

碳税政策下考虑航运竞争的碳减排投资决策研究

杨宜清, 徐 琪

东华大学旭日工商管理学院, 上海

收稿日期: 2023年11月22日; 录用日期: 2024年1月11日; 发布日期: 2024年1月19日

摘 要

碳税政策下航运企业承担随之带来的碳排放成本, 从而不得不考虑投资碳减排技术降低企业碳排放, 然而如何在航运企业存在竞争的情形下进行投资决策成为亟待解决的问题。以此为背景, 构建一个港口与两个航运企业组成的港航供应链。分析对比无企业投资、单一企业投资、两企业投资三种情形下港航供应链成员定价和利润以及碳排放总量的变化情况。结果表明单一企业投资情形下航运企业谁投资则谁受益, 两企业均投资时在某些条件下则会导致两航运企业的利润甚至低于无企业投资下的利润, 同时在受到竞争环境的影响, 单一投资情形下碳减排水平高于两企业投资时的减排水平。研究还发现不同竞争强度下, 碳税对于不同情形下的航运企业利润的影响有所不同。

关键词

减排投资, 碳排放, 碳税, 竞争供应链

Research on Emission Reduction Investment Considering Shipping Competition under Carbon Tax Policy

Yiqing Yang, Qi Xu

Glorious Sun School of Business and Management, Donghua University, Shanghai

Received: Nov. 22nd, 2023; accepted: Jan. 11th, 2024; published: Jan. 19th, 2024

Abstract

Under the carbon tax policy, shipping companies have to bear the carbon emission costs, which

force them to consider investing in carbon reduction technologies to lower their carbon emissions. However, making investment decisions in the presence of competition among shipping companies remains a challenging problem. To address this issue, a port and two shipping companies are constructed to form a port-shipping supply chain. The changes in pricing, profits, and total carbon emissions of the members in the port-shipping supply chain are analyzed and compared under three scenarios: no company investment, single company investment, and investment by both companies. The results indicate that in the case of a single company investment, the company that invests benefits, while in some conditions, both shipping companies' profits may even be lower than those without any company investment when both companies invest. Moreover, under the influence of competitive environment, the level of carbon emission reduction is higher in the scenario of a single company investment compared to when both companies invest. The study also finds that the impact of carbon tax on shipping companies' profits varies under different levels of competition intensity.

Keywords

Carbon Reduction Investment, Carbon Emission, Carbontax, Supply Chain Competition

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着国际贸易的发展, 作为国际贸易衍生需求的国际远洋运输需求增长迅速。远洋运输因其单位运输成本低的优点承担全球货运需求的 85%, 成为国际贸易中最重要的运输方式之一, 因此其产生的有害气体和温室气体成为大气污染的主要来源之一。近年来全球温室效应加剧, 人们逐渐重视温室气体排放问题, 对于减少碳排放的需求日益强烈, 港口与航运企业的碳减排问题被广泛关注。有研究表明航运部门能够有效降低碳排放并实现全球成本的节约, 因此建议将航运行业纳入碳交易体系中或对其征收碳税 [1]。各国政府及国际组织也积极采取措施降低航运业碳排放。如 2018 年 4 月, 国际海事组织(IMO)通过了《船舶温室气体减排初步战略》, 提出尽快减少船舶温室气体排放的计划, 目标是 2050 年全球航运产生的碳排放比 2008 年减少 50% 以上, 2100 年前尽快实现温室气体零排放 [2]。2019 年 12 月, 《欧洲绿色协议》提出“让欧洲成为全球首个碳中和大陆”, 并可能对包含航运业在内的多数行业实行“气候税金”。我国作为世界港口和航运大国, 顺应全球形势积极采取措施推进港口航运产业减碳。2021 年国务院印发《“十四五”节能降碳综合工作方案》, 提出加强船舶清洁能源动力推广应用, 推动船舶岸电受电设施改造。政策的不断推进督促企业采取措施减少碳排放。受到环境低碳宣传的影响, 消费者逐渐重视产品的碳排放而选择低碳产品, 因此许多企业选择投资碳减排技术吸引更多消费者。2023 年马士基宣布订造 6 艘能够使用绿色甲醇燃料的中型集装箱船舶, 至此马士基的甲醇动力船舶订单量达 25 艘。中远海运持续推进旗下控股码头场桥“油改电”, 采用电力驱动替代柴油发电机驱动, 降低碳排放和噪音污染, 此外截止 2022 年底, 其集团旗下港口实现国内控股码头集装箱船舶泊位岸电设施全覆盖。在目前的自然环境和政策环境下, 港口航运企业如何减少碳排放成为不可规避的问题。

2. 文献综述

国际上以碳税与碳排放交易机制为主流的碳减排政策, 其中碳税政策更为灵活、应用范围更为广泛

[3]。航海碳税最早由欧盟委员会于 2013 年提出, 是以船舶燃油消耗量为标准征收的一种环境税, 希望通过税收手段减少船舶运营过程中的燃油消耗量从而降低航运业产生的碳排放。碳税政策能够将企业对环境造成的外部社会成本内化为企业的运营成本, 进而影响产品的成本和价格以解决碳排放带来的环境问题[4]。Lee Tsung-Chen 等[5]利用 GTAP-E 模型分析航海碳税对于全球经济的影响, 数值结果显示除非碳税税率非常高, 否则对国际集装箱征收航海碳税不会造成重大的经济影响。因此航海碳税成为促进航运业碳减排的重要政策之一。虽然我国目前还没有正式征收碳税, 但在现有的税制中存在的化石能源的消费税属于广义意义上的碳排放税[6]。为应对碳税政策, 航运企业要么投资碳减排技术降低碳排放, 否则承担高额的碳排放成本。碳排放交易机制通过建立企业间碳排放额度的交易市场, 借助市场机制配置碳排放权实现碳排放总量的降低。政府以降低碳排放总量为目标向企业下发免费碳排放额度, 当企业产生的碳排放超出免费额度时则需要从碳交易市场购买其他企业出售的额度, 反之也可以出售多余额度获得收益[7]。由于本文考虑航运企业的碳减排投资问题, 因此仅考虑碳税政策带来的影响。

目前已有学者研究碳税政策对于港口航运企业运营带来的影响, 主要侧重在航运路径及航速优化和港航企业碳减排投资决策两个方面。航运业产生的碳排放主要来源于船舶航行及挂靠港口和港口货物装卸机械的燃油消耗。与航运业总体碳排放量相比, 港区产生的碳排放量相对较小[8]。因此许多学者关注于碳税等环境政策下船舶的航行速度及路径优化问题。如 Sunil Tiwari [9]等研究碳税政策下货运集装箱化策略问题, 认为货物集运有助于降低运输总成本和碳排放总量。Yang Liu [10]等研究在碳税基础上考虑航运企业联盟的航运网络优化问题, 结果表明班轮公司会通过降低航行速度和增加船只数量来控制运营成本。Weihao Ma [11]等研究也表明碳税会导致航运公司运营管理船舶时, 降低其航行速度, 进而可能降低航运业的效率。Chuanxu Wang 和 Changyan Xu [12]基于碳税政策研究行次租船的航速优化问题。Shiqing Gao [13]等的研究表明调整班轮速度是船舶精益运营管理的重要途径, 而在更为严格的环境政策下班轮公司还需要提供多样化的运输服务以保证企业需求的稳定。以上文献表明船舶运营过程中可以通过调节航速、增加航线配船数量等方式降低运输过程中产生的碳排放。

针对港航企业碳减排投资问题, Cui 和 Notteboom [8]研究港口竞争情形下, 基于碳税政策港口私有化程度对碳减排投资以及碳排放污染的影响。在此基础上, 部分学者考虑企业行为如企业环境责任[14] [15]对碳税政策下港口竞争的碳减排投资问题进行完善。Zhuoqi Teng [16]等发现港口整合能提高社会福利, 但不一定会减少碳排放。而 Jian Wang [15]等发现集装箱码头之间合作能减少对于环境的破坏。桑高峰[17]考虑市场具有低碳偏好时, 对比不同博弈情形下港航企业的碳减排投资决策。周海英[18]和梁晶[19]研究不同博弈情形下航运企业碳减排投资问题, 前者提出港口辅助减排成本的概念从而解释政府补贴对于港航碳减排的推动作用, 后者对比碳税政策与碳交易机制对航运企业减排决策影响。Lingpeng Meng 等[20]认为补贴航运企业短期内优于无成本分摊情形但长期来看并不能很好地促进碳减排。王伶俐等[21]研究货主低碳偏好下船公司竞争碳减排决策问题认为选择减排的船公司的利润总是大于选择不减排的船公司的利润的结论, 但并未考虑碳政策对于减排投资带来的影响。还有部分学者对岸电技术和低硫燃油技术选择问题进行研究[22] [23] [24] [25]

以上有关港航碳减排的研究文献中主要存在以下不足: 一是大多文献考虑单一港口与单一航运企业构成的二级供应链, 然而实际中一个港口会为许多航运企业提供服务。二是现有文献当中较多考虑上游港口企业的碳减排投资问题, 少有研究航运企业的碳减排投资决策问题。三是多数碳减排投资研究仅对企业的碳减排投资努力进行分析, 少有文献分析其他因素对碳排放总量的影响。因此本文考虑由一个港口和两个航运企业构成的航运供应链, 基于航运企业竞争下, 研究航运企业的碳减排投资问题, 分析竞争环境和碳税政策对于港航供应链成员的定价、利润以及碳排放总量的影响。

3. 问题描述及基本假设

3.1. 问题描述

本文考虑由一个港口和两个相同地位航运企业组成的二级港航供应链(如图 1), 航运企业 1 和航运企业 2 均具备投资碳减排技术的能力, 上游港口企业向航运企业 1 和航运企业 2 分别收取 ω_1 和 ω_2 的服务费。为清晰起见, 以下分三种情形, 即无企业投资减排技术、单一航运企业投资减排技术以及两航运企业均投资减排技术的情形, 探究两航运企业竞争情形下航运企业碳减排技术投资决策问题。假定港口边际服务成本为零。航运企业 1 和航运企业 2 分别以 p_1 和 p_2 的运输价格向托运人提供运输服务。考虑港口主导的港航供应链系统, 即港口企业领导的 Stackelberg 博弈, 航运企业 1 和航运企业 2 作为跟随者依据港口企业的决策而决策。

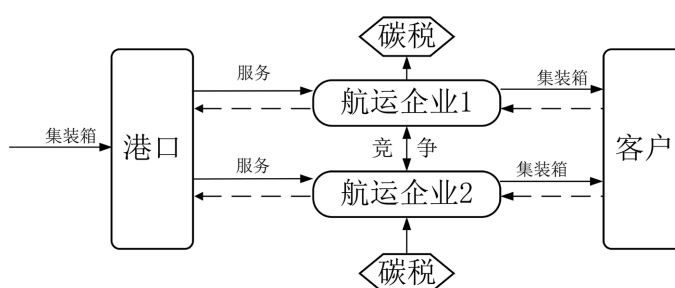


Figure 1. The structure of the shipping supply chain
图 1. 港航供应链结构图

假定航运市场的运输需求是确定的, 即需求依据航运企业运价确定。航运企业之间存在竞争, 因此双方需求不仅取决于自身运价, 还会受到对方运价的影响, 参考 Madani & Rasti-Barzoki [26]和邓万江[27]设定两航运企业的市场需求函数为 $Q_i = a - p_i + b * p_j$, ($i=1,2$) 分别表示航运企业 1 和航运企业 2。其中, $a > 0$ 为市场的最大规模, $0 < b < 1$ 为竞争强度系数, b 值越大意味着竞争强度越大; 反之, 则表示竞争强度越小。

航运企业作为市场主体, 其目标为自身企业利润最大化, 由于采取减排技术需要投入大量的减排成本, 因此航运企业整体减排积极性较低。在此情形下, 政府为督促航运企业采取措施降低碳排放而对航运企业产生的碳排放征收碳税。借鉴桑高峰[17]和梁晶[19], 航运企业装卸每单位 TEU 所产生的初始碳排放为 e_0 , 政府对航运企业产生碳排放征收的碳税税率为 t , 因此航运企业 i 需要付出碳排放成本为 $Q_i e_0 t$ 。为减轻税负, 航运企业可以通过投资碳减排技术降低碳排放量。借鉴 Map [28]和刘家国[29]设定投资成本为 $\frac{1}{2} k_i e_i^2$ ($i=1,2$) 与减排水平成二次方关系, 其中 e_i 和 k_i 分别表示为航运企业 i 的碳减排技术投资水平和碳减排技术投资成本系数。当航运企业 i 投资碳减排技术水平为 e_i 时, 碳排放成本可表示为 $Q_i (e_0 - e_i) t$, 此时供应链成员产生的碳排放总量为 $ED = Q_1 (e_0 - e_1) + Q_2 (e_0 - e_2)$ 。另由于两航运企业具有同等地位, 因此设定 $k_1 = k_2 = k$ 。

3.2. 基本假设

1) 港口与两个航运企业之间采取 Stackelberg 博弈, 港口为领导者, 两个航运企业为跟随者, 且两个竞争的航运企业之间采取静态的伯川德纳什博弈。

2) 由于两航运企业采取价格竞争, 因此两航运企业的决策变量分别为 p_1 和 p_2 。由于不同情形下航

运企业会选择碳减排技术投资, 因此决策变量还包括 e_1 和 e_2 。

3) 表示方便, 上标 N、S 和 B 分别表示无企业投资、单一企业投资碳减排技术和两企业投资碳减排技术情形, 下表 p、1、2、SC 分别表示港口企业、航运企业 1、航运企业 2 和供应链, 如 π_p^N 表示无企业投资碳减排技术情形下港口企业的利润。

4) 为保证均衡解有意义以及供应链成员利润函数为凹函数, 假定条件 $2k - t^2 > 0$ 、 $(2+b)k - (1+b)t^2 > 0$ 和 $a + (b-1)e_0t > 0$ 成立。

4. 模型建立与求解

4.1. 无企业投资(N)

无企业投资情形下, 港口作为领导者先决定对两航运企业收取的港口服务费 w_1 和 w_2 , 在此基础上两航运企业分别以各自企业自身利益最大化决定各自的运价 $p_i (i=1,2)$ 。此时港口的利润函数为:

$$\pi_p^N = \sum_{i=1}^2 w_i * Q_i \quad (1)$$

航运企业 $i (i=1,2)$ 的利润函数为:

$$\pi_i^N = (p_i - w_i - e_0t) * (a - p_i + bp_{3-i}) \quad (2)$$

由逆向归纳法对该问题进行求解得到定理 1。

定理 1: 在无企业投资情形下, 港口最优服务费以及两航运企业的最优运价分别为 $w_1^{N*} = w_2^{N*} = \frac{a + (b-1)e_0t}{2(1-b)}$, $p_1^{N*} = p_2^{N*} = \frac{a + (1-b)(2a + e_0t)}{4 - 6b + 2b^2}$ 。

根据定理 1 中的最优解可以得到, 两航运企业的市场规模为 $Q_1^{N*} = Q_2^{N*} = \frac{a + (b-1)e_0t}{2(2-b)}$ 。最终得到该

情形下两航运企业最优利润和港口企业最优利润分别为 $\pi_1^{N*} = \pi_2^{N*} = \frac{(a + (b-1)e_0t)^2}{4(b-2)^2}$ 和

$\pi_p^{N*} = \frac{(a + (b-1)e_0t)^2}{2(2-b)(1-b)}$ 。此时供应链成员产生的碳排放总量为 $ED_{SC}^{N*} = \frac{e_0(a + (b-1)e_0t)}{2-b}$ 。

推论 1: $\frac{\partial w_i^{N*}}{\partial t} < 0$, $\frac{\partial p_i^{N*}}{\partial t} > 0$, $\frac{\partial \pi_i^{N*}}{\partial t} < 0$, $\frac{\partial \pi_p^{N*}}{\partial t} < 0$, $\frac{\partial ED_{1+2}^{N*}}{\partial t} < 0$ 。

推论 1 表明, 政府对航运企业征收碳税也会对上游港口企业的服务价格以及利润产生影响。对上游港口企业而言, 随着碳税税率的增加, 其服务价格和最优利润都会随之降低; 而对竞争的航运企业来说, 随着碳税税率的增加, 航运企业会选择提高运价转嫁碳税税率增加带来的成本增长, 但是这也无法避免税率增加对利润造成损失。同时推论 1 表明碳税政策能够有效降低供应链成员产生的碳排放总量。

4.2. 单一航企投资(S)

单一航运企业投资情形即两航运企业中仅有一个航运企业投资碳减排技术, 由于两航运企业地位相同, 因此假定航企 1 投资碳减排技术。在此情形下博弈顺序如下:

第一阶段: 港口企业确定对两航运企业的服务费率 w_1 和 w_1 , 使得自身利润最大化:

$$\pi_p^S = \sum_{i=1}^2 w_i * Q_i \quad (3)$$

第二阶段: 航运企业 1 与航运企业 2 进行价格博弈, 航运企业 1 决策减排投资水平 e_1 和运价 p_1 , 航

$$\pi_2^B = (p_2 - w_2 - (e_0 - e_2)t) * (a - p_2 + bp_1) - \frac{1}{2}ke_2^2 \quad (8)$$

由逆向归纳法求解可得定理 3。

定理 3: 当两航运企业均投资时, 港口对两航运企业最优服务费分别为 $w_1^{B*} = \frac{a+(b-1)e_0t}{2(1-b)}$,

$w_2^{B*} = \frac{a+(b-1)e_0t}{2(1-b)}$; 航企 1 的最优运价和最优碳减排投资水平分别为

$p_1^{B*} = \frac{a(3-2b)k - (b-1)e_0kt + 2a(b-1)t^2}{2(1-b)((b-1)t^2 - (b-2)k)}$, $e_1^{B*} = \frac{t(a+(b-1)e_0t)}{2((b-1)t^2 - (b-2)k)}$; 航企 2 最优运价和最优减排投资

水平分别为 $p_2^{B*} = \frac{a(3-2b)k - (b-1)e_0kt + 2a(b-1)t^2}{2(1-b)((b-1)t^2 - (b-2)k)}$, $e_2^{B*} = \frac{t(a+(b-1)e_0t)}{2((b-1)t^2 - (b-2)k)}$ 。

由定理 2 得到两航运企业的市场需求分别为 $Q_1^{B*} = \frac{k(a+(b-1)e_0t)}{2((b-1)t^2 - (b-2)k)}$,

$Q_2^{B*} = \frac{k(a+(b-1)e_0t)}{2((b-1)t^2 - (b-2)k)}$ 。

此时, 港口的最优利润、航企 1 的最优利润和航企 2 的最优利润分别为

$\pi_p^{B*} = \frac{k(a+(b-1)e_0t)^2}{2(1-b)((b-1)t^2 - (b-2)k)}$, $\pi_1^{B*} = \frac{k(a+(b-1)e_0t)^2(2k-t^2)}{8((-2+b)k - (b-1)t^2)^2}$, $\pi_2^{B*} = \frac{k(a+(b-1)e_0t)^2(2k-t^2)}{8((-2+b)k - (b-1)t^2)^2}$ 。供

应链成员产生的碳排放总量为

$$ED_{SC}^{B*} = \frac{k(a+(b-1)e_0t)(2(2-b)e_0k - at - (1-b)e_0t^2)}{2((b-2)k - (b-1)t^2)^2}$$

推论 2: $\frac{\partial p_i^{B*}}{\partial k} > 0$, $\frac{\partial e_i^{B*}}{\partial k} < 0$, $\frac{\partial Q_i^{B*}}{\partial k} < 0$, $\frac{\partial \pi_p^{B*}}{\partial k} > 0$, $\frac{\partial \pi_{sc}^{B*}}{\partial k} > 0$ 。当 $0 < b < \frac{2}{3}$, $k > \frac{(1-b)t^2}{2-3b}$ 时, $\frac{\partial \pi_i^{B*}}{\partial k} < 0$;

而当 $0 < b < \frac{2}{3}$, $\frac{t^2}{2} < k < \frac{(1-b)t^2}{2-3b}$ 或 $\frac{2}{3} < b < 1$ 时, $\frac{\partial \pi_i^{B*}}{\partial k} > 0$

证明: 分别对航运企业运价、碳减排投资水平、市场需求、航运企业利润、港口企业利润以及供应

链企业利润求关于碳减排投资成本系数 k 的导数, 易得 $\frac{\partial p_i^{B*}}{\partial k} = \frac{t^2(a+(b-1)e_0t)}{2((b-2)k - (b-1)t^2)}$,

$\frac{\partial e_i^{B*}}{\partial k} = \frac{2(b-2)t(a+(b-1)e_0t)}{(2(b-2)k - 2(b-1)t^2)^2}$, $\frac{\partial Q_i^{B*}}{\partial k} = \frac{(b-1)t^2(a+(b-1)e_0t)}{2((b-2)k - (b-1)t^2)^2}$, $\frac{\partial \pi_p^{B*}}{\partial k} = \frac{t^2(a+(b-1)e_0t)^2}{2((b-2)k - (b-1)t^2)^2}$ 。当

$2k - t^2 > 0$ 时, 推得 $(b-2)k - (b-1)t^2 < -\frac{b}{2}t^2 < 0$ 。因此 $\frac{\partial p_i^{B*}}{\partial k} > 0$, $\frac{\partial e_i^{B*}}{\partial k} < 0$, $\frac{\partial Q_i^{B*}}{\partial k} < 0$, $\frac{\partial \pi_p^{B*}}{\partial k} > 0$, $\frac{\partial \pi_{sc}^{B*}}{\partial k} > 0$ 。

$\frac{\partial \pi_{sc}^{B*}}{\partial k} = \frac{(a+(b-1)e_0t)^2((6-5b)kt^2 + 3(b-1)t^4)}{4((b-2)k - (b-1)t^2)^3}$, 由 $2k - t^2 > 0$ 推得 $(6-5b)kt^2 + 3(b-1)t^4 > \frac{b}{2}t^4 > 0$, 进而

推得 $\frac{\partial \pi_{sc}^{B*}}{\partial k} < 0$ 。 $\frac{\partial \pi_i^{B*}}{\partial k} = \frac{(a+(b-1)e_0t)^2((2-3b)kt^2 + (b-1)t^4)}{8((b-2)k - (b-1)t^2)^3}$, 当 $0 < b < \frac{2}{3}$ 时, $\frac{(1-b)t^2}{2-3b} > \frac{1}{2}t^2$, 此时当

$k > \frac{(1-b)t^2}{2-3b}$ 则 $(2-3b)kt^2 + (b-1)t^4 > 0$, 推得 $\frac{\partial \pi_i^{B*}}{\partial k} < 0$; 而当 $\frac{t^2}{2} < k < \frac{(1-b)t^2}{2-3b}$ 则 $(2-3b)kt^2 + (b-1)t^4 < 0$, 推得 $\frac{\partial \pi_i^{B*}}{\partial k} > 0$; 当 $\frac{2}{3} < b < 1$ 时, $(2-3b)kt^2 + (b-1)t^4 < 0$ 易得此时 $\frac{\partial \pi_i^{B*}}{\partial k} > 0$ 。

推论 2 显示, 随着碳减排投资成本系数的增加, 航运企业的碳减排投资水平、市场需求平衡以及港口的最优收益会下降。同时, 航运企业的运价会增加。这是因为投资成本的增加意味着需要更多的投资降低产品的碳排放, 减少了航运企业的投资意愿。这直接导致投资水平的下降, 进而导致航运企业的运价上涨、市场需求下降以及港口企业利润的减少。

值得关注的是, 虽然航运企业的利润函数关于碳减排投资成本系数并非单调的, 但是港航供应链的总利润却是随着投资成本系数的增大而降低的。这就说明碳减排投资成本系数的增大能够增加航运企业的利润, 但这必然会损害整个港航供应链的总利润。

5. 港航供应链碳减排均衡分析

5.1. 单一航企投资的影响

对比单一航企投资碳减排技术、无航企投资碳减排技术情形下供应链成员的利润函数以及航运企业服务价格, 分析仅有一方投资碳减排技术时, 减排投资决策对供应链成员的影响。

命题 1 比较两情形下成本效应可以得出:

(1) 比较两航运企业各自的服务价格, 可得: $\Delta p_1^S = p_1^{S*} - p_1^{N*} < 0$, $\Delta p_2^S = p_2^{S*} - p_2^{N*} < 0$; 且两航运企业价格波动的差值满足 $\Delta p_2^S = \frac{b}{2} \Delta p_1^S$ 。

(2) 比较港口企业的服务费, 可得: $w_1^{S*} = w_1^{N*}$, $w_2^{S*} = w_2^{N*}$ 。

证明: $\Delta p_1^S = p_1^{S*} - p_1^{N*} = \frac{t^2(a + (b-1)e_0t)}{(2-b)((b^2-4)k - (b^2-2)t^2)}$,

$\Delta p_2^S = p_2^{S*} - p_2^{N*} = \frac{bt^2(a + (b-1)e_0t)}{2(2-b)((b^2-4)k - (b^2-2)t^2)}$, 易证 $\Delta p_2^S = \frac{b}{2} \Delta p_1^S$, 由 $2k - t^2 > 0$ 推得

$(b-2)k - (b-1)t^2 < -\frac{b}{2}t^2 < 0$, 即可证明 $\Delta p_1^S = p_1^{S*} - p_1^{N*} < 0$ 和 $\Delta p_2^S = p_2^{S*} - p_2^{N*} < 0$ 。

命题 1 表明, 当只有航运企业 1 投资碳减排技术时, 对于上游港口企业的服务费和与自身地位相同的航运企业 2 的运价有不同的影响。根据(1)的发现, 当只有航企 1 投资时, 航运企业的运价都有一定程度的下降, 但两企业的运价下降的原因不同。航企 1 投资减少单位需求产生的碳排放量, 因此航企 1 支付的碳税成本有所降低, 能够降低运价获得更多市场份额和利润。对于航企 2 而言, 由于航企 1 服务价格的下降, 航企 2 为减小航企 1 降价的影响被动地降低运价, 也正因如此其运价下降幅度为航企 1 运价的下降幅度的 $\frac{b}{2}$ 倍(航企 2 运价的下降幅度小于航企 1 运价的下降幅度)。(2)则表明航企 1 投资碳减排技术前后上游港口企业对两航运企业的服务费率均相等, 也就是说航企投资对于上游港口企业的服务费率没有影响。

命题 2 比较两情形下的市场效应可得: $\Delta Q_1^S = Q_1^{S*} - Q_1^{N*} > 0$, $\Delta Q_2^S = Q_2^{S*} - Q_2^{N*} < 0$ 。

命题 2 表明, 单一投资情形下, 航企 1 的市场需求增大而航企 2 的市场需求减小。单一企业投资能够提高自身的市场需求水平。结合命题 1 可知, 这是由于投资碳减排技术降低满足单位需求产生的碳排放成本, 从而航企 1 有底气降低运价以获取更大的市场。而航企 2 由于没有成本优势来大幅度降低运价,

因此不可避免地损失部分市场。

命题 3 比较两情形下的企业最优利润可得:

(1) 比较两航运企业的最优利润, 可得 $\Delta\pi_1^S = \pi_1^{S*} - \pi_1^{N*} > 0$, $\Delta\pi_2^S = \pi_2^{S*} - \pi_2^{N*} < 0$ 。

(2) 比较港口企业的最优利润, 可得 $\Delta\pi_p^S = \pi_p^{S*} - \pi_p^{N*} > 0$ 。

证明: $\Delta\pi_1^S = \pi_1^{S*} - \pi_1^{N*} = \frac{1}{8}(a+(b-1)e_0t)^2 \frac{(16-16b^2+3b^4)kt^2-2(b^2-2)^2t^4}{(b^2-2)^2((b^2-4)k-(b^2-2)t^2)}$, 由 $(2+b)k-(1+b)t^2 > 0$

得 $(16-16b^2+3b^4)kt^2-2(b^2-2)^2t^4 > b(1-b)(4+2b-b^2)t^4 > 0$, 从而证明 $\Delta\pi_1^S = \pi_1^{S*} - \pi_1^{N*} > 0$;

$\Delta\pi_1^S = \pi_1^{S*} - \pi_1^{N*} = -\frac{bt^2(a+(b-1)e_0t)^2(-2(-4+b^2)k+(-4-b+2b^2)t^2)}{4(b-2)^2((-4+b^2)k-(b^2-2)t^2)}$, 由 $(2+b)k-(1+b)t^2 > 0$ 得

$(8-2b^2)k+(-4-b+2b^2)t^2 > bt^2 > 0$, 进而证明 $\Delta\pi_2^S = \pi_2^{S*} - \pi_2^{N*} < 0$; 同理易证 $\Delta\pi_p^S = \pi_p^{S*} - \pi_p^{N*} > 0$

命题 3 表明仅有一方投资情形下, 航企 1 的最优利润大于无企业投资情形的利润, 而航企 2 的最优利润则小于无企业投资情形的利润。对港口而言, 单一企业投资情形的最优利润大于无企业投资情形的最优利润。航企 1 投资碳减排技术获得成本上的优势, 相较于无投资时运价有所降低, 但也获得更大的市场份额。航企 2 在航企 1 降低运价的情况下, 被迫降低运价以减小由于航企 1 降价导致的市场份额的流失。最终结果体现为航运企业 1 最优利润相较之前增加, 而航企 2 最优利润则低于之前。这也表明航企竞争中任意航企投资碳减排技术能够获得更大的市场需求进而提高企业利润, 同时港口利润也会增加, 这是因为航企 1 投资带来市场需求的增加大于航运企业 2 市场需求的减少, 因此总体上港口利润是增加的。

5.2. 两航企投资的影响

对比两航运企业投资与无航运企业情形下港口与两航运企业的利润函数以及运价, 分析两航运企业投资对航运供应链的影响。

命题 4 比较两航运企业投资与无企业投资情形下成本效应可以得出:

(1) 比较两航运企业的运价, 可得: $\Delta p_1^B = p_1^{B*} - p_1^{N*} < 0$, $\Delta p_2^B = p_2^{B*} - p_2^{N*} < 0$ 。

(2) 比较港口的服务费, 可得: $w_1^{B*} = w_1^{N*}$, $w_2^{B*} = w_2^{N*}$ 。

命题 4 的(1)表明在两航运企业均投资碳减排技术情形下, 航运企业的单位运价都有所下降, 这与命题 1 中结论相契合, 即竞争情形下航运企业投资碳减排技术有助于降低碳排放带来的成本从而降低单位运价。由(2)可知, 竞争情形下两航运企业投资碳减排技术对于上游港口服务费没有影响, 这也与命题 1 中结论相同。

命题 5 比较两企业投资情形与无企业投资情形下的企业最优利润可得:

(1) 比较两航运企业的最优利润, 可得: 当 $0 < b < \frac{2}{3}$, $k > \frac{2(b-1)^2t^2}{4-8b-3b^2}$ 时,

$\Delta\pi_i^B = \pi_i^{B*} - \pi_i^{N*} > 0$; 当 $0 < b < \frac{2}{3}$, $\frac{1}{2}t^2 < k < \frac{2(b-1)^2t^2}{4-8b-3b^2}$ 时 $\Delta\pi_i^B = \pi_i^{B*} - \pi_i^{N*} < 0$; 当 $\frac{2}{3} < b < 1$ 时,

$\Delta\pi_i^B = \pi_i^{B*} - \pi_i^{N*} < 0$ 。

(2) 比较港口企业的最优利润, 可得: $\Delta\pi_p^B = \pi_p^{B*} - \pi_p^{N*} > 0$

证明: $\Delta\pi_i^B = \pi_i^{B*} - \pi_i^{N*} = -\frac{t^2(a+(b-1)e_0t)^2((-4+8b-3b^2)k+2(b-1)^2t^2)}{8(b-2)^2((b-2)k-(b-1)t^2)^2}$, 当 $0 < b < \frac{2}{3}$ 时易得

$-4+8b-3b^2 < 0$, 因此当 $k > \frac{2(b-1)^2 t^2}{4-8b-3b^2}$ 时 $(-4+8b-3b^2)k + 2(b-1)^2 t^2 < 0$, 此时 $\Delta\pi_i^B = \pi_i^{B^*} - \pi_i^{N^*} > 0$, 而当 $\frac{1}{2}t^2 < k < \frac{2(b-1)^2 t^2}{4-8b-3b^2}$ 时, 推得 $(-4+8b-3b^2)k + 2(b-1)^2 t^2 > 0$ 即 $\Delta\pi_i^B = \pi_i^{B^*} - \pi_i^{N^*} < 0$; 当 $\frac{2}{3} < b < 1$ 时, $(-4+8b-3b^2)k + 2(b-1)^2 t^2 > \frac{b^2 t^2}{2} > 0$, 因此 $\Delta\pi_i^B = \pi_i^{B^*} - \pi_i^{N^*} < 0$ 。(2)的证明与上文证明相似, 在此不再给予证明。

命题 5 中(1)显然表明, 两航运企业均投资碳减排技术时, 企业的最优利润不一定大于两企业均不投资的情形, 仅在某些情形下, 两企业投资能获得高于不投资时的收益, 而其他情形下, 两企业的收益甚至低于不投资时的收益。竞争强度和投资成本系数影响着两情形下航运企业的收益。当两航运企业竞争强度 $0 < b < \frac{2}{3}$ 即两航运企业竞争性较低时, 且政府征收的碳税税率较低时, 双方同时碳减排产生的收益将会高于不投资时的收益; 而如果两航运企业的竞争强 $\frac{2}{3} < b < 1$ 或政府征收的碳减排税率较高时, 双方投资情形下的最优收益都会低于不投资情形下的最优收益。这说明当竞争强度小且碳税税率低时, 两航运企业都能从投资中获得收益。当竞争强度高时, 航运企业则会安于现状, 因为此时投资无法带来收益的增长。命题 5 中(2)则说明该情形下港口的最优收益高于无投资情形下的最优收益, 这是由于两航运市场的需求都有所增加造成的。

5.3. 均衡分析

推论 1 当竞争强度较小且碳减排成本系数较大时, 即 $0 < b < \frac{2}{3}$, $k > \frac{2(b-1)^2 t^2}{4-8b-3b^2}$, 两航运企业投资 (B 策略) 是均衡策略, 但此时碳减排投资水平小于单一投资情形下航运企业的碳减排投资水平。

推论 1 由命题 3 和命题 5 结合得到的。航运企业之间的竞争使得当仅有一个航运企业投资时, 投资的一方必然能够获得更大的利润, 而不投资的一方则会导致利润损失。当航运企业发现同时投资情形下收益大于不投资时收益时, 航运企业之间的博弈结果为双方都会选择投资, 不会放任对方投资而自身承担利润损失。

此外, 推论 1 还表明虽然两企业投资策略为均衡策略, 但在此情形下两航运企业的碳减排水平低于单一航运企业投资时的碳减排水平。这是由于单一企业投资时成本降低带来的竞争优势更明显, 进而更有意愿进行投资。而当两航运企业均投资时, 这种优势在竞争的影响下效果逐渐削弱, 直接体现在减排水平的下降。

6. 数值分析

本节进一步分析竞争情形下碳税税率对于不同情形下港航供应链的碳减排努力水平、运输价格、碳排放总量、港口利润和航运企业利润的影响。由于从实际企业获得真实的研究数据较为困难以及某些研究参数难以通过测量计算取得, 因此本文在设定算例参数时主要参考相关文献中的参数设定数值[30] [31] [32]。为保证参数设定能够更贴近现实, 本文还注意参考现实当中某些参数的实际取值。综合以上考虑, 本节数值分析中各参数设定如下: $a=100$, $b \in [0,1]$, $t \in [1.5,3.5]$, $e_0=20$, $k=8$ 。

6.1. 减排努力水平

图 2 与图 3 分别为不同情形下减排水平随碳税税率 t 、竞争系数 b 的变化情况。从图 2 可以看出单一企业投资情形下减排水平要高于两企业投资情形下的减排水平, 这也验证了推论 $e_1^{S^*} > e_i^{B^*}$ 。随着竞争系

数的增加, 航企的减排水平都随之增加。但单一投资情形的航企减排水平增长趋势大于另一情形的减排水平增长趋势。单一投资情形下, 随着两企业间竞争加剧, 航运企业 1 为降低单位碳排放成本提高自身竞争优势会有将强烈的意愿减排, 而两企业均投资情形下, 随着企业间竞争的加剧, 投资减排技术产生的成本效益带来的竞争优势不明显, 因此两企业对于减排水平的意愿不如单一情形下的碳减排投资水平, 体现在图中还表现为随着竞争系数的增加, 单一投资和两方投资情形的减排水平的差值逐渐增大。

图 3 表明随着碳税税率的增加, 两种情形下的减排水平随之增加, 且单一企业投资情形下的增长趋势大于两企业投资情形下的增长趋势。这是由于随着碳税税率的增加, 意味着单位碳排放所需要缴纳的碳税随之增加, 这也就表明降低单位碳排放对于成本降低带来的影响逐渐增加, 因此投资减排技术对于碳排放成本的缩减更加显著, 航运企业相对更愿意投资减排技术以取得成本效应。

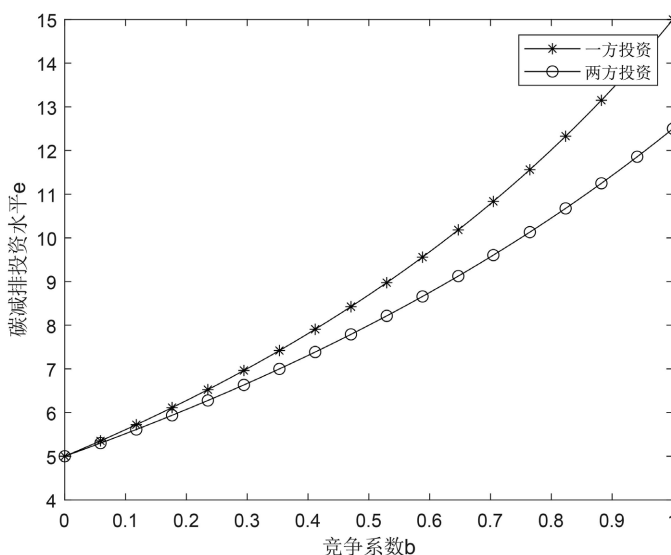


Figure 2. Effect of b on the optimal carbon reduction investment efforts
图 2. 竞争系数对碳减排投资水平的影响

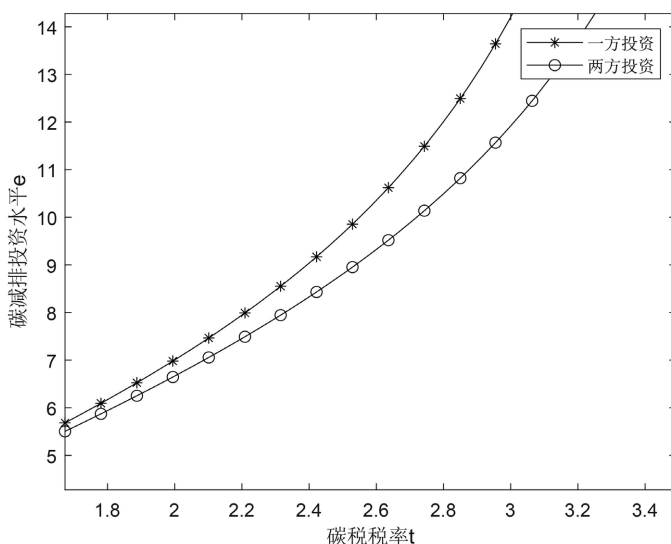


Figure 3. Effect of t on the optimal carbon reduction investment efforts
图 3. 碳税税率对碳减排投资水的影响

6.2. 港口服务费与单位运价

图 4、图 5 分别为港口服务费、单一投资情形航企 1 运价、单一投资情形航企 2 运价、两企业投资航企运价和无企业投资航企运价, 随竞争系数 b 以及碳税税率 t 变化趋势。图 4 表明, 随着两企业竞争系数的增加, 港口服务费以及航运企业运价都会随之增加。图 5 则表明有企业投资减排技术的两种情形下, 航运企业运价均随着碳税税率的增加而降低。这是以为随着碳税税率的增加, 航运企业 1 对减排投资也会随之增加, 从而获得较为显著的成本优势。航运企业 2 的运价随着碳税税率的增加先上涨而后下降, 这是因为碳税税率较低时, 航运企业 1 的碳减排水平相对较低, 两企业间的成本优势差异不明显, 而航运企业 2 为抵抗碳税税率增加带来的成本增长只能提高价格; 而当碳税税率较高时, 航运企业 1 投资碳减排技术带来的成本优势显著, 而航运企业 2 若继续提高价格对抗碳排放成本的增长则会失去更多市场需求, 导致企业利润受损。所以此时航运企业 2 只能降低运价应对航运企业 1 对于自身市场的侵蚀。

对于港口而言, 虽然碳税征收对象为下游航运企业, 但其对航运企业服务价格也会产生影响, 港口服务价格随着碳税税率增加而降低。港口主导情形下, 随着碳税税率增加, 航运企业单位碳排放成本进而增加, 因此航运企业通过提高运价应对碳税税率带来的碳排放成本增加, 而上游港口企业为避免航运企业过高制定运价导致市场需求大幅缩减, 主动降低港口服务费以缓解航运企业碳排放成本增加带来的影响以保障自身利润的稳定。

结合图 4 和图 5 中单一投资情形下航运企业 1 运价以及两企业投资下运价均低于无企业投资时市场运价。这也就表明航企投资碳减排技术能取得一定的成本优势降低运价以获得更大的市场需求。

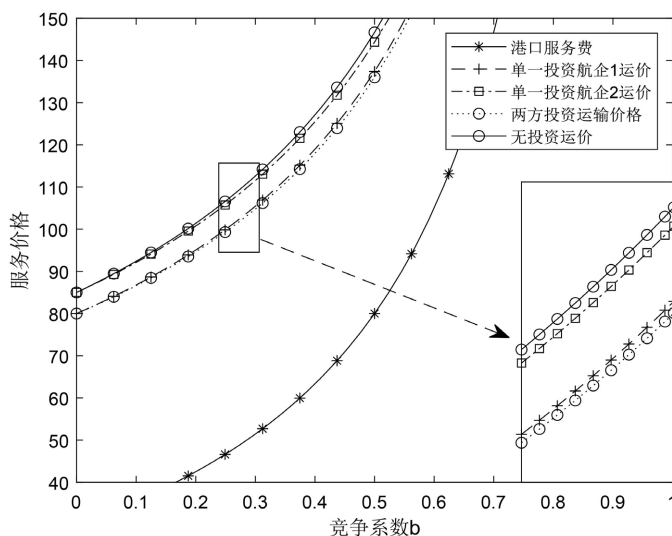


Figure 4. Effect of b on the optimal shipping service prices

图 4. 竞争系数对服务价格的影响

6.3. 航运企业利润

给定碳税税率 $t=2$ 以及投资成本系数 $k=8$ 的前提下即碳税税率相对较低时, 图 6 表明航运企业利润与竞争强度系数 b 之间的关系。随着竞争系数的增加, 整体上不同情形下的航企利润随之增加。对比两企业投资和无企业投资情形下航企利润发现, 碳税税率低且企业竞争强度小时, 两航运企业同时投资碳减排技术收益大于均不投资时收益; 而当竞争强度不断加剧, 两企业投资碳减排技术获得的成本优势不断被弱化, 出现两企业投资收益反而低于均不投资情形下的收益。这也与前文中推导的结论相符。

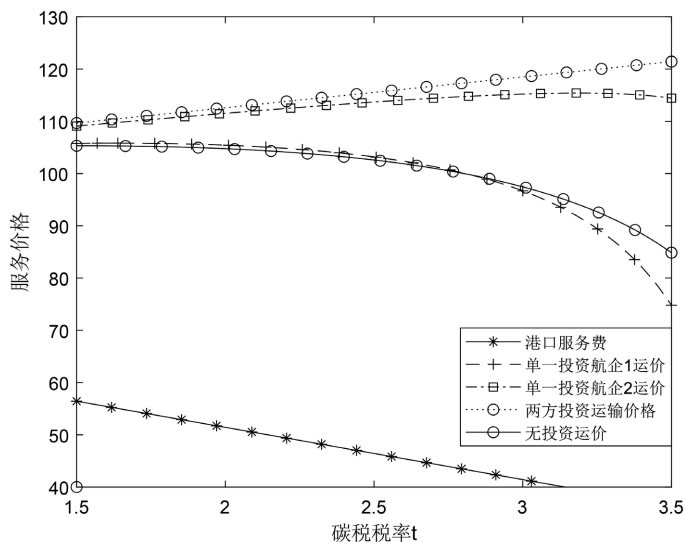


Figure 5. Effect of t on the optimal shipping service prices

图 5. 碳税税率对服务价格的影响

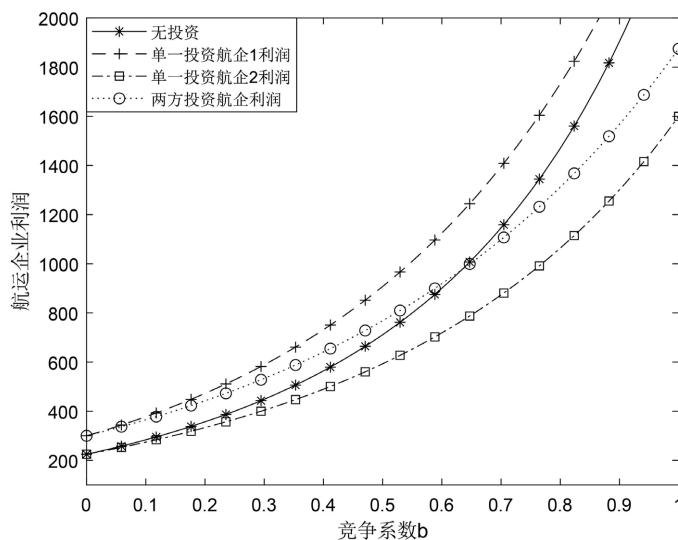


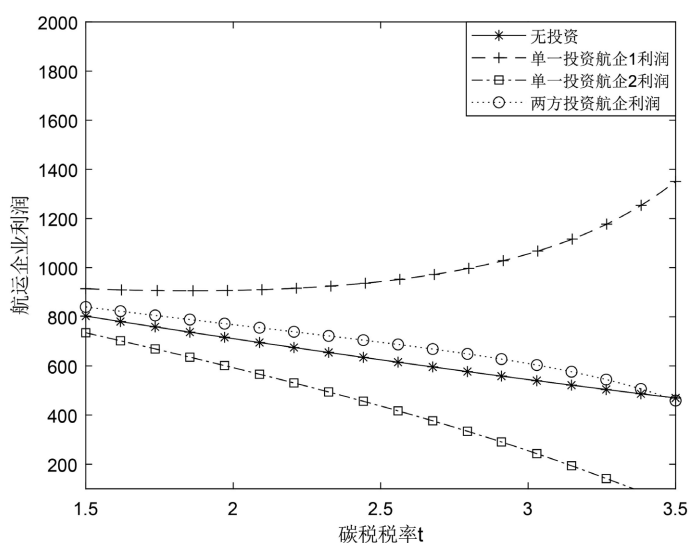
Figure 6. Effect of b on the profits of the shipping companies

图 6. 竞争系数对航运企业利润的影响

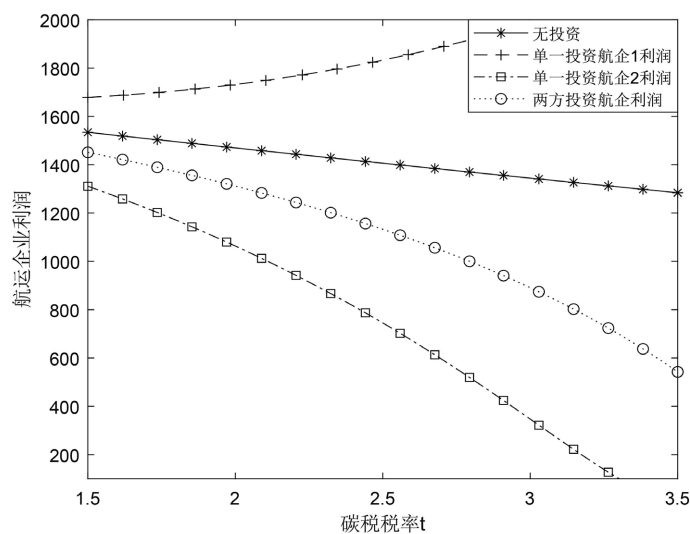
由于不同竞争强度系数 b 下, 航企利润受碳税税率影响不同, 因此选取不同的竞争强度系数进行数值仿真从而更全面地分析航企利润随碳税税率的变化情况。图 7 中 a 与 b 的竞争强度系数分别取值为 0.5 和 0.8。图 7 两图表明随着碳税税率的增加, 除单一投资情形下航企 1 的利润随之增长外, 其余航企利润均随之减少。因为单一投资情形下, 航 1 投资碳减排技术的相对优势随着碳税税率的增加逐渐增强, 所以航企 1 的利润随之增加, 航企 2 的利润随之减少。另结合两图发现无论竞争强度如何, 航企利润均满足 $\pi_1^{S*} > \pi_1^{N*} = \pi_1^{N*} > \pi_2^{S*}$ 。

对比图 7 中两图发现, 碳税税率较低时, 低竞争强度下两方投资情形的航企利润大于无企业投资情形的航企利润, 而高竞争强度下两方投资情形的航企利润则低于无投资情形的航企利润, 此时两企业投资陷入“囚徒困境”。随着碳税税率的增加, 低竞争强度下, 两方投资情形与无企业投资情形的航企利

润差逐渐减小, 当碳税税率超过某一阈值时, 出现无企业投资情形的航企利润大于两企业投资情形的航企利润。高竞争强度下, 随着碳税税率的增加, 两方投资情形与无企业投资情形的航企利润差随着增大。



(a)



(b)

Figure 7. Effect of t on the profits of the shipping companies

图 7. 碳税税率对航运企业利润影响

6.4. 碳排放总量

图 8 与图 9 分别为碳排放总量随竞争强度和碳税税率的变化趋势。图 8 表明随着竞争强度的增加, 无投资情形的碳排放总量逐渐增大且增大趋势愈加明显, 而一方投资情形和两方投资情形下则是随之小幅增加且增加趋势逐步放缓。图 9 表明碳排放总量随碳税税率的增加而减小, 这是由于碳税税率增加意味着企业单位碳排放成本增加, 企业刻意控制产量降低碳排放。随着碳税税率的增加, 单一投资情形下航企 1 的减排投资意愿增强, 且航企 2 刻意缩减碳排放, 因此当碳税税率超过某一阈值时, 单一投资情形的碳排放总量会低于两企业投资的碳排放总量。结合图 3 与图 4 发现, 虽然单一投资情形的碳减排投

资水平更高, 但该情形的碳排放总量并非最低, 仅当碳税税率较高时, 单一投资情形的碳排放总量会低于两企业投资的碳排放总量, 其余情况下, 两企业投资情形供应链产生的碳排放总量均低于单一企业投资情形的碳排放总量, 因此政府应当注意维持市场的竞争程度, 设定合理的碳税税率, 促进市场中的航运企业在避免利润损失的情形下积极投资碳减排技术, 进而达到显著降低碳排放的目的。

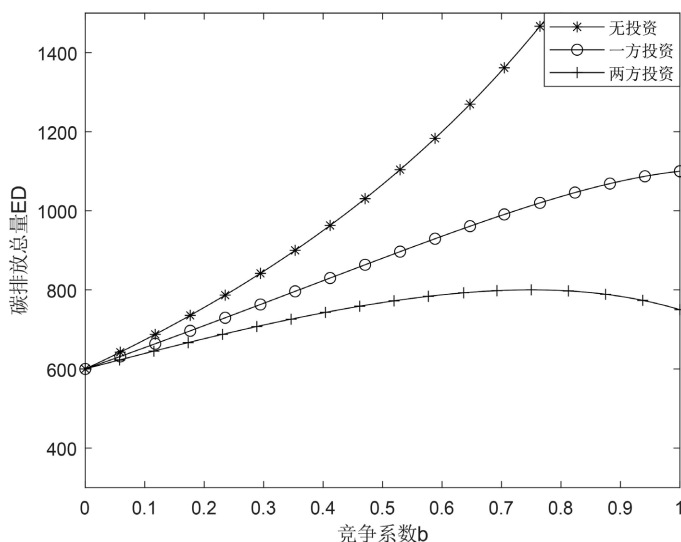


Figure 8. Effect of b on the total quantity of carbon emission
图 8. 竞争系数对碳排放总量的影响

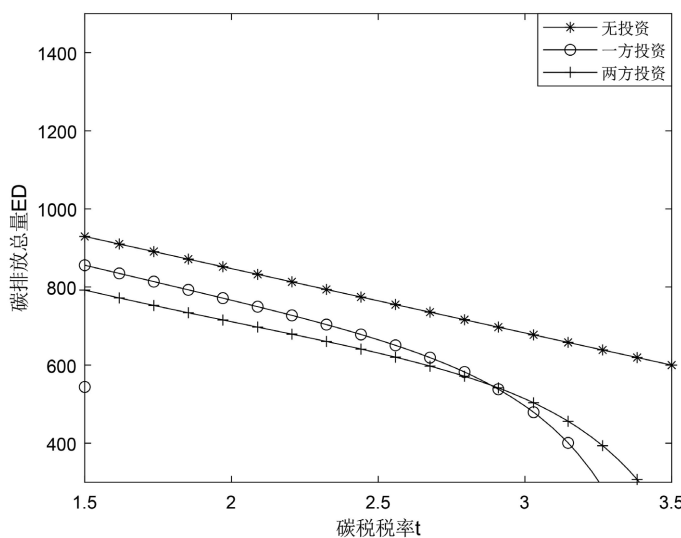


Figure 9. Effect of t on the total quantity of carbon emission
图 9. 碳税税率对碳排放总量的影响

7. 结语

本文考虑由一个港口与两个同地位航运企业组成的二级港航供应链在航企竞争情形下基于碳税政策的航运企业碳减排投资决策问题。首先对比不同数量企业投资碳减排技术对于港口服务费、航企运价以及利润的影响。其次分析企业间竞争强度系数和碳税税率对于不同情形的最优碳减排投资水平和碳排放

总量的影响, 并得到以下结论: 1) 单一企业投资碳减排技术能够获得竞争优势从而提高自身利润, 但两企业同时投资则可能会导致企业利润低于均不投资情形的利润而陷入囚徒困境的局面。2) 碳税政策不仅会对航运企业决策有影响, 同时对上游港口的服务价格和利润也会产生影响。3) 随着碳税税率的增加, 不同情形下的碳排放总量均有所降低, 且在一定碳税税率下两企业投资情形的碳排放总量低于单一投资的碳排放总量。对于政府而言, 根据市场竞争程度制定碳税, 促进航运企业均进行碳减排投资, 这样既能避免企业利润的损失, 又能够实现更低程度的碳排放总量。

上述结论对港航企业运营决策具有现实意义, 对政府制定合理碳税促进企业降低碳排放存在参考价值。本文在许多方面可以进行扩展研究: 文章仅考虑港口主导情形下的结果, 而实际当中随着航运企业的不断发展联盟, 存在航运企业主导的航企供应链。文章考虑下游航运企业具有同等地位, 未考虑航运企业不同地位带来的影响。另文章仅考虑竞争情形而没有考虑港口航运之合作以及航运企业间合作的情形, 后续可对此展开研究。

基金项目

国家自然科学基金重点项目(71832001); 国家社会科学基金项目(21BGL014)。

参考文献

- [1] Heitmann, N. and Peterson, S. (2014) The Potential Contribution of the Shipping Sector to an Efficient Reduction of Global Carbon Dioxide Emissions. *Environmental Science & Policy*, **42**, 56-66. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2014.05.001>
- [2] 黄有方, 魏明晖, 王煜, 等. “双碳”目标导向下我国绿色航运物流发展现状与趋势[J]. 大连海事大学学报, 2023, 49(1): 1-16.
- [3] 曹细玉, 张杰芳. 碳减排补贴与碳税下的供应链碳减排决策优化与协调[J]. 运筹与管理, 2018, 27(4): 57-61.
- [4] Pigou, A.C. (1924) *The Economics of Welfare*. Macmillan, New York.
- [5] Lee, T.C., Chang, Y.T. and Lee, P.T.W. (2013) Economy-Wide Impact Analysis of a Carbon Tax on International Container Shipping. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, **58**, 87-102. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2013.10.002>
- [6] 周艳菊, 胡凤英, 周正龙. 碳税政策下制造商竞争的供应链定价策略和社会福利研究[J]. 中国管理科学, 2019, 27(7): 94-105.
- [7] 刘家国, 孔玉丹, 镇璐. 考虑双均衡的港航供应链可持续投资研究[J]. 中国管理科学, 2022, 30(3): 142-153.
- [8] Cui, H. and Notteboom, T. (2017) Modelling Emission Control Taxes in Port Areas and Port Privatization Levels in Port Competition and Co-Operation Sub-Games. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, **56**, 110-128. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.07.030>
- [9] Tiwari, S., Wee, H.M., Zhou, Y.J. and Tjoeng, L. (2021) Freight Consolidation and Containerization Strategy under Business as Usual Scenario & Carbon Tax Regulation. *Journal of Cleaner Production*, **279**, Article ID: 123270. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123270>
- [10] Liu, Y., Xin, X., Yang, Z., et al. (2021) Liner Shipping Network—Transaction Mechanism Joint Design Model Considering Carbon Tax and Liner Alliance. *Ocean & Coastal Management*, **212**, Article ID: 105817. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2021.105817>
- [11] Ma, W.H., Han, Y.Y., Tang, H., et al. (2023) Ship Route Planning Based on Intelligent Mapping Swarm Optimization. *Computers & Industrial Engineering*, **176**, Article ID: 108920. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108920>
- [12] Wang, C.X. and Xu, C.Y. (2015) Sailing Speed Optimization in Voyage Chartering Ship Considering Different Carbon Emissions Taxation. *Computers & Industrial Engineering*, **89**, 108-115. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2015.04.034>
- [13] Gao, S.Q., Xin, X., Li, C., et al. (2022) Container Ocean Shipping Network Design Considering Carbon Tax and Choice Inertia of Cargo Owners. *Ocean & Coastal Management*, **216**, Article ID: 105986. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2021.105986>
- [14] Xu, L.L., Chen, Y.Y. and Lee, S.H. (2022) Emission Tax and Strategic Environmental Corporate Social Responsibility in a Cournot-Bertrand Comparison. *Energy Economics*, **107**, Article ID: 105846. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2022.105846>

- [15] Wang, J., Huang, Q., Lin, X.D. and Yu, M.Z. (2021) Container Terminal Competition and Cooperation Considering Emission Tax. *Maritime Policy & Management*, **49**, 930-953. <https://doi.org/10.1080/03088839.2021.1914875>
- [16] Teng, Z.Q., Li, X.L., Fang, Y.T. and Fu, H.L. (2021) Will Port Integration Help Reduce Carbon Emissions and Improve Social Welfare? *Discrete Dynamics in Nature and Society*, **2021**, Article ID: 5208046.
- [17] 桑高峰, 孟燕萍. 碳税政策下港口与船舶减排决策的博弈分析[J]. 科技管理研究, 2019, 39(21): 227-235.
- [18] 周海英, 李伯棠. 碳税与客户低碳偏好下港航企业减排决策分析[J]. 中国航海, 2022, 45(3): 72-79.
- [19] 梁晶, 张霖, 刘禹轩. 考虑碳排放政策的港航企业减排策略研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2023, 23(1): 39-47.
- [20] Meng, L.P., Wang, J.M., Yan, W., et al. (2022) A Differential Game Model for Emission Reduction Decisions between Ports and Shipping Enterprises Considering Environmental Regulations. *Ocean & Coastal Management*, **225**, Article ID: 106221. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2022.106221>
- [21] 王伶俐, 汪传旭, 程琴. 考虑政府补贴和货主低碳偏好的船公司减排决策[J]. 上海海事大学学报, 2021, 42(2): 88-95.
- [22] 周海英, 张文静. 绿色港口建设下港口与船舶减排决策研究[J]. 科技管理研究, 2022, 42(7): 205-214.
- [23] 周海英, 邓燕赞. “双碳”目标下的岸电减排决策研究[J]. 科技管理研究, 2022, 42(11): 229-235.
- [24] Wang, C.X., Jiao, Y. and Peng, J.Y. (2023) Shipping Company's Choice of Shore Power or Low Sulfur Fuel Oil under Different Power Structures of Maritime Supply Chain. *Maritime Policy & Management*. <https://doi.org/10.1080/03088839.2023.2174609>
- [25] Yang, L., Cai, Y.J., Wei, Y.L., et al. (2019) Choice of Technology for Emission Control in Port Areas: A Supply Chain Perspective. *Journal of Cleaner Production*, **240**, Article ID: 118105. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118105>
- [26] Madani, S.R. and Rasti-Barzoki, M. (2017) Sustainable Supply Chain Management with Pricing, Greening and Governmental Tariffs Determining Strategies: A Game-Theoretic Approach. *Computers & Industrial Engineering*, **105**, 287-298. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.01.017>
- [27] 邓万江, 马士华, 关旭. 碳交易背景下存在顾客环保偏好的双企业竞争策略研究[J]. 中国管理科学, 2017, 25(12): 17-26.
- [28] Ma, P., Wang, H.Y. and Shang, J. (2013) Contract Design for Two-Stage Supply Chain Coordination: Integrating Manufacturer-Quality and Retailer-Marketing Efforts. *International Journal of Production Economics*, **146**, 745-755. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.09.004>
- [29] 刘家国, 赵慧达, 李健. 基于绿色投资效率的港航供应链投资策略研究[J]. 中国管理科学, 2021, 29(11): 33-44.
- [30] 周艳菊, 黄雨晴, 陈晓红, 等. 促进低碳产品需求的供应链减排成本分担模型[J]. 中国管理科学, 2015, 23(7): 85-93.
- [31] 王珊珊, 张李浩, 范体军. 基于碳减排技术的竞争供应链投资均衡策略研究[J]. 中国管理科学, 2020, 28(6): 73-82.
- [32] 刘名武, 吴开兰, 付红, 等. 消费者低碳偏好下零售商主导供应链减排合作与协调[J]. 系统工程理论与实践, 2017, 37(12): 3109-3117.