

# 碳税与客户低碳偏好下港航企业减排决策分析

周海英, 李伯棠

(广州航海学院 港口与航运管理学院, 广东 广州 510725)

**摘要:**在对船舶征收碳税和客户群体绿色偏好背景下,基于供应链视角,探讨港口与船舶碳减排的影响因素。应用博弈方法,建立集中、分散决策情形下港口和船舶的碳减排决策博弈模型,得到不同博弈模型下的港口与船舶减排策略,并进行比较分析。研究表明:首先,集中决策情形下,港口与船舶能实现最优利润目标;其次,港口协助减排成本与船舶减排成本之间的关系,影响港口与船舶的策略选择;最后,政府对船舶征收碳税以及客户群体绿色意识的提高,都会促进港口和船舶减排。

**关键词:**碳税;低碳偏好;博弈方法;减排决策

中图分类号:F224.32 文献标志码:A

## The Ways for Port and Shipping Enterprises to Make Decision on Emission-Reduction in the Context of Carbon Tax and Client's Low Carbon Preference

ZHOU Haiying, LI Botang

(Department of Port and Shipping Management, Guangzhou Maritime University,  
Guangzhou 510725, China)

**Abstract:** The factors influencing an emission-reduction-decision of ports and shipping companies are analyzed from the angle of supply train. Two decision-making game models are built based on the game theory, for centralized and decentralize decision-making respectively. The two models lead to different emission-reduction strategies. The comparison between them show that centralized decision ensures the best port-ship overall profit objective. The difference of emission-reduction cost for with and without port's cooperation decides the final decision. It is also seen that introduction of carbon tax and the environmental awareness of clients are effective driving forces to put emission-reduction into practice.

**Key words:** carbon tax; low carbon preference; game approach; decision-making on emission-reduction

全球港口与航运网络的发展是世界经济增长的重要推动力,也是全球供应链的重要载体。然而,频繁的航运活动造成的有害气体和温室气体的排放,例如氮氧化物( $\text{NO}_x$ ),硫氧化物( $\text{SO}_x$ ),一氧化碳( $\text{CO}$ ),颗粒物( $\text{PM}$ )和温室气体中的二氧化碳( $\text{CO}_2$ )等,已成为港航活动的主要能耗和污染源头。作为全球供应链的重要组成部分,港口行业占据上述排放和污染的比重较大。根据《中国机动车环境管理年报(2018)》,2017年,我国船舶排放二氧化硫( $\text{SO}_2$ )、碳氢化合物( $\text{CH}$ )、 $\text{NO}_x$ 、 $\text{PM}$ 数量分别为85.3万吨、7.9万吨、134.6万吨、13.1万吨。其中, $\text{NO}_x$ 和 $\text{PM}$ 分别占非道路移动源排放的25.6%和

28.4%。上海、深圳、香港等港口城市大气源解析研究显示,船舶港口排放已成为重要的排放源之一<sup>[1]</sup>。作为世界港口和航运大国,如何实现港口与航运节能减排的目标已成为我国政府监管部门必须面对的重要问题<sup>[2]</sup>。

2013年,欧盟立法推行航海碳税政策。航海碳税主要是针对船舶排放 $\text{CO}_2$ 的征税机制,是以船舶燃油耗量为基础所征收的税,目的是通过减少燃油消耗,降低 $\text{CO}_2$ 排放<sup>[3]</sup>,该征税机制是推动船舶减排所采取的主要措施之一。

为了顺应全球减排发展的趋势,以及实现我国碳达峰和碳中和承诺目标,作为世界港口和航运大

收稿日期:2021-05-12

基金项目:广东省哲学社科规划项目(GD20CGL44);广东省“十三五”教育科学规划项目(2020GXJK097)

作者简介:周海英(1983—),女,湖南永州人,博士,副教授,研究方向为港航管理、物流工程。E-mail:cindychou@163.com

国,探索切合实际的绿色发展之路,迫切需要对各种减排措施进行研究,包括本文论述的船舶征收碳税机制。目前,我国已有部分学者提出,为减少船舶的碳排放量,政府应当对船舶征收碳税,如于冬艳<sup>[4]</sup>探讨了集装箱班轮公司征收碳税,以促进集装箱班轮航线配船模型优化;LEE T 等<sup>[5]</sup>通过研究表明,在没有处理好碳税和经济增长平衡的情况下,对船舶征收高碳税会造成我国国内生产总值的巨大损失;CULLINANE K C S<sup>[6]</sup>对目前航运业碳排放的政策进行了分析,认为碳税政策与技术更新能够促进船舶节能减排;YANG L 等<sup>[7]</sup>研究了对港口征收碳税背景下的港航企业减排技术选择行为。上述研究表明,碳税政策作为减排措施之一,可以从源头上促进行业或企业减排,以经济手段约束行业或企业排放大气污染物,对推进行业绿色化进程具有重要意义。

同时,随着我国综合实力不断提升,人民生活水平不断提高,民众的绿色环保意识得到不断增强。研究表明,消费者的绿色环保意识同样可以促进企业减排<sup>[8]</sup>。对产品供应链中消费者低碳偏好与企业减排决策关系的相关研究表明,消费者低碳偏好直接对企业减排决策产生影响。例如,熊中楷等<sup>[9]</sup>基于 Stackelberg 模型研究了消费者环保意识和碳税政策对产品制造商减排决策的影响,消费者环保意识和碳税政策与污染型制造商的最优单位碳排放量呈正向关系,而与清洁型制造商的最优单位碳排放量呈反向关系;YANG H X 等<sup>[10]</sup>研究了在消费者环保意识和碳税政策背景下,零售商提供的收益共享和成本共享对制造商碳减排努力的影响;HONG L 等<sup>[11]</sup>研究了一个由制造商和零售商组成的供应链中,消费者环境意识、零售商对环境质量、批发价格和零售价格的公平性关注对供应链的影响;尽管在港航领域有关客户低碳偏好的研究较少,属于起步阶段,但桑高峰等<sup>[12]</sup>探讨对港口征收碳税背景下港口与船舶的减排决策问题,也给我们不少启迪。

为了探讨对船舶征收碳税背景下港航企业的减排决策问题,本文基于港航供应链领域客户群体的低碳偏好,研究对船舶征收碳税背景下港口与船舶减排决策行为,探讨政府推动港航企业减排的管理方法,为港航企业减排决策以及政府相关政策的制定提供理论参考。

## 1 问题描述与模型假设

### 1.1 问题描述

考虑由单个港口和单个船舶组成的两级低碳港航供应链,船舶由于装卸集装箱等原因停靠港口,这

个过程会产生一定的碳排放。对于船舶在停靠过程中所产生的碳排放,政府征收碳税。为降低排放,船舶使用减排技术来减排,但这些减排技术需要港口的协助,如岸电减排需要港口为船舶提供岸电服务,又如液化天然气(Liquefied Natural Gas, LNG)技术需要港口为船舶提供 LNG 加注服务。因此,港口除为船舶提供装卸、搬运、仓储、配送等服务外,还需为船舶提供减排协助服务。而客户群体具有低碳偏好,在选择船舶的时候偏好选择清洁环保型船,如图 1 所示。

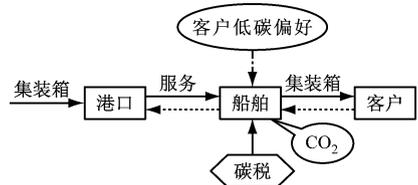


图 1 对船舶征收碳税下港口与船舶关系图

### 1.2 符号说明与模型假设

本文分别探讨集中决策和分散决策情形下的港航供应链减排策略选择问题。其中,分散决策情形又分为:港口主导的 Stackelberg 博弈、船舶主导的 Stackelberg 博弈、港口和船舶同时主导的 Nash 博弈三种结构。相关符号说明(详见表 1)以及假设如下所示。

表 1 符号说明

符号说明
$w$ : 港口装卸每单位 TEU 的利润
$m$ : 船舶每单位 TEU 的边际利润
$p$ : 每单位 TEU 的市场价格, $p = w + m$
$x$ : 船舶减排力度
$e$ : 船舶碳减排之前的单位碳排放
$r$ : 政府对船舶每单位碳排放所征收的碳税
$q$ : 客户的需求
$U_o$ : 港口的利润
$U_s$ : 船舶的利润
$U$ : 港航供应链整体利润
$a$ : 集装箱的市场容量
$b$ : 客户需求对每单位 TEU 的市场价格的敏感系数
$\lambda$ : 客户需求对船舶减排力度的敏感系数
$h$ : 港口协助船舶减排的成本系数
$n$ : 船舶的减排成本系数

假设 1: 客户的需求会随着船舶减排力度的提高而增加,随着每单位 TEU 的市场装卸价格增加而减少,参考 MA P 等<sup>[13]</sup>,ZHANG J 等<sup>[14]</sup>和 AUST G 等<sup>[15]</sup>的研究方法,设  $q = a - bp + \lambda x = a - b(w + m)$

+  $\lambda x$ 。

假设2:船舶使用减排技术,必须要付出相应的减排成本,参考 MA P 等<sup>[13]</sup>的研究方法,假设减排成本为  $\frac{nx^2}{2}$ 。而港口为协助船舶减排,需要提供相应的服务,付出相应的协助减排成本,如岸电技术中,港口要进行岸电设施建设,又如 LNG 技术中,港口要进行 LNG 加注站建设。同样,参考 MA P 等<sup>[13]</sup>的研究方法,假设港口的协助减排成本为  $\frac{hx^2}{2}$ 。

假设3:港口和船舶具有完全信息,双方都是理性博弈参与者。

假设4:只有港口和船舶分享整条供应链的利润。

假设5: $a, b, \lambda, h, n, e$  都大于零。

假设6:港口协助船舶进行碳减排,即船舶决策减排力度,港口提供相应协助减排服务。

综上,得到港口利润函数  $U_o$ 、船舶利润函数  $U_s$ 、港航供应链整体利润函数  $U$  分别如式(1)~(3)所示:

$$U_o = w[a - b(w + m) + \lambda x] - \frac{hx^2}{2} \quad (1)$$

$$U_s = [m - e(1 - x)r][a - b(w + m) + \lambda x] - \frac{nx^2}{2} \quad (2)$$

$$U = [(w + m) - er(1 - x)](a - b(w + m) + \lambda x) - \frac{(h + n)x^2}{2} \quad (3)$$

其中,  $a > ber$ 。

## 2 模型建立与求解

### 2.1 集中决策情形

集中决策情形下,港口与船舶协同合作,以港航供应链的整体利润最优化作为目标,共同决定减排力度  $x$  和每单位 TEU 的市场价格  $p$ ,决策模型如式(4)所示:

$$U_{\max} = [p - er(1 - x)](a - bp + \lambda x) - \frac{(h + n)x^2}{2} \quad (4)$$

$(0 < p < a/b, 0 < x < 1)$

分别对  $x, p$  进行一阶偏导可得:

$$\frac{\partial U}{\partial x} = [p - er(1 - x)]\lambda + er(a - bp + x\lambda) - hx - nx$$

$$\frac{\partial U}{\partial p} = a - bp - b[p - er(1 - x)] + x\lambda \quad (5)$$

分别对  $x, p$  进行二阶偏导可得:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} = 2er\lambda - h - n, \frac{\partial^2 U}{\partial x \partial p} = \lambda - ber,$$

$$\frac{\partial^2 U}{\partial p^2} = -2b, \frac{\partial^2 U}{\partial p \partial x} = \lambda - ber \quad (6)$$

由此可得海赛矩阵:

$$\begin{bmatrix} -2b & \lambda - ber \\ \lambda - ber & 2er\lambda - h - n \end{bmatrix}$$

可知,当  $2b(n + h) - (\lambda + ber)^2 > 0$  时,海赛矩阵小于零,即存在最优  $x, p$  使得整体供应链利润最大。

从而,对式(5)进行求解可得:

$$x^* = \frac{(a - ber)(ber + \lambda)}{2b(h + n) - (ber + \lambda)^2}$$

$$p^* = \frac{a[h + n - er(ber + \lambda)] - er[\lambda^2 - b(h + n - er\lambda)]}{2b(h + n) - (ber + \lambda)^2}$$

$$U^* = \frac{(h + n)(a - ber)^2}{2[2b(h + n) - (ber + \lambda)^2]} \quad (7)$$

### 2.2 分散决策情形

在此情形下,分别探讨港口主导的 Stackelberg 博弈、参与双方处于同等地位的 Nash 博弈以及船舶主导的 Stackelberg 博弈结构下的港口和船舶碳减排均衡策略。

#### 2.2.1 港口主导的 Stackelberg 博弈

港口先决定每单位 TEU 的装卸价格  $w$ , 然后船舶在已知  $w$  的情况下决定每单位 TEU 的边际利润  $m$  和减排力度  $x$ , 采用逆推归纳法进行求解。

首先,对船舶的利润最优化问题进行求解分析:

$$U_{s, \max} = [m - e(1 - x)r][a - b(w + m) + \lambda x] - nx^2/2,$$

$$(0 < m < a/b - w, 0 < x < 1) \quad (8)$$

分别对  $m$  和  $x$  进行一阶偏导可得:

$$\frac{\partial U_s}{\partial x} = [m - er(1 - x)]\lambda + er[a - b(m + w) + x\lambda] - nx$$

$$\frac{\partial U_s}{\partial m} = a - b(m + w) - b[m - er(1 - x)] + x\lambda \quad (9)$$

分别对  $m$  和  $x$  进行二阶偏导并由此得到海赛矩阵:  $\begin{bmatrix} -2b & \lambda - ber \\ \lambda - ber & 2er\lambda - n \end{bmatrix}$ , 当  $2bn - (\lambda + ber)^2 > 0$  时,海赛矩阵小于零,此时,存在  $m$  和  $x$  使得船舶利润最大化,由此可得:

$$x = \frac{b^2 e^2 r^2 + b^2 erw - aber - a\lambda + ber\lambda + bw\lambda}{(ber + \lambda)^2 - 2bn}$$

$$m = \frac{a - b[w + er(x - 1)] + \lambda x}{2b} \quad (10)$$

$$U_{o,\max} = w[a - b(w + m) + \lambda x] - hx^2/2$$

$$(0 < w < a/b - m, 0 < x < 1)$$

其次,对港口的利润最优化问题进行求解分析:

分别对  $w$  进行一阶偏导可得:

$$\frac{\partial U_o}{\partial w} = \frac{b\{a[b^2e^2(h-n)r^2 + (h-n)\lambda^2 + 2b(n^2 + ehr\lambda - enr\lambda)] + b\{b^2e^2r^2[e(n-h)r - (h-2n)w] + [e(n-h)r - (h-2n)w]\lambda^2 + 2b[e^2(n-h)r^2\lambda - 2n^2w - er(n^2 + hw\lambda - 2nw\lambda)]\}\}}{(b^2e^2r^2 - 2bn + 2ber\lambda + \lambda^2)^2} \quad (11)$$

对  $w$  进行二阶偏导得到:

$$\frac{\partial^2 U_o}{\partial w^2} = \frac{-b^2[b^2e^2r^2(h-2n) + \lambda^2(h-2n) + 2b(2n^2 + ehr\lambda - 2enr\lambda)]}{[(ber + \lambda)^2 - 2bn]^2}$$

当  $(h-2n)(\lambda + ber)^2 + 4bn^2 > 0$  时,存在最优的  $w$  使得港口利润最大化。由此可得:

$$x_1 = \frac{n(a - ber)(ber + \lambda)}{(h - 2n)(ber + \lambda)^2 + 4bn^2}$$

$$w_1 = \frac{(a - ber)[2b(n^2 + ehr\lambda - enr\lambda) - b^2e^2(n-h)r^2 - (n-h)\lambda^2]}{b[(h-2n)(ber + \lambda)^2 + 4bn^2]}$$

$$m_1 = \frac{an[n - er(ber + \lambda)] + er[b^2e^2r^2(h-n) + (h-2n)\lambda^2 + b(3n^2 + 2ehr\lambda - 3enr\lambda)]}{b[(h-2n)(ber + \lambda)^2 + 4bn^2]}$$

$$p_1 = \frac{benr(bn - ber\lambda - \lambda^2) - a[(n-h)\lambda^2 - b^2e^2(h-2n)r^2 + b(3enr\lambda - 2ehr\lambda - 3n^2)]}{b[(h-2n)(ber + \lambda)^2 + 4bn^2]} \quad (12)$$

将式(12)代入式(1)~(3),可得:

$$U_{s,1} = \frac{n^3(a - ber)^2(2bn - b^2e^2r^2 - 2ber\lambda - \lambda^2)}{2[(h-2n)(ber + \lambda)^2 + 4bn^2]^2}$$

$$U_{o,1} = \frac{n^2(a - ber)^2}{2[(h-2n)(ber + \lambda)^2 + 4bn^2]}$$

$$U_1 = \frac{n^2(a - ber)^2[b^2e^2(h-3n)r^2 + (h-3n)\lambda^2 + 2b(3n^2 + ehr\lambda - 3enr\lambda)]}{2[(h-2n)(ber + \lambda)^2 + 4bn^2]^2} \quad (13)$$

## 2.2.2 船舶主导的 Stackelberg 博弈

在船舶主导的 Stackelberg 博弈情形下,船舶先决定每单位 TEU 的边际利润  $m$  和减排力度  $x$ ,然后港口再决定每单位 TEU 的装卸价格  $w$ ,采用逆推归纳法进行求解。

首先,对港口的利润最优化问题进行求解:

$$U_{o,\max} = w[a - b(w + m) + \lambda x] - hx^2/2$$

$$(0 < w < a/b - m, 0 < x < 1) \quad (14)$$

分别对  $w$  进行一阶偏导可得:

$$\frac{\partial U_o}{\partial w} = a - bw - b(m + w) + \lambda x \quad (15)$$

由于  $\frac{\partial^2 U_o}{\partial w^2} = -2b$ ,即存在最优的  $w$  使得港口利润最大化,由式(15)可得:

$$w = \frac{a - bm + \lambda x}{2b} \quad (16)$$

船舶的利润最优化问题为:

$$U_{s,\max} = [m - e(1-x)r][a - b(w + m) + \lambda x] - nx^2/2$$

$$(0 < m < a/b - w, 0 < x < 1) \quad (17)$$

分别对  $m$  和  $x$  进行一阶偏导可得:

$$\frac{\partial U_s}{\partial m} = \frac{1}{2}(aer - bemr - 2nx + m\lambda - er\lambda + 2er\lambda x)$$

$$\frac{\partial U_s}{\partial x} = \frac{1}{2}[a + b(er - 2m - erx) + \lambda x] \quad (18)$$

分别对  $m$  和  $x$  进行二阶偏导并由此得到海赛矩阵为:

$$\begin{bmatrix} -b & \frac{(\lambda - ber)}{2} \\ \frac{(\lambda - ber)}{2} & er\lambda - n \end{bmatrix}$$

当  $4bn - (ber + \lambda)^2 > 0$  时,海赛矩阵小于零,即存在最优的  $m$  和  $x$  使得船舶利润最大化,由此可得:

$$m_2 = \frac{er(ber\lambda + \lambda^2 - 2bn) + a[er(ber + \lambda) - 2n]}{(ber + \lambda)^2 - 4bn}$$

$$x_2 = \frac{(a - ber)(ber + \lambda)}{4bn - (ber + \lambda)^2}, w^2 = \frac{an - benr}{4bn - (ber + \lambda)^2}$$

$$p_2 = \frac{er(ber\lambda - bn + \lambda^2) + a[er(ber + \lambda) - 3n]}{(ber + \lambda)^2 - 4bn} \quad (19)$$

从而分别得到港口、船舶以及供应链整体最优利润,结果如下:

$$U_{o,2} = \frac{(a - ber)^2[2bn^2 - h(ber + \lambda)^2]}{2[4bn - (ber + \lambda)^2]^2}$$

$$U_{s,2} = \frac{n(a - ber)^2}{2[4bn - (ber + \lambda)^2]}$$

$$U_2 = \frac{(a - ber)^2 [6bn^2 - (ber + \lambda)^2 (h + n)]}{2[4bn - (ber + \lambda)^2]^2} \quad (20)$$

### 2.2.3 港口和船舶处于同等地位的 Nash 博弈

港口和船舶分别同时决定每单位 TEU 的装卸价格  $w$  和船舶运输每单位 TEU 的边际利润  $m$  以及减排力度  $x$ 。

港口的利润最优化问题为:

$$U_{o,\max} = w[a - b(w + m) + \lambda x] - hx^2/2 \quad (21)$$

$$(0 < w < a/b - m, 0 < x < 1)$$

对  $w$  进行一阶偏导、二阶偏导可得:

$$\frac{\partial U_o}{\partial w} = a - 2bw - bm + \lambda x, \quad \frac{\partial^2 U_o}{\partial w^2} = -2b \quad (22)$$

船舶的利润最优化问题为:

$$U_{s,\max} = [m - e(1 - x)r][a - b(w + m) + \lambda x] - nx^2/2 \quad (23)$$

$$(0 < m < a/b - w, 0 < x < 1)$$

分别对  $m, x$  进行一阶偏导可得:

$$\frac{\partial U_s}{\partial x} = \lambda m - er(1 - x)\lambda - nx + er[a - b(m + w) + \lambda x] \quad (23)$$

$$U_3 = \frac{(a - ber)^2 [2b(2n^2 - ehr\lambda - enr\lambda) - (b^2 e^2 r^2 + \lambda^2)(h + n)]}{2[(ber + \lambda)^2 - 3bn]^2} \quad (26)$$

$$\frac{\partial U_s}{\partial m} = a - bw - 2bm - ber(1 - x) + \lambda x \quad (24)$$

分别对  $m$  和  $x$  进行二阶偏导并由此得到海赛

矩阵:  $\begin{bmatrix} -2b & \lambda - ber \\ \lambda - ber & 2\lambda er - n \end{bmatrix}$ , 当  $2bn - (\lambda + ber)^2 > 0$  时,海赛矩阵小于零,即存在最优的  $m$  和  $x$  使得船舶利润最大化。

对式(22)~(24)联合求解,得到模型的均衡解如下:

$$x_3 = \frac{(a - ber)(ber + \lambda)}{3bn - (ber + \lambda)^2}$$

$$w_3 = \frac{n(a - ber)}{3bn - (ber + \lambda)^2}$$

$$m_3 = \frac{er(ber\lambda - 2bn + \lambda^2) + a[er(ber + \lambda) - n]}{(ber + \lambda)^2 - 3bn} \quad (25)$$

将式(25)代入式(1)~(3)中,得到:

$$p_3 = \frac{er(ber\lambda + \lambda^2 - bn) + a[er(ber + \lambda) - 2n]}{(ber + \lambda)^2 - 3bn}$$

$$U_{o,3} = \frac{(a - ber)^2 (2bn^2 - b^2 e^2 hr^2 - 2ber\lambda - h\lambda^2)}{2[(ber + \lambda)^2 - 3bn]^2}$$

$$U_{s,3} = \frac{n(a - ber)^2 (2bn - b^2 e^2 r^2 - 2ber\lambda - \lambda^2)}{2[(ber + \lambda)^2 - 3bn]^2}$$

## 3 结果分析

### 3.1 船舶最优减排力度和港航供应链整体利润比较

$$x^* - x_1 = \frac{(\lambda + ber)(n - h)(a - ber)[2bn - (\lambda + ber)^2]}{[2b(h + n) - (\lambda + ber)^2][(h - 2n)(\lambda + ber)^2 + 4bn^2]} \quad (27)$$

即:

当  $h < n$  时,  $x_1 < x^*$ ;

当  $h > n$  时,  $x_1 > x^*$ 。

同理可得命题 1。

命题 1:

当  $n > 2h$  时,  $x^* > x_3 > x_2, x^* > x_1 > x_2, U^* > U_3 > U_2, U^* > U_1 > U_2$ ;

当  $h < n < 2h$  时,  $x_2 < x_1 < x^* < x_3, U_2 < U_1 < U^*, U_3 < U^*$ ;

当  $h > n$  时,  $x_3 > x_2 > x_1 > x^*, U^* > U_3, U^* > U_2, U^* > U_1$ 。

命题 1 表明,一定条件下,在船舶与港口组成的港航供应链中,当船舶减排成本系数远大于港口协助减排成本系数( $n > 2h$ )时,集中决策情形下的减排力度、整体供应链利润都大于分散决策情形,即此时,港口和船舶之间协同合作可以使整个港航供应

链的减排力度和利润达到最优。特别当港口协助减排成本系数为 0 时,即只需船舶进行减排投入,而港口不需要减排投入,如船舶使用低硫油减排,仅船舶需要承担使用低硫油的费用,此时港口与船舶进行合作是最优决策。而港口处于主导地位情形的港航供应链的减排力度和整体利润最小。

当船舶减排成本系数略大于( $h < n < 2h$ )港口协助减排成本系数时,港口与船舶处于平等地位情形的减排力度最大,其次是集中决策情形,然后是船舶处于主导地位的情形,最后是港口处于主导地位的情形。但集中决策情形下的整体供应链利润是最优的。

当船舶减排成本系数小于港口协助减排成本系数( $h > n$ )时,集中决策情形下的减排力度低于分散决策情形。分散决策情形下,港口与船舶同时处于主导地位的减排力度最大,港口处于主导地位的减

排力度最小。但集中决策情形下的港航供应链利润是最优的。

无论港口协助减排成本系数与船舶减排成本系数是何种关系,从供应链整体利润最大化的角度来看,港口与船舶合作是最优决策。2020年9月,上港集团与一众集装箱班轮公司、港航企业共同签署《“长江港航区块链综合服务平台”合作框架协议》。2020年11月,粤港澳大湾区组合港启动,通过全新上线的物流及贸易便利化服务平台,实现大湾区多港如一港。2021年7月,广州港集团与天津港集团联合国内知名内贸航运企业发起中国内贸集装箱港航服务联盟,从经济性、时效性、便捷性、稳定性、环保性等方面全方位提升国内客户对内贸集装箱运输的认可度和体验度,共同打造“海上高速—FAST”服务品牌。无论是区块链技术下的“供应链联盟”,还是全方位提升国内客户认可度和体验度的“海上高速—FAST”,都体现了港航企业合作追求整体利润最大化的趋势。

但从政府排放控制角度来看,港口与船舶合作效果并非总是最优。当船舶减排成本系数远大于港口协助减排成本系数时,集中决策情形下的减排力度最优;当船舶减排成本系数略大于或小于港口协助减排成本系数时,港口与船舶处于平等地位的减排力度最大。因此,政府在推广船舶减排过程中,可以通过降低港口协助减排成本,促进港口与船舶合作,以实现排放控制和港航供应链整体利润最大化的双赢目标。这也是当前政府大力补贴港口岸电设施建设的原因之一。

为使用岸电,港口和船舶都要进行岸电改造,但改造费用昂贵。当前,我国政府主要对港口岸电设施建设、船舶使用岸电、清洁能源设备、船舶转用低硫油进行补贴,而对船舶岸电受电设备改造补贴相对较少。除中央对港口岸电设施建设进行补贴外,地方政府也会进行补贴,如深圳对港口岸电设施按不超过项目建设费用30%的标准资助,广州对岸电设施按项目建设费用50%的标准资助。截至2019年底,《港口岸电布局方案》内五类泊位的岸电设施覆盖泊位共787个(其中沿海港口泊位525个),数量上为最低建设目标(493个)的160%,总体完成率为81%,超过71%的序时进度要求<sup>[16]</sup>。此时,港口协助减排成本远低于船舶减排成本,满足 $h < n$ ,甚至 $h < n/2$ ,集中决策情形下的供应链减排力度和整体利润达到最优。2019年,我国交通运输部、财政部等六部门联合制定印发的《关于进一步共同推进船舶靠港使用岸电工作的通知》中对于“进一步

加大船舶靠港使用岸电协同推进力度”进行了明确要求,即推动企业协同合作,以实现企业利润最大化和减排力度最大化的双赢目标。

### 3.2 灵敏度分析

#### 3.2.1 最优减排力度 $x$ 的灵敏度分析

首先,分析集中决策情形下的均衡解,由式(7)得:

$$\frac{\partial x^*}{\partial h} = -\frac{2b(a - ber)(ber + \lambda)}{[(ber + \lambda)^2 - 2bh]^2} < 0$$

同理可得:

$$\frac{\partial x^*}{\partial n} < 0, \frac{\partial x^*}{\partial a} > 0, \frac{\partial x^*}{\partial \lambda} > 0$$

其次,对分散决策情形下的均衡解进行分析,都可以得到一样的结果,因此可得命题2。

$$\text{命题2: } \frac{\partial x}{\partial h} < 0, \frac{\partial x}{\partial n} < 0, \frac{\partial x}{\partial a} > 0, \frac{\partial x}{\partial \lambda} > 0$$

命题2说明,在港口与船舶组成的港航供应链中,港口协助减排成本系数  $h$ 、船舶减排成本系数  $n$  的增加,会使得船舶最优减排力度  $x$  减少,而市场容量  $a$ 、客户群体需求对减排力度的敏感系数  $\lambda$  的增加,会使得船舶最优减排力度  $x$  增加。综上可知,政府可以通过降低港口和船舶减排成本、提高客户群体低碳偏好、扩大航运市场规模来达到提高减排力度、降低碳排放的目的。

#### 3.2.2 港航供应链整体最优利润 $U$ 的灵敏度分析

首先,分析集中决策情形下的均衡解,由式(7)得:

$$\frac{\partial U^*}{\partial h} = -\frac{(ber - a)^2(ber + \lambda)^2}{2[(ber + \lambda)^2 - 2bh - 2bn]^2} < 0$$

同理可得:

$$\frac{\partial U^*}{\partial n} < 0, \frac{\partial U^*}{\partial a} > 0, \frac{\partial U^*}{\partial \lambda} > 0$$

其次,对分散决策情形下的均衡解进行分析,都可以得到一样的结果,因此可得命题3。

$$\text{命题3: } \frac{\partial U}{\partial h} < 0, \frac{\partial U}{\partial n} < 0, \frac{\partial U}{\partial a} > 0, \frac{\partial U}{\partial \lambda} > 0$$

在集中决策情形下可得到:

$$\frac{\partial U}{\partial b} < 0, \frac{\partial U}{\partial r} < 0$$

命题3说明,在集中决策情形和分散决策情形下,港口协助减排成本系数  $h$  和船舶的减排成本系数  $n$  对供应链整体最优利润呈反向关系: $h$ 、 $n$  增加, $U$  会减少;客户群体对减排力度的敏感系数  $\lambda$  与港航供应链整体最优利润  $U$  呈正向关系: $\lambda$  增加, $U$  会增加;市场容量  $a$  与港航供应链的最优利润  $U$  呈正向关系: $a$  增加, $U$  会增加。在集中决策情形下,客

户对装卸每单位 TEU 的市场价格的敏感系数  $b$  与港航供应链最优利润  $U$  呈反向关系:  $b$  越大,  $U$  越小; 政府对船舶所征收的碳税  $r$  对港航供应链整体最优利润  $U$  也呈现反向关系:  $r$  越大,  $U$  越小。可见, 对船舶征收碳税以及客户群体的低碳偏好意识增强都会促进船舶减排, 但过高的碳税会降低航运企业利润, 打击航运企业积极性。此外, 港航企业减排成本、航运市场规模也会影响港航企业利润。

综上, 从港航企业利润最大化来看, 港航企业协同合作是最优选择。从政府排放控制来看, 港口与船舶合作并非总是最优, 当船舶减排成本系数远大于港口协助减排成本系数时, 集中决策情形下的减排力度最优; 当船舶减排成本系数略大于或小于港口协助减排成本系数时, 港口与船舶处于平等地位的减排力度最大。当前, 航运业的合作联盟如火如荼, 在此背景下, 政府要顺势而为, 推动港航企业协同合作, 实现排放控制与港航企业利润最大化的双赢目标。一是搭建港航企业交流合作平台、加强港航联动, 如指导港口企业与航运企业签订岸电使用协议, 鼓励港口对使用岸电船舶实施优先靠泊等。二是通过补贴岸电充电设施建设和 LNG 加注站建设以及加大减排技术研发等措施, 降低港口协助减排成本。三是加强监管, 督促船舶进行减排。本文研究发现, 当船舶减排成本与港口减排成本相当或低于港口减排成本时, 港口与船舶处于同等地位情形的减排力度是最优的, 但此时供应链整体利润却不是最优的, 即无法达到排放控制与港航企业利润最大化双赢的目标。因此, 在对船舶减排进行适度补贴的同时, 更要加强监管, 督促船舶进行岸电设备改造和使用岸电。四是制定合理的碳税政策, 加大公众环保意识宣传, 畅通公众环保监督渠道。五是提高港航营商环境, 促进航运市场健康发展, 确保排放控制下的港航企业利润。

## 4 结束语

在船舶征收碳税背景下, 基于港航供应链视角, 探讨港口与船舶的减排决策问题。结果表明, 从港航供应链利润最大化角度来看, 集中决策情形最优。但从政府排放控制角度来看, 当船舶减排成本系数远大于港口减排成本系数 ( $n > 2h$ ) 时, 集中决策情形下的减排力度大于分散决策情形; 当船舶减排成本系数略大于 ( $h < n < 2h$ ) 港口减排成本系数时, 港口与船舶处于平等地位的情形减排效果最优, 其次是集中决策情形, 然后是船舶处于主导地位的情形, 最后是港口处于主导地位的情形; 当船舶减排成本

系数小于港口减排成本系数 ( $h > n$ ) 时, 港口与船舶同时处于主导地位的情形减排力度最大, 其次是船舶处于主导地位的情形, 然后是港口处于主导地位的情形, 最后是集中决策情形。

另外, 船舶减排力度以及整体供应链的最优利润与市场容量  $a$ 、客户群体对港航供应链减排力度的敏感系数  $\lambda$  呈正向关系, 而与港口协助减排成本系数  $h$ 、船舶的减排成本系数  $n$  呈反向关系。在集中决策情形下, 客户对装卸每单位 TEU 的市场价格的敏感系数  $b$  与港航供应链最优利润  $U$  呈反向关系, 政府所征收的碳税  $r$  对港航供应链整体最优利润  $U$  也呈现反向关系。

在实际情况中, 港航企业减排决策受到诸多因素影响, 如港口之间的差异 (港口地理位置、吞吐量、资源优势等的差异)、船舶之间的差异 (船舶大小、停泊港口时间、减排技术等差异), 以及港口之间、船舶之间的竞争关系和市场的不确定性等因素, 使得港航企业减排决策问题较为复杂。本文以单个港口和单个船舶所组成的港航供应链为背景, 讨论碳税和客户低碳偏好情形下的港口与船舶减排决策问题, 一方面, 可为相关问题研究提供思路, 另一方面, 所得结论在一定范围内可为港航企业减排决策和政府推动港航企业减排提供参考和借鉴。未来, 将在本文工作基础上, 结合港口和船舶异质性, 考虑港口、船舶之间的竞争关系, 以及市场的不确定性等因素, 对相关问题做进一步分析和探讨。

## 参 考 文 献

- [1] 马冬. 强化船舶排放污染治理构建绿色航运体系 [N/OL]. 中国环境报, (2018-04-24) [2021-04-12]. [http://49.5.6.212/html/2018-04/24/content\\_72019.htm](http://49.5.6.212/html/2018-04/24/content_72019.htm).
- [2] 镇璐, 诸葛丹, 汪小帆. 绿色港口与航运管理研究综述 [J]. 系统工程理论与实践, 2020, (8): 2037-2050.
- [3] 张丽. 航海碳税与我国航运业绿色发展道路 [J]. 中国航海, 2018, 41(1): 113-116.
- [4] 于冬艳. 考虑碳排放成本的集装箱班轮航线配船优化研究 [D]. 大连: 大连海事大学, 2015.
- [5] LEE T, CHANG Y, LEE P T W. Economy-Wide Impact Analysis of a Carbon Tax on International Container Shipping [J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2013, 58: 87-102.
- [6] CULLINANE K C S. Atmospheric Emissions from Shipping: the Need for Regulation and Approaches to Compliance [J]. Transport Reviews, 2013, 33(4): 377-401.

- [7] YANG L, CAI Y, WEI Y, et al. Choice of Technology for Emission Control in Port Areas: A Supply Chain Perspective[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 240(12): 1-14.
- [8] WANG Q P, ZHAO D Z, HE L F. Contracting Emission Reduction for Supply Chains Considering Market Low-Carbon Preference[J]. *Journal of Cleaner Production*, Volume, 2016, (120):72-84.
- [9] 熊中楷, 张盼, 郭年. 供应链中碳税和消费者环保意识对碳排放影响[J]. *系统工程理论与实践*. 2014, 34(9):2245-2252.
- [10] YANG H X, CHEN W B. Retailer-Driven Carbon Emission Abatement with Consumer Environmental Awareness and Carbon Tax: Revenue-Sharing Versus Cost-Sharing[J]. *Omega*, 2018, (78):179-191.
- [11] HONG L, ZHOU Z H, LIU Y Y, et al. Optimal Environmental Quality and Price with Consumer Environmental Awareness and Retailer's Fairness Concerns in Supply Chain [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, (213): 1063-1079.
- [12] 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, 21(3):227-235.
- [13] MA P, WANG H, SHANG J. Contract Design for Two-Stage Supply Chain Coordination: Integrating Manufacturer-Quality and Retailer-Marketing Efforts [J]. *International Journal of Production Economics*, 2013, 146(2):745-755.
- [14] ZHANG J, CHIANG W K, LIANG L. Strategic Pricing with Reference Effects in a Competitive Supply Chain [J]. *Omega*, 2014, 44(2): 126-135.
- [15] AUST G, BUSCHER U. Cooperative Advertising Models in Supply Chain Management: A Review[J]. *European Journal of Operational Research*, 2014, 234(1): 1-14.
- [16] 交通运输部水运局. 我国港口岸电建设及使用情况 [EB/OL]. (2020-12-11) [2021-04-12]. [https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/syj/202012/t20201211\\_3502532.html](https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/syj/202012/t20201211_3502532.html).

(上接第 71 页)

- [8] 李振福. 北极航线对我国的多重影响[J]. *中国船检*, 2016(2):17-20.
- [9] 商务部. 大连港内外贸航线增至 106 条, 航线覆盖全球主要贸易区 [EB/OL]. (2017-03-02) [2020-09-25]. <http://www.mofcom.gov.cn/article/resume/n/201703/20170302526381.shtml>.
- [10] 中国口岸协会. 中国口岸年鉴 2017 [M]. 北京: 中国海关出版社, 2017.
- [11] 白响恩, 王建忠, 肖英杰. 中国船舶首次穿越北极东北航道纪实[J]. *航海技术*, 2013(1):2-5.
- [12] 马龙, 安磊, 张晓辉, 等. 北极东北航线 2006-2015 年通航窗口数据集[J]. *全球变化数据学报(中英文)*, 2019, 3(3):244-251.
- [13] 李鹤. 东北地区利用北极航道对欧贸易运输的竞争态势[J]. *资源科学*, 2020, 42(11):2092-2105.
- [14] 李振福, 马书孟, 汤晓雯, 等. 大北极交通运输网络演进趋势研究[J]. *俄罗斯东欧中亚研究*, 2014(2): 37-42.
- [15] 闵超, 杨清华. 北极海洋环境保护工作组(PAME)北极航运状况报告介绍[J]. *极地研究*, 2020, 32(2): 279-280.
- [16] 迟梦菡. 北极东北航道开通后对我国与沿线国家贸易潜力影响分析[D]. 大连: 大连海事大学, 2019.
- [17] 李珍. 北极航道开通与中国的潜在经济利益研究——贸易潜力及其引致的经济增长效应[D]. 上海: 上海海洋大学, 2016.
- [18] 储红艳, 张钦红. 北冰洋航线通航下大连港及釜山港博弈竞争研究[J]. *物流科技*, 2017, 40(11):83-88.
- [19] 邵桂兰, 郝国志, 李晨. 中国对虾出口贸易的影响因素及潜力分析——基于贸易引力模型 [J]. *海洋经济*, 2020, 10(6):22-30.
- [20] 姚明月, 胡麦秀. 北极“东北航道”开通对中欧贸易的影响——基于贸易引力模型分析 [J]. *海洋经济*, 2014, 4(5):9-15.
- [21] 刘青峰, 姜书竹. 从贸易引力模型看中国双边贸易安排 [J]. *浙江社会科学*, 2002(6):17-20.