized remanufacturer to analyze the impacts of two different carbon allowance allocation rules (grandfathering and benchmarking) on the authorized remanufacturing supply chain. The main conclusions are as follows. 1) The OEM will make emissions reduction investments when the carbon emission per unit of new products, the carbon trading price, and the benchmark carbon quota meet certain conditions, and the benchmarking mechanism can improve the OEM's initiative to reduce emissions. 2) When carbon allowance and carbon trading price meet certain conditions, carbon trading policy can increase the benefits of all parties in the supply chain. 3) An appropriate increase in carbon trading price can promote emission reduction, but the total environmental impact of the two carbon allowance allocation rules is also related to the level of the OEM's emission reduction investment and carbon trading price.

Key words: carbon trading policy; authorized remanufacturing; the grandfathering mechanism; the benchmarking mechanism