

控制与决策

Control and Decision

碳限额与交易政策下竞合供应链减排投资策略研究

霍艳芳, 胡慧君, 毛照昉, 韩鹏

引用本文:

霍艳芳, 胡慧君, 毛照昉, 等. 碳限额与交易政策下竞合供应链减排投资策略研究[J]. *控制与决策*, 2025, 40(8): 2579–2590.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2024.1407>

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>

精确动态规划算法求解绿色单机调度问题

Exact dynamic programming algorithm for green single machine scheduling problem
控制与决策. 2021, 36(8): 1891–1900 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1710>

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>

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>

现货市场补充作用下基于总量折扣的运输服务采购问题研究

Transportation service procurement based on total discount under complementary effect of spot market
控制与决策. 2021, 36(11): 2794–2802 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0274>

碳限额与交易政策下竞合供应链减排投资策略研究

霍艳芳^{1†}, 胡慧君¹, 毛照昉¹, 韩鹏²

(1. 天津大学 管理与经济学部, 天津 300072; 2. 天津财经大学 商学院, 天津 300221)

摘要: 在碳限额与交易政策下, 构建一个由生产外包的原始设备制造商 (OEM) 和竞争的合同制造商 (CM) 构成的竞合供应链系统, 考虑溢出效应, 通过对比企业不减排投资、CM 减排投资、OEM 减排投资以及联合减排投资 4 种场景, 对供应链减排投资策略选择问题展开研究. 研究结果表明: 首先, 相较于不投资, CM 总能从投资中获益. 多数情况下 CM 选择联合投资, 但是, 当竞争占主导时, 会选择单独投资. 对于 OEM 而言, 搭便车并非总是有利可图, 联合投资能够显著提升其效益. 其次, 竞合关系中合作占主导或竞争较弱时联合投资为 CM 和 OEM 的均衡策略. 再次, 碳交易价格、溢出系数会影响企业在竞争与合作间的倾向性, 调节企业间的竞合关系, 进而影响供应链企业的决策行为. 最后, 通常情况下供应链减排投资能够获得更好的环境绩效, 但是, 当单位产品的初始碳排放量很大时, 会出现“减排努力困境”.

关键词: 碳限额与交易政策; 竞合供应链; 碳减排投资; 溢出效应

中图分类号: F272

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2024.1407

引用格式: 霍艳芳, 胡慧君, 毛照昉, 等. 碳限额与交易政策下竞合供应链减排投资策略研究 [J]. 控制与决策, 2025, 40(8): 2579-2590.

Research on emission reduction investment strategies in co-opetitive supply chain under carbon cap-and-trade policy

HUO Yan-fang^{1†}, HU Hui-jun¹, MAO Zhao-fang¹, HAN Peng²

(1. School of Management and Economics, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. School of Business, Tianjin University of Finance and Economics, Tianjin 300221, China)

Abstract: Under the carbon cap-and-trade policy, a co-opetitive supply chain system composed of an original equipment manufacturer (OEM) with production outsourcing and a competing contract manufacturer (CM) is constructed. Considering the spillover effect, the issue of the choice of supply chain emission reduction investment strategies is studied by comparing four scenarios: no emission reduction investment, emission reduction investment by a CM, emission reduction investment by an OEM, and joint emission reduction investment. The research findings are as follows: Firstly, compared with no investment, the CM can always benefit from investment. In most cases, the CM chooses joint investment. However, when competition is dominant, the CM will choose to invest alone. For the OEM, free-riding is not always profitable, and joint investment can significantly improve its benefits. Secondly, when cooperation dominates in the co-opetitive relationship or the competition is relatively weak, joint investment is the equilibrium strategy for both the CM and the OEM. Thirdly, the carbon trading price and the spillover coefficient will affect the tendency of enterprises between competition and cooperation, regulate the co-opetitive relationship among enterprises, and further influence the decision-making behaviors of supply chain enterprises. Finally, under normal circumstances, supply chain emission reduction investment can achieve better environmental performance, but when the initial carbon emissions per unit of product are very large, the "emission reduction effort dilemma" will occur.

Keywords: carbon cap-and-trade policy; co-opetitive supply chain; carbon emission reduction investment; spillover effect

0 引言

从《联合国气候变化框架公约》到《巴黎协定》,

全球日益重视环境保护, 为此, 各国政府制定相关政策限制企业碳排放. 由于碳限额与交易机制具有减

收稿日期: 2024-12-04; 录用日期: 2025-04-08.

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划项目 (92167206); 天津市科技计划项目 (22ZLGCX00060).

责任编辑: 刘士新.

[†]通信作者. E-mail: yanfanghuo@tju.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.

排总量确定、减排效率更高等优点,已在欧洲、北美、中国等地广泛应用^[1].对于企业而言,碳限额与交易政策是一把双刃剑,既是挑战也是机遇.在碳政策的制约下,部分企业宣布减产或支付显著的碳成本;相反,一些企业立足可持续发展,积极投资于绿色减排,形成了独特的绿色竞争优势并实现了直接的经济收益.

近20年来,越来越多的原始设备制造商(original equipment manufacturer, OEM)将产品生产、组装等业务外包给合同制造商(contract manufacturer, CM),自己专注于产品设计、研发等核心业务,以此降本增效^[2].部分OEM外包给非竞争CM,也有一些OEM倾向于竞争CM.竞争CM既是OEM的上游供应商,又是OEM在销售市场上的竞争对手,二者组成一条同时存在竞争和合作的供应链.在生产实践中,面对生产者责任制度^[3-4],CM往往主动承担减排投资以实现低碳生产并赢得代工业务.如为减少制造过程的碳排放,三星独立投资30.5亿美元建设新的OLED屏幕生产线,同时服务三星和苹果产品的生产.在强大的政策压力和消费者对品牌责任的关注下,近期OEM也开始逐步参与竞合供应链的减排行动.如在歌尔-苹果智能耳机竞合供应链中,双方在微型麦克风、传感器等组件上深度合作,共同探索减碳技术,携手迈向2030年供应链和产品全生命周期碳中和目标.

通常情况下,企业的策略选择主要取决于投资成本与新增收益间的权衡,但是,在生产实践中,存在一些因素使得企业开展减排投资的策略选择变得更加复杂.碳限额与交易政策的施行改变了供应链的成本收益结构.在竞合供应链中,CM会基于外界环境,权衡横向市场竞争与纵向合同制造业务的相对重要性来做出经营决策,从而影响供应链内的竞合主导关系.碳限额与交易政策借助碳交易价格的变动,改变CM在碳交易市场的收益或支出情况,影响其低碳创新水平和业务重心,进而调整CM与OEM间的竞合态势.此外,由于OEM与CM间的外包合作关系,两者可在彼此的研发投资中学习相关知识和技术,自然地,一个企业的投资成果会溢出到另一个企业上^[5].直观上,溢出效应使得搭便车者无需付出成本即可获益.因此,一般情况下,企业往往会选择搭便车.然而,在实践中,仍然有部分OEM积极参与供应链的减排投资,如苹果对歌尔的绿色投资.碳限额与交易政策和溢出效应等因素导致供应链中同时存在多种竞争与合作的矛盾.这些矛盾使得竞争或合作在竞合关系中占据主导地位,从而影

响企业的策略选择.

与本文研究相关的文献主要涉及竞合供应链、绿色减排投资和技术溢出等领域.“竞合”是由Nalebuff等^[6]在专著《竞合》中提出的概念;Katsaliaki等^[7]通过PRISMA (preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses)框架对供应链竞合的现有研究进行了系统性文献综述,确定了一个由结构、机制、动力、信任和学习等17个变量构成的概念框架.本文研究的竞合结构为“买方-供应商合作”,学者从不同角度对该竞合结构中企业的传统运营问题进行了研究,如OEM是否采购外包^[8-10]、古诺竞争中的主导地位^[11]、CM的产能分配^[12]、市场不确定性和生产时机^[13]、信息共享^[14]、知识产权协议^[15]等.近年来,随着消费者对产品创新需求的增加以及企业对于工艺改进的重视,部分文献将创新决策纳入其中,研究不同策略下的企业的最优选择.Li等^[5]比较了OEM单独投资、两者共同投资以及两者分别投资等场景下企业的策略选择,研究结果表明:OEM始终在共同投资下获利最多;而CM的偏好策略受到竞争强度、技术溢出程度、消费者产品偏好和成本分担率的影响.Li等^[16]的研究中,OEM可从非竞争CM或竞争CM处购买组件,研究结果表明:对于供应商发起的投资,因竞争CM总是倾向于竞合,一定条件下竞合作为均衡结果发生;对于OEM发起的投资,竞合永远不会发生.

大部分碳限额与交易政策方面的文献主要探讨单位产品初始碳排放量和减排效率^[17]、消费者低碳偏好^[17-18]、风险厌恶水平^[19]、供应链整合程度^[20]等因素对于企业减排决策的影响.陈晓红等^[17]研究表明在碳限额与交易机制下随着碳交易价格的上升,清洁型和低减排成本中间型制造商的单位碳排放量会减少,高减排成本中间型制造商的单位碳排放量则先减少后增加再减少,污染型制造商的单位碳排放量则先增加后减少.还有一些文献探讨企业的减排投资策略选择,如Luo等^[21]研究发现在碳限额与交易政策下,与竞争厂商的研发合作将带来更多的利润和更少的碳排放总量;Yang等^[22]开发了一个两期绿色技术投资模型,表明了公司的投资策略取决于销售收益与投资成本间的权衡;王道平等^[23]建立了集中、分散和纵向合作决策模型,表明了仅当零售商边际利润满足一定条件时,零售商才会选择与制造商纵向合作,且碳交易政策会使得合作条件更严苛;Zhu等^[24]于碳混合政策下,对由开展绿色投资与再制造努力的制造商以及开展低碳推广的零售商构成的供应链联合减排决策进行了微分博弈分析,发

现非合作模式下减排效率较低. 双边成本分担合同在提高联合减排效率方面比单边更优, 但是需要纳入利润再分配机制.

目前, 技术溢出的研究侧重于溢出对于供应链上下游或横向竞争环境中企业决策的影响. 纵向供应链中, Ge 等^[25] 研究发现, 供应链企业采取非合作研发时, 较高的溢出会带来更多收益; 若企业采取合作研发, 则该结论仅在某些条件下成立. 李金溪等^[26] 发现垂直溢出的增加提高了供应链企业的减排水平和利润表现. 横向竞争中, D'Aspremont 等^[27] 的研究最为经典, 其讨论了古诺竞争下, 存在研发溢出时两个竞争厂商的横向合作激励. 王桐远等^[28] 研究了上游竞争制造商间的横向溢出效应对于零售商信息分享决策的影响. Yu 等^[29] 研究发现, 当技术溢出较强时, 两竞争企业均不投资于脱碳创新, 脱碳创新的投资努力随技术溢出的增大而减小. Chen 等^[30] 研究发现, 在存在技术溢出效应和政府补贴条件下, 高溢出效应会抑制企业研发投资意愿, 低溢出效应促使企业选择相同研发技术. 上述研究表明溢出效应会促进上下游企业间的创新协同和研发投入, 抑制横向竞争企业的创新动力. 然而, 技术溢出对于竞合供应链企业减排水平的影响尚不明确.

综上, 本文聚焦于受碳限额与交易政策约束的竞合供应链, 探究存在技术溢出效应时企业的减排投资策略选择问题. 本文与以往文献的不同之处在于: 首先, 现有竞合供应链研究多聚焦于采购外包等传统运营问题, 虽然在工艺改进、产品创新等方面取得了进展, 但是普遍缺乏对碳政策约束的系统考量. 本文则针对碳限额与交易政策下竞合供应链企业的减排投资策略选择, 拓展该领域的研究视角. 其次, 当前技术溢出研究主要关注供应链上下游或向企业间溢出效应的影响, 鲜有研究其在竞合供应链中的作用. 虽然 Li 等^[5] 在竞合供应链投资模型中引入了溢出效应, 但是其研究的对象为产品创新而非碳减排投资. 本文将溢出效应纳入竞合供应链中, 考虑溢出效应对碳排放量降低的影响机制.

1 问题描述与模型假设

本文聚焦于一个由生产外包的 OEM 和竞争 CM 构成的竞合供应链. 其中: OEM 将生产外包给 CM 并支付批发价格; CM 在生产并销售自有产品的同时, 承接 OEM 产品的生产. 政府为促进“双碳”目标的早日实现, 对供应链系统实施碳配额与交易政策. 考虑溢出效应, 通过比较企业不减排投资、CM 减排投资、OEM 减排投资以及联合减排投资 4 种场

景, 探讨竞合供应链企业的减排投资策略选择问题. 本文使用的参数及其含义如表 1 所示.

表1 模型参数含义

参数	含义
j	上标 $j = N, C, O, J$ 依次表示模型 N 、模型 C 、模型 O 和模型 J
i	下标 $i = c, o$ 依次表示 CM 和 OEM
w	CM 的单位批发价格
q_i	CM、OEM 的生产数量
e	单位碳减排水平
μ	模型 J 中 OEM 负责的投资成本比例, $0 < \mu < 1$
p_i	CM、OEM 产品的销售价格
a	市场潜在需求规模, $a > 0$
θ	OEM 的品牌优势, $\theta > 0$
γ	CM 和 OEM 产品的替代程度, $0 < \gamma < 1$
β	溢出系数, $0 < \beta \leq 1$
p	碳交易的价格, $p > 0$
λ	初始单位碳排放量, $\lambda > 0$
g	政府分配给 CM 的免费碳排放额度, $g > 0$
E	竞合供应链的环境绩效
π_i	CM、OEM 的利润

本文提出的假设如下.

假设 1 根据文献 [5, 8], 竞合供应链中企业大多采用逆需求函数. OEM 和 CM 的逆需求函数如下所示:

$$p_o = a + \theta - q_o - \gamma q_c, \tag{1}$$

$$p_c = a - q_c - \gamma q_o. \tag{2}$$

其中: a ($a > 0$) 为市场潜在需求规模; θ ($\theta > 0$) 为 OEM 的品牌优势, θ 越大, OEM 的知名度越大; γ ($0 < \gamma < 1$) 为两种产品间的替代程度, γ 越大, 产品替代程度越高, 市场竞争越激烈.

假设 2 产品在生产、运输和销售过程中, 均会产生一定的温室气体, 但是主要的碳排放发生在生产过程, 因此, 本文只假定 CM 受到碳排放规制限制, 政府分配给 CM 一定的碳排放限额, CM 可在碳交易市场购买或出售碳排放权, 单位碳排放量的交易价格 p 为外生变量, 由碳交易市场确定^[3-4].

假设 3 溢出效应的大小取决于 CM 对生产资源的利用和配置状况. 假设 CM 减排投资时溢出系数为 β_1 , OEM 减排投资时溢出系数为 β_2 , 为简化计算, 参考 Chen 等^[30] 的研究, 令 $\beta_1 = \beta_2 = \beta$, $\beta \in (0, 1)$; 而在联合减排投资下, 两者间的合作程度更进一步, 双方共用同一产线, 参见文献 [5, 24], 假设此时溢出是完全的, 即 $\beta = 1$.

假设 4 生产实践中, 企业关于节能减排方面的

投资一般是比较大额的一次性投资,投资成本为减排水平的二次函数^[5,16,21].不同企业进行技术投资的效率不同,即投资成本系数不同,假设CM和OEM的投资成本系数分别为 k_1 和 k_2 .为聚焦核心内容,简化计算,参见文献[5],令 $k_1 = k_2 = 1$,则减排投资成本为 $\frac{1}{2}(e^j)^2, j = C, J, O$.

假设5 低碳生产是不易实现的长期过程,通常需要进行重大设备的替换或生产流程的调整,不如产量和价格等决策变化的频繁、迅速,因此,在博弈顺序中假定减排投资决策先于其他决策^[20].

假设6 参见文献[8],环境绩效表示为 $E^j = \sum_i (\lambda - \beta e^j) q_i^j$.此时,环境绩效是个负向指标.环境绩效越小,碳排放总量越小,对环境越有利.

2 模型构建与求解

2.1 企业不投资(模型N)

设定企业不减排投资时的模型N为基准模型,此时,CM的利润包含批发收益、销售收益以及碳成本(或收益),具体表达式为

$$\pi_c^N = w^N q_o^N + p_c^N q_c^N - p(\lambda(q_o^N + q_c^N) - g). \quad (3)$$

其中: $\lambda(q_o^N + q_c^N)$ 为CM的碳排放总量,其与碳配额 g 的大小决定了CM需要支出的碳成本或获得的碳收益.OEM的利润函数为

$$\pi_o^N = (p_o^N - w^N) q_o^N. \quad (4)$$

在模型N中,企业不进行减排投资,环境绩效为

$$E^N = \lambda(q_c^N + q_o^N). \quad (5)$$

模型N中博弈顺序如下:首先,CM设定批发价格 w^N ;然后,CM和OEM确定各自的生产数量 q_c^N 、 q_o^N .采用逆推法求解式(3)和(4),以获取模型N的均衡结果.为确保模型N中海塞矩阵负定且生产数量等决策变量非负,需要满足 $0 < \lambda < \frac{a}{p}$ 且 $0 < \theta < \bar{\theta}^N$.

定理1 企业不减排投资时的均衡结果为

$$w^N = \frac{\lambda p(\gamma^2(2+\gamma)-8)+4\theta(\gamma^2-2)-a(8+(\gamma-4)\gamma^2)}{-16+6\gamma^2},$$

$$q_o^N = \frac{2(-1+\gamma)m-2\theta}{-8+3\gamma^2},$$

$$q_c^N = \frac{(-2+\gamma)(4+\gamma)m+2\gamma\theta}{-16+6\gamma^2},$$

其中 $m = a - \lambda p > 0$.

推论1 企业不减排投资时,OEM的品牌优势 θ 、碳交易价格 p 对于CM和OEM的影响为:

$$1) \frac{\partial q_o^N}{\partial \theta} > 0, \frac{\partial w^N}{\partial \theta} > 0, \frac{\partial q_c^N}{\partial \theta} < 0; \frac{\partial \pi_c^N}{\partial \theta} > 0$$

($i = c, o$);

$$2) \frac{\partial w^N}{\partial p} > 0, \frac{\partial q_i^N}{\partial p} < 0 (i = c, o); \frac{\partial \pi_o^N}{\partial p} < 0; \text{当 } g < g_1 \text{ 时, } \frac{\partial \pi_c^N}{\partial p} < 0; \text{ 否则, } \frac{\partial \pi_c^N}{\partial p} > 0.$$

由推论1可知:模型N下,随着 θ 增大,OEM的订购数量、CM的批发价格和两者的利润均增大,而CM的生产数量减小.这是因为 θ 越大,OEM在市场竞争中优势越明显,获得的销售收益越大;而CM会避免市场竞争,依赖合同制造收益,降低自身的生产数量并提高批发价格.另外,随着碳交易价格增大,碳政策的约束作用增大,CM努力降低生产数量.因此,随着碳交易价格的增大,CM一方面降低自有产品的产量;另一方面也会提高批发价格来降低OEM的订购数量,导致OEM的利润随碳交易价格增大而减小,CM的利润随碳交易价格的变化取决于碳限额,若碳限额较小,则利润减小;若碳限额较大,则利润增大.

2.2 企业不投资(模型C)

考虑到碳限额与交易政策对企业生产经营的影响,竞合供应链中大部分CM会投资于减排技术,此时CM单位产品的碳排放量变为 $\lambda - e^C$,减排投资成果会溢出到OEM产品上,使得OEM单位产品的碳排放量变为 $\lambda - \beta e^C$.模型C下CM的利润函数为

$$\pi_c^C = w^C q_o^C + p_c^C q_c^C - p((\lambda - e^C)q_c^C + (\lambda - \beta e^C)q_o^C - g) - \frac{1}{2}(e^C)^2. \quad (6)$$

OEM的利润函数为

$$\pi_o^C = (p_o^C - w^C) q_o^C. \quad (7)$$

此时,供应链的环境绩效为

$$E^C = (\lambda - e^C)q_c^C + (\lambda - \beta e^C)q_o^C. \quad (8)$$

模型C中的博弈时序如下:首先,CM决策减排水平 e^C 、批发价格 w^C ;然后,CM和OEM同时决策各自的生产数量 q_c^C 、 q_o^C .采用逆推法求解,得到模型C的均衡结果.为确保模型C中海塞矩阵负定且生产数量等决策变量非负,模型C中需要满足 $m > 0, 0 < p < \bar{p}^C, 0 < \gamma < \beta$,或 $\beta < \gamma < 1$ 且 $0 < \theta < \bar{\theta}^C$.

定理2 CM减排投资时的均衡结果为

$$e^C = \frac{pm(-8+4\beta(-1+\gamma))-(-4+\gamma)\gamma+4p\theta(-\beta+\gamma)}{A},$$

$$w^C = \frac{\lambda p A_1 + a A_2 + 2\theta(-4+2\gamma^2+p^2(2+2\beta^2-3\beta\gamma))}{A},$$

$$q_o^C =$$

$$q_c^C = \frac{-2m(2 + p^2(-1 + \beta) - 2\gamma) + 2\theta(-2 + p^2)}{A} + \frac{(2\gamma + p^2(-2\beta + \gamma))\theta}{A} + \frac{m(p^2(-1 + \beta)(2\beta - \gamma) + (-2 + \gamma)(4 + \gamma))}{A}$$

推论 2 CM 减排投资时, OEM 的品牌优势 θ 、溢出系数 β 和碳交易价格 p 对于 CM 和 OEM 的影响为:

- 1) $\frac{\partial q_c^C}{\partial \theta} > 0$; 当 $\gamma \leq \beta$ 时, $\frac{\partial e^C}{\partial \theta} > 0$.
- 2) 当 $\theta < \theta_1, p > p_1$ 且 $\beta < \gamma$ 时, $\frac{\partial e^C}{\partial \beta} < 0$, 否则, $\frac{\partial e^C}{\partial \beta} > 0$, $\frac{\partial \pi_c^C}{\partial \beta} > 0$; 当 $\theta > \theta_2$ 且 $\beta < \gamma$ 时, $\frac{\partial \pi_c^C}{\partial \beta} < 0$, 否则, $\frac{\partial \pi_c^C}{\partial \beta} > 0$.
- 3) ① 当 $\theta > \theta_3$ 时, 若 $\beta < \gamma$ 且 $0 < p < p_2$, 则 $\frac{\partial e^C}{\partial p} > 0$; 若 $\beta < \gamma$ 且 $p > p_2$, 则 $\frac{\partial e^C}{\partial p} < 0$; 若 $\beta > \gamma$, 则 $\frac{\partial e^C}{\partial p} > 0$. ② 当 $\theta < \theta_3$ 时, 若 $\lambda < \lambda_1$, 则 $\frac{\partial e^C}{\partial p} > 0$; 若 $\lambda > \lambda_1$ 且 $0 < p < p_2$, 则 $\frac{\partial e^C}{\partial p} > 0$; 若 $\lambda > \lambda_1$ 且 $p > p_2$, 则 $\frac{\partial e^C}{\partial p} < 0$.

根据推论 2 的 1), 模型 C 中 OEM 的生产数量随 OEM 的品牌优势 θ 增大而增大. 当溢出系数大于产品替代程度时, CM 的减排水平随 θ 增大而增大; 反之, 则 CM 的减排水平随 θ 增加而减小. 随着 θ 越大, OEM 在市场竞争中的优势越显著, 销售数量越大. 当溢出系数大于产品替代程度时, CM 减排的实际效果较大. 此时, θ 越大, 投资带来的碳收益越大, 因此, CM 持续提高减排水平; 当溢出系数小于产品替代程度时, 减排投资的实际作用效果非常有限. θ 越大, 总销售量越大, 供应链需要付出的碳成本越大, 因此, CM 持续降低减排水平.

根据推论 2 的 2), CM 投资时, 当 OEM 的品牌优势较小、碳交易价格较大且溢出系数小于产品替代程度时, 减排水平随溢出系数增大而减小; 反之, 则减排水平随溢出系数的增大而增大. 利润方面, 与横向竞争关系不同, 竞合供应链中溢出系数总是正向影响 CM 的利润, 这是因为 CM 总能通过灵活调整批发价格来获取更大利润; 而对于 OEM, 与直觉不同, OEM 并非总能通过搭便车获得好处, 是否能够从溢出效应中获得收益, 还需要综合考虑品牌优势、碳交易价格等因素的影响. 这是因为若 OEM 品牌优势显著, 则 OEM 的销售数量较大, β 是影响碳收益的大小的关键因素. 随着 β 增大, 减排投资的实

际效果增大, 对此, CM 持续提高减排水平. 同时, 为获取更多利润, CM 在市场竞争与合同制造中侧重于后者, 选择提高产量、降低批发价格, 此时, OEM 利润随溢出系数增加而增大, OEM 可从搭便车中获益; 但是, 当溢出系数较小时, 批发价格降低的正向影响小于产量增加的负向影响, 导致 OEM 订购量降低, 利润减少, 此时搭便车将损害 OEM 的利益. 若 θ 较小, 则市场竞争激烈, 双方销售数量较小, 溢出系数的作用效果有所减弱, 碳交易价格成为影响减排水平随溢出系数的变化规律的关键参数. 当碳交易价格较低时, 供应链的碳成本较小, CM 的减排水平会随溢出系数增大而增大; 而当碳交易价格较高时, 供应链的碳成本较大, 此时需要考虑 β 与 γ 的大小关系. 当 β 较小时, 随着 β 增大, CM 通过降低减排水平和产量, 提高批发价格来应对碳压力. 当 β 超出某一阈值时, 减排效果能够更大程度地发挥作用, CM 的减排水平会随溢出系数增大而增大.

根据推论 2 的 3), CM 投资时, 减排水平随碳交易价格变化的趋势取决于 OEM 品牌优势、初始单位碳排放量、溢出系数和产品替代程度. 当 OEM 品牌优势显著时, OEM 的销售数量较大. 在碳交易价格较低时, CM 为在碳交易市场获取更多收益, 会随着碳交易价格上升而提高减排水平. 但是当减排水平提高到一定程度后, 投资成本大幅增加. 若溢出系数较小, 则减排投资的效果有限, 继续增加减排水平将导致成本高于收益. 因此, 当碳交易价格超过特定阈值时, 减排水平会下降. 反之, 若溢出系数较大, 则减排水平则会随着碳交易价格的升高而持续上升. 当 OEM 的品牌优势较小时, 双方销售数量较小. 若初始单位碳排放量较小, 则较低的减排水平也能保证碳排放总量小于碳限额. 随着碳交易价格增大, CM 提高减排水平以增大碳收益. 若初始单位碳排放量较大, 则 CM 的碳成本压力较大, 当碳交易价格较小时, 减排投资收益大于成本, CM 增大减排水平; 而当碳交易价格超过阈值后, 投资带来的收益小于付出的成本, 减排水平减小.

2.3 企业不投资 (模型 O)

具有更大品牌优势的 OEM 受到更多消费者的关注, 承担着更大的社会责任, 因此, 某些情况下 OEM 会进行减排投资. OEM 单位产品的碳排放量变为 $\lambda - e^O$, 减排成果部分溢出到 CM 产品上, 模型 O 下 CM 的利润函数 π_c^O 为

$$\pi_c^O = w^O q_c^O + p_c^O q_c^O - p((\lambda - e^O)q_c^O + (\lambda - \beta e^O)q_c^O - g). \tag{9}$$

OEM 的利润函数为

$$\pi_o^o = (p_o^o - w^o)q_o^o - \frac{1}{2}(e^o)^2. \quad (10)$$

此时, 供应链的环境绩效为

$$E^o = (\lambda - \beta e^o)q_c^o + (\lambda - e^o)q_o^o. \quad (11)$$

模型 O 中的博弈顺序如下: 首先, OEM 决策减排水平; 然后, CM 决策批发价格; 最后, CM 和 OEM 同时分别决策各自的生产数量. 逆序求解, 以获取模型 O 的均衡结果. 为确保模型 O 中海塞矩阵负定且生产数量等决策变量非负, 模型 O 中需要满足 $m > 0$ 且 $0 < p < \bar{p}^o$.

定理 3 OEM 减排投资时的均衡结果为

$$e^o = \frac{8p(1 - \beta\gamma)((1 - \gamma)m + \theta)}{B},$$

$$w^o = \frac{B_2}{2B}, \quad q_c^o = \frac{B_3}{2B},$$

$$q_o^o = \frac{2(8 - 3\gamma^2)((1 - \gamma)m + \theta)}{B}.$$

推论 3 OEM 减排投资时, OEM 的品牌优势 θ 、碳交易价格 p 对于 CM 和 OEM 的影响为:

- 1) $\frac{\partial q_o^o}{\partial \theta} > 0; \frac{\partial e^o}{\partial \theta} > 0.$
- 2) $\frac{\partial e^o}{\partial \beta} < 0; \frac{\partial q_o^o}{\partial \beta} < 0; \frac{\partial \pi_o^o}{\partial \beta} < 0; \frac{\partial w^o}{\partial \beta} > 0.$

3) ① 当 $\theta > \theta_4$ 时, $\frac{\partial e^o}{\partial p} > 0.$ ② 当 $\theta < \theta_4$ 时, 若 $\lambda < \lambda_2$, 则 $\frac{\partial e^o}{\partial p} > 0;$ 若 $\lambda > \lambda_2$ 且 $0 < p < p_3$, 则 $\frac{\partial e^o}{\partial p} > 0;$ 若 $\lambda > \lambda_2$ 且 $p > p_3$, 则 $\frac{\partial e^o}{\partial p} < 0.$

根据推论 3 的 1), 模型 O 中 OEM 的生产数量、减排水平随 OEM 的品牌优势 θ 增大而增大.

根据推论 3 的 2), 在模型 O 中, OEM 的减排水平、订购数量和利润均随溢出系数的增大而减小, CM 的批发价随溢出系数的增大而增大. 这是因为随着溢出系数增大, OEM 的减排投资使得 CM 获得

$$q_o^j = \frac{(\gamma - 1)mC_1 + 2\theta(16 - 6\gamma^2 + p^2(\gamma(4 + \gamma) - 10))}{C},$$

$$\mu =$$

$$\frac{-m(-128 + p^2(-6 + \gamma)^2(-2 + \gamma)^2 + 6\gamma^2(20 + (-8 + \gamma)\gamma)) + 4\theta(-1 + \gamma)(6\gamma^2 + p^2(4 + (-8 + \gamma)\gamma))}{2m(-128 + \gamma(128 + \gamma(-4 + 3(-8 + \gamma)\gamma))) - 8\theta(-1 + \gamma)(-16 + 3\gamma^2)},$$

$$e^j = \frac{-pm(-128 + \gamma(128 + \gamma(-4 + 3(-8 + \gamma)\gamma))) + 4p\theta(-1 + \gamma)(-16 + 3\gamma^2)}{2C},$$

$$w^j = \frac{\lambda p C_1(-8 + \gamma^2(2 + \gamma)) + 4\theta(4(-2 + \gamma^2)(-8 + 3\gamma^2) + p^2(-72 + \gamma(64 + \gamma(14 + (-17 + \gamma)\gamma))))}{4C} +$$

$$\frac{a(256 - 4\gamma^2(2 + \gamma)(28 + 3(-6 + \gamma)\gamma) - p^2(352 + \gamma(-320 + \gamma(-32 + \gamma(92 + (-18 + \gamma)\gamma))))}{4C},$$

更多搭便车的好处, 增强其市场竞争力, 导致 CM 提高批发价格, 损害 OEM 利益. 因此, OEM 会降低减排水平和订购量. 这表明 OEM 减排投资时, 溢出效应对于 OEM 的影响是负面的.

根据推论 3 的 3), 模型 O 中当 OEM 的品牌优势较大, 或 OEM 的品牌优势较小且初始单位碳排放量较小时, 减排水平随碳交易价格增大而增大; 反之, 则减排水平随碳交易价格增大先增大后减小. 由推论 3 的 1) 可知, θ 越大, OEM 的销售数量越大, 碳交易价格越大, 减排投资的效果越显著, OEM 提升减排水平获得的收益越大. 因此, 减排水平随碳交易价格增大而增大. 当 θ 较小时, 原因与推论 2 的 3) 分析一致.

2.4 企业不投资 (模型 J)

为推动供应链可持续发展, OEM 与 CM 联合进行减排投资, OEM 承担 μ 比例的投资成本. 模型 J 下 CM 的利润函数 π_c^j 为

$$\pi_c^j = w^j q_o^j + p_c^j q_c^j - p((\lambda - e^j)(q_o^j + q_c^j) - g) - \frac{1}{2}(1 - \mu)(e^j)^2. \quad (12)$$

OEM 的利润函数为

$$\pi_o^j = (p_o^j - w^j)q_o^j - \frac{1}{2}\mu(e^j)^2. \quad (13)$$

联合投资时供应链的环境绩效为

$$E^j = (\lambda - e^j)(q_c^j + q_o^j). \quad (14)$$

模型 J 中的博弈顺序如下: 首先, OEM 决策分担比例 μ ; 然后, CM 决策减排水平 e^j 、批发价格 w^j ; 最后, CM 和 OEM 同时分别决策各自的生产数量 q_c^j 、 q_o^j . 逆序求解, 得到模型 J 的均衡结果. 为确保模型 J 中海塞矩阵负定且生产数量等决策变量非负, 模型 J 中需要满足 $m > 0, 0 < p < \bar{p}^j$ 且 $\theta > \underline{\theta}^j$.

定理 4 CM 和 OEM 减排投资时的均衡结果为

$$q_c^J = \frac{(-2 + \gamma)(4 + \gamma)mC_1 + 4\theta(-16\gamma + 6\gamma^3 + p^2(16 + \gamma(-6 + \gamma(-7 + 2\gamma))))}{4C}$$

推论 4 联合减排投资时, OEM 的品牌优势 θ 、碳交易价格 p 对于 CM 和 OEM 的影响为:

1) $\frac{\partial \mu^J}{\partial \theta} > 0$; $\frac{\partial q_c^J}{\partial \theta} > 0$; $\frac{\partial e^J}{\partial \theta} > 0$.

2) ① 当 $\theta > \theta_5$ 时, $\frac{\partial e^J}{\partial p} > 0$. ② 当 $\theta < \theta_5$ 时, 若 $\lambda < \lambda_3$, 则 $\frac{\partial e^J}{\partial p} > 0$; 若 $\lambda > \lambda_3$ 且 $0 < p < p_4$, 则 $\frac{\partial e^O}{\partial p} > 0$; 若 $\lambda > \lambda_3$ 且 $p > p_4$, 则 $\frac{\partial e^O}{\partial p} < 0$.

根据推论 3 和推论 4, 模型 J 中 OEM 的品牌优势、碳交易价格对减排水平等决策的影响与模型 O 中类似.

3 模型分析

3.1 模型 C 与模型 N 比较

命题 1 与不减排投资相比, CM 减排投资时, 有:

1) $q_c^C > q_c^N$.

2) 当 $\beta > \gamma$ 时, $q_o^C > q_o^N$; 否则, $q_o^C < q_o^N$.

3) 当 $0 < \beta < \frac{\gamma^3}{8 - 2\gamma^2}$ 时, $w^C > w^N$; 否则, $w^C < w^N$.

4) $\pi_c^C > \pi_c^N$.

5) 当 $\beta > \gamma$ 时, $\pi_o^C > \pi_o^N$; 否则, $\pi_o^C < \pi_o^N$.

6) ① 当 $0 < \lambda < \lambda_4$ 时, $E^C < E^N$; ② 当 $\lambda_4 < \lambda < \lambda_5$ 时, 若 $0 < \theta < \theta_6$, 则当 $0 < \beta < \frac{\gamma}{2}$ 或 $\frac{\gamma}{2} < \beta < \gamma$ 且 $p > p_5$ 时, $E^C < E^N$; 否则, $E^C > E^N$. 若 $\theta > \theta_6$, 则当 $\gamma < \beta$, 或 $\frac{\gamma}{2} < \beta < \gamma$ 且 $p < p_5$ 时, $E^C < E^N$; 否则, $E^C > E^N$; ③ 当 $\lambda > \lambda_5$ 时, $E^C > E^N$.

由命题 1 可知, 相较于模型 N , 模型 C 中 CM 的生产数量增加, 而 CM 的批发价格和 OEM 的生产数量取决于溢出系数和产品替代程度. 利润层面, 模型 C 中 CM 的利润更大, OEM 的利润情况则取决于溢出系数和产品替代程度的相对大小: 当溢出系数大于产品替代程度时, 模型 C 下 OEM 利润更大; 否则, 模型 N 下 OEM 利润更大. 从环境绩效视角看, 相较于不投资, 若初始单位碳排放量较小, 则减排投资总会带来更好的环境绩效; 若初始单位碳排放量很大, 则不投资时环境绩效更好; 若初始单位碳排放量处于中等水平, 则减排投资可能会使得环境绩效更好或更糟糕, 具体结果取决于 OEM 的品牌优势、溢出系数、产品替代程度以及碳交易价格等.

直觉上, 模型 C 下 OEM 不用承担任何投资成本, 且通过搭便车的方式能够从 CM 的减排成果中

受益, 较之模型 N 利润应得到改善. 但是根据命题 1 的 5), OEM 的利润可能会变好也可能会变差, 其变化情况受溢出系数影响. 若溢出系数大于产品替代程度, 则减排投资能够大幅降低所有产品的单位碳排放量, 为获取更高的合同制造收益和碳收益, CM 选择降低批发价格, 激励 OEM 增加订单, 从而促使 OEM 的市场销售收益显著提升. 此时, 在竞合关系中, 合作占据主导地位, OEM 与 CM 实现双赢. 然而, 若溢出系数小于产品替代程度, 则 CM 的投资成果赋予其自有产品相比于 OEM 产品更突出的低碳优势, 极大提升了 CM 产品的市场竞争力. 此时, CM 更倾向于竞争, 在市场竞争与合同制造中更侧重于前者, 这使得双方在市场中的竞争态势迅速升温, 在竞合关系中, 竞争因素占据了主导地位. 为此, CM 选择提高批发价格, 使得 OEM 的单位产品边际利润变小 ($p_o^C - w^C < p_o^N - w^N$). 面对成本压力, OEM 不得不降低产量, 最终导致 OEM 的利润受损.

综上, 在竞合供应链中, 溢出系数、产品替代程度等参数的变化会影响企业的竞合倾向性, 从而改变供应链的竞合状态. 但是无论是竞争主导还是合作主导, CM 总能通过灵活调整批发价格来获取更大利润. 对于 OEM 而言, 搭便车并非总是上策, 若产品替代程度很高, CM 通过投资提升自身竞争能力并从中获益, 则会损伤 OEM 的利益. 另外, 通常情况下, 企业进行减排投资能够改善环境绩效, 但是当行业的初始单位碳排放量很大时, 会出现“减排努力困境”, 即供应链成员的减排努力可能反而会恶化环境影响.

3.2 模型 O 与模型 N 比较

命题 2 与不减排投资相比, OEM 减排投资时, 有:

1) $w^O < w^N$.

2) $q_o^O > q_o^N$.

3) 当 $0 < \beta \leq \frac{2}{7}$ 且 $0 < \gamma < \sqrt{8 + \frac{1}{\beta^2}} - \frac{1}{\beta}$, 或 $\frac{2}{7} < \beta < 1$ 时, $q_c^O > q_c^N$; 否则, $q_c^O < q_c^N$.

4) $\pi_i^O > \pi_i^N, i = c, o$.

5) ① 当 $0 < \lambda < \lambda_6$ 时, $E^O < E^N$. ② 当 $\lambda_6 < \lambda < \lambda_7$ 时, 若 $\theta > \theta_7$, 则 $E^O < E^N$; 否则, $E^O > E^N$. ③ 当 $\lambda > \lambda_7$ 时, $E^O > E^N$.

根据命题 2, 与模型 N 相比, 在模型 O 中, CM 的批发价格降低, OEM 产量增加. CM 产量增减与溢出

系数、产品替代程度相关:当溢出系数大,或溢出系数小且产品替代程度低时,CM产量增加;反之,则减少.此外,OEM和CM的利润均有所提升.环境绩效方面,若初始单位碳排放量较小,或排放量处于中等水平且OEM的品牌优势较大,则投资减排时环境绩效更好;否则,不投资时环境绩效更好.

相较于不投资,OEM减排投资有效缓解了CM直面的碳压力,减轻了碳限额对于产量的约束,作为回应,CM降低批发价格,OEM则提高产量,由于增大的市场销售收益超出其投资成本,OEM的利润有所提升.对于CM而言,溢出系数影响其产量决策,若溢出系数较大,则CM有契机增加产能,因此会选择提高产量;若溢出系数较小但是产品替代程度较低,则意味着市场竞争相对缓和,CM有机会扩大销售,同样会设定较高产量;然而,若溢出系数较小而产品替代程度较高,则为避免激烈的市场竞争,CM会降低产量,此时,与OEM的合同制造收益成为CM的主要收入途径.无论CM采取何种产量决策,总能通过搭便车来获取更高利润.综上,在模型O下,OEM和CM实现了帕累托改善.

3.3 模型J与模型N比较

命题3 与不减排投资相比,OEM和CM联合减排投资时,有:

- 1) $q_i^J > q_i^N, i = c, o.$
- 2) $w^J < w^N.$
- 3) $\pi_i^J > \pi_i^N, i = c, o.$
- 4) ① 当 $0 < \lambda < \lambda_8$ 时, $E^J < E^N.$ ② 当 $\lambda_8 < \lambda < \lambda_9$ 时,若 $\theta > \theta_8$, 则 $E^J < E^N$; 否则, $E^J > E^N.$ ③ 当 $\lambda > \lambda_9$ 时, $E^J > E^N.$

由命题3可知,与模型N相比,在模型J中,CM的批发价格降低,OEM与CM的生产数量和利润均增大.环境绩效的表现情况则与模型O中类似.

相较于不投资,在联合减排投资下,由于双方完全共享减排成果,CM的产能得以最大程度释放,OEM和CM的生产数量均有所增加.作为对于OEM参与减排的回报,CM降低批发价格.此时,OEM因减排付出的投资成本小于投资带来的收益,从而实现利润增长;另外,CM的市场销售和合同制造收益均有所增加,且OEM分担了部分减排成本,使得CM的投资成本小于投资收益,其利润亦显著增大.因此,在模型J下,OEM和CM同样能够实现帕累托改善.

3.4 减排水平比较

命题4 比较模型C、模型O、模型J中的减排水平,有:当 $\theta < \theta_9, \gamma_1 < \gamma < 1$ 且 $\underline{\beta} < \beta < \beta_1$ 时, e^C

最大;否则, e^J 最大.

由命题4可知,大多数情况下,模型J下减排水平最大.只有当OEM的品牌优势较小、产品替代程度较高且溢出系数较小时,模型C下减排水平最大.图1为 $a = 200, g = 200, \lambda = 2, p = 1.3, \gamma = 0.65$ 时模型C、模型O、模型J三种场景下,减排水平取最大值的情形.

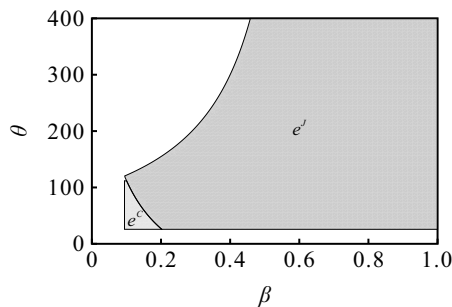


图1 产品替代程度较高时减排水平取最大值的情形

相较于单独投资,联合投资下OEM和CM共同出资,能够承担更高的减排成本,从而实现更高的减排水平,因此,在大多数情况下,联合投资的减排效果最佳.而当OEM的品牌优势较小、产品替代程度较高且溢出系数较小时,CM与OEM实力相近,市场竞争异常激烈.此时,CM更倾向于竞争,在市场竞争与合同制造中更侧重于前者,CM单独投资时,更高的减排水平极大地增强了其在市场上的竞争力,因此,当竞合关系中竞争占据主导地位时,CM减排投资下减排水平最大.

3.5 均衡策略分析

CM和OEM作为供应链中承担不同角色的两个主体,对于是否投资于减排技术以及采取何种投资策略,均有着各自的考量.因此,本节将先从这两个主体的视角,分别确定它们的最优策略,进而探究双方的均衡策略.

3.5.1 CM主导投资的双赢策略

从CM的角度看,其主导的投资策略有不投资、单独投资以及联合投资3种情况.比较3种投资策略下企业的利润,可得到命题5.

命题5 在CM主导的3种投资策略下,CM和OEM的利润情况如下:

- 1) 当 $\theta < \theta_{10}, \gamma_2 < \gamma < 1$, 且 $\underline{\beta} < \beta < \beta_1$ 时, $\pi_c^C > \pi_c^J > \pi_c^N$; 否则, $\pi_c^J > \pi_c^C > \pi_c^N.$
- 2) $\pi_o^J > \max\{\pi_o^N, \pi_o^C\}.$

根据命题5,在CM主导的不投资、单独投资、联合投资这3种策略中,对于CM而言,多数情况下,模型J下利润最大.然而,当竞合关系以竞争为主导,即OEM的品牌优势不明显、产品替代程度较高

且溢出系数较小时,模型C下CM的利润最大.这一结论的机理与命题4一致.命题5的1)解释了面对品牌优势显著的苹果公司,歌尔虽然在市场销售自有品牌耳机,但是其焦点仍然在合同制造业务上,单独投资动力不足,更愿意与苹果在原材料采购、生产制造等环节共同探索减碳技术;而苹果凭借其较大品牌优势,受歌尔市场竞争的负面影响较小,愿意共同投资来降低耳机供应链的碳排放量,以实现低碳目标.相反,在三星与苹果这类企业实力相近、产品相似度高的竞合供应链中,苹果借助三星的先进技术生产产品,但是同时警惕市场竞争,因此,不会对三星投资;另一方面,三星出于防止技术和商业机密泄露、增强自身竞争力以及更好地把控投资方向和节奏等考虑,更倾向于单独投资,最终呈现三星单独投资的局面.

对于OEM而言,在CM主导的3种投资策略下,联合投资是占优策略.这一策略能够在溢出系数较小时,CM单独投资对自身利益的损害.尽管在溢出系数较大时,OEM通过CM投资的行为能够增加收益,但是,其利润始终低于采取联合投资策略所获利润.这表明即使抛开社会责任,仅考虑经济利润,苹果等OEM与CM联合开展减排投资是最优策略.因此,OEM应打破“搭便车”这种不劳而获的传统思维定式,充分认识到参与供应链的减排投资,不仅是履行社会责任的必要之举,更是实现自身经济目标的基本要求.

根据命题5,可得到CM主导投资下的双赢策略,如推论5所示.

推论5 当 $\theta > \theta_{10}$,或 $\theta < \theta_{10}$ 且 $\gamma < \gamma_2$,或 $\theta < \theta_{10}$, $\gamma > \gamma_2$ 且 $\beta > \beta_1$ 时,模型J为CM主导投资的双赢策略.

由推论5可知,当OEM的品牌优势较大,或OEM的品牌优势较小且产品替代程度较低,或OEM的品牌优势较小、产品替代程度较高且溢出系数较大时,模型J为CM主导投资下的双赢策略.这表明在CM主导的3种投资策略下,竞合关系中合作占主导或竞争较弱时联合减排投资为CM和OEM的最佳策略选择.

3.5.2 OEM主导投资的双赢策略

从OEM的角度看,其主导的投资策略有不投资、单独投资以及联合投资3种情况.比较3种投资策略下企业的利润,可得到命题6.

命题6 在OEM主导的3种投资策略下,CM和OEM的利润情况为 $\pi_i^J > \pi_i^O > \pi_i^N, i = c, o$

根据命题6,在OEM主导的3种投资场景中,

无论是CM还是OEM,模型J下企业的利润最大,模型O下次之,模型N下最小.原因在于:对于OEM而言,若单独投资时设定较高的减排水平,则CM将直接获得投资带来的碳收益,考虑到市场竞争,CM可能会采取提高批发价格等竞争性策略,从而导致OEM利润受损.为了避免这种情况,OEM单独投资时减排水平较低,故其利润低于联合投资时的利润.对于CM而言,尽管在模型O下无需承担投资成本且能够享受技术溢出的好处,但是,OEM在减排方面的投入相较于联合投资模式大幅减少.这种投入的不足间接导致产品生产成本上升,进而损害了CM的利润.综上所述,相较于联合投资,OEM单独投资下OEM和CM的利润有所降低.此外,命题2中已证明相较于不投资,OEM减排投资下OEM和CM的利润均有所提升.命题6表明,OEM参与竞合供应链减排投资时,单独投资永远不是最佳策略选择.这与现实相符,以苹果为例,相较于单独投资,其首选与CM进行联合投资.

根据命题6,可得到OEM主导投资下的双赢策略,如推论6所示.

推论6 模型J为OEM主导投资的双赢策略.

推论5和推论6分别从CM、OEM主导投资的策略中得到了企业的双赢策略,由推论5和推论6进一步推导出CM和OEM的均衡策略如命题7所示.

命题7 当 $\theta > \theta_{10}$,或 $\theta < \theta_{10}$ 且 $\gamma < \gamma_2$,或 $\theta < \theta_{10}$, $\gamma > \gamma_2$ 且 $\beta > \beta_1$ 时,模型J为OEM与CM的均衡策略.

由命题7可知,在竞合供应链结构中,除竞争异常激烈的情况,联合减排时的减排水平最大,双方的利润也最大.这表明当竞合关系以合作为主导或竞争较弱时,联合减排是双方的最优选择.

4 数值模拟

本节通过数值仿真对上述结论进行验证和进一步分析.设定相关参数为 $a = 200, g = 200$,其他参数依具体情形设定.

4.1 溢出系数对减排水平的影响

结合前文推论2和推论3可知:OEM减排投资时,减排水平随溢出系数增大而降低.CM减排投资时,情况相对复杂:当OEM品牌优势显著时,减排水平随溢出系数先降后升,阈值为产品替代程度;若OEM品牌优势不显著,则结果受碳交易价格影响,此时,溢出系数对于减排水平的影响如图2所示.

图2中:虚线呈现OEM减排投资下减排水平随

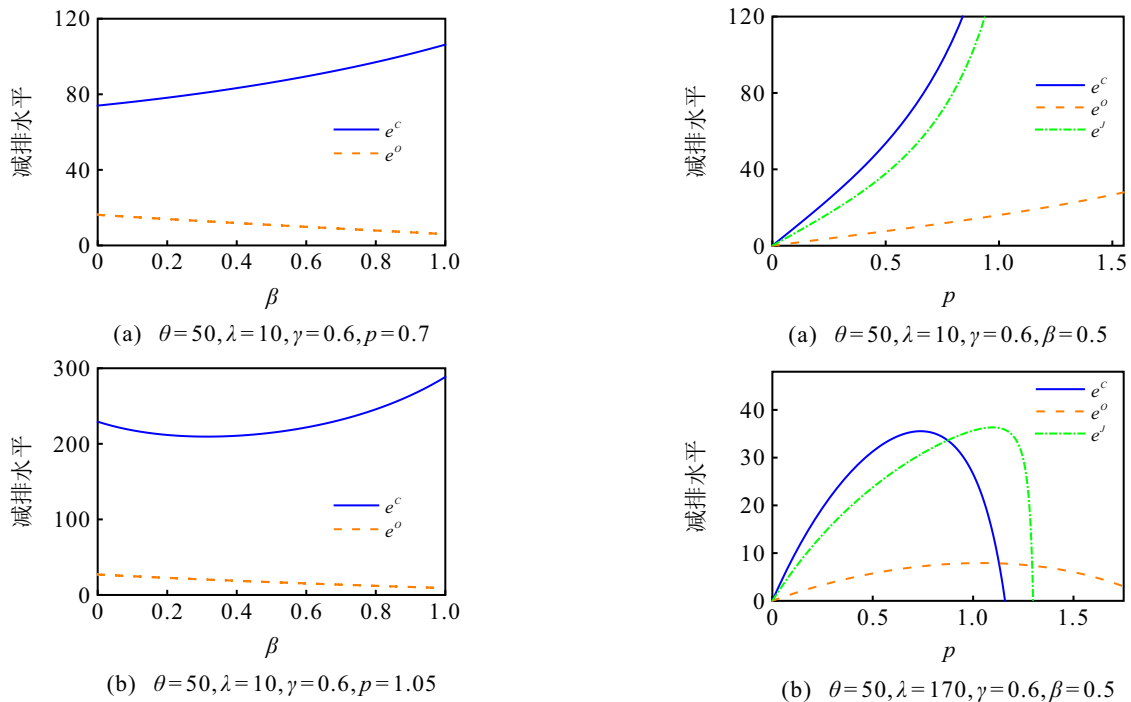


图2 θ 较小时减排水平溢出系数的变化趋势

溢出系数增大而减小的趋势, 实线则展示 CM 减排投资时减排水平随溢出系数的变化. 图 2(a) 显示, 当碳交易价格较低时, CM 减排投资下减排水平随溢出系数增大而升高; 图 2(b) 表明, 当碳交易价格较高时, 随溢出系数增大, CM 减排投资下减排水平先降低后升高, 该结论与推论 2 的 2)、推论 3 的 2) 相符.

4.2 碳交易价格对减排水平的影响

图 3 为碳交易价格对减排水平的影响. 图 3(a) 和图 3(b) 为 θ 较小时的情况. 如图 3(a) 所示, 当 OEM 的品牌优势 θ 较小、初始单位碳排放量 λ 较小时, 3 种场景下减排水平均随 p 增大而增大; 如图 3(b) 所示, 当 θ 较小、 λ 较大时, 随着 p 增大, 3 种场景下减排水平均先增大后减小; 图 3(c) 和图 3(d) 表明, 当 θ 较大时, 联合投资和 OEM 减排投资时减排水平随 p 增大而增大, 而只有满足溢出系数大于产品替代程度时, CM 减排投资时减排水平的表现与其变化一致, 否则减排水平较低且随碳交易价格的变化趋势为先增大后减小, 该结论与前文推论 2 的 3)、推论 3 的 3) 以及推论 4 的 2) 一致. 另外, 图 3 表明, 一般情况下, 联合投资时减排水平最大, 但是当竞争异常激烈 (如图 3(a) 所示) 时, 存在 CM 减排投资时减排水平最大的情况, 该结论与命题 4 一致.

5 结论

本文考虑了一个由生产外包的 OEM 和为其代工的 CM 构成的竞合供应链, 在这条竞合供应链中, CM 既是 OEM 的上游供应商, 又是 OEM 在销售市场上的竞争对手. 面对碳减排压力, 考虑投资溢出效

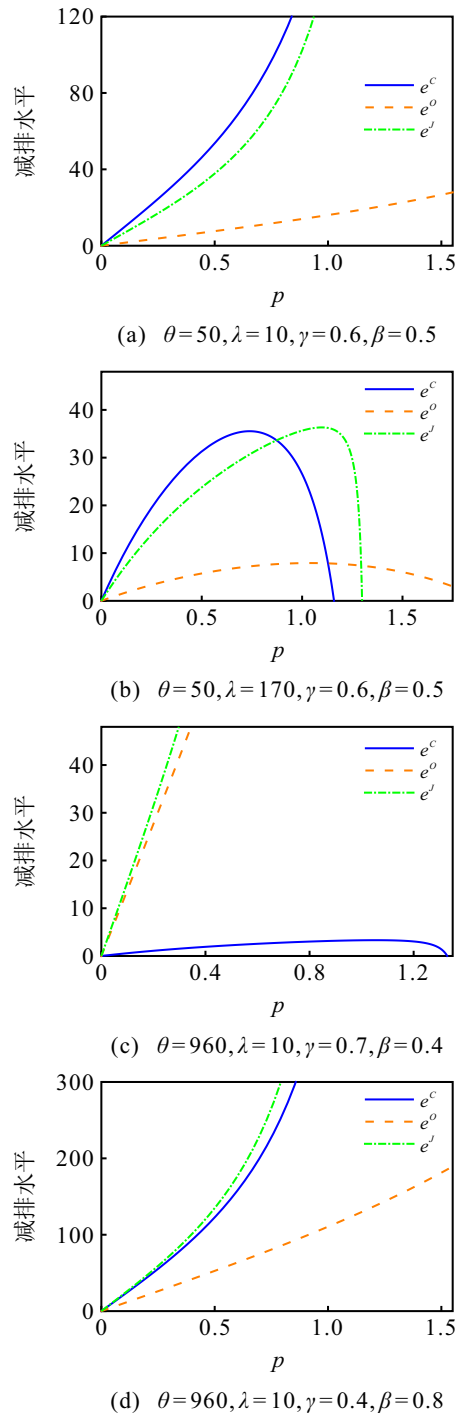


图3 碳交易价格对减排水平的影响

应, 研究了在碳限额与交易政策下 CM 和 OEM 的减排投资策略选择, 以及碳交易价格、溢出系数等参数对于企业策略选择和经营决策的影响.

研究发现: 首先, 当竞合关系中合作占主导或竞争较弱时, 联合投资为 CM 与 OEM 的均衡策略. 这与之前的文献结论基本一致, 在碳限额与交易下, 联合减排可以实现供应链企业的帕累托改进^[24], 也能够使得两个竞争厂商获得更高的利润^[21]. 另外, 在供应链减排投资情境下, 对于 OEM 和 CM 而言, “搭便车”均非占优策略. 从 CM 视角看, 投资虽然总比不投资获益更多, 但是当 OEM 投资时, 较低的减排

水平使得此时的搭便车收益远不及联合投资,某些条件下甚至不如自己投资.从OEM角度分析,在技术溢出较大时,虽然能够从CM投资中获得搭便车收益,但是该收益低于联合投资收益,且当技术溢出较小时,搭便车时收益甚至低于不投资情境.因此,在实践中,OEM应积极参与供应链减排行动,通过与CM通力合作,一方面促进供应链零碳目标的实现,另一方面最优化自身的策略选择,在竞合中实现共赢.其次,在碳限额和交易政策与主体间竞合关系的共同作用下,碳交易价格、溢出系数等参数的变化会改变企业在竞争与合作间的倾向性,进而影响了企业的决策行为.与过往研究中“溢出效应促进上下游企业研发投入与创新协同^[26],削弱横向竞争企业创新动力^[29]”的结论不同,在碳限额约束的竞合供应链中,溢出系数的增加对于产能调整具有显著影响,致使不同企业投资时,溢出效应的具体作用存在差异.CM减排投资时,多数情况下,减排水平会随溢出系数的增大而提高,且溢出系数增大总能提升CM的利润,增强其采取合作策略的倾向,促使双方加强合作;OEM减排投资时,CM会因搭便车而提升市场竞争力,此时溢出效应会削弱OEM的投资动机,加剧竞争趋势.考虑到碳交易政策既能给企业增加成本也能带来收益,碳交易价格对于企业竞争与合作的影响取决于OEM的品牌优势和产品的初始单位碳排放水平等因素.因此,政府应根据行业特点和市场态势动态来调整碳配额,以影响碳交易价格并引导企业决策,从而促进经济发展和生态改善.最后,大部分情况下,进行减排投资能够减少企业生产活动对环境带来的负面影响,但是,当初始单位碳排放量较大时会出现“减排努力困境”,即供应链成员在减排方面的努力可能会恶化对环境的影响.因此,企业在绿色发展中要警戒这种初衷虽然好但是结果却背道而驰的情况.

本文的研究仍然存在一些不足和局限:首先,消费者对于企业低碳减排行动往往具有重要影响,企业开展绿色减排投资除政策压力,也是为了吸引消费者,因此,在未来可以考虑消费者的低碳偏好;其次,未来可从更微观的层面考量技术溢出特征,进一步揭示溢出效应的影响方式;最后,本文探索了买方-供应商供应链中的竞合关系,期待未来有更多网络、生态系统等复杂环境中的竞合关系研究.

参考文献 (References)

[1] Cai Y J, Choi T M. Extended producer responsibility: A systematic review and innovative proposals for

improving sustainability[J]. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 2021, 68(1): 272-288.

[2] Feng Q, Lu L X. The strategic perils of low cost outsourcing[J]. *Management Science*, 2012, 58(6): 1196-1210.

[3] Hong Z F, Chu C B, Yu Y G. Dual-mode production planning for manufacturing with emission constraints[J]. *European Journal of Operational Research*, 2016, 251(1): 96-106.

[4] Chen W, Chen J, Ma Y K. Renewable energy investment and carbon emissions under cap-and-trade mechanisms[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 278: 123341.

[5] Li G, Wu H M, Zheng H. Technology investment strategy for a competitive manufacturer in the presence of technology spillover[J]. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 2023, 70(3): 1162-1173.

[6] Nalebuff B J, Brandenburger A M. Co-opetition[M]. New York: Currency Doubleday, 1996.

[7] Katsaliaki K, Kumar S, Loulos V. Supply chain co-opetition: A review of structures, mechanisms and dynamics[J]. *International Journal of Production Economics*, 2024, 267: 109057.

[8] Niu B Z, Mu Z H, Chen L, et al. Coordinate the economic and environmental sustainability via procurement outsourcing in a co-opetitive supply chain[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2019, 146: 17-27.

[9] Niu B Z, Chen Y Y, Zeng F Z. One step further for procurement cooperation: Will the industry leader benefit from its competitive manufacturer's joint determination of consumption quality?[J]. *European Journal of Operational Research*, 2023, 311(3): 989-1008.

[10] 王甜源,傅科,徐佳焱.考虑竞争的OEM生产采购外包战略决策[J].管理科学学报,2024,27(1):28-45.
(Wang T Y, Fu K, Xu J Y. OEM's manufacturing and procurement outsourcing strategy with competition[J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2024, 27(1): 28-45.)

[11] Chen Y W, Karamemis G, Zhang J Y. A win-win strategy analysis for an original equipment manufacturer and a contract manufacturer in a competitive market[J]. *European Journal of Operational Research*, 2021, 293(1): 177-189.

[12] Ghamat S, Pun H, Yan X H. Optimal outsourcing strategies when capacity is limited[J]. *Decision Sciences*, 2018, 49(5): 958-991.

[13] Niu B Z, Chen K L, Fang X, et al. Technology specifications and production timing in a co-opetitive supply chain[J]. *Production and Operations Management*, 2019, 28(8): 1990-2007.

[14] Li G, Tian L, Zheng H. Information sharing in an online marketplace with co-opetitive sellers[J]. *Production and Operations Management*, 2021, 30(10): 3713-3734.

[15] Ghamat S, Pun H, Critchley G, et al. Using intellectual

- property agreements in the presence of supplier and third-party copycatting[J]. *European Journal of Operational Research*, 2021, 291(2): 680-692.
- [16] Li W, Zhao X. Competition or coopetition? Equilibrium analysis in the presence of process improvement[J]. *European Journal of Operational Research*, 2022, 297(1): 180-202.
- [17] 陈晓红, 曾祥宇, 王傅强. 碳限额交易机制下碳交易价格对供应链碳排放的影响[J]. *系统工程理论与实践*, 2016, 36(10): 2562-2571.
(Chen X H, Zeng X Y, Wang F Q. Impacts of carbon trading price on carbon emission in supply chain under the cap-and-trade system[J]. *Systems Engineering — Theory & Practice*, 2016, 36(10): 2562-2571.)
- [18] 张令荣, 徐航, 李云凤. 碳配额交易背景下双渠道供应链减排决策研究[J]. *管理工程学报*, 2023, 37(2): 90-98.
(Zhang L R, Xu H, Li Y F. Research on emission reduction decision-making of dual-channel supply chain under the carbon cap-and-trade policy[J]. *Journal of Industrial Engineering and Engineering Management*, 2023, 37(2): 90-98.)
- [19] Sun H X, Yang J, Zhong Y. Optimal decisions for two risk-averse competitive manufacturers under the cap-and-trade policy and uncertain demand[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17(3): 1010.
- [20] Bai Q G, Chen J G, Xu J T. Energy conservation investment and supply chain structure under cap-and-trade regulation for a green product[J]. *Omega*, 2023, 119: 102886.
- [21] Luo Z, Chen X, Wang X J. The role of co-opetition in low carbon manufacturing[J]. *European Journal of Operational Research*, 2016, 253(2): 392-403.
- [22] Yang M F, Chen X. Green technology investment strategies under cap-and-trade policy[J]. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 2022, 71: 3867-3880.
- [23] 王道平, 常敬雅, 郝玫. 碳交易政策下基于技术投资的供应链纵向合作动态减排研究[J]. *控制与决策*, 2024, 39(5): 1654-1664.
(Wang D P, Chang J Y, Hao M. Research on dynamic emission reduction of supply chain vertical cooperation based on technology investment under carbon trading policy[J]. *Control and Decision*, 2024, 39(5): 1654-1664.)
- [24] Zhu C, Xi X, Goh M. Differential game analysis of joint emission reduction decisions under mixed carbon policies and CEA[J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 358: 120913.
- [25] Ge Z H, Hu Q Y, Xia Y S. Firms' R&D cooperation behavior in a supply chain[J]. *Production and Operations Management*, 2014, 23(4): 599-609.
- [26] 李金溪, 易余胤. 考虑垂直溢出的供应链碳减排决策模型[J]. *管理工程学报*, 2020, 34(1): 136-146.
(Li J X, Yi Y Y. The decision-making of carbon emissions reduction in a two-echelon supply chain with vertical spillovers[J]. *Journal of Industrial Engineering and Engineering Management*, 2020, 34(1): 136-146.)
- [27] D'Aspremont C, Jacquemin A. Cooperative and noncooperative R & D in duopoly with spillovers[J]. *The American Economic Review*, 1988, 78(5): 1133-1137.
- [28] 王桐远, 李进军, 李延来. 制造商竞争下创新投资对零售商信息分享策略的影响[J]. *控制与决策*, 2020, 35(12): 3006-3016.
(Wang T Y, Li J J, Li Y L. Optimal information sharing strategy for retailer under competitive manufacturers' innovation investment[J]. *Control and Decision*, 2020, 35(12): 3006-3016.)
- [29] Yu M, Liu K Y, Li W. Decarbonizing innovation investment strategy in competing supply chains considering technology spillovers and environmental regulation[J]. *Expert Systems with Applications*, 2024, 238: 122106.
- [30] Chen K H, Fan Y M. Selection of R&D techniques: The influence of spillover effects and government subsidies[J]. *Transportation Research — Part E: Logistics and Transportation Review*, 2025, 194: 103879.

作者简介

霍艳芳 (1972-), 女, 副教授, 博士, 主要研究方向为物流与供应链管理、现代工业工程理论与应用, E-mail: yanfanghuo@tju.edu.cn;

胡慧君 (2001-), 女, 硕士生, 主要研究方向为运营与供应链管理, E-mail: 2496801575@qq.com;

毛照昉 (1977-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为运营与供应链管理、智能制造、复杂系统管理, E-mail: maozhaofang@tju.edu.cn;

韩鹏 (1991-), 男, 讲师, 博士, 主要研究方向为供应链运作管理、消费者行为、智慧供应链, E-mail: hanpengquantong@163.com.