

# 控制与决策

Control and Decision

考虑合同“双碳”服务的供应链减排策略动态协调

曹柬, 陈锦义, 马修岩

引用本文:

曹柬, 陈锦义, 马修岩. 考虑合同“双碳”服务的供应链减排策略动态协调[J]. *控制与决策*, 2025, 40(3): 755-764.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2024.0328>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

[考虑碳限额的制造/再制造混合系统生产优化决策](#)

Production optimization decision of manufacturing/remanufacturing under carbon emission permits

*控制与决策*. 2021, 36(9): 2249-2256 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1457>

[混合碳政策下制造商低碳转型的技术选择策略](#)

Technology selection in low carbon transition of the manufacturer under mixed carbon policy

*控制与决策*. 2021, 36(7): 1763-1770 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1536>

[信息非对称下考虑制造商回收行为的闭环供应链协调](#)

Coordination of closed supply chain under asymmetric information considering manufacturer's recycling behavior

*控制与决策*. 2021, 36(7): 1723-1731 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1657>

[不同担保模式下考虑零售商公平关切的闭环供应链博弈模型](#)

Game models of closed-loop supply chain under different warranty modes considering retailer's fairness concerns

*控制与决策*. 2021, 36(6): 1489-1498 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1328>

[两周期双寡头竞争环境中再制造影响](#)

Effect of remanufacturing on duopoly competition in two-period

*控制与决策*. 2021, 36(5): 1213-1222 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0840>

# 考虑合同“双碳”服务的供应链减排策略动态协调

曹 柬<sup>†</sup>, 陈锦义, 马修岩

(浙江工业大学 管理学院, 杭州 310023)

**摘要:** 碳交易政策的施行推动了供应链对于降碳生产、低碳宣传的长期关注. 在此需求下, 节能服务行业衍生出合同“双碳”服务模式. 为了分析该模式对上游制造商和下游零售商减排决策的影响, 基于随机微分博弈理论构建自主减排策略模型、外包合作减排策略模型和持股合作减排策略模型. 研究发现: 制造商是否采纳合同“双碳”服务主要取决于节能服务公司的减排成本优势, 且与商誉衰减率、贴现率和消费者低碳偏好相关; 在制造商选择合同“双碳”服务的情形下, 零售商存在降低宣传力度并获取额外收益的可能; 持股合作方式可降低制造商对于合作减排的成本要求; 制造商持有股份的提高可增加供应链减排投入, 实现制造商与零售商利润的帕累托改进; 持股合作为节能服务公司带来的直接利润改进较低, 制造商可通过转移支付等方式来促成合作. 研究工作聚焦于节能服务行业的新模式, 为供应链减排策略的选择提供参考依据.

**关键词:** 合同“双碳”服务; 碳交易政策; 供应链减排; 持股合作; 动态协调; 随机微分博弈

中图分类号: F402 文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2024.0328

引用格式: 曹柬, 陈锦义, 马修岩. 考虑合同“双碳”服务的供应链减排策略动态协调 [J]. 控制与决策, 2025, 40(3): 755-764.

## Dynamic coordination of supply chain emission reduction strategies considering dual carbon service contract

CAO Jian<sup>†</sup>, CHEN Jin-yi, MA Xiu-yan

(School of Management, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

**Abstract:** The implementation of carbon emission trading has driven supply chains to pay long-term attention to low-carbon production and propaganda. In response to this demand, the energy-saving service industry has derived a dual carbon service contract model. In order to analyze the impact of the model on the selection and dynamic coordination of supply chain emission reduction strategies, the independent reduction, project contract, and shareholding cooperation strategy models are constructed. The study finds that the choice of the dual carbon service contract mainly depends on the cost advantage of the energy service company (ESCO). This condition is related to goodwill decay rate, discount rate, and consumers' low-carbon preference. When manufacturers choose the dual carbon service contract, retailers may reduce their promotional efforts and gain additional profits. Shareholding cooperation can reduce the cost requirement. The increase of the shareholding can increase supply chain emission reduction investment and achieve Pareto improvement in profits for manufacturers and retailers. Shareholding cooperation brings low profit optimization for the ESCO, and manufacturers can facilitate it through transfer payments. The research focuses on a new model in the energy-saving service industry, providing reference for the selection of supply chain emission reduction strategies.

**Keywords:** dual carbon service contract; carbon emission trading; supply chain emission reduction; shareholding cooperation; dynamic coordination; stochastic differential game

## 引言

我国自 2011 年起已在北京、上海等 7 个省市开展碳市场建设试点工作, 并于 2021 年 7 月正式启动全国碳市场交易. 碳交易政策的实施促进了制造企业经济效益与环境效益的绑定, 通过优化生产流程、

引进减排设备等措施, 制造企业可在满足碳配额要求的同时实现碳盈余、获取碳收益<sup>[1]</sup>. 与此同时, 社会公众对于绿色环保、低碳节能的持续关注, 不断推动着绿色低碳产品市场的产生和发展<sup>[2]</sup>; 一些零售商也加大广告投入来曝光产品的绿色信息, 吸引具有

收稿日期: 2024-03-29; 录用日期: 2024-07-24.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (72274175, 71874159); 国家社会科学基金重点项目 (22AZD127); 浙江省哲学社会科学规划课题项目 (22NDJC057YB).

<sup>†</sup>通信作者. E-mail: jcao@zjut.edu.cn.

本文附带电子附录文件, 可登录本刊官网该文“资源附件”区自行下载阅览.

低碳偏好的购买者<sup>[3]</sup>。上游制造商与下游零售商的联合减排推动了低碳供应链的形成,如中国跨境电商巨头 SHEIN 于 2022 年 9 月承诺通过整合供应链、引进节能技术等方式,将在 2030 年减少其业务范围内 25% 的温室气体排放。

供应链自主减排往往会面临较高的成本负担,因此,需要寻求新的运营战略和合作方式<sup>[4]</sup>。在供应链对减排服务的长期需求下,节能服务公司逐步将减排服务作为公司主营业务之一<sup>[5]</sup>。起初,节能服务公司主要是通过合同能源管理的商业模式来满足高耗能制造企业的节能降耗需求<sup>[6]</sup>。随着政府和市场对于碳排放的日益关注,节能服务公司在合同能源管理中愈发强调所提供服务的碳减排效果。2022 年,合同能源管理项目新增投资 1 654.1 亿元,年节能能力达 4 647 万吨标准煤,相当于减排二氧化碳 11 432 万吨。在节能服务行业对降碳需求的积极响应下,“双碳”目标催生了一类新的服务模式——合同“双碳”服务<sup>[7]</sup>。合同“双碳”服务是合同能源管理在碳减排背景下的衍生和创新,旨在为企业提供碳减排项目设计和实施、碳资产开发和管理、碳金融运作等综合服务。不同于合同能源管理以用电量为核心为制造企业提供节能服务,合同“双碳”服务以碳排放量为核心满足制造企业的减排需求。如麟祥环保等公司推出了碳中和综合服务业务,已在湖南、安徽等多个省市开展试点。但是,节能服务业作为资金密集型和技术密集型产业,业内公司面临投资周期长、资金周转难等问题。针对此问题,节能服务公司开始尝试以设备租赁、股权融资等方式促进项目开发过程中的资金周转,与制造企业进行持股合作也成为了选择之一<sup>[8]</sup>。

综上所述,随着碳交易政策的推行,制造企业和零售企业愈发关注碳减排的投入和宣传;同时,供应链减排市场吸引了节能服务公司的参与,催生了合同“双碳”服务模式。因此,有必要讨论这一新的服务模式对于供应链减排的影响。

## 1 文献综述

与本研究相关的主要有以下 3 个方面:供应链减排动态协调、动态过程中随机因素影响、节能服务公司合作减排。

针对供应链减排中存在的动态协调问题,现有研究基于微分博弈理论进行了探讨。徐春秋等<sup>[9]</sup>研究了制造商减排投入对于产品减排量的动态影响,分析了供应链减排的集中决策和成本分摊问题;Ma 等<sup>[10]</sup>基于库存变动对制造商采购行为的影响,研究

了碳税政策下制造商的多样性采购策略和减排策略;孙睿等<sup>[11]</sup>针对林木生长过程刻画了相应的林业碳汇状态方程,并在此基础上讨论了由林农和项目开发企业所构成的碳汇供应链的决策问题和风险化解机制;Cai 等<sup>[12]</sup>基于供应链上下游均会产生碳排放的现实背景,构建了结合供应商与制造商碳排放的低碳商誉动态变化过程,探讨了碳交易政策下供应链不同权力结构的减排策略。上述研究侧重于供应链减排过程中的动态变化,探究连续时间下的最优减排策略选择。

值得注意的是,当下国际格局变幻、突发事件频发,对经济环境和消费者理念的稳定性造成了一定冲击<sup>[13]</sup>。此外,制造商的减排投入、零售商的广告宣传也存在随机性。因此,需要考虑随机因素的干扰。范贺花等<sup>[14]</sup>基于市场随机需求的现实,研究了低碳供应链渠道选择问题;Kennedy 等<sup>[15]</sup>考虑了零售商广告投入和产出中存在的随机性,探讨了制造商与零售商广告合作问题;Schlosser 等<sup>[16]</sup>在特殊寡头市场的随机动态定价背景下,研究了易腐和耐用品的广告投入微分博弈模型。与这些研究类似,本文将重点关注产品低碳商誉随时间变化过程中存在的随机性。

供应链进行碳减排可满足碳配额规制并在具有绿色偏好的市场环境下扩大产品需求,但是鉴于减排技术的高壁垒,自行减排会带来较高的成本负担,因此,与节能服务公司的减排合作成为选择之一<sup>[17]</sup>。郭雨等<sup>[18]</sup>对比了不同的合同能源管理,指出政府应推广工程总承包型合同来促进供应链的碳减排投入;樊文平等<sup>[19]</sup>则进一步考虑了合同能源管理中的纵向持股情形,分析了制造商、零售商对节能服务公司不同持股策略下的供应链减排;Sun 等<sup>[20]</sup>研究了碳交易政策背景下由供应商、制造商和节能服务公司组成的供应链,并探讨了不同合作模式下制造商的减排策略选择;白世贞等<sup>[21]</sup>以绿色信贷为切入点,讨论了不同资本结构下节能服务公司与供应链的合作减排情形。以上研究主要从静态博弈视角分析了合同能源管理为供应链碳减排带来的影响,鲜有文献针对节能服务公司提供合同“双碳”服务的现实情境展开动态研究。

上述文献对供应链减排动态协调问题、随机因素干扰问题以及节能服务公司合作减排问题展开了一定研究,基于此,本文进一步研究考虑合同“双碳”服务模式的供应链动态协调问题。现有文献对于节能服务公司合作减排问题的研究主要聚焦于静态视角,考虑到减排过程的长期性、动态性以及随机因素

的影响, 本文基于随机微分博弈理论对该问题进行刻画. 过往相关研究主要以合同能源管理作为合作减排方式, 而合同能源管理往往以节能量作为核心指标, 本文关注到节能服务行业新兴的合同“双碳”服务模式, 其贴合以减碳量为核心的供应链合作减排需求. 此外, 关注到现实中节能服务公司存在的资金周转问题以及制造商与节能服务公司长期合作的偏好, 本文也研究制造商持股参与合同“双碳”服务模式的合作减排策略.

## 2 问题描述

本文研究主体为由制造商  $M$  和零售商  $R$  组成的二级供应链. 其中: 制造商在供应链中占据主导地位, 负责产品的生产并决定选择何种减排策略; 零售商处于跟随地位, 负责产品的销售并对产品相关绿色低碳信息进行宣传. 本文中, 制造商的减排努力主要针对产品生产过程. 鉴于合同“双碳”服务模式的兴起, 考虑如下两类减排形式: 1) 自主减排策略 IR, 即制造商根据自身的生产情况决定投入减排努力. 2) 合作减排策略, 即制造商与节能服务公司就合同“双碳”服务模式达成协议, 由节能服务公司为制造商提供减排服务; 本研究中合作减排策略分为两种: 外包合作减排策略 PC 和持股合作减排策略 SC.

### 2.1 产品低碳商誉的动力学模型

产品在销售和宣传过程中, 其碳排放等信息逐步为消费者所知, 通过长期积累形成低碳商誉<sup>[22]</sup>. 产品低碳商誉主要受产品低碳水平、宣传努力以及随机因素等影响. 此外, 消费者对于产品的低碳印象会随着时间而模糊, 产品低碳商誉因此衰减. 在采用基准线法的碳配额政策下, 政府根据产品所在类型的单位碳排放水平向制造企业分配碳配额. 采用  $\bar{e}$  表示产品单位碳配额 (表示单位产品碳排放上限, 如《广东省 2022 年度碳排放配额分配方案》中规定卫生用纸制品的单位碳配额为  $1.222 \text{ t CO}_2/\text{t}$ , 当超出该上限时, 企业需要购买配额来满足碳配额约束, 反之则可出售配额来获取收益),  $e_0$  表示制造商生产单位产品所产生的基础碳排放; 鉴于碳规制的约束作用, 可假设  $\bar{e} - e_0 < 0$ .  $E(t)$  ( $E(t) > 0$ ) 为  $t$  时刻制造商选择减排策略后的减排投入, 可表示产品单位碳排放的下降. 产品的低碳程度不仅取决于其单位碳排放量, 也受其所处类型的碳排放水平影响, 则  $t$  时刻的产品低碳水平表示为  $\bar{e} - e_0 + E(t)$ . 产品低碳水平越高, 环境绩效越大, 其低碳商誉也越高. 同时, 零售商可采取披露产品低碳信息、宣传企业减排投入等方式来提升产品低碳商誉, 令其低碳宣传努力为  $A(t)$ . 考

虑市场和商誉本身的不确定因素, 产品低碳商誉的状态方程可用 Itô 公式<sup>[23]</sup> 刻画为

$$\begin{aligned} \dot{G}(t) &= [\gamma A(t) + \mu(\bar{e} - e_0 + E(t)) - \delta G(t)]dt + \\ &\quad \sigma \sqrt{G(t)} dz(t), \\ G(0) &= G_0. \end{aligned} \quad (1)$$

其中:  $\gamma$ 、 $\mu$  分别为低碳宣传努力、产品低碳水平对于商誉的边际影响系数;  $\delta$  为商誉随着时间的衰减率, 体现消费者对于产品低碳印象的遗忘;  $\sigma \sqrt{G(t)}$  为扩散项,  $\sigma$  为噪声参数, 考虑到随着商誉的提高, 消费者对于产品认可度的上升可减缓随机扰动对于商誉的影响, 因此假设商誉的波动率与其本身的平方根成正比;  $z(t)$  为标准维纳过程. 本文不考虑产品低碳商誉  $G(t) < 0$  的情况.

### 2.2 低碳市场偏好和碳交易

随着气候环境的变化和“双碳”战略的展开, 消费者的低碳偏好不断提升, 根据生态环境部发布的《公民生态环境行为调查报告 (2022)》显示, 主动关注或传播交流过环境信息的受访者人数占比为 78.3%, 经常做到购买绿色产品的人数占比超过 6 成. 考虑产品低碳商誉对市场的需求影响,  $t$  时刻的市场需求可表示为  $D(t) = \alpha + \eta G(t)$ . 其中:  $\alpha$  为产品基础市场需求;  $\eta$  为市场低碳偏好程度,  $\eta$  越大, 消费者低碳意识越强, 越倾向于购买低碳产品. 上述公式表明制造商和零售商可通过提升产品低碳商誉的方式来扩大市场需求. 在采用基准线法的碳配额政策下, 单位碳排放价格为  $p_c$  ( $p_c > 0$ ), 制造商依据其产品单位碳排放与碳配额的差值  $\bar{e} - e_0 + E(t)$  进行碳交易, 在超出配额的情况下购买配额来满足碳规制或在配额盈余的情况下出售配额来获取额外收益. 综上, 制造商进行低碳投入可产生两方面的效益: 一是扩大产品的市场需求, 二是满足碳配额规制、进行碳交易.

### 2.3 供应链减排策略

假设每单位产品销售可给制造商和零售商分别带来利润  $\pi_M$  和  $\pi_R$  ( $\pi_M$ 、 $\pi_R > 0$ ); 为了保证制造商生产单位产品所获得的利润不小于 0, 存在基础条件  $\pi_M + p_c(\bar{e} - e_0) \geq 0$ . 本文研究无限时间区域内的供应链减排策略, 假设所有决策参与者均具有相同的贴现率  $\rho$  ( $\rho > 0$ ).

制造商采取减排策略来实现产品降碳效果. 在自主减排策略 IR 中, 制造商通过工艺改进、流程优化等方式投入减排努力  $E(t)$ , 相应的减排投入成本系数为  $k_M$  ( $k_M > 0$ ); 为不失一般性<sup>[24]</sup>, 考虑减排成本的凸性特征, 制造商自主减排成本为  $\frac{1}{2} k_M E^2(t)$ .

在合作减排策略中, 制造商采纳节能服务公司提供的合同“双碳”服务, 节能服务公司针对产品生产环节投入减排努力  $E(t)$ , 减排投入成本系数为  $k_S$  ( $k_S > 0$ ); 同样地, 相应的减排成本为  $\frac{1}{2}k_S E^2(t)$ . 与制造商自主减排相比, 节能服务公司往往降碳经验相对丰富, 减排技术相对成熟, 减排方案制定也更为合理, 其减排所需投入成本相对较低 ( $k_S < k_M$ )<sup>[20]</sup>. 本文首先考虑采用工程总承包型合同的外包合作减排策略PC: 制造商将产品生产过程中的减排业务作为一个项目外包给节能服务公司, 并以单位价格  $p_e(t)$  支付减排成效  $E(t)D(t)$  的相应费用<sup>[18]</sup>. 进一步地, 考虑当前节能服务公司普遍存在融资难、回款难的现实状况, 讨论制造商与节能服务公司间的动态协调, 构建制造商对节能服务公司进行投资情形下的持股合作减排策略SC: 在持股合作中, 制造商对节能服务公司的减排行为进行投资, 支付比例为  $\theta$  ( $\theta \in (0, 1)$ ) 的减排成本, 同时, 在合作减排过程中节能服务公司以比例  $\theta$  给予制造商收益分红<sup>[25]</sup>. 零售商根据制造商的减排策略进行低碳宣传, 投入宣传努力  $A(t)$  ( $A(t) \geq 0$ ), 宣传投入成本系数为  $k_R$  ( $k_R > 0$ ); 类似地, 相应的宣传成本为  $\frac{1}{2}k_R A^2(t)$ . 3种策略的研究情形如图1所示.

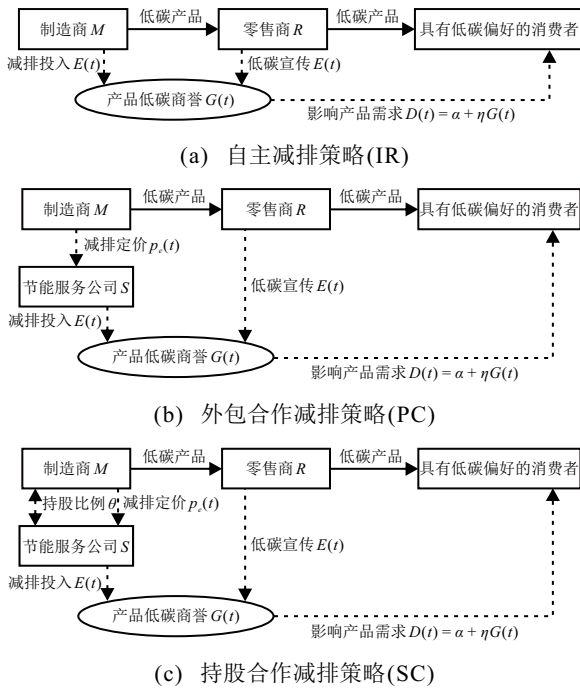


图1 3种减排策略的研究情形

### 3 自主减排策略IR

自主减排策略IR下, 制造商根据自身利润最大化进行减排投入, 零售商则在了解制造商减排投入决策后进行低碳宣传, 制造商和零售商的目标泛函

如下所示 (为表达简洁, 下文公式中的相关符号省略时间变量  $t$ ):

$$J_M^{\text{IR}}(G, t) = \max_E \int_0^\infty e^{-\rho t} [\Pi_M^{\text{IR}}] dt = \max_E \int_0^\infty e^{-\rho t} \left[ (\pi_M + p_c(\bar{e} - e_0 + E)) \times (\alpha + \eta G) - \frac{1}{2} k_M E^2 \right] dt, \quad (2)$$

$$J_R^{\text{IR}}(G, t) = \max_A \int_0^\infty e^{-\rho t} [\Pi_R^{\text{IR}}] dt = \max_A \int_0^\infty e^{-\rho t} \left[ \pi_R (\alpha + \eta G) - \frac{1}{2} k_R A^2 \right] dt. \quad (3)$$

为了得到制造商和零售商的反馈均衡策略, 在逆向归纳法的基础上采用 Hamilton-Jacobi-Bellman (HJB) 方程求解. 求解结果如命题1和命题2所示.

**命题1** 在自主减排策略IR中: 制造商的最优减排努力为  $E^{\text{IR}} = \frac{(\eta p_c + 2\mu f_1^{\text{IR}})G + \alpha p_c + \mu f_2^{\text{IR}}}{k_M}$ , 利润最优值函数为  $V_M^{\text{IR}}(G) = f_1^{\text{IR}} G^2 + f_2^{\text{IR}} G + f_3^{\text{IR}}$ ; 零售商的最优宣传努力为  $A^{\text{IR}} = \frac{\gamma}{k_R} g_1^{\text{IR}}$ , 利润最优值函数为  $V_R^{\text{IR}}(G) = g_1^{\text{IR}} G + g_2^{\text{IR}}$ .

相关参数需要满足条件  $k_M > \frac{4\eta\mu p_c}{\rho + 2\delta}$ , 该条件表明制造商进行自主减排将产生较高的减排成本, 这与现实相符.

**命题2** 策略IR下: 低碳商誉期望为

$$\exp(G^{\text{IR}}) = \left( G_0 - \frac{Y^{\text{IR}}}{X^{\text{IR}}} \right) e^{-X^{\text{IR}} t} + \frac{Y^{\text{IR}}}{X^{\text{IR}}},$$

方差为

$$\text{var}(G^{\text{IR}}) = \sigma^2 (Y^{\text{IR}} e^{2X^{\text{IR}} t} + 2(X^{\text{IR}} G_0 - Y^{\text{IR}}) e^{X^{\text{IR}} t} + Y^{\text{IR}} - 2X^{\text{IR}} G_0) / [2(X^{\text{IR}})^2 e^{2X^{\text{IR}} t}],$$

低碳商誉期望极限为  $\lim_{t \rightarrow \infty} \exp(G^{\text{IR}}) = \frac{Y^{\text{IR}}}{X^{\text{IR}}}$ , 方差极限为  $\lim_{t \rightarrow \infty} \text{var}(G^{\text{IR}}) = \frac{\sigma^2 Y^{\text{IR}}}{2(X^{\text{IR}})^2}$ . 其中

$$X^{\text{IR}} = \frac{-k_M \rho + \sqrt{k_M (\rho + 2\delta) (k_M (\rho + 2\delta) - 4\eta\mu p_c)}}{2k_M},$$

$$Y^{\text{IR}} = \frac{\gamma^2 g_1^{\text{IR}}}{k_R} + \mu(\bar{e} - e_0) + \frac{\mu(\alpha p_c + \mu f_2^{\text{IR}})}{k_M}.$$

为了保证产品低碳商誉期望收敛, 需要满足条件  $X^{\text{IR}} > 0$ , 即  $k_M > \frac{\eta\mu p_c (\rho + 2\delta)}{\delta(\rho + \delta)}$ , 可证明

$$\frac{\eta\mu p_c (\rho + 2\delta)}{\delta(\rho + \delta)} > \frac{4\eta\mu p_c}{\rho + 2\delta}.$$

上述模型表明, 在碳配额规制和市场低碳偏好

的影响下, 制造商会考虑进行减排投入. 而在现实中, 由于制造商自身减排技术和减排经验相对偏弱, 其减排成本往往较高, 越来越多的制造商倾向于选择节能服务公司所提供的合同“双碳”服务. 因此, 进一步考虑节能服务公司参与的合作减排模式.

#### 4 合作减排策略

合作减排策略下, 制造商与节能服务公司就合同“双碳”服务达成协议, 由节能服务公司负责碳减排工作, 并根据协议内容进行收益分配. 本节首先构建采用工程总承包型合同的外包合作减排策略模型; 考虑到市场上存在制造商投资其他节能服务公司甚至成立节能服务分公司的现状, 进一步研究在制造商持股节能服务公司情形下的供应链减排情况, 并探讨股权结构对于供应链减排行为的影响.

##### 4.1 外包合作减排策略PC

在工程总承包型合同中, 制造商将产品生产的碳减排工作作为项目整体以特定价格委托给节能服务公司, 节能服务公司据此开展减排投入. 零售商则根据减排效果进行产品宣传. 制造商、节能服务公司、零售商的目标泛函如下所示:

$$J_M^{\text{PC}}(G, t) = \max_{p_e} \int_0^\infty e^{-\rho t} [\Pi_M^{\text{PC}}] dt = \max_{p_e} \int_0^\infty e^{-\rho t} [(\pi_M + p_e(\bar{e} - e_0 + E)) \times (\alpha + \eta G) - p_e E(\alpha + \eta G)] dt, \quad (4)$$

$$J_S^{\text{PC}}(G, t) = \max_E \int_0^\infty e^{-\rho t} [\Pi_S^{\text{PC}}] dt = \max_E \int_0^\infty e^{-\rho t} \left[ p_e E(\alpha + \eta G) - \frac{1}{2} k_S E^2 \right] dt, \quad (5)$$

$$J_R^{\text{PC}}(G, t) = \max_A \int_0^\infty e^{-\rho t} [\Pi_R^{\text{PC}}] dt = \max_A \int_0^\infty e^{-\rho t} \left[ \pi_R(\alpha + \eta G) - \frac{1}{2} k_R A^2 \right] dt. \quad (6)$$

与求解策略IR模型类似, 基于逆向归纳法并结合HJB方程进行求解. 求解结果如命题3和命题4所示.

**命题3** 在外包合作减排策略PC中, 制造商的最优单位减排定价为

$$p_e^{\text{PC}} = \frac{(\eta p_c + 2\mu f_1^{\text{PC}} - 2\mu h_1^{\text{PC}})G + \alpha p_c + \mu(f_2^{\text{PC}} - h_2^{\text{PC}})}{2(\alpha + \eta G)},$$

利润最优值函数为  $V_M^{\text{PC}}(G) = f_1^{\text{PC}} G^2 + f_2^{\text{PC}} G + f_3^{\text{PC}}$ ; 节能服务公司的最优减排努力为

$$E^{\text{PC}} = \frac{(\eta p_c + 2\mu f_1^{\text{PC}} + 2\mu h_1^{\text{PC}})G + \alpha p_c + \mu(f_2^{\text{PC}} + h_2^{\text{PC}})}{2k_S},$$

利润最优值函数为  $V_S^{\text{PC}}(G) = h_1^{\text{PC}} G^2 + h_2^{\text{PC}} G + h_3^{\text{PC}}$ ; 零售商的最优宣传努力为  $A^{\text{PC}} = \frac{\gamma}{k_R} g_1^{\text{PC}}$ , 利润最优值函数为  $V_R^{\text{PC}}(G) = g_1^{\text{PC}} G + g_2^{\text{PC}}$ .

相关参数需要满足条件  $k_S > \frac{3\eta\mu p_c}{\rho + 2\delta}$ . 对比命题1可知, 此时减排成本系数的阈值更小, 这与节能服务公司减排成本相对较低的现实状况相符.

**命题4** 策略PC下: 商誉期望为

$$\exp(G^{\text{PC}}) = \left( G_0 - \frac{Y^{\text{PC}}}{X^{\text{PC}}} \right) e^{-X^{\text{PC}} t} + \frac{Y^{\text{PC}}}{X^{\text{PC}}},$$

方差为

$$\text{var}(G^{\text{PC}}) = \sigma^2 (Y^{\text{PC}} e^{2X^{\text{PC}} t} + 2(X^{\text{PC}} G_0 - Y^{\text{PC}}) e^{X^{\text{PC}} t} + Y^{\text{PC}} - 2X^{\text{PC}} G_0) / [2(X^{\text{PC}})^2 e^{2X^{\text{PC}} t}];$$

低碳商誉期望极限为  $\lim_{t \rightarrow \infty} \exp(G^{\text{PC}}) = \frac{Y^{\text{PC}}}{X^{\text{PC}}}$ , 方差极限为  $\lim_{t \rightarrow \infty} \text{var}(G^{\text{PC}}) = \frac{\sigma^2 Y^{\text{PC}}}{2(X^{\text{PC}})^2}$ . 其中

$$X^{\text{PC}} = \frac{k_S(\delta - \rho) + \sqrt{k_S(\rho + 2\delta)(k_S(\rho + 2\delta) - 3\eta\mu p_c)}}{3k_S},$$

$$Y^{\text{PC}} = \frac{\gamma^2 g_1^{\text{PC}}}{k_R} + \mu(\bar{e} - e_0) + \frac{\mu(\alpha p_c + \mu(f_2^{\text{PC}} + h_2^{\text{PC}}))}{2k_S}.$$

为了保证收敛, 相关参数需要满足条件  $\delta \geq \rho$  或  $k_S > \frac{\eta\mu p_c(\rho + 2\delta)}{\delta(2\rho + \delta)}$ . 这里:  $\delta$  为产品低碳商誉随时间的衰减率,  $\rho$  为资金的时间价值. 在本模型中, 由节能服务公司提供减排服务来提升产品低碳商誉, 若商誉衰减率不低于资金贴现率 ( $\delta \geq \rho$ , 在现实中, 资金贴现率也往往低于消费者对产品低碳形象的遗忘速率), 则当产品低碳商誉增长至一定范围时, 商誉的显著衰减将降低节能服务公司的预期收益, 制约了相应的减排投入行为, 从而保证了产品低碳商誉的收敛. 同时可证明  $\frac{\eta\mu p_c(\rho + 2\delta)}{\delta(2\rho + \delta)} > \frac{3\eta\mu p_c(\rho + 2\delta)}{\delta(2\rho + \delta)}$ , 对比命题2, 有  $\frac{\eta\mu p_c(\rho + 2\delta)}{\delta(2\rho + \delta)} < \frac{\eta\mu p_c(\rho + 2\delta)}{\delta(\rho + \delta)}$ , 符合节能服务公司减排成本较低的现实.

##### 4.2 持股合作减排策略SC

鉴于碳减排项目存在前期投入大、开发周期长、回款困难等问题, 现实中节能服务公司易产生资金周转问题. 与此同时, 面对长期的减排需求, 制造商愿意维持与节能服务公司的长期合作, 甚至成立节能服务分公司来降低减排成本, 如近年来上海宝钢

成立节能环保分公司来开展节能减排相关业务. 因此, 考虑制造商对节能服务公司进行投资的持股合作减排策略, 在合同“双碳”服务存续期间, 制造商支付比例为 $\theta$ 的减排成本, 并据此收取节能服务公司相应比例的收益分红. 制造商、节能服务公司、零售商的目标泛函如下所示:

$$J_M^{\text{SC}}(G, t) = \max_{p_e} \int_0^\infty e^{-\rho t} [\Pi_M^{\text{SC}}] dt = \max_{p_e} \int_0^\infty e^{-\rho t} \left[ (\pi_M + p_e(\bar{e} - e_0 + E)) \times (\alpha + \eta G) - p_e E(\alpha + \eta G) + \theta p_e E(\alpha + \eta G) - \frac{1}{2} \theta k_S E^2 \right] dt, \quad (7)$$

$$J_S^{\text{SC}}(G, t) = \max_E \int_0^\infty e^{-\rho t} [\Pi_S^{\text{SC}}] dt = \max_E \int_0^\infty e^{-\rho t} \left[ (1 - \theta) p_e E(\alpha + \eta G) - \frac{1}{2} (1 - \theta) k_S E^2 \right] dt, \quad (8)$$

$$J_R^{\text{SC}}(G, t) = \max_A \int_0^\infty e^{-\rho t} [\Pi_R^{\text{SC}}] dt = \max_A \int_0^\infty e^{-\rho t} \left[ \pi_R(\alpha + \eta G) - \frac{1}{2} k_R A^2 \right] dt. \quad (9)$$

求解结果如命题5所示.

**命题5** 在持股合作减排策略SC中: 制造商的最优单位减排定价为

$$p_e^{\text{SC}} = \frac{[(1 - \theta)\eta p_c + 2(1 - \theta)\mu f_1^{\text{SC}} - 2\mu h_1^{\text{SC}}]G + (1 - \theta)\alpha p_c + \mu[(1 - \theta)f_2^{\text{SC}} - h_2^{\text{SC}}]}{(2 - \theta)(1 - \theta)(\alpha + \eta G)},$$

利润最优值函数为 $V_M^{\text{SC}}(G) = f_1^{\text{SC}}G^2 + f_2^{\text{SC}}G + f_3^{\text{SC}}$ ; 节能服务公司的最优减排努力为 $E^{\text{SC}} = \frac{(\eta p_c + 2\mu f_1^{\text{SC}} + 2\mu h_1^{\text{SC}})G + \alpha p_c + \mu(f_2^{\text{SC}} + h_2^{\text{SC}})}{(2 - \theta)k_S}$ , 利

润最优值函数为 $V_S^{\text{SC}}(G) = h_1^{\text{SC}}G^2 + h_2^{\text{SC}}G + h_3^{\text{SC}}$ ; 零售商的最优宣传努力为 $A^{\text{SC}} = \frac{\gamma}{k_R} g_1^{\text{SC}}$ , 利润最优值函数为 $V_R^{\text{SC}}(G) = g_1^{\text{SC}}G + g_2^{\text{SC}}$ .

相关参数需要满足条件 $k_S > \frac{4(3 - 2\theta)\eta\mu p_c}{(2 - \theta)^2(\rho + 2\delta)}$ ,

可证明 $\frac{4(3 - 2\theta)\eta\mu p_c}{(2 - \theta)^2(\rho + 2\delta)} < \frac{3\eta\mu p_c}{\rho + 2\delta}$ .

**命题6** 策略SC下: 商誉期望为 $\exp(G^{\text{SC}}) = \left(G_0 - \frac{Y^{\text{SC}}}{X^{\text{SC}}}\right)e^{-X^{\text{SC}}t} + \frac{Y^{\text{SC}}}{X^{\text{SC}}}$ , 方差为

$$\text{var}(G^{\text{SC}}) = \sigma^2(Y^{\text{SC}}e^{2X^{\text{SC}}t} + 2(X^{\text{SC}}G_0 - Y^{\text{SC}})e^{X^{\text{SC}}t} + Y^{\text{SC}} - 2X^{\text{SC}}G_0)/[2(X^{\text{SC}})^2e^{2X^{\text{SC}}t}];$$

低碳商誉期望极限为 $\lim_{t \rightarrow \infty} \exp(G^{\text{SC}}) = \frac{Y^{\text{SC}}}{X^{\text{SC}}}$ , 方差极

限为 $\lim_{t \rightarrow \infty} \text{var}(G^{\text{SC}}) = \frac{\sigma^2 Y^{\text{SC}}}{2(X^{\text{SC}})^2}$ . 其中

$$X^{\text{SC}} = \frac{\sqrt{k_S(\rho + 2\delta)((2 - \theta)^2 k_S(\rho + 2\delta) - 4(3 - 2\theta)\eta\mu p_c)}}{2(3 - 2\theta)k_S},$$

$$Y^{\text{SC}} = \frac{\gamma^2 g_1^{\text{SC}}}{k_R} + \frac{\mu(\alpha p_c + \mu(f_2^{\text{SC}} + h_2^{\text{SC}}))}{(2 - \theta)k_S} + \mu(\bar{e} - e_0).$$

为了保证上述结果收敛, 需要满足 $2\delta \geq (2 - \theta)\rho$ 或

$$k_S > \frac{(3 - 2\theta)\eta\mu p_c(\rho + 2\delta)}{(3 - \theta)\delta((2 - \theta)\rho + (1 - \theta)\delta)}.$$

## 5 结果分析

为了探究制造商采纳合同“双碳”服务的意愿以及持股比例对于供应链减排策略的影响, 本节从理论层面对比不同策略下的产品低碳商誉、减排投入、低碳宣传努力以及供应商与零售商的最优利润.

### 5.1 策略IR与PC的比较分析

假设 $\Delta' = \frac{2\eta\mu p_c}{6\eta\mu p_c - k_M(\rho + 2\delta) + \Lambda}$ , 其中 $\Lambda = \sqrt{k_M(\rho + 2\delta)(k_M(\rho + 2\delta) - 4\eta\mu p_c)}$ . 下述推论在满足条件 $k_M > \frac{9\eta\mu p_c}{2(\rho + 2\delta)}$ 的情况下成立(对比命题1可知, 此条件下制造商减排成本系数的阈值更大, 表明仅当制造商承担较高的减排成本时, 其才会考虑合作减排, 同时可证明在此条件下 $0 < \Delta' < 1$ ).

**推论1** 关于供应链减排努力 $E$ 、低碳宣传努力 $A$ 、产品低碳商誉 $G$ 的关系如下所示:

1) 当 $\frac{k_S}{k_M} < \Delta'$ 时, 存在 $A^{\text{PC}} > A^{\text{IR}}$ ; 当 $\frac{k_S}{k_M} > \Delta'$ 时, 存在 $A^{\text{PC}} < A^{\text{IR}}$ .

2) 当 $\frac{k_S}{k_M} < \Delta'$ 时, 存在 $E^{\text{PC}} > E^{\text{IR}}$ ,  $G^{\text{PC}} > G^{\text{IR}}$ .

本文中产品低碳商誉主要受3个方面因素影响: 低碳宣传努力、产品低碳水平、商誉自身的自然衰减, 其中产品低碳水平与供应链减排投入直接相关. 推论1表明: 当节能服务公司具有相对先进的减排技术时, 制造商通过将产品生产过程中的减排工程外包可实现更高的减排效果, 提升产品本身的低碳水平; 同时, 根据供应链减排效果, 零售商在此情形下愿意加大广告投入来宣传企业的环保行为, 以提升产品低碳商誉、巩固企业绿色形象. 如2022年8月, 元气森林与远景科技集团宣布达成全面战略合作, 由远景科技集团作为节能服务公司协助元气森林打造0碳工厂, 随后推出“零碳”气泡水, 并以“1瓶汽水碳减排等于关灯2小时”“0糖、0脂、0卡、净0碳”等作为广告语进行宣传. 推论1同时表明, 零售商的行为具有一定的滞后性, 并不会及时跟随制造商减排努力的上升而扩大宣传投入, 即存在 $\frac{k_S}{k_M} \in (\Delta', \bar{\Delta}')$ , 相比于自主减排策略, 外包合作策略下供应链减排

努力上升, 产品低碳商誉上升, 而零售商却不会加大其宣传投入.

**推论 2** 关于制造商、零售商最优利润值的关系如下所示: 当  $\frac{k_S}{k_M} < \Delta'$  时, 存在  $V_M^{PC} > V_M^{IR}$ ,  $V_R^{PC} > V_R^{IR}$ .

制造商作为减排策略中的主导者, 其根据自身利润最大化选择相应的减排策略. 当节能服务公司具有明显的成本优势时, 选择外包合作减排策略可提升企业的经济效益, 原因在于通过外包合作方式可实现减排生产过程中的降本增效. 作为减排策略的跟随者, 零售商没有根据自身利润来选择减排策略的权力, 但是, 却可以因供应链减排效果的提升而获利. 原因在于零售商的利润主要来自于产品的销售利润, 零售商根据自身利润最大化进行低碳宣传, 当供应链加大减排努力时, 产品低碳商誉上升, 相应的市场需求扩大, 零售商也因此获得更高的利润. 进一步可知, 在供应链减排过程中, 零售商作为供应链的一部分与制造商构成了利益共同体. 结合推论 1 可知: 当  $\frac{k_S}{k_M} \in (\Delta', \overline{\Delta'})$  时, 零售商“搭便车”成为了外包合作减排的获益者, 此时零售商不会加大低碳宣传力度, 却会从更高的商誉和市场需求中获益.

**推论 3**  $\Delta'$  与  $k_M$ 、 $\rho$ 、 $\delta$  呈负相关, 与  $\eta$ 、 $\mu$ 、 $p_c$  呈正相关;  $\Delta'k_M$  则与  $k_M$  呈正相关.

由推论 2 可知, 当  $\frac{k_S}{k_M} < \Delta'$  时, 制造商选择将减排工程外包给节能服务公司. 推论 3 表明该条件在贴现率、商誉衰减率 ( $\rho$ ,  $\delta$ ) 较高的情况下更为严苛, 而在需求市场 ( $\eta$ ,  $\mu$ ) 和碳市场 ( $p_c$ ) 对于减排努力作出较多正向反馈的情况下更为宽松, 即当贴现率、商誉衰减率越高、消费者绿色偏好越低、单位碳价越低时, 制造商进行减排的需求越不急迫, 对于节能服务公司减排技术的要求也就越高. 同时, 该条件与制造商自主减排成本系数呈负相关, 即制造商自身减排所需成本越大, 所选择合作的节能服务公司相比于制造商具备越明显的成本优势, 但是具体减排成本 ( $\Delta'k_M$ ) 的要求相对降低.

## 5.2 策略 SC 中持股比例 $\theta$ 的影响分析

鉴于当前节能服务公司普遍存在资金周转困难以及制造企业对于碳减排的长期关注, 本文探讨了合同“双碳”服务下的融资模式, 即在外包合作减排策略 PC 的基础上进一步考虑了持股合作的协调方式. 下文将分析持股比例对于供应链减排策略选择的影响.

假设

$$\Delta'' = 2\eta\mu p_c / [2(3 - 2\theta)\eta\mu p_c - (1 - \theta)k_M(\rho + 2\delta) + (1 - \theta)\Lambda],$$

其中  $\Lambda = \sqrt{k_M(\rho + 2\delta)(k_M(\rho + 2\delta) - 4\eta\mu p_c)}$ . 下述推论在满足条件  $k_M > \frac{(3 - 2\theta)^2 \eta\mu p_c}{(2 - \theta)(\rho + 2\delta)}$  的情况下成立 (比较推论 1 ~ 推论 3 所需满足的条件, 可证明  $\frac{(3 - 2\theta)^2 \eta\mu p_c}{(2 - \theta)(\rho + 2\delta)} \leq \frac{9\eta\mu p_c}{2(\rho + 2\delta)}$ , 即持股合作下该条件更易满足; 同时也可证明在此条件下  $0 < \Delta'' < 1$ ).

**推论 4** 当满足条件  $\frac{k_S}{k_M} < \Delta''$  时, 制造商会选择与节能服务公司进行持股合作减排, 且  $\Delta''$  与制造商持股比例  $\theta$  呈正相关.

在持股合作方式下, 制造商可凭借对节能服务公司的减排投资获取相应比例的利润, 不仅可以增强双方的合作意愿, 还增强了双方的共同利润. 此时, 制造商的利润构成为生产利润、碳减排收益、股份分红. 随着持股比例的上升, 合作减排带来更多分红利润的同时降低了制造企业对于合作方减排成本优势的要求. 推论 4 表明持股合作方式可降低合作减排的门槛, 节能服务公司在成本优势不明显的情形下, 可考虑给予制造商持股分红以促进合作.

**推论 5** 相比于外包合作减排策略 PC, 持股合作减排策略 SC 的情形下制造商愿意制定更高的减排单价  $p_e$  来激励节能服务公司的减排投入, 即  $p_e^{SC} > p_e^{PC}$ .

本文中, 节能服务公司收益来源于制造商根据碳减排效果所支付的金额  $p_e E(t)D(t)$ . 持股合作减排策略中, 制造商可根据投资节能服务公司减排成本比例  $\theta$  收取收益分红. 在此情形下, 制造商制定较高的减排单价可在避免承担过高成本的同时激励节能服务公司的减排投入, 且随着股份比例的上升, 制造商将制定更具有吸引力的减排单价.

**推论 6** 制造商持有节能服务公司股份可激励供应链减排行为, 提升产品商誉, 且该提升幅度与持股比例呈正相关. 即存在  $E^{SC} > E^{PC}$ ;  $A^{SC} > A^{PC}$ ;  $G^{SC} > G^{PC}$ ;  $E^{SC}$ 、 $A^{SC}$ 、 $G^{SC}$  关于  $\theta$  递增.

在制造商持股情形下, 节能服务公司减排投入  $E$ 、零售商宣传投入  $A$ 、产品商誉  $G$  均有所提升, 且随着持股份额的上升, 提升幅度也随之加大. 由推论 5 可知, 随着持有股份的上升, 制造商会提高减排单价  $p_e$  进而促使节能服务公司加大减排投入; 结合命题 5, 零售商根据供应链减排策略进行相应的宣传, 在供应链减排投入、宣传投入增加的情况下, 产品低碳商誉也有所上升. 推论 6 表明, 相比于外包合作减

排, 持股合作减排策略可带来较高的环境效益.

**推论 7** 制造商、零售商的最优利润值与持股比例呈正相关, 即  $V_M^{SC}$ 、 $V_R^{SC}$  关于  $\theta$  递增.

制造商通过对节能服务公司的减排行为进行投资, 一方面可获取相应的收益分红, 另一方面可提升减排单价以加大减排投入, 促进供应链整体减排行为进而提升产品低碳商誉, 在满足碳规制、获取碳收益的同时扩大市场需求、提升最优利润. 在此情形下, 即使零售商不增加宣传投入, 依然能够依靠更高的产品需求获得更多的销售利润. 该推论表明持股合作减排策略可为制造商、零售商带来经济效益. 因此, 制造商有进行持股合作的偏好, 为了探讨节能服务公司关于持股合作的意愿, 需要分析持股合作下节能服务公司的利润变化, 鉴于结果的复杂度, 将在算例分析中进行说明.

## 6 算例分析

上文建立了 3 种供应链减排策略模型, 并在求解决策均衡解的基础上展开了相关分析. 在上述命题和推论的基础上, 本节采用算例分析的方式对节能服务公司选择持股合作的可能展开进一步分析. 设置参数为  $\alpha = 8 \times 10^5$ ,  $p_c = 56$ ,  $\bar{e} = 1.222$ ,  $e_0 = 1.301$ ,  $\pi_M = 4400$ ,  $\pi_R = 2636$ ,  $k_M = 2.55 \times 10^9$ ,  $k_S = 9.72 \times 10^8$ ,  $k_R = 5.80 \times 10^8$ ,  $\theta = 0.2$ ,  $\eta = 200$ ,  $\mu = 100$ ,  $\gamma = 70$ ,  $\delta = 0.1$ ,  $\rho = 0.05$ ,  $\sigma = 0.3$ ,  $G_0 = 100$ .

### 1) 节能服务公司最优利润变化趋势.

为了探讨节能服务公司是否存在选择与制造商进行持股合作的可能, 需要比较不同持股比例下节能服务公司的最优利润, 结果如图 2 所示. 随着持股比例的上升, 节能服务公司利润呈现缓慢上升后下降的趋势, 表明当制造商持有股份小于一定比例时, 通过持股合作方式可实现节能服务公司利润的改进; 结合推论 7 可知, 在此情形下, 持股合作减排策略能够实现供应链整体与节能服务公司利润的帕累托改进, 双方存在选择持股合作达成协调的利益驱动. 当持股比例较小时, 制造商的投资行为降低了节能服务公司的减排成本, 同时加强了双方合作的鲁棒性, 提高了单位减排定价, 激励节能服务公司加大减排投入, 进一步提升了产品低碳商誉, 使得制造商获得了更高的销售利润和减排效益; 相应地, 节能服务公司在进行收益分红后也可从中获益. 当持股比例较大时, 制造商仍然能够获得更大的市场需求和环境收益, 但是, 节能服务公司需要将较大份额的收益分享给制造商, 从而导致其利益受损, 阻碍了持股合作

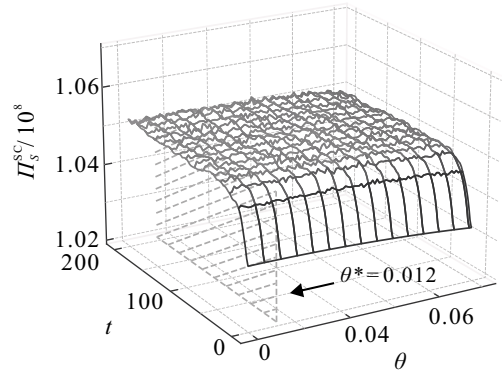


图2 持股合作下节能服务公司利润  $\Pi_S^{SC}$  变化趋势

的进行.

图 2 也表明, 存在最优持股比例  $\theta^* = 0.012$ , 实现了节能服务公司利润的帕累托改进; 但是此时最优持股比例仅为 1.2%, 表明在不考虑资金约束的情形下节能服务公司进行持股合作的意愿并不强烈, 这与现实情况一致. 以 2022 年为例, 该年度 76% 的合作减排项目均由节能服务公司自有资金投资, 融资情况较少<sup>[7]</sup>. 主要原因在于碳交易推行初期, 制造商减排成本较高, 持股合作会弱化节能服务公司的成本优势. 为了探讨双方实现减排合作协调的可能, 需要进一步分析节能服务公司与制造商的总利润随持股比例的变化情况, 如图 3 所示.

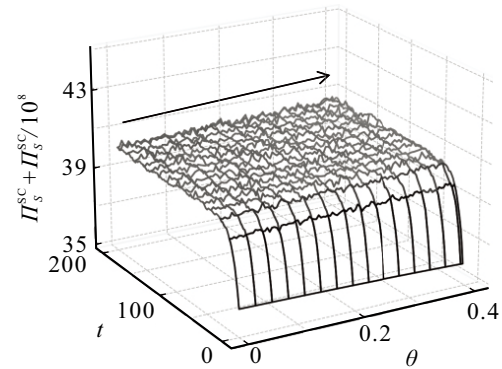


图3 持股合作下节能服务公司和制造商总利润  $\Pi_M^{SC} + \Pi_S^{SC}$  变化趋势

由图 3 可知, 随着持股比例的增加, 节能服务公司和制造商的总利润呈上升趋势, 且上升幅度较为明显, 表明即使节能服务公司的利润因持股合作而受损, 制造商通过持股合作获得的额外收益也远大于节能服务公司的利润损失, 制造商依然能够采用转移支付方式来推动持股合作的形成, 进而实现双方利润的帕累托改进和减排合作协调. 当前提供合同“双碳”服务的节能服务公司易面临投资周期长、现金流脆弱的困境, 在此情形下制造商可采取多种转移支付方式来促成与节能服务公司的持股合作, 如通过金融借贷、注资持股等方式为节能服务公司

提供资金支持,也可通过合理配置碳资产、合作创新绿色低碳技术、联手开发园区可再生能源、推动回收工业余热余压等途径扩展双方的收益来源。

## 7 结 论

鉴于制造企业对于减排生产的日益重视,同时考虑到节能服务行业发展的新模式,本文基于随机微分博弈对供应链减排的策略选择进行了探讨,分析了制造商自主减排策略、外包合作减排策略和持股合作减排策略下的供应链减排行为和利润变化,并利用理论推导以及算例分析对比了不同情形下3种策略的优劣.提出的主要结论和管理启示如下。

1) 对于制造商而言,是否选择合同“双碳”服务主要取决于节能服务公司的相对减排成本优势,当节能服务公司的成本优势明显时,制造商倾向于合作减排.该条件在折现率和商誉衰减率较高、消费者低碳偏好和碳价较低的情形下会更为严苛.制造商初入减排市场面临一定的技术壁垒,选择合同“双碳”服务是推进产品低碳化、满足企业降碳需求的有效途径.政府可通过补贴、绿色信贷等政策加深制造业与节能服务公司的联系,推广合同“双碳”服务模式,同时引导绿色消费,打造积极公平的碳市场环境,促进环境效益的提升。

2) 对于零售商而言,作为供应链联合减排中的跟随者,其低碳宣传具有一定的滞后性,当制造商选择合同“双碳”服务提升减排投入时,零售商在一定情形下会出现“搭便车”行为,在不增加甚至减少低碳宣传投入的情形下获取额外收益.制造商作为供应链主导者需要加强与零售商的利益捆绑,以成本分摊、收益共享等方式激励零售商跟进供应链减排投入的相关宣传,同时推进低碳产品认证、共享减排信息以降低零售商的宣传成本。

3) 对于持股合作方式,制造商持股参与合作减排可产生更高的减排投入和低碳商誉、提升供应链利润,且持股合作方式可降低制造商对合作减排的成本要求;节能服务公司从中获取的直接利润改进较低,为了促成持股合作,制造商可采取转移支付等方式.在当前碳交易试点推广、制造企业减排成本普遍较高的情形下,节能服务公司选择持股合作的意愿并不强烈,制造商可通过金融借贷、碳资产配置、可再生能源开发等方式作为转移支付手段实现双方在持股合作下的动态协调。

合同“双碳”服务模式的出现为供应链减排提供了新的选择.不同于以往合同能源管理,在此模式下,节能服务公司以降低企业碳排放作为核心业

务.本文针对这一模式展开了研究,分析其对供应链减排产生的影响,并为供应链、节能服务公司等提供了一定管理启示.研究工作存在一些不足和待完善之处.如:模型中未考虑减排过程中所获得的技术积累,现实中政府碳规制会随着产品基准碳排放水准变化而发生改变,持股合作中会因合作双方议价能力等原因出现出资比例与分红比例不一致的情形,这些均是后续需要研究的方向。

## 参考文献 (References)

- [1] 张川, 马慧敏, 郭振. 碳限额与交易机制和消费者低碳偏好下的供应链减排及融资策略[J]. 控制与决策, 2023, 38(11): 3271-3278.  
(Zhang C, Ma H M, Guo Z. Carbon emission reduction and financing strategy for a supply chain under cap-and-trade regulation and consumer's low-carbon preference[J]. Control and Decision, 2023, 38(11): 3271-3278.)
- [2] Gao F, Souza G C. Carbon offsetting with eco-conscious consumers[J]. Management Science, 2022, 68(11): 7879-7897.
- [3] Yang L, Zhang Q, Ji J N. Pricing and carbon emission reduction decisions in supply chains with vertical and horizontal cooperation[J]. International Journal of Production Economics, 2017, 191: 286-297.
- [4] 汪明月, 刘宇, 史文强, 等. 碳交易政策下低碳技术异地协同共享策略及减排收益研究[J]. 系统工程理论与实践, 2019, 39(6): 1419-1434.  
(Wang M Y, Liu Y, Shi W Q, et al. Research on technology remote synergic sharing strategy of low carbon under the ETS in China[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2019, 39(6): 1419-1434.)
- [5] McInerney C, Bunn D W. Expansion of the investor base for the energy transition[J]. Energy Policy, 2019, 129: 1240-1244.
- [6] Tan B, Yavuz Y. Modelling and analysis of a business model to offer energy-saving technologies as a service[J]. International Journal of Production Research, 2015, 53(23): 7118-7135.
- [7] 中国节能协会节能服务产业委员会 (EMCA). 2022 节能服务产业发展报告[EB/OL]. (2023-04-11)[2023-05-02]. <https://mp.weixin.qq.com/s/7178Xmh3U4JyIeoXztxsVw>.  
(ESCO Committee of China Energy Conservation Association (EMCA). (2023-04-11)[2023-05-02]. <https://mp.weixin.qq.com/s/7178Xmh3U4JyIeoXztxsVw>.)
- [8] Zhou Y R, Evans M, Yu S, et al. Linkages between policy and business innovation in the development of China's energy performance contracting market[J]. Energy Policy, 2020, 140: 111208.
- [9] 徐春秋, 赵道致, 原白云, 等. 上下游联合减排与低碳宣传的微分博弈模型[J]. 管理科学学报, 2016, 19(2): 53-65.  
(Xu C Q, Zhao D Z, Yuan B Y, et al. Differential game

- model on joint carbon emission reduction and low-carbon promotion in supply chains[J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2016, 19(2): 53-65.)
- [10] Ma X, Ho W, Ji P, et al. Coordinated pricing analysis with the carbon tax scheme in a supply chain[J]. *Decision Sciences*, 2018, 49(5): 863-900.
- [11] 孙睿, 何大义, 闫晶晶. 基于随机微分博弈的林业碳汇项目开发的风险化解机制研究[J]. *系统工程理论与实践*, 2024, 44(7): 2273-2292.  
(Sun R, He D Y, Yan J J. Risk resolution mechanism for the development of forestry carbon sink projects based on stochastic differential game[J]. *Systems Engineering — Theory & Practice*, 2024, 44(7): 2273-2292.)
- [12] Cai J H, Jiang F Y. Decision models of pricing and carbon emission reduction for low-carbon supply chain under cap-and-trade regulation[J]. *International Journal of Production Economics*, 2023, 264: 108964.
- [13] 贺小丹, 陈博, 杜雯翠. 新冠肺炎疫情对消费者信心的冲击效果与作用机制 —— 基于中国 35 个城市居民问卷调查的分析[J]. *经济与管理研究*, 2021, 42(1): 40-50.  
(He X D, Chen B, Du W C. Impact effect and mechanism of COVID-19 pandemic on consumer confidence — Based on the questionnaire of residents in China's 35 large cities[J]. *Research on Economics and Management*, 2021, 42(1): 40-50.)
- [14] 范贺花, 张超, 周永卫. 考虑随机需求环境下的低碳供应链渠道选择[J]. *统计与决策*, 2020, 36(14): 166-170.  
(Fan H H, Zhang C, Zhou Y W. Channel selection of low-carbon supply chain considering random demand environment[J]. *Statistics & Decision*, 2020, 36(14): 166-170.)
- [15] Kennedy A P, Sethi S P, Siu C C, et al. Cooperative advertising in a dynamic three-echelon supply chain[J]. *Production and Operations Management*, 2021, 30(11): 3881-3905.
- [16] Schlosser R. Stochastic dynamic pricing and advertising in isoelastic oligopoly models[J]. *European Journal of Operational Research*, 2017, 259(3): 1144-1155.
- [17] Tan B. Design of balanced energy savings performance contracts[J]. *International Journal of Production Research*, 2020, 58(5): 1401-1424.
- [18] 郭雨, 白春光, 张璐, 等. 碳交易政策下节能服务公司参与减排的合同选择[J]. *工程管理科技前沿*, 2022, 41(2): 17-25.  
(Guo Y, Bai C G, Zhang L, et al. Contract options of energy service companies participating in carbon emission reduction under Cap-and-Trade[J]. *Frontiers of Science and Technology of Engineering Management*, 2022, 41(2): 17-25.)
- [19] 樊文平, 王旭坪, 刘名武, 等. 不同减排合同下企业间纵向持股对供应链决策的影响[J]. *管理工程学报*, 2021, 35(1): 189-200.  
(Fan W P, Wang X P, Liu M W, et al. The impact of vertical shareholding among enterprises on supply chain decisions under different emission reduction contracts[J]. *Journal of Industrial Engineering and Engineering Management*, 2021, 35(1): 189-200.)
- [20] Sun J S, Yuan P P, Li G. Reducing supply chain carbon emissions in consideration of energy service companies under the cap-and-trade mechanism[J]. *Annals of Operations Research*, DOI: 10.1007/s10479-023-05496-y.
- [21] 白世贞, 吴东秀, 鄢章华. 不同资本结构下节能服务公司参与供应链减排合作策略研究[J]. *运筹与管理*, 2023, 32(7): 7-14.  
(Bai S Z, Wu D X, Yan Z H. Research on the strategy of cooperative emission reduction in supply chain involving ESCO under different capital structure[J]. *Operations Research and Management Science*, 2023, 32(7): 7-14.)
- [22] 徒君, 高凤阳, 黄敏. 不同权力结构下供应链减排策略随机微分博弈[J]. *控制与决策*, 2024, 39(1): 291-300.  
(Tu J, Gao F Y, Huang M. Stochastic differential game of supply chain emission reduction strategies under different power structures[J]. *Control and Decision*, 2024, 39(1): 291-300.)
- [23] Cifarelli M D, Masciandaro D, Peccati L, et al. Success or failure of a firm under different financing policies: A dynamic stochastic model[J]. *European Journal of Operational Research*, 2002, 136(3): 471-482.
- [24] Ghosh D, Shah J. A comparative analysis of greening policies across supply chain structures[J]. *International Journal of Production Economics*, 2012, 135(2): 568-583.
- [25] 王道平, 常敬雅. 政府补贴下考虑持股合作战略的供应链减排动态协调方法[J]. *控制与决策*, 2024, 39(4): 1370-1378.  
(Wang D P, Chang J Y. Research on dynamic coordination of supply chain emission reduction considering shareholding cooperation strategy under government subsidy[J]. *Control and Decision*, 2024, 39(4): 1370-1378.)

## 作者简介

曹柬 (1973-), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 主要研究方向为低碳供应链、闭环供应链, E-mail: [jcao@zjut.edu.cn](mailto:jcao@zjut.edu.cn);

陈锦义 (2000-), 男, 博士生, 主要研究方向为低碳供应链, E-mail: [jychen\\_cosimo@zjut.edu.cn](mailto:jychen_cosimo@zjut.edu.cn);

马修岩 (1988-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为物流与供应链管理、可持续运营、数字经济, E-mail: [max@zjut.edu.cn](mailto:max@zjut.edu.cn).