

跨国合同制造供应链减排技术垂直一体化决策

赖新峰¹, 王鑫¹, 陈志祥², 刘伟明^{3*}

(1. 江西财经大学信息管理与数学学院, 江西 南昌 300013; 2. 中山大学管理学院, 广东 广州 510275;
3. 广州航海学院数字经济与贸易学院, 广东 广州 510725)

摘要: 近年来, 国际贸易环境动荡对绿色跨国供应链产生了极大的干扰, 垂直一体化战略是克服这些风险的有效途径。在此背景下, 文章构建了三种不同的垂直一体化离岸外包供应链博弈模型, 分析了其博弈均衡结果并进行了对比。研究表明: 上下游合同制造商在垂直一体化战略下将存在“搭便车”经济现象, 处于上游的合同制造商能从“搭便车”中攫取更高的利润; 不存在关税时, 原始设备制造商实施完全垂直一体化战略不仅对自身有利, 同时也能为供应链其他成员带来更高的利润, 完全垂直一体化是有益于整个供应链的占优战略; 存在关税时, 完全垂直一体化战略不再是完全占优战略, 其占优空间会被压缩。

关键词: 绿色供应链; 垂直一体化; 关税; Stackelberg博弈

中图分类号: F224 文献标识码: A 文章编号: 1000-5781(2026)01-0194-15

doi: 10.13383/j.cnki.jse.2026.01.013

Vertical integration decision of transnational contract manufacturing supply chain emission reduction technology

Lai Xinfeng¹, Wang Xin¹, Chen Zhixiang², Liu Weiming^{3*}

(1. School of Information Management and Mathematics, Jiangxi University of Finance and Economics, Nanchang 330013, China;
2. School of Business, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;
3. School of Digital Economy and Trade, Guangzhou Maritime University, Guangzhou 510725, China)

Abstract: In recent years, the turbulence of the international trade environment has greatly disrupted the green transnational supply chain, and the vertical integration strategy is an effective way to overcome these risks. Against this background, the paper constructs three different game models of vertically integrated offshore outsourcing supply chains, analyzes the game equilibrium results, and makes a comparison. The research shows that there will be a free-rider phenomenon for upstream and downstream contract manufacturers under a vertical integration strategy. Upstream contract manufacturers can grab higher profits from “free riding”. In the case of no tariff, the implementation of complete vertical integration strategy by OEMs is not only beneficial to themselves but also brings higher profits to other members of the supply chain. Complete vertical integration is a dominant strategy beneficial to the entire supply chain. After the imposition of a tariff, the complete vertical integration strategy is no longer a fully dominant, and its scope of dominance will be reduced.

Key words: green supply chain; vertical integration; tariff; Stackelberg game

收稿日期: 2022-11-23; 修订日期: 2024-07-08.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(72261013); 江西省自然科学基金资助项目(20242BAB25011); 广东省自然科学基金资助项目(2025A1515010562).

*通信作者

1 引言

气候异常、温室效应加剧已经成为经济社会所共同面临的世界性问题,制造业在生产过程中排放二氧化碳是造成环境污染、极端天气频发的重要原因之一^[1]。针对这一难题,2020年9月,我国提出了2030年“碳达峰”和2060年“碳中和”的战略目标,双碳战略是关乎人类社会可持续生存与发展、推动生态文明建设的重要决策。绿色供应链作为实现双碳战略目标的有效主体,其绿色生产行为是推动生态环境建设和可持续发展的必然要求。近年来,国际政治环境动荡、贸易局势剧变对绿色供应链,尤其是绿色跨国供应链造成了极大的干扰^[2,3],例如,美国国家公路交通安全管理局和美国环境保护局宣布安全经济燃油效率(SAFE)新规则将取代之前的企业平均燃油经济(CAFE)规则,这项规则的改变放松了对新生产轻型汽车的燃油经济性年改善幅度要求。2022年8月美国《通胀削减法案》提出将提供约3 690亿美元绿色税收激励和补贴措施。之后,在2023年欧盟峰会上,欧盟成员国围绕《净零工业法案》等对绿色产业进行补贴的相关内容展开了激烈讨论^[4],这对全球供应链投资布局产生了深远影响。

垂直一体化生产是缓解国际贸易压力的重要手段^[5],能够有效提高供应链鲁棒性。垂直一体化是指与企业产品的用户或原料的供应单位相联合或自行向这些经营领域扩展,即企业在现有业务的基础上,向现有业务的上游或下游发展,形成供产、产销或供产销一体化,以扩大现有业务范围的企业经营行为。例如李宁公司2019年在广西南宁建立自己的生产基地,进行供应链的垂直一体化战略^[6]。近年来,小米的全球化进程不断加速,小米的零部件供应商合力泰(Holitech)预计在三年内在印度投资约2亿美元。2022年小米公司投资了上游锂电池电解液供应商法恩莱特,同年小米又投资苏州至盛半导体科技有限公司,投资产品覆盖新材料、新工艺、电子产品核心器件、手机及智能硬件供应链等相关领域,不断完善上游产业链布局^[7]。从垂直整合方向来看,垂直一体化分为前向一体化和后向一体化;从垂直整合宽度来看,垂直一体化分为部分垂直一体化和完全垂直一体化^[8]。垂直一体化可以缓解不确定风险,但反过来其本身又会受到风险的影响,尤其是对于具有多级制造流程的供应链来说,其将会面临多种不同的垂直一体化策略。那么,当不存在关税时,哪种垂直一体化策略更好?当存在关税时,最优策略又会不会发生变化?是否会出现搭便车现象?在此背景下,本文从垂直整合程度出发研究了绿色跨国供应链的垂直一体化国际决策问题,为供应链实施不同的垂直一体化战略提供了政策参考。

本文的研究主要与绿色供应链、关税以及供应链垂直一体化等三个领域密切相关。首先,绿色供应链是指企业实施绿色生产、减少碳排放、提高产品绿色度的可持续供应链运营模式^[9]。从供应链内部的权力结构角度,黄帝等^[10]研究了不同权力结构下碳税对绿色供应链减排水平的影响,杨天剑等^[11]基于不同渠道权力结构研究了企业的绿色创新策略。从供应链内部的主体协调角度,已有研究主要聚焦于成本分担、政府补贴、信息共享等合作机制,如许格妮等^[12]考虑零售商与制造商共同分担绿色成本的竞争供应链,研究了不同绿色成本分担模式对产品零售价、绿色度以及供应链成员收益的影响。从供应链之外的政府补贴角度,Yang等^[13]发现政府补贴可以通过减轻企业对技术改进的财务负担,成为缓解囚徒困境的有效途径。王一雷等^[14]在考虑消费者的低碳偏好对市场需求影响的基础上,建立了三种不同的契约模型,对供应链系统中制造商和零售商的联合减排机制及供应链利润协调问题开展了研究。张云丰等^[15]和杨玉香等^[16]研究了供应链网络中的碳减排问题。从目前来看,有关绿色供应链的博弈文献大都从供应链企业、金融机构、政府等不同主体的角度对产品绿色度、碳减排水平和供应链利润进行优化,在研究问题上很少有基于合同制造背景的绿色供应链文献,缺乏指导企业在合同制造背景下进行垂直一体化管理的理论。

其次,全球供应链近年来贸易风险剧增,例如,由于政治干扰,美国2019年对我国出口美国的约3 000亿美元的商品加征关税,税率为10%,极大地增加了全球供应链企业的压力^[17]。而绿色跨国供应链加入了全球贸易风险后,将使得供应链决策变得更加复杂,目前有关考虑全球贸易风险的绿色跨国供应链的研究较少,但也有一些,主要为刘名武等比较了政府补贴生产成本与政府补贴绿色投入成本策略在跨国绿色供应

链中的效率^[18],同时考虑关税、供应链权力结构以及消费者绿色偏好,比较分析了关税、权力结构和消费者绿色偏好对绿色供应链决策的影响^[19]. 现有的有关全球供应链风险的研究主要聚焦于关税、汇率对供应链定价、订货的影响,缺乏探讨贸易风险对合同制造供应链垂直一体化策略的影响的文献.

最后,供应链垂直一体化的文献主要采用实证研究的方法,如Boehm和Sonntag^[20]研究了供应商与买方的竞争对手垂直一体化问题. Armour和Tece^[21]从实证分析的角度,选取了美国石油作为研究对象,结果表明垂直一体化战略在一定程度上对于企业有正向激励作用. Karantininis等^[22]选取了丹麦444家农产品企业作为研究对象,研究发现,垂直一体化对企业新产品的总量产生正向积极的影响. 孙喜^[5]对纵向一体化在中国产业升级中的作用进行研究,得出了采取激进创新的龙头企业更倾向于通过纵向一体化方式自主发展互补能力的结论. 从目前来看,垂直一体化的文献主要聚焦于垂直一体化对企业运营绩效的影响,针对企业如何在不同的垂直一体化策略间进行选择的文献较为匮乏.

本文在多级制造背景下,分析了不同的绿色研发技术投入垂直一体化模式对于供应链决策的影响;解释了合同制造商在垂直一体化战略下的“搭便车”现象;对比三种不同的垂直一体化供应链模型均衡结果,讨论在供应链的不同位置实施垂直一体化战略对供应链各节点利润和产品绿色度的影响. 研究结果表明:上下游合同制造商在垂直一体化战略下将存在“搭便车”经济现象. 当不存在关税时,完全垂直一体化是有益于整个供应链的占优战略. 当存在关税时,完全垂直一体化战略的占优空间会被压缩,如何选择最好的战略取决于关税水平的高低.

2 模型描述及参数设定

考虑一个由原始设备制造商和两个合同制造商所组成的三级离岸外包绿色跨国供应链网络,原始设备制造商位于进口国,合同制造商位于出口国,原始设备制造商与二级合同制造商签订合同,规定生产责任与义务,这是常见的离岸外包供应链形态. 原始设备制造商将对合同制造商实施绿色研发业务的垂直一体化控制管理,共有三种垂直一体化供应链结构: 1) 部分垂直一体化模式 I: 一级合同制造商绿色研发业务垂直一体化,主要指原始设备制造商对一级合同制造商进行绿色研发技术投入; 2) 部分垂直一体化模式 II: 二级合同制造商绿色研发业务垂直一体化,主要指原始设备制造商对二级合同制造商进行绿色研发技术投入; 3) 完全垂直一体化模式: 两个合同制造商绿色研发业务同时垂直一体化,主要指原始设备制造商对两个合同制造商都进行绿色研发技术投入. 这种垂直一体化结构参考了已有文献^[8]的研究. 具体结构如图1所示.

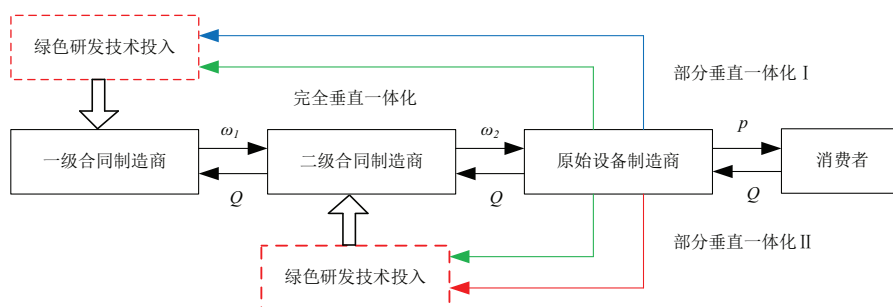


图1 垂直一体化三级离岸外包绿色供应链结构图

Fig. 1 Three-level offshoring green supply chain structure under vertical integration

现实生活中的很多委托方公司在委托产品的代工服务时,都会在合同中对产品规格、绿色度等有关产品的信息做出要求,合同制造商按照合同要求来进行生产. 由于不同国家之间具有不同的法律规定和碳减排政策,合同制造商提供的绿色技术并不一定满足采购商所在国的要求,并且合同制造商不一定具备绿色技术的研发能力,因此模型中原始设备制造商提供该技术,设绿色研发投入水平为 e ($e > 0$),根据边际成本递增效应,绿色研发投入成本为 $\frac{1}{2}ke^2$, k ($k > 0$)为绿色研发投入成本系数. 供应链成员按照从上游到下游的

定价决策时序进行博弈, 一级合同制造商以单位成本 c 进行原材料采购, 并决策销售给二级合同制造商的单位价格 ω_1 , 二级合同制造商决策销售给原始设备制造商的单位价格 ω_2 , 原始设备制造商面对终端市场, 决策出售给消费者的单位价格 p . 假设消费者的产品市场需求为 $Q = a - bp + \beta e$, 其中 $a (a > 0)$ 表示市场的潜在需求, 且 a 为一个相对较大的值^[23,24], $b (b > 0)$ 表示消费者的价格敏感系数, $\beta (\beta > 0)$ 表示消费者的绿色偏好程度. 当进口国对本国进口产品加征关税时, 原始设备制造商需要缴纳 $\delta (\delta > 0)$ 比例的从价关税. 所有参数定义见表 1.

表 1 参数定义

Table 1 The definition of parameters

参数	含义	参数	含义
a	市场潜在需求	e	绿色研发投入水平
b	消费者价格敏感度	β	消费者的绿色偏好程度
Q	产品市场需求	λ	绿色技术定价系数
c	一级合同制造商产品成本	k	绿色研发投入成本系数
ω_1	一级合同制造商产品定价	π_{M^1}	一级合同制造商利润
ω_2	二级合同制造商产品定价	π_{M^2}	二级合同制造商利润
p	原始设备制造商产品定价	π_D	原始设备制造商利润
δ	关税税率		

3 不同垂直一体化供应链决策模型

在 3.1 节、3.2 节和 3.3 节, 分别建立了三种不同垂直一体化供应链决策模型, 求解并分析了博弈均衡结果. 所有的证明见附录.

3.1 部分垂直一体化模式 I 决策模型(模型 N^1)

部分垂直一体化模式 I 下, 原始设备制造商对一级合同制造商的绿色研发业务实施垂直一体化管理, 绿色研发投入成本和绿色技术服务费均纳入原始设备制造商利润函数中, 绿色研发投入水平 e 不作为博弈的决策变量, 而作为可调节的政策参数. 一级合同制造商需要向绿色研发技术支持企业支付每单位产品 $\frac{1}{2}\lambda ke^2$ 的绿色技术服务费并做出产品定价决策 ω_1 , 二级合同制造商观测到一级合同制造商的决策后, 决定自己的产品报价 ω_2 , 原始设备制造商观测到 ω_2 后, 决定产品销往终端市场的价格 p , 各节点供应链成员的利润函数如下

$$\pi_{M^1}^{N^1} = \left(\omega_1 - c - \frac{1}{2}\lambda ke^2 \right) (a - bp + \beta e), \quad (1)$$

$$\pi_{M^2}^{N^1} = (\omega_2 - \omega_1) (a - bp + \beta e), \quad (2)$$

$$\pi_D^{N^1} = (p - (1 + \delta)\omega_2) (a - bp + \beta e) + \underbrace{\frac{1}{2}\lambda ke^2 (a - bp + \beta e) - \frac{1}{2}ke^2}_{\text{绿色研发业务垂直一体化的收入与成本}}. \quad (3)$$

定理 1 部分垂直一体化模式 I 绿色供应链存在唯一最优策略 $\omega_1^{N^1} = \frac{2(a+\beta e)+bH+2b\lambda ke^2}{4b(1+\delta)}$, $\omega_2^{N^1} = \frac{6(a+\beta e)+bH+4b\lambda ke^2}{8b(1+\delta)}$, $p^{N^1} = \frac{14(a+\beta e)+bH}{16b}$. 供应链各级成员利润为 $\pi_{M^1}^{N^1} = \frac{(2(a+\beta e)-bH)^2}{64b(1+\delta)}$, $\pi_{M^2}^{N^1} = \frac{(2(a+\beta e)-bH)^2}{128b(1+\delta)}$, $\pi_D^{N^1} = \frac{(2a+2\beta e)^2-4abH+(bH)^2-4be(32ke+\beta H)}{256b}$, 其中 $H = \delta\lambda ke^2 + 2c(1 + \delta)$.

定理 1 得到了部分垂直一体化模式 I 绿色供应链成员的最优定价和利润. 研究发现一级合同制造商的利润正好是二级合同制造商利润的两倍.

推论 1 当不存在关税时($\delta = 0$), 部分垂直一体化模式 I 下的供应链均衡定价及利润有

$$\frac{\partial \omega_1^{N^I}}{\partial e} > 0, \frac{\partial \omega_2^{N^I}}{\partial e} > 0, \frac{\partial p^{N^I}}{\partial e} > 0, \frac{\partial \pi_{M^1}^{N^I}}{\partial e} > 0, \frac{\partial \pi_{M^2}^{N^I}}{\partial e} > 0.$$

推论1表明, 实施部分垂直一体化模式 I 后, 供应链各级成员的产品均衡定价都会随着绿色研发投入水平的增加而无限上升, 这是由于, 绿色研发的投入会提高产品的绿色度, 使得市场需求上升, 消费者愿意付出更多的价格购买绿色产品, 市场的均衡价格也随之上升, 故各级供应链成员的产品定价也会不断上升. 同时, 一级合同制造商和二级合同制造商的利润也随着绿色研发投入水平的增加而无限上升, 这是由于, 原始设备制造商将绿色研发业务实行了垂直一体化模式管理, 一级合同制造商和二级合同制造商虽然无法实施绿色研发投入决策, 但也不用承担绿色研发投入成本, 二者反而可以从这种模式下“搭便车”, 不付出绿色研发投入成本而享受到绿色产品所带来的高额市场需求, 从垂直一体化企业的“努力”中获得坐享其成的利润, 一级合同制造商虽然需要向绿色研发技术企业支付绿色技术服务费, 但其会将该笔成本转移到产品定价中最后流入原始设备制造商的利润函数与绿色研发业务垂直一体化的收入相抵消, 故一级合同制造商本质上并没有承担绿色研发投入成本, 其绿色技术服务费转移定价也没有造成终端市场需求减少. “搭便车”现象的出现说明社会经济资源没有得到最优的配置, 经济系统也没有达到最高效率, 搭便车的人多了, 总体效率必然降低、甚至损害集体利益, 出现所谓的“搭便车困境”. 其中, 一级合同制造商“搭便车”所获得的收益要比二级合同制造商高 $\frac{\beta(a-bc+\beta e)}{16b}$. 这启示实施垂直一体化业务的企业管理者, 可以设计激励、成本分担、合作契约等措施使制造商、尤其是上游制造商承担垂直一体化成本, 破除“搭便车”, 实现帕累托最优.

3.2 部分垂直一体化模式 II 决策模型(模型 N^{II})

部分垂直一体化模式 II 下, 原始设备制造商对二级合同制造商的绿色研发业务实施垂直一体化管理, 绿色研发投入成本和绿色技术服务费均纳入原始设备制造商利润函数中. 一级合同制造商做出产品定价决策 ω_1 , 二级合同制造商观测到一级合同制造商的决策后, 需要向绿色研发技术支持企业支付每单位产品 $\frac{1}{2}\lambda ke^2$ 的绿色技术服务费并决定自己的产品报价 ω_2 , 原始设备制造商观测到二级合同制造商的决策后, 决定产品销往终端市场的价格 p , 各节点供应链成员的利润函数如下

$$\pi_{M^1}^{N^{II}} = (\omega_1 - c)(a - bp + \beta e), \quad (4)$$

$$\pi_{M^2}^{N^{II}} = \left(\omega_2 - \omega_1 - \frac{1}{2}\lambda ke^2\right)(a - bp + \beta e), \quad (5)$$

$$\pi_D^{N^{II}} = (p - (1 + \delta)\omega_2)(a - bp + \beta e) + \underbrace{\frac{1}{2}\lambda ke^2(a - bp + \beta e) - \frac{1}{2}ke^2}_{\text{绿色研发业务垂直一体化的收入与成本}}. \quad (6)$$

定理 2 部分垂直一体化模式 II 绿色供应链存在唯一最优策略 $\omega_1^{N^{II}} = \frac{2(a+bc+\beta e+bc\delta)-\delta b\lambda ke^2}{4b(1+\delta)}$, $\omega_2^{N^{II}} = \frac{6(a+\beta e)+bH+4b\lambda ke^2}{8b(1+\delta)}$, $p^{N^{II}} = \frac{14(a+\beta e)+bH}{16b}$. 供应链各级成员利润为 $\pi_{M^1}^{N^{II}} = \frac{(2(a+\beta e)-bH)^2}{64b(1+\delta)}$, $\pi_{M^2}^{N^{II}} = \frac{(2(a+\beta e)-bH)^2}{128b(1+\delta)}$, $\pi_D^{N^{II}} = \frac{(2a+2\beta e)^2-4abH+(bH)^2-4be(32ke+\beta H)}{256b}$, 其中 $H = \delta\lambda ke^2 + 2c(1 + \delta)$.

定理2表明在部分垂直一体化模式 I 和 II 下, 一级合同制造商和二级合同制造商的利润均不变, 且一级合同制造商的利润正好也是二级合同制造商利润的两倍.

推论 2 当不存在关税时($\delta = 0$), 两种部分垂直一体化模式下的供应链均衡结果有

$$\omega_1^{N^I} > \omega_1^{N^{II}}, \omega_2^{N^I} = \omega_2^{N^{II}}, p^{N^I} = p^{N^{II}}, \pi_{M^1}^{N^I} = \pi_{M^1}^{N^{II}}, \pi_{M^2}^{N^I} = \pi_{M^2}^{N^{II}}, \pi_D^{N^I} = \pi_D^{N^{II}},$$

$$\frac{\partial \omega_1^{N^I}}{\partial e} > \frac{\partial \omega_1^{N^{II}}}{\partial e} > 0, \frac{\partial \omega_2^{N^I}}{\partial e} = \frac{\partial \omega_2^{N^{II}}}{\partial e} > 0, \frac{\partial p^{N^I}}{\partial e} = \frac{\partial p^{N^{II}}}{\partial e} > 0,$$

$$\frac{\partial \pi_{M^1}^{N^I}}{\partial e} = \frac{\partial \pi_{M^1}^{N^{II}}}{\partial e} > 0, \frac{\partial \pi_{M^2}^{N^I}}{\partial e} = \frac{\partial \pi_{M^2}^{N^{II}}}{\partial e} > 0.$$

推论2表明, 两种不同的部分垂直一体化模式的 ω_2 、 p 、 π_{M^1} 、 π_{M^2} 、 π_D 都是相同的, 但是部分垂直一体化模式 I 下的一级合同制造商产品定价 ω_1 要比部分垂直一体化模式 II 高 $\frac{\lambda ke^2}{2}$ 个单位, 其对绿色研发投入水平的灵敏度也要高出 λke 个单位. 两种部分垂直一体化模式的不同之处在于绿色研发投入业务垂直一体化的位置不同, 但是两种模式下的垂直一体化主导者都为原始设备制造商, 不同位置的垂直一体化结构并没有从本质上影响子博弈精炼纳什均衡的均衡路径, 因此, 两种模式下的供应链成员利润水平是相同的. 而 $\omega_1^{N^I}$ 较低是因为部分垂直一体化模式 II 下转移定价具有滞后性: 在部分垂直一体化模式 I 中, 由于一级合同制造商需要付出绿色技术服务费, 因此其产品定价中会增加绿色技术服务费成本, 该笔成本随着下游供应链逐级传导, 而在部分垂直一体化模式 II 中, 一级合同制造商不需要付出绿色技术服务费, 绿色技术服务费成本从二级合同制造商处开始转移并向下传导, 故 $\omega_1^{N^I} > \omega_1^{N^{II}}$, 但 $\omega_2^{N^I} = \omega_2^{N^{II}}$, $p^{N^I} = p^{N^{II}}$. 这表明, 在供应链的不同位置实施垂直一体化战略不会对供应链各节点利润造成影响, 同时, 推论 2 中, 由 $\frac{\partial \pi_{M^1}^{N^I}}{\partial e} = \frac{\partial \pi_{M^1}^{N^{II}}}{\partial e} > 0$, $\frac{\partial \pi_{M^2}^{N^I}}{\partial e} = \frac{\partial \pi_{M^2}^{N^{II}}}{\partial e} > 0$ 可知, 部分垂直一体化模式 II 中, 一级合同制造商和二级合同制造商仍然存在“搭便车”的经济行为.

3.3 完全垂直一体化供应链决策模型(模型 N^S)

完全垂直一体化模式下, 原始设备制造商同时对一级和二级合同制造商的绿色研发业务实施垂直一体化管理, 考虑两个合同制造商生产不同的零部件, 如汽车的轮胎和发动机, 两个合同制造商的绿色生产行为都可以吸引更多的消费者. 一级合同制造商向绿色研发技术支持企业支付每单位产品 $\frac{1}{2}\lambda ke^2$ 的绿色服务费用并做出产品定价决策 ω_1 , 二级合同制造商观测到一级合同制造商的决策后, 也需要支付绿色服务费用并决定自己的产品报价 ω_2 , 原始设备制造商观测到二级合同制造商的决策后, 决定产品销往终端市场的价格 p , 各节点供应链成员的利润函数如下

$$\pi_{M^1}^S = \left(\omega_1 - c - \frac{1}{2}\lambda ke^2 \right) (a - bp + 2\beta e), \quad (7)$$

$$\pi_{M^2}^S = \left(\omega_2 - \omega_1 - \frac{1}{2}\lambda ke^2 \right) (a - bp + 2\beta e), \quad (8)$$

$$\pi_D^S = (p - (1 + \delta)\omega_2) (a - bp + 2\beta e) + \underbrace{\left(\frac{1}{2}\lambda ke^2 + \frac{1}{2}\lambda ke^2 \right) (a - bp + 2\beta e) - \frac{1}{2}ke^2 - \frac{1}{2}ke^2}_{\text{绿色研发业务垂直一体化的收入与成本}}. \quad (9)$$

定理 3 完全垂直一体化模式绿色供应链存在唯一最优策略 $\omega_1^S = \frac{a+bc+2\beta e+bc\delta+b\lambda ke^2}{2b(1+\delta)}$, $\omega_2^S = \frac{3(a+2\beta e)+bL+4b\lambda ke^2}{4b(1+\delta)}$, $p^S = \frac{7(a+2\beta e)+bL}{8b}$. 供应链各级成员利润为 $\pi_{M^1}^S = \frac{(a+2\beta e-bL)^2}{16b(1+\delta)}$, $\pi_{M^2}^S = \frac{(a+2\beta e-bL)^2}{32b(1+\delta)}$, $\pi_D^S = \frac{(a+2\beta e)^2-2abL+(bL)^2-4be(16ke+\beta L)}{64b}$, 其中 $L = \delta\lambda ke^2 + c(1 + \delta)$.

定理3表明无论是在部分垂直一体化模式下, 还是在完全垂直一体化模式下, 一级合同制造商的利润都是二级合同制造商利润的两倍.

定理 4 当不存在关税时($\delta = 0$), 三种不同垂直一体化模式下的供应链成员利润比较结果如下

$$\pi_{M^1}^S > \pi_{M^1}^{N^I} = \pi_{M^1}^{N^{II}}, \pi_{M^2}^S > \pi_{M^2}^{N^I} = \pi_{M^2}^{N^{II}}, \pi_D^S > \pi_D^{N^I} = \pi_D^{N^{II}}.$$

定理4表明, 完全垂直一体化模式下的所有供应链成员利润都要高于部分垂直一体化模式 I / II, 因此, 原始设备制造商实施完全垂直一体化战略不仅对自身有利, 同时也能为供应链其他成员带来更高的利润, 完全垂直一体化战略是有益于整个供应链的占优战略. 从该角度出发, 一级合同制造商和二级合同制造商均希望原始设备制造商实施完全垂直一体化, 故一级合同制造商和二级合同制造商有动机为原始设备制造商承担完全垂直一体化成本, 原始设备制造商可以采取成本分摊等机制降低自身的运营成本.

推论 3 当不存在关税时($\delta = 0$), 三种不同垂直一体化模式下的供应链均衡结果有

$$\omega_1^S > \omega_1^{N^I} > \omega_1^{N^{II}}, \omega_2^S > \omega_2^{N^I} = \omega_2^{N^{II}}, p^S > p^{N^I} = p^{N^{II}},$$

$$\frac{\partial \omega_1^S}{\partial e} > \frac{\partial \omega_1^{N^I}}{\partial e} > \frac{\partial \omega_1^{N^{II}}}{\partial e} > 0, \frac{\partial \omega_2^S}{\partial e} > \frac{\partial \omega_2^{N^I}}{\partial e} = \frac{\partial \omega_2^{N^{II}}}{\partial e} > 0, \frac{\partial p^S}{\partial e} > \frac{\partial p^{N^I}}{\partial e} = \frac{\partial p^{N^{II}}}{\partial e} > 0,$$

$$\frac{\partial \pi_{M^1}^S}{\partial e} > \frac{\partial \pi_{M^1}^{N^I}}{\partial e} = \frac{\partial \pi_{M^1}^{N^{II}}}{\partial e} > 0, \frac{\partial \pi_{M^2}^S}{\partial e} > \frac{\partial \pi_{M^2}^{N^I}}{\partial e} = \frac{\partial \pi_{M^2}^{N^{II}}}{\partial e} > 0.$$

推论3表明,完全垂直一体化下的供应链各级成员的产品定价都较高,降低了消费者剩余,对于消费者具有不利性,且该模式下供应链各级成员产品均衡定价对绿色研发投入水平更加敏感.除以之外,由 $\frac{\partial \pi_{M^1}^S}{\partial e} > \frac{\partial \pi_{M^1}^{N^I}}{\partial e} = \frac{\partial \pi_{M^1}^{N^{II}}}{\partial e} > 0$ 和 $\frac{\partial \pi_{M^2}^S}{\partial e} > \frac{\partial \pi_{M^2}^{N^I}}{\partial e} = \frac{\partial \pi_{M^2}^{N^{II}}}{\partial e} > 0$ 可以得出,完全垂直一体化下的一级合同制造商和二级合同制造商仍然可以“搭便车”,且“搭便车”所取得的收益更高.

4 关税对均衡决策的影响

分别考虑当不存在关税和存在关税两种情况是十分有必要的,现实中,并不是每一件产品在国际贸易中都会被加征关税,而对于不存在关税和存在关税两种情况,提供了不同的见解.第3节对不存在关税时的均衡结果进行了分析,本节将围绕存在关税时关税对均衡决策的影响展开分析.受到关税影响,三种垂直一体化模式下的进口国原始设备制造商均提高了产品价格 p 来规避损失,而出口国合同制造商为了刺激 p 上升所导致的终端市场需求下降均降低了自身的产品定价 ω_1, ω_2 ,这一规律同时也类似刘名武等^[25]对传统一般跨国供应链的研究发现.

推论4 进口国加征关税后,三种垂直一体化供应链均衡结果有

$$\left| \frac{\partial \omega_1^S}{\partial \delta} \right| > \left| \frac{\partial \omega_1^{N^I}}{\partial \delta} \right| = \left| \frac{\partial \omega_1^{N^{II}}}{\partial \delta} \right|, \left| \frac{\partial \omega_2^S}{\partial \delta} \right| > \left| \frac{\partial \omega_2^{N^I}}{\partial \delta} \right| = \left| \frac{\partial \omega_2^{N^{II}}}{\partial \delta} \right|, \left| \frac{\partial p^S}{\partial \delta} \right| > \left| \frac{\partial p^{N^I}}{\partial \delta} \right| = \left| \frac{\partial p^{N^{II}}}{\partial \delta} \right|,$$

$$\left| \frac{\partial \pi_{M^1}^S}{\partial \delta} \right| > \left| \frac{\partial \pi_{M^1}^{N^I}}{\partial \delta} \right| = \left| \frac{\partial \pi_{M^1}^{N^{II}}}{\partial \delta} \right|, \left| \frac{\partial \pi_{M^2}^S}{\partial \delta} \right| > \left| \frac{\partial \pi_{M^2}^{N^I}}{\partial \delta} \right| = \left| \frac{\partial \pi_{M^2}^{N^{II}}}{\partial \delta} \right|, \left| \frac{\partial \pi_D^S}{\partial \delta} \right| > \left| \frac{\partial \pi_D^{N^I}}{\partial \delta} \right| = \left| \frac{\partial \pi_D^{N^{II}}}{\partial \delta} \right|.$$

推论4表明,完全垂直一体化模式下供应链各级成员产品均衡价格和均衡利润都对关税较为敏感,由于完全垂直一体化拓宽了绿色技术研发业务范围,使得其在进口国处被多加征了关税,因此,关税对完全垂直一体化供应链的损害更高.完全垂直一体化战略的占优空间将随着关税的升高逐步压缩.

定理5 进口国加征关税后,完全垂直一体化与两种部分垂直一体化模式下供应链各级成员利润水平有

$$\begin{cases} \pi_{M^1}^S > \pi_{M^1}^{N^I} = \pi_{M^1}^{N^{II}}, 0 < \delta < \frac{2\beta}{b\lambda k e} \\ \pi_{M^1}^S \leq \pi_{M^1}^{N^I} = \pi_{M^1}^{N^{II}}, \delta \geq \frac{2\beta}{b\lambda k e}, \end{cases}$$

$$\begin{cases} \pi_{M^2}^S > \pi_{M^2}^{N^I} = \pi_{M^2}^{N^{II}}, 0 < \delta < \frac{2\beta}{b\lambda k e} \\ \pi_{M^2}^S \leq \pi_{M^2}^{N^I} = \pi_{M^2}^{N^{II}}, \delta \geq \frac{2\beta}{b\lambda k e}, \end{cases}$$

$$\begin{cases} \pi_D^S > \pi_D^{N^I} = \pi_D^{N^{II}}, 0 < \delta < E \\ \pi_D^S \leq \pi_D^{N^I} = \pi_D^{N^{II}}, \delta \geq E, \end{cases}$$

其中 $E = \frac{Z - \sqrt{Z^2 - 4Y(-128b\beta k + 8a\beta - 8bc\beta + 12e\beta^2)}}{2Y}$, $Z = 8bc\beta + 4abek\lambda - 4b^2cek\lambda + 12be^2k\beta\lambda$, $Y = (4b^2cek\lambda + 3b^2e^3k^2\lambda^2)$.

定理5实际上也是推论4的必然结果.定理5表明,与推论3相比,加征关税后,完全垂直一体化战略不再是完全占优战略.合同制造商和原始设备制造商均存在临界值,当关税税率低于临界值时,完全垂直一体化可以带来更高的利润,而当关税税率高于临界值时,部分垂直一体化模式的利润会逐渐超过完全垂直一体化,

关税税率与完全垂直一体化战略占优空间呈反向变动关系, 由于对上下游绿色研发业务实施完全垂直一体化, 故该模式下较之两种部分垂直一体化模式在进口国处被额外加征了关税, 当关税税率较低时, 完全垂直一体化模式的占优区域仍然存在, 而当关税税率超过临界值时, 完全垂直一体化占优区域消失, 部分垂直一体化模式变为更优的选择. 定理5表明, 关税作为外生的风险冲击, 不仅影响了每个供应链成员的利润, 也影响了原始设备制造商的垂直一体化模式选择的决策, 当原始设备制造商所在国进口关税较低时, 建议其选择完全垂直一体化模式, 当原始设备制造商所在国进口关税较高时, 建议其选择部分垂直一体化模式.

推论 5 原始设备制造商利润临界值低于合同制造商.

推论5是和定理5相关的, 定理5中得出了原始设备制造商选择完全垂直一体化模式和部分垂直一体化模式的临界值, 在该临界值处, 原始设备制造商选择不同的垂直一体化模式的利润是一样的, 而合同制造商的临界值要高于原始设备制造商, 这表明, 当原始设备制造商的最优选择受关税影响变为完全垂直一体化模式时, 使得合同制造商利润更高的模式可能仍然是部分垂直一体化模式, 因此, 若原始设备制造商的谈判权不够强时, 合同制造商将不愿意被垂直一体化运营, 此时, 原始设备制造商可以使用收益分享契约激励合同制造商.

5 数值算例

本节旨在通过具体的数值算例, 验证前文理论分析结果, 并将前文结论以更加清晰的方式展现出来, 首先, 在第1小节仿真分析不存在关税时政策参数绿色研发投入水平 e 对供应链各级成员利润的影响, 在第2小节考虑存在关税的情形, 仿真分析关税税率 δ 和绿色研发投入水平 e 对供应链各级成员利润的交叉影响.

5.1 绿色研发投入水平对供应链各级成员利润的影响

取参数 $a = 100, b = 1, c = 1, k = 10, \beta = 1, 0.2 < e < 0.5$. 考虑不存在关税的情形, 即 $\delta = 0$, 仿真结果如图2~图4所示.

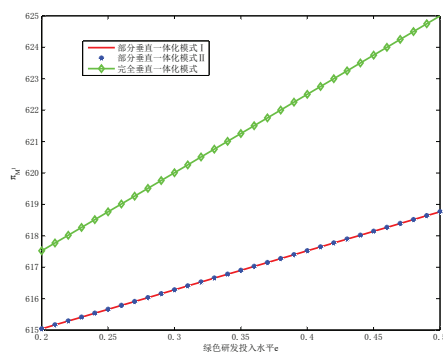


图2 绿色研发投入水平对一级合同制造商利润的影响

Fig. 2 The impact of green R&D investment on primary contract manufacturer's profit

从图2~图4的仿真结果可以看出, 各级供应链成员在部分垂直一体化模式 I、II 下的利润水平是一样的, 因此在供应链不同部分分别实施垂直一体化不会对供应链利润造成影响. 一级合同制造商和二级合同制造商的利润水平随着绿色研发投入水平 e 的提高而不断上升, 即存在“搭便车”现象, 并且, 完全垂直一体化模式下二者“搭便车”的所获得的收益更高, 即“搭便车”倾向性更强. 原始设备制造商利润随着绿色研发投入水平 e 的提高先上升后下降, 当绿色研发投入水平 e 在0.3左右时, 原始设备制造商利润达到最大. 同时, 还可以看到, 完全垂直一体化下的各级供应链成员利润都是最高的, 因此, 完全垂直一体化为占优战略. 以上仿真结果表明, 合同制造商存在搭便车行为, 原始设备制造商可以设计激励、成本分担、合作契约等措施使合同制造商承担垂直一体化成本, 破除“搭便车”, 实现帕累托最优, 从理论上来说, 两个合同制造商都有接受

合作契约的动机.

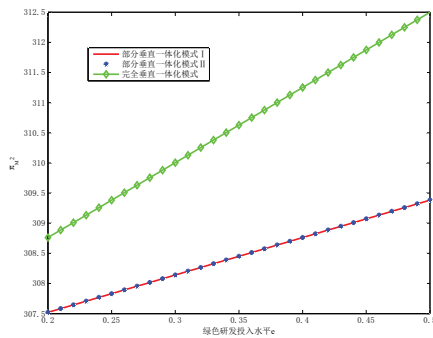


图 3 绿色研发投入水平对二级合同制造商利润的影响
Fig. 3 The impact of green R&D investment on secondary contract manufacturer's profit

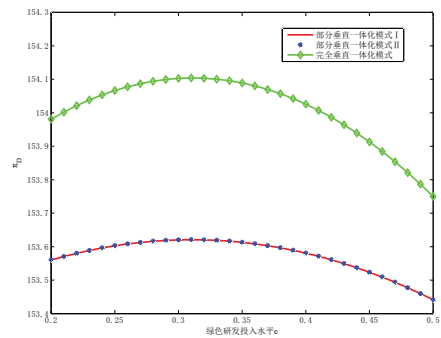


图 4 绿色研发投入水平对原始设备制造商利润的影响
Fig. 4 The impact of green R&D investment on original equipment manufacturer's profit

5.2 关税税率与绿色研发投入水平对供应链各级成员利润的影响

本小节仍然采用5.1节参数取值, 即 $a = 100, b = 1, c = 1, k = 10, \beta = 1, 0.2 < e < 0.5$, 同时考虑关税影响, 根据我国进口商品的关税税率表显示, 我国进口商品关税税率普遍在0-1之间, 故取 $\delta \in (0, 1)$. 仿真结果如图5~图7所示.

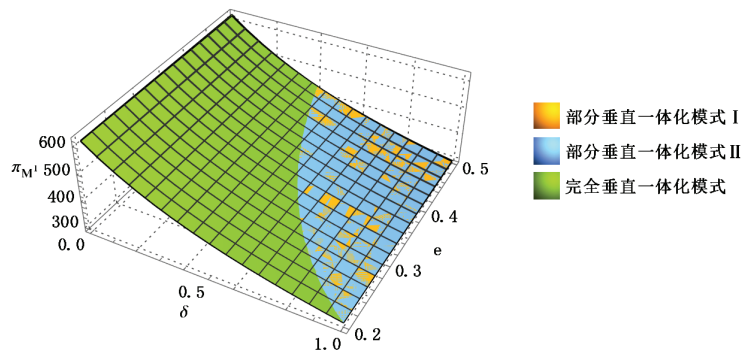


图 5 关税税率与绿色研发投入水平对一级合同制造商利润的影响
Fig. 5 The impact of tariff rates and green R&D investment levels on primary contract manufacturer's profit

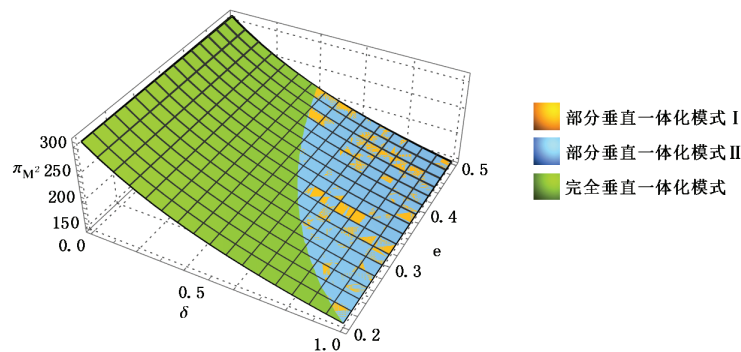


图 6 关税税率与绿色研发投入水平对二级合同制造商利润的影响
Fig. 6 The impact of tariff rates and green R&D investment levels on secondary contract manufacturer's profit

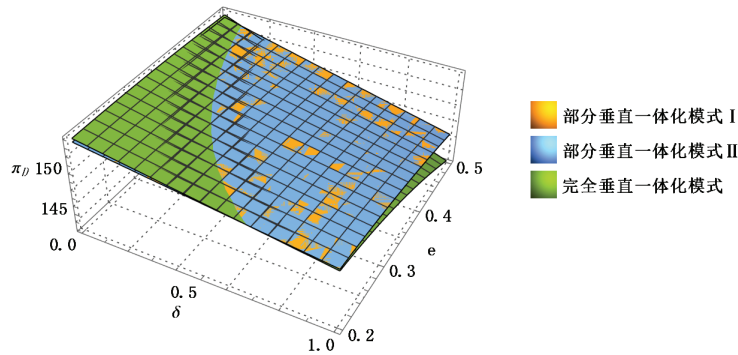


图 7 关税税率与绿色研发投入水平对原始设备制造商利润的影响

Fig. 7 The impact of tariff rates and green R&D investment levels on original equipment manufacturer's profit

从图5~图7的仿真结果可以看出, 加征关税后, 各级供应链成员在部分垂直一体化模式 I、II 下的利润水平也仍然是一样的. 图5、图6表明一级合同制造商、二级合同制造商仍然可以在通过垂直一体化企业的努力搭便车, 而图7表明原始设备制造商利润随着绿色研发投入水平的增加先上升后下降. 受到关税冲击, 供应链各级成员的利润水平都随着关税税率的上升而下降, 存在临界值, 当关税税率超过临界值时, 完全垂直一体化战略的占优空间完全消失, 部分垂直一体化下的供应链成员利润水平变得更高, 并且, 明显可以看出, 原始设备制造商的利润临界值 δ 要低于合同制造商, 这也与定理5和推论5相符. 其次, 可以发现, 各个临界值 δ 都随着绿色研发投入水平 e 的增加而变小, 这是由于, 绿色研发投入水平 e 的增加将导致产品成本和定价上升, 故供应链在进口国处将被加征更多的关税, 因此最优垂直一体化战略的临界值将会下降. 以上仿真结果表明, 关税会影响原始设备制造商的垂直一体化模式选择的决策, 当原始设备制造商所在国进口关税较低时, 建议其选择完全垂直一体化模式, 当原始设备制造商所在国进口关税较高时, 建议其选择部分垂直一体化模式. 同时, 若原始设备制造商的谈判权不够强时, 合同制造商将不愿意被垂直一体化运营, 此时, 原始设备制造商可以使用收益分享契约激励合同制造商.

6 扩展分析

本节拟从合同制造商生产相同零部件和三种模式下的减排量两个视角进行扩展分析.

6.1 合同制造商生产相同零部件

前文的分析中, 考虑的是两个合同制造商生产不同的零部件, 如汽车的轮胎和发动机. 在本节中, 将模型扩展为两个合同制造商生产相同的零部件, 它们可能一起生产汽车的轮胎或者发动机. 与前文不同的是, 在完全垂直一体化模式下, 由于两个合同制造商生产相同的零部件, 要想实现 $2\beta e$ 的绿色效果, 原始设备制造商的投资应为 $\frac{1}{2}k(2e)^2$, 而不是前文中的 $\frac{1}{2}ke^2 + \frac{1}{2}ke^2$. 因此, 在这种情况下, 原始设备制造商的利润函数为

$$\pi_D^S = (p - (1 + \delta)\omega_2)(a - bp + 2\beta e) + \left(\frac{1}{2}\lambda ke^2 + \frac{1}{2}\lambda ke^2\right)(a - bp + 2\beta e) - \frac{1}{2}k(2e)^2. \quad (10)$$

对模型重新求解, 发现与定理5相同, 仍然存在关税临界值, 使得原始设备制造商的垂直一体化策略发生改变. 前两个临界值都与定理5相同, 但是 E 改变为: $\frac{Z - \sqrt{Z^2 - 4Y(-384bek + 8a\beta - 8bc\beta + 12e\beta^2)}}{2Y}$, 其中 $Z = 8bc\beta + 4abek\lambda - 4b^2cek\lambda + 12be^2k\beta\lambda$, $Y = (4b^2cek\lambda + 3b^2e^3k^2\lambda^2)$. 这意味着原始设备制造商的利润临界值发生了变化, 这是由于, 原始设备制造商想要达到相同的绿色效果需要投入更多的资源, 因此原始设备制造商的成本会上升. 但是, 这并不影响原始设备制造商的最优垂直一体化模式会随关税上升而发生变化的结论, 因此, 当两个合同制造商生产相同的零部件时, 前文得到的主要结论仍然是有效的.

6.2 三种模式下的减排量

在前文中,从利润对比的角度得到了不存在关税和存在关税两种情况下应当如何选择垂直一体化模式的结论,然而,在可持续发展的背景下,有些利益相关者也非常关注哪种模式下的减排效果更好,因此,在这一节分析了三种模式的减排效果.使用绿色技术研发投入的水平来刻画减排量,这种刻画是合理的,较高的绿色技术研发投入水平往往代表较高的减排量^[26].需要注意的是,在部分垂直一体化模式I、II中,供应链的减排量等于一级合同制造商、二级合同制造商各自的减排量(即减排量等于绿色技术研发投入水平),在完全垂直一体化模式中,供应链的减排量等于两个合同制造商减排量的总和(即减排量等于绿色技术研发投入水平的二倍).

模型中,由于 e 并不是博弈的均衡结果,而是作为博弈时的事前合同参数,所以博弈均衡解中没有 e 的解析式,在前文分析中,求解了给定 e 但不给定垂直一体化模式的情形下的均衡,并通过利润对比来分析最优的垂直一体化模式.在本节的拓展分析中,考虑了给定 e 且给定垂直一体化模式的情形,并在此情形下反解不同垂直一体化模式中最优的 e ,从而对比三种模式的减排效果.具体的求解方法是,寻找使得第3节中不同模式下原始设备制造商利润最大化时的 e ,此时的 e 就是给定 e 且给定垂直一体化模式的情形下的最优 e .由于第3节博弈均衡解中原始设备制造商利润过于复杂,且存在 e 的高阶次方,因此最优 e 的解析解无法求出,使用数值模拟简化分析,数值模拟是运营管理领域文献中处理复杂结果所常用的分析方法^[27, 28].继续沿用第5节中的参数设置,得到三种模式下减排量的对比如图8所示.

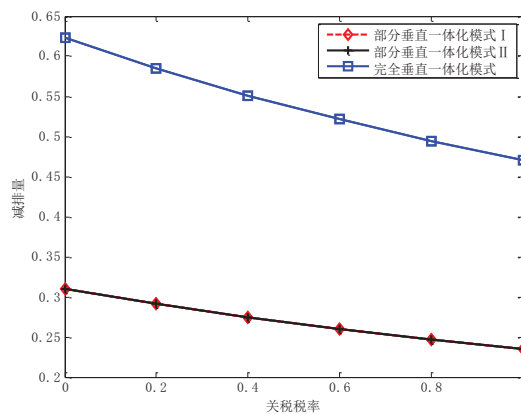


图8 不同垂直一体化模式下的减排量

Fig. 8 Emission reduction under different vertical integration modes

在图8中,两种部分垂直一体化模式的减排量曲线是重合的,这意味着,无论减排主体是上游一级合同制造商还是下游二级合同制造商,供应链的减排量都是一样的,在供应链不同位置进行减排不会改变最优的减排量.但是,图8还表明,完全垂直一体化模式中的减排量要明显高于两种部分垂直一体化模式,因此,完全垂直一体化模式的减排效果要优于部分垂直一体化模式.这个结果是直观的,原因是,完全垂直一体化模式中两个合同制造商一起减排,减排量等于绿色技术研发投入水平的二倍,所以在相同的绿色研发技术水平下,完全垂直一体化模式可以实现更高的减排效果,即完全垂直一体化模式的边际减排量更高.同时,还可以看到,三种模式下的减排量都随着关税的升高而降低,这是因为关税带来了较高的成本,原始设备制造商必须通过降低减排量来节省成本,这一规律也与刘名武等^[18]的研究结论是一致的.

7 结束语

随着国际政治与贸易局势的动荡加剧,企业的供应链、尤其是跨国供应链遭到了极大的干扰,绿色供应链作为实现我国“碳达峰”和“碳中和”战略的重要行为主体,实施垂直一体化战略能够有效克服供应链风险

干扰, 提高供应链鲁棒性, 为双碳战略提供有效助力. 本文基于这一背景构建了三种垂直一体化模式下的绿色供应链模型, 分析了不同垂直一体化模式下供应链的运营决策并进行了对比, 同时, 文章进一步探讨了关税对于绿色供应链垂直一体化战略的影响, 为当前绿色生产企业实施垂直一体化国际决策提供了可参考的理论支持, 本文主要结论与启示如下:

1) 两个合同制造商在垂直一体化战略下将存在“搭便车”经济现象, 处于上游的合同制造商能从“搭便车”中攫取更高的利润. 这说明垂直一体化模式下社会经济资源没有得到最优的配置, 经济系统也没有达到最高效率; 同时启示实施垂直一体化业务的企业管理者, 可以设计激励、成本分担、合作契约等措施使制造商、尤其是上游合同制造商承担垂直一体化成本, 破除“搭便车”, 实现帕累托最优.

2) 两种不同的部分垂直一体化模式下的供应链利润水平和减排量是一样的, 在供应链的不同位置实施垂直一体化战略不会对供应链各成员利润和减排量造成影响. 由于完全垂直一体化模式中两个合同制造商一起减排, 减排量等于绿色技术研发投入水平的二倍, 因此完全垂直一体化模式的边际减排量更高, 所实现的减排效果要优于两种部分垂直一体化模式.

3) 不存在关税时, 完全垂直一体化供应链各节点成员产品均衡定价、均衡利润都要高于部分垂直一体化模式 I/II, 因此, 原始设备制造商实施完全垂直一体化战略不仅对自身有利, 同时也能为供应链其他成员带来更高的利润, 完全垂直一体化战略是有益于整个供应链的占优战略. 从该角度出发, 一级合同制造商和二级合同制造商均希望原始设备制造商实施完全垂直一体化, 因此, 一级合同制造商和二级合同制造商有动机为原始设备制造商承担完全垂直一体化成本, 原始设备制造商可以采取成本分摊等机制降低自身的运营成本. 但是, 该模式也存在一定弊端, 即该模式下的供应链各节点成员的产品定价都较高, 降低了消费者剩余, 对于消费者具有不利性.

4) 存在关税时, 完全垂直一体化战略不再是完全占优战略, 其占优空间会被压缩. 合同制造商和原始设备制造商均存在临界值, 当关税税率低于临界值时, 完全垂直一体化可以带来更高的利润, 而当关税税率高于临界值时, 部分垂直一体化模式的利润会逐渐超过完全垂直一体化, 关税税率与完全垂直一体化战略占优空间呈反向变动关系, 且原始设备制造商的关税临界值更低. 因此, 关税是绿色跨国供应链垂直一体化决策的重要影响因素.

本文的研究角度定位于从垂直整合宽度出发的垂直一体化模式, 未来研究可以进一步继续向垂直整合方向拓展.

参考文献:

- [1] 王文利, 程天毓. 碳交易背景下供应链运营决策的演化博弈分析. 系统工程理论与实践, 2021, 41(5): 1272–1281.
Wang W L, Cheng T Y. Evolutionary game analysis of supply chain operations decision under the background of carbon trading. *Systems Engineering: Theory & Practice*, 2021, 41(5): 1272–1281. (in Chinese)
- [2] Ghosh D, Shah J. Supply chain analysis under green sensitive consumer demand and cost sharing contract. *International Journal of Production Economics*, 2015, 164: 319–329.
- [3] 吉如媚, 张小宁, 闫 黄. 考虑转口贸易的全球供应链网络关键节点识别. 系统工程学报, 2023, 38(6): 850–863.
Ji R M, Zhang X N, Yan H. Identification of critical nodes in global supply chain networks considering entrepot trade. *Journal of Systems Engineering*, 2023, 38(6): 850–863. (in Chinese)
- [4] Bistline J, Blanford G, Brown M, et al. Emissions and energy impacts of the inflation reduction act. *Science*, 2023, 380(6652): 1324–1327.
- [5] 孙 喜. 纵向一体化在中国产业升级中的作用研究. 科学学研究, 2020, 38(11): 1954–1965.
Sun X. Vertical integration in industrial upgrading in China. *Studies in Science of Science*, 2020, 38(11): 1954–1965. (in Chinese)
- [6] Li P, Tan D, Wang G, et al. Retailer's vertical integration strategies under different business modes. *European Journal of Operational Research*, 2021, 294(3): 965–975.
- [7] 宋 华, 陶 铮, 杨雨东. “制造的制造”: 供应链金融如何使能数字商业生态的跃迁: 基于小米集团供应链金融的案例研究. 中国工业经济, 2022(9): 178–196.

- Song H, Tao Z, Yang Y D. How does supply chain enable the transition of digital business ecosystem: A case study about Xiaomi supply chain finance. *China Industrial Economics*, 2022(9): 178–196. (in Chinese)
- [8] 赖新峰, 王鑫, 陈志祥, 等. 不同垂直一体化模式下出口导向型制造企业生产仿真研究: 关税和劳动力成本影响分析. *管理评论*, 2022, 34(6): 280–291.
Lai X F, Wang X, Chen Z X, et al. Production simulation research of export-oriented manufacturing enterprises under different vertical integration modes: Analysis of the impact of tariffs and labor costs. *Management Review*, 2022, 34(6): 280–291. (in Chinese)
- [9] Wu S, Chan Felix T, Chung S. A study on green supply chain under capital constraint considering time-varying salvage value. *International Journal of Production Research*, 2022, 60(1): 8–24.
- [10] 黄帝, 张菊亮. 不同权力结构下碳税对供应链减排水平的影响. *中国管理科学*, 2021, 29(7): 57–70.
Huang D, Zhang J L. The impacts of carbon tax on emissions abatement level in a supply chain under different power structures. *Chinese Journal of Management Science*, 2021, 29(7): 57–70. (in Chinese)
- [11] 杨天剑, 田建改. 不同渠道权力结构下供应链定价及绿色创新策略. *软科学*, 2019, 33(12): 127–132.
Yang T J, Tian J G. Supply chain pricing and green innovation strategies under different channel power structures. *Soft Science*, 2019, 33(12): 127–132. (in Chinese)
- [12] 许格妮, 陈惠汝, 武晓莉, 等. 竞争供应链中绿色成本分担博弈分析. *系统工程学报*, 2020, 35(2): 244–256.
Xu G N, Chen H R, Wu X L, et al. Game analysis on green cost-sharing between competing supply chains. *Journal of Systems Engineering*, 2020, 35(2): 244–256. (in Chinese)
- [13] Yang R, Tang W, Zhang J. Technology improvement strategy for green products under competition: The role of government subsidy. *European Journal of Operational Research*, 2021, 289(2): 553–568.
- [14] 王一雷, 朱庆华, 夏西强. 基于消费偏好的供应链上下游联合减排协调契约博弈模型. *系统工程学报*, 2017, 32(02): 188–198.
Wang Y L, Zhu Q H, Xia X Q. Supply chain upstream and downstream joint coordination contract game model based on consumer preference. *Journal of Systems Engineering*, 2017, 32(02): 188–198. (in Chinese)
- [15] 张云丰, 尚钱龙, 龚本刚, 等. 碳标签制度下三级供应链定价与碳减排决策. *系统工程学报*, 2022, 37(2): 242–262.
Zhang Y F, Shang Q L, Gong B G, Wang Y. Pricing and carbon emission reduction decisions in three-echelon supply chain under carbon labelling system. *Journal of Systems Engineering*, 2022, 37(2): 242–262. (in Chinese)
- [16] 杨玉香, 李剑锋, 金芳芳, 等. 供应链网络均衡下碳税与碳交易政策比较. *系统工程学报*, 2022, 37(2): 178–193.
Yang Y X, Li J F, Jin F F, et al. Comparative study of carbon tax and carbon cap-and-trade policies under supply chain network equilibrium. *Journal of Systems Engineering*, 2022, 37(2): 178–193. (in Chinese)
- [17] 鲍勤, 苏丹华, 汪寿阳. 中美贸易摩擦对中国经济影响的系统分析. *管理评论*, 2020, 32(7): 3–16.
Bao Q, Su D H, Wang S Y. Systematic analysis for the impacts of US-China trade friction on China's economy. *Management Review*, 2020, 32(7): 3–16. (in Chinese)
- [18] 刘名武, 翟梦月, 陈翔. 关税和补贴视角下的跨国绿色供应链决策研究. *软科学*, 2019, 33(9): 21–26.
Liu M W, Zhai M Y, Chen X. Decision-making of transnational green supply chain from the perspectives of tariff and subsidy. *Soft Science*, 2019, 33(9): 21–26. (in Chinese)
- [19] 刘名武, 刘亚琼, 付巧灵. 关税、权力结构与消费者偏好下的绿色供应链决策研究. *中国管理科学*, 2022, 30(03): 131–141.
Liu M W, Liu Y Q, Fu Q L. Green supply chain decisions with consideration of tariffs, power structures and consumer preference. *Chinese Journal of Management Science*, 2022, 30(03): 131–141. (in Chinese)
- [20] Boehm J, Sonntag J. Vertical integration and foreclosure: Evidence from production network data. *Management Science*, 2023, 69(1): 141–161.
- [21] Armour H, Teece D. Vertical integration and technological innovation. *The Review of Economics and Statistics*, 1978, 62(3): 470–474.
- [22] Karantininis K, Sauer J, Furtan W. Innovation and integration in the agri-food industry. *Food Policy*, 2010, 35(2): 112–120.
- [23] Niu B Z, Mu Z H. Sustainable efforts, procurement outsourcing, and channel co-opetition in emerging markets. *Transportation Research, Part E: Logistics and Transportation Review*, 2020, 138: 101960.
- [24] 许浩楠, 刘家国. 考虑供应风险的OEM/ODM供应链决策研究. *中国管理科学*, 2024: 1–20. Doi: 10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2023.0351.
Xu H N, Liu J G. Research on OEM/ODM supply chain decision making considering supply risk. *Chinese Journal of Management Science*, 2024: 1–20. Doi: 10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2023.0351. (in Chinese)
- [25] 刘名武, 付巧灵, 刘亚琼. 加征关税下的跨国供应链决策及补贴策略研究. *中国管理科学*, 2023, 31(1): 92–103.
Liu M W, Fu Q L, Liu Y Q. Decision-making and subsidy strategy of a multinational supply chain suffered to import tariff. *Chinese Journal of Management Science*, 2023, 31(1): 92–103. (in Chinese)

- [26] 潘 晨, 杨 柏, 冯鹤林, 等. 碳交易制度下绿色供应链不同成本分担合同选择. 系统工程学报, 2023, 38(4): 555–576.
Pan C, Yang B, Feng H L. Different cost-sharing contracts choices in a green supply chain under carbon trading system. Journal of Systems Engineering, 2023, 38(4): 555–576. (in Chinese)
- [27] Liang Y, Liu W, Li W K, et al. A co-opetitive game analysis of platform compatibility strategies under add-on services. Production and Operations Management, 2023, 32(11): 3541–3558.
- [28] Li D, Nishant M, Serguei N. Contracting for product support under information asymmetry. Management Science, 2023, 69(8): 4627–4645.

作者简介:

赖新峰 (1981—), 男, 江西靖安人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向: 物流与供应链管理, Email: laixinfeng@jxufe.edu.cn;

王 鑫 (1999—), 男, 河南信阳人, 硕士生, 研究方向: 物流与供应链管理, Email: jufegood@foxmail.com;

陈志祥 (1965—), 男, 广西陆川人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向: 生产运作管理, Email: mnsczx@mail.sysu.edu.cn;

刘伟明 (1978—), 男, 江苏宜兴人, 博士, 教授, 硕士生导师, 研究方向: 环境规制, Email: liuweiming@gzmtu.edu.cn.

附录 定理与推论的证明

定理1的证明:

Stackelberg 博弈是一种典型的具有先动优势的完全信息动态博弈, 后动者可以观察到先动者的决策信息, 此类模型一般采用逆向求解法, 先求出后动者的最优决策, 再逐级递推. 因此, 先求出该博弈的子博弈精炼纳什均衡, 首先考虑在给定二级合同制造商产品生产定价 ω_2 的情况下, 原始设备制造商的最优决策. 对原始设备制造商的利润函数 π_D^N 求关于决策变量 p 的一阶和二阶导数, 可得

$$\frac{\partial \pi_D^N}{\partial p} = a - bp + \beta e - b \left(p + \frac{\lambda k e^2}{2} - (1 + \delta) \omega_2 \right),$$

$$\frac{\partial^2 \pi_D^N}{\partial p^2} = -2b.$$

由于 $b > 0$, 因此 $\frac{\partial^2 \pi_D^N}{\partial p^2} < 0$, π_D^N 存在唯一最优解使得函数值达到最大, 利用一阶条件 $\frac{\partial \pi_D^N}{\partial p} = 0$ 可以解得最优解 p 关于给定的 ω_2 的反应函数为 $p = \frac{2a + 2\beta e - b\lambda k e^2 + 2b(1 + \delta)\omega_2}{4b}$, 二级合同制造商预测到原始设备制造商将根据该反应函数决策 p , 因此, 将该反应函数代入二级合同制造商的利润函数中, 继续求解上一级子博弈精炼纳什均衡, 考虑在给定一级合同制造商产品生产定价 ω_1 的情况下, 二级合同制造商的最优决策. 对二级合同制造商的利润函数 π_{M2}^N 求关于决策变量 ω_2 的一阶和二阶导数, 可得

$$\frac{\partial \pi_{M2}^N}{\partial \omega_2} = \frac{2a + 2\beta e + b\lambda k e^2 + \delta b\lambda k e^2 + 2b(1 + \delta)\omega_1 - 4b(1 + \delta)\omega_2}{4},$$

$$\frac{\partial^2 \pi_{M2}^N}{\partial \omega_2^2} = -b(1 + \delta).$$

由于 $b > 0$, 因此 $\frac{\partial^2 \pi_{M2}^N}{\partial \omega_2^2} < 0$, π_{M2}^N 存在唯一最优解使得函数值达到最大, 利用一阶条件 $\frac{\partial \pi_{M2}^N}{\partial \omega_2} = 0$ 可以解得最优解 ω_2 关于给定的 ω_1 的反应函数为 $\omega_2 = \frac{2a + 2\beta e + b\lambda k e^2 + 2b(1 + \delta)\omega_1}{4b(1 + \delta)}$, 一级合同制造商也会预测到二级合同制造商将根据该反应函数决策 ω_2 , 因此, 将该反应函数代入一级合同制造商的利润函数中, 继续求解上一级子博弈精炼纳什均衡, 考虑在给定一级合同制造商产品成本 c 的情况下, 一级合同制造商的最优决策. 对一级合同制造商的利润函数 π_{M1}^N 求关于决策变量 ω_1 的一阶和二阶导数, 可得

$$\frac{\partial \pi_{M1}^N}{\partial \omega_1} = \frac{2a + 2bc + 2\beta e + 2bc\delta + (2 + \delta)b\lambda k e^2 - 4b(1 + \delta)\omega_1}{8},$$

$$\frac{\partial^2 \pi_{M1}^N}{\partial \omega_1^2} = -\frac{b}{2}(1 + \delta).$$

由于 $b > 0$, 因此 $\frac{\partial^2 \pi_{M1}^N}{\partial \omega_1^2} < 0$, π_{M1}^N 存在唯一最优解使得函数值达到最大, 利用一阶条件 $\frac{\partial \pi_{M1}^N}{\partial \omega_1} = 0$ 可以解得最优解为 $\omega_1^N = \frac{2a + 2bc + 2\beta e + 2bc\delta + (2 + \delta)b\lambda k e^2}{4b(1 + \delta)}$, 子博弈精炼纳什均衡求解完毕, 将该式反代到上述各个反应函数, 可以解出定理1中供应链各成员最优决策. 证毕.

推论1的证明

令 $\delta = 0$, 通过求导计算可得

$$\frac{\partial \omega_1^{N^I}}{\partial e} = \frac{\beta + 2\lambda b k e}{2b}, \frac{\partial \omega_2^{N^I}}{\partial e} = \frac{3\beta + 4\lambda b k e}{4b}, \frac{\partial p^{N^I}}{\partial e} = \frac{7\beta}{8b}, \frac{\partial \pi_{M^1}^{N^I}}{\partial e} = \frac{\beta(a-bc+\beta e)}{8b}, \frac{\partial \pi_{M^2}^{N^I}}{\partial e} = \frac{\beta(a-bc+\beta e)}{16b}.$$

由于参数 $a, b, c, k, e, \beta, \lambda$ 均大于0, 因此, 显然可得 $\frac{\partial \omega_1^{N^I}}{\partial e} > 0, \frac{\partial \omega_2^{N^I}}{\partial e} > 0, \frac{\partial p^{N^I}}{\partial e} > 0$. 同时, $a - bp > 0$, 而 $p > c$, 因此 $a - bc > 0$, 故可得 $\frac{\partial \pi_{M^1}^{N^I}}{\partial e} > 0, \frac{\partial \pi_{M^2}^{N^I}}{\partial e} > 0$. 证毕.

推论2的证明: 对上述变量作差后, 根据各个参数的正负性即可得证推论2. 证毕.

定理2的证明: 证明过程与定理1类似, 具体求解过程不再赘述. 证毕.

推论3的证明: 对上述变量作差后, 根据各个参数的正负性即可得证推论3. 证毕.

定理3的证明: 证明过程与定理1类似, 具体求解过程不再赘述. 证毕.

定理4的证明: 计算三种模式下的均衡利润差值, 根据各个参数的正负性即可得证定理4. 证毕.

推论4的证明: 对三种模式下的均衡结果分别求导作差后即可得证推论4. 证毕.

定理5的证明:

计算三种模式下的均衡利润差值, 即 $\pi_{M^1}^S - \pi_{M^1}^{N^I}(\pi_{M^1}^{N^{II}}), \pi_{M^2}^S - \pi_{M^2}^{N^I}(\pi_{M^2}^{N^{II}}), \pi_D^S - \pi_D^{N^I}(\pi_D^{N^{II}})$, 并求其零点, 可以得到三个函数的零点(舍去一个)分别为 $\delta_1 = \frac{2\beta}{b\lambda k e}, \delta_2 = \frac{2\beta}{b\lambda k e}$,

$$\delta_3 = \frac{8bc\beta + 4abek\lambda - 4b^2cek\lambda + 12be^2k\beta\lambda - \sqrt{(8bc\beta + 4abek\lambda - 4b^2cek\lambda + 12be^2k\beta\lambda)^2 - 4(-128bek + 8a\beta - 8bc\beta + 12e\beta^2)(4b^2cek\lambda + 3b^2e^3k^2\lambda^2)}}{2(4b^2cek\lambda + 3b^2e^3k^2\lambda^2)}.$$

当 $\delta > 0$ 时, 所有利润函数 $\pi(\delta)$ 均无间断点, 即 $\pi(\delta)$ 处处连续, 故 $\pi_{M^1}^S - \pi_{M^1}^{N^I}(\pi_{M^1}^{N^{II}}), \pi_{M^2}^S - \pi_{M^2}^{N^I}(\pi_{M^2}^{N^{II}}), \pi_D^S - \pi_D^{N^I}(\pi_D^{N^{II}})$ 均在零点两端具有不同极性的函数值, 通过特殊值法即可得证定理5. 证毕.

推论5的证明

由定理4可知合同制造商与原始设备制造商的临界值, 对其作差可得

$$\frac{2\beta}{b\lambda k e} - \frac{8bc\beta + 4abek\lambda - 4b^2cek\lambda + 12be^2k\beta\lambda - \sqrt{(8bc\beta + 4abek\lambda - 4b^2cek\lambda + 12be^2k\beta\lambda)^2 - 4(-128bek + 8a\beta - 8bc\beta + 12e\beta^2)(4b^2cek\lambda + 3b^2e^3k^2\lambda^2)}}{2(4b^2cek\lambda + 3b^2e^3k^2\lambda^2)} = \frac{2(2bc\beta - abek\lambda + b^2cek\lambda + \sqrt{b^2(e^2k^2(a^2 + 96be^2k)\lambda^2 + c^2(2\beta + bek\lambda)^2 - 2cek\lambda(2a\beta + bek(a\lambda - 64)))})}{b^2ek\lambda(4c + 3e^2k\lambda)},$$

$$\text{又因为 } \frac{2(2bc\beta - abek\lambda + b^2cek\lambda + abek\lambda)}{b^2ek\lambda(4c + 3e^2k\lambda)} < \frac{2(2bc\beta - abek\lambda + b^2cek\lambda + \sqrt{b^2(e^2k^2(a^2 + 96be^2k)\lambda^2 + c^2(2\beta + bek\lambda)^2 - 2cek\lambda(2a\beta + bek(a\lambda - 64)))})}{b^2ek\lambda(4c + 3e^2k\lambda)},$$

而 $\frac{2(2bc\beta - abek\lambda + b^2cek\lambda + abek\lambda)}{b^2ek\lambda(4c + 3e^2k\lambda)} > 0$, 根据同比传导性可知

$$\frac{2(2bc\beta - abek\lambda + b^2cek\lambda + \sqrt{b^2(e^2k^2(a^2 + 96be^2k)\lambda^2 + c^2(2\beta + bek\lambda)^2 - 2cek\lambda(2a\beta + bek(a\lambda - 64)))})}{b^2ek\lambda(4c + 3e^2k\lambda)} > 0, \text{ 得证推论5. 证毕.}$$