

文章编号: 1000-4653(2025)04-0192-08

# 考虑政府政策和绿色偏好的低碳海运 供应链减排决策分析

杨宇淳, 赵楠

(上海海事大学 交通运输学院, 上海 201306)

**摘要:**为实现碳中和目标,政府和企业正全力加快航运业的绿色转型。本文针对低碳海运供应链(LMSC),考虑政府政策和消费者绿色偏好,运用斯塔克尔伯格博弈理论,构建航运公司和货代代理(货代)的二阶段博弈模型,确定双方的定价和碳减排水平决策,研究碳税、政府补贴和消费者绿色偏好对双方决策的影响。研究发现:1)航运公司与货代合作能够实现 LMSC 整体利润的最大化,为了进一步提高 LMSC 的碳减排水平,双方应共同主导 LMSC 的发展;2)政府补贴和低碳意识的提高具有双重作用,不仅降低了碳排放水平还提高了企业利润,在某些情况下可能导致集装箱市场价格上涨;3)虽然碳税能够显著提高 LMSC 的低碳水平,但它会降低各方的利润,并推高集装箱市场价格。

**关键词:**低碳海运; 斯塔克尔伯格博弈模型; 航运供应链; 减排决策; 绿色偏好

中图分类号: U6-9; F224.32

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1000-4653.2025.04.022

## Analysis of emission reduction decisions in low-carbon maritime supply chains considering government policies and green preferences

YANG Yuchun, ZHAO Nan

(College of Transport and Communications, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

**Abstract:** To achieve carbon neutrality, governments and enterprises are accelerating the decarbonization process in the shipping industry. This paper focuses on the Low-Carbon Maritime Supply Chain (LMSC), considering both government policies and consumers' green preferences. A two-stage Stackelberg game model between shipping companies and freight forwarders is developed to determine optimal pricing and carbon emission reduction strategies, while examining the impacts of carbon taxes, government subsidies, and consumers' green preferences on decision-making. The analysis yields three main findings: First, cooperation between freight forwarders and shipping companies maximizes overall profits for the LMSC; however, to achieve higher emission reduction levels, both parties should co-lead the supply chain. Second, government subsidies and enhanced low-carbon awareness produce dual effects: while they help reduce emissions and increase corporate profits, they may also raise TEU market prices for consumers under certain conditions. Third, although carbon taxes significantly improve the low-carbon performance of the LMSC, they reduce profits for all participants and increase TEU market prices.

**Key words:** low-carbon shipping; Stackelberg game model; Maritime; emission reduction decisions; green preferences

从2024年起,航运业被纳入欧盟碳排放交易体系,航运公司需为碳排放支付费用。这将增加其运营成本,促使其调整策略,并可能将成本转嫁至低碳

海运供应链(Low-Carbon Maritime Supply Chain, LMSC)上的其他成员,从而影响全球供应链的上下游产业<sup>[1]</sup>。

收稿日期: 2024-12-02

第一作者: 杨宇淳(2001—),男,硕士生,研究方向为航运供应链。E-mail: 1298524668@qq.com

通信作者: 赵楠(1986—),女,高级工程师,博士,研究方向为交通运输规划与管理,港口管理。E-mail: rockyzhao1986@163.com

引用格式: 杨宇淳,赵楠. 考虑政府政策和绿色偏好的低碳海运供应链减排决策分析[J]. 中国航海, 2025, 48(4): 192-199.

YANG Y C, ZHAO N. Analysis of emission reduction decisions in low-carbon maritime supply chains considering government policies and green preferences[J]. Navigation of China, 2025, 48(4): 192-199. (in Chinese)

部分中国学者建议对船舶征收碳税以减少碳排放。例如,于冬艳<sup>[2]</sup>提出对集装箱班轮公司征收碳税,优化航线配船模型;CULLINANE 等<sup>[3]</sup>认为碳税政策和技术更新能促进节能减排;周海英等<sup>[4]</sup>及陈星星<sup>[5]</sup>也从博弈论视角探讨了碳税背景下的减排策略。因此,在碳税政策下实现 LMSC 的减排成为关键议题。

托运人的低碳偏好同样是航运业转型升级的重要因素,越来越多的托运人愿意为更环保的运输支付更高费用<sup>[6]</sup>。货运代理(以下简称“货代”)等第三方在低碳海运中发挥重要作用,有时甚至主导供应链<sup>[7-8]</sup>。此外,政府补贴作为外部激励手段,被广泛用于推动企业技术升级和低碳服务,如深圳市政府对使用低硫油船舶公司进行补贴。

实践中,目前航运公司在供应链中具备较强议价能力,因此许多学者研究了不同权力结构下的博弈。WANG 等<sup>[9]</sup>构建了政府、枢纽港和承运商组成的斯塔克尔伯格(Stackelberg)博弈模型。梁志超等<sup>[10]</sup>构建了码头和船公司为主导者的博弈模型。陈婉婷等<sup>[11]</sup>研究了不同市场竞争环境下的绿色减排和价格决策。

综上所述,尽管在航运节能减排和碳排放博弈方面已有大量研究,但仍存在不足:此前的研究主要集中于港口和航运公司,货代等企业的参与相对较少;同时,这些研究侧重于供应链上游,忽略了下游消费者减碳意愿对博弈决策的影响,且缺乏如政府补贴等更贴近实践的影响因素。

由于当前航运市场中,只有集装箱运输市场呈现出显著的寡头垄断特征,本文将研究重点聚焦于集装箱运输市场的博弈分析,并通过构建集中决策与分散决策的 Stackelberg 博弈模型,考虑消费者的绿色偏好对市场需求的影响,以期为港航货运企业的减排决策及政府低碳政策制定提供理论支持,也为其他类型的航运市场提供一定的参考和启示。

## 1 模型构建

### 1.1 问题描述

LMSC 是由航运公司和货代组成的二级供应链系统。在 LMSC 中,政府会对航运公司的碳排放征收碳税,而具有环保意识的消费者愿意支付更高的费用选择绿色运输方式。

为了应对这些变化,航运公司会采取绿色改造措施以降低碳排放,货代则通过协助航运公司减排来吸引偏好环保的消费者。此外,为了激励企业进行绿色投资,政府还会对企业的部分绿色投资成本

提供补贴。

随着市场环境的不不断变化,航运公司和货代在供应链中的主导地位也在动态调整。双方有时合作,有时各自作为供应链的领导者,从而对供应链产生不同的影响。

基于此,本文构建了四种不同权力结构的博弈模型,并深入分析政府碳税及补贴、消费者绿色偏好对供应链中的关键决策变量和企业利润的影响。

### 1.2 符号参数与模型假设

本文参数见表 1。

表 1 符号说明

Tab.1 Symbol description

类型	符号	说明
决策变量	$C$	航运公司运输每标准箱(TEU)的利润
	$F$	货代服务每 TEU 的利润
	$R$	碳减排水平
	$T$	每 TEU 市场价, $T = C + F$
其他参数	$a$	市场容量
	$g$	低碳敏感系数
	$m$	协助减排成本系数
	$n$	航运公司减排成本系数
	$e$	船舶碳减排前的单位碳排放
	$r$	政府对船舶单位碳排放所征收碳税
	$i$	政府补贴系数
推导参数	$q$	客户需求
	$U_1$	航运公司的总预期利润
	$U_2$	货代的总预期利润

考虑到航运供应链中的实际复杂情形,在不改变现实本质的前提下尽可能简化模型,给出如下假设:

假设 1:需求函数为线性函数,随 TEU 市场价上升而下降,随碳减排水平  $R$  上升而上升。参考 MA 等<sup>[12]</sup>的研究方法,将需求函数设置为  $q = a - T + gR = a - F - C + gR$ 。

假设 2:参考周海英等<sup>[4]</sup>的研究策略,航运公司的碳减排水平即为 LMSC 的低碳水平,并且航运公司决策碳减排水平,而货代提供相应协助减排服务。

假设 3:由于本文研究的重点是低碳减排决策,因此本文弱化了其他成本,仅考虑低碳成本,所以假设定价即为利润,而低碳成本在总收入之后扣除。

假设 4:航运公司进行碳减排,需要付出相应的减排成本,参考 MA 等<sup>[12]</sup>的研究方法,假设航运公

司总减成本为  $0.5nR^2$ 。与以往研究不同,本文还考虑了货运代理的协助减排,同样假设货代的协助减排投资成本为  $0.5mR^2$ [12]。

假设5:政府补贴系数  $i$  直接作用于减排成本[7]。

假设6:本文博弈为完全信息博弈。

综上,总体以及双方的利润函数  $U_z, U_1, U_2$  可表示为

$$U_z = [F + C - er(1 - R)](a - F - C + gR) - 0.5(1 - i)(m + n)R^2 \quad (1)$$

$$U_1 = [C - er(1 - R)](a - F - C + gR) - 0.5n(1 - i)R^2 \quad (2)$$

$$U_2 = F(a - F - C + gR) - 0.5m(1 - i)R^2 \quad (3)$$

## 2 模型建立与求解

### 2.1 集中决策

航运公司与货代相互合作,以 LMSC 整体利润最优为目标,共同决定碳减排水平  $R$  和每单位 TEU 市场价  $T$ 。

$$U_z = [T - er(1 - R)](a - T + Rg) - 0.5(1 - i)(m + n)R^2 \quad (4)$$

对  $R, T$  求一阶偏导并联立得:

$$\begin{cases} R^* = \frac{(a - er)(er + g)}{2(m + n)(1 - i) - (er + g)^2} \\ T^* = a[(1 - i)(m + n) - er(er + g)] / [2(1 - i)(m + n) - (er + g)^2] - er[g^2 - (1 - i)(m + n) + erg] / [2(1 - i)(m + n) - (er + g)^2] \end{cases} \quad (5)$$

所以存在  $R^*$ ,使得利润最大,得

$$U_z^* = \frac{(1 - i)(m + n)(a - er)^2}{2[2(1 - i)(m + n) - (er + g)^2]} \quad (6)$$

### 2.2 分散决策

#### 2.2.1 货代主导的 Stackelberg 博弈

货代先决定服务利润  $F$ ,随后航运公司在已知货代决策的情况下,决定自身服务利润  $C$  和碳减排水平  $R$ ,最后货代根据航运公司的决策改变自身的决策变量  $F$ 。采用传统的逆向归纳法对模型进行求解。

首先,对航运公司的利润最优问题进行分析:

$$U_{1,\max} = [C - er(1 - R)](a - F - C + gR) - 0.5n(1 - i)R^2 \quad (7)$$

分别对  $C, R$  求导并联立可得

$$\begin{cases} R_1 = \frac{(er + g)(F - a + er)}{2n(1 - i) - (er + g)^2} \\ C_1 = \frac{a - F + gR - er(R - 1)}{2} \end{cases} \quad (8)$$

接着对货代利润最优进行分析:

$$U_{2,\max} = F(a - F - C + gR) - 0.5m(1 - i)R^2 \quad (9)$$

将  $R, C$  代入并对  $F$  求导,联立可得存在  $F$  使得利润最大:

$$F_1 = \frac{(a - er)[2n^2(1 - i) - (m - n)(er - g)^2]}{(m - 2n)(er + g)^2 + 4n^2(1 - i)} \quad (10)$$

将  $F_1$  代入可得

$$R_1 = \frac{n(er + g)(a - er)}{(m - 2n)(er + g)^2 + 4n^2(1 - i)} \quad (11)$$

$$C_1 = \frac{an[n(1 - i) - er(er + g)] + er[e^2r^2(m - n) + (m - 2n)g^2 + 3n^2(1 - i) + erg(2m - 3n)]}{(m - 2n)(er + g)^2 + 4n^2(1 - i)} \quad (12)$$

代入  $U_1, U_2$  得

$$U_{1,1} = \frac{(1 - i)n^3(a - er)^2[2n(1 - i) - (er + g)^2]}{2[(m - 2n)(er + g)^2 + 4n^2(1 - i)]^2} \quad (13)$$

$$U_{2,1} = \frac{(1 - i)n^2(a - er)^2}{2[(m - 2n)(er + g)^2 + 4n^2(1 - i)]} \quad (14)$$

$$U_{z,1} = \frac{n^2(a - er)^2[(1 - i)(m - 3n)(er + g)^2 + 6n^2(1 - i)^2]}{2[(m - 2n)(er + g)^2 + 4n^2(1 - i)]^2} \quad (15)$$

#### 2.2.2 航运公司主导的 Stackelberg 博弈

航运公司先决定服务利润  $C$  和碳减排水平  $R$ ,随后货代在已知航运公司的决策情况下决定自身服务利润  $F$ ,最后航运公司根据货代的决策改变自身的决策变量  $C$  和  $R$ 。采用传统的逆向归纳法进行求解。

首先,对货代的利润最优问题进行分析:

$$U_{2,\max} = F(a - F - C + gR) - 0.5(1 - i)mR^2 \quad (16)$$

对  $F$  求导并联立可得存在  $F$  使得利润最大

$$F_2 = \frac{a - C + gR}{2} \quad (17)$$

接着对航运公司利润进行分析:

$$U_{1,\max} = [C - er(1 - R)](a - F - C + gR) - 0.5(1 - i)nR^2 \quad (18)$$

将  $F$  代入并分别对  $C, R$  求偏导,联立可得存在  $C, R$  使得利润最大:

$$\begin{cases} C_2 = \frac{er(er + g)(g + a) - 2n(1 - i)(er + a)}{(er + g)^2 - 4n(1 - i)} \\ R_2 = \frac{(er + g)(a - er)}{4n(1 - i) - (er + g)^2} \end{cases} \quad (19)$$

代入  $F_2$ , 得

$$F_2 = \frac{n(1-i)(a-er)}{4n(1-i) - (er+g)^2} \quad (20)$$

将式(20)代入  $U_1, U_2$  得

$$U_{1,2} = \frac{n(1-i)(a-er)^2}{2[4n(1-i) - (er+g)^2]} \quad (21)$$

$$U_{2,2} = \frac{(a-er)^2(1-i)[2n^2(1-i) - m(er+g)^2]}{2[4n(1-i) - (er+g)^2]^2} \quad (22)$$

$$U_{z,2} = \frac{(a-er)^2(1-i)[6n^2(1-i) - (n+m)(er+g)^2]}{2[4n(1-i) - (er+g)^2]^2} \quad (23)$$

### 2.2.3 双方权利对等的 Nash 博弈

航运公司和货代同时决定自身的单位 TEU 利润  $C$  和  $F$ , 以及碳减排水平  $R$ 。

航运公司最优利润为:

$$U_{1,\max} = [C - er(1-R)](a - F - C + gR) - 0.5n(1-i)R^2 \quad (24)$$

对  $C, R$  求一阶偏导得:

$$\begin{cases} \frac{\partial U_{1,\max}}{\partial C} = a - 2C - F + Rg + er(1-R) \\ \frac{\partial U_{1,\max}}{\partial R} = -Rn(1-i) + er(a - C - F + Rg) + g[C - er(1-R)] \end{cases} \quad (25)$$

存在  $C, R$  使得航运公司利润最大。

同理对货代利润函数求一阶偏导, 存在  $F$  使得货代利润最大, 联立解方程可得均衡解:

$$\begin{cases} R_3 = \frac{(a-er)(er+g)}{3n(1-i) - (er+g)^2}, \\ C_3 = \frac{n(1-i)(a-er)}{3n(1-i) - (er+g)^2} \\ F_3 = \frac{er[g^2 + erg - 2n(1-i)] + a[er(er+g) - n(1-i)]}{(er+g)^2 - 3n(1-i)} \end{cases} \quad (26)$$

将  $R, F, C$  代入利润函数可得:

$$U_{1,3} = \frac{n(a-er)^2(1-i)[2n(1-i) - (er+g)^2]}{2[3n(1-i) - (er+g)^2]^2} \quad (27)$$

$$U_{2,3} = \frac{(a-er)^2(1-i)[2n^2(1-i) - m(er+g)^2]}{2[3n(1-i) - (er+g)^2]^2} \quad (28)$$

$$U_{z,3} =$$

$$\frac{(a-er)^2(1-i)[4n^2(1-i) - (m+n)(er+g)^2]}{2[3n(1-i) - (er+g)^2]^2} \quad (29)$$

## 3 模型结果分析

### 3.1 集中决策和分散决策的 LMSC 利润分析

**命题 1:** 当  $m > n$  时,  $U_z > U_{z,1}$

证明: 为简洁起见, 证明方法可见附录。

命题 1 表明当货代协助减排的成本系数大于航运公司的减排成本系数时, 集中决策模式下的 LMSC 利润会大于航运公司主导模式下的利润。

**命题 2:** 当  $m > n$  时,  $U_z > U_{z,2}$

证明: 命题 2 的证明类似于命题 1 的证明。

命题 2 表明当货代协助减排成本系数大于航运公司减排成本系数时, 集中决策模式下的 LMSC 利润会大于货代主导模式下的利润。

**命题 3:** 当  $m > n$  时,  $U_z > U_{z,3}$

证明: 命题 3 的证明类似于命题 2 的证明。

命题 3 表明当货代协助减排成本系数大于航运公司减排成本系数时, 集中决策模式下的 LMSC 利润会大于双方权利对等模式下的利润。

### 3.2 分散决策下不同权力结构的 LMSC 利润以及碳减排水平分析

**命题 4:** 当  $n > m$  时,  $R_3 > R_1 > R_2$  且  $U_{z,1} > U_{z,2}$

证明: 为简洁起见, 证明方法可见附录。

命题 4 表明当航运公司减排成本系数大于货代协助减排成本系数时, 双方权利对等模式下的碳减排水平最高, 货代主导模式下次之, 航运公司主导模式下最低。且货代主导模式下的 LMSC 整体利润大于航运公司主导的 LMSC 整体利润。

**命题 5:** 当  $n > 2m$  时,  $R_3 > R_2, R_1 > R_2$  且  $U_{z,3} > U_{z,2}, U_{z,1} > U_{z,2}$

证明: 命题 5 的证明类似于命题 4。

命题 5 表明当航运公司减排成本系数远大于货代协助减排成本系数时, 双方权利对等模式下的碳减排水平和货代主导模式下的碳减排水平均大于航运公司主导模式下的碳减排水平。且双方权利对等模式和货代主导模式下的 LMSC 整体利润均大于航运公司主导模式下的 LMSC 整体利润。

**命题 6:** 当  $m > n$  时,  $R_3 > R_2 > R_1$

证明: 命题 6 的证明类似于命题 5。

命题 6 表明当货代协助减排成本系数大于航运公司减排成本系数时, 双方权利对等模式下的碳减排水平最高, 货代主导模式下的碳减排水平次之, 航运公司主导模式下的碳减排水平最低。

## 4 数值模拟

在本节中,将通过数值模拟深化对博弈结果的理解,旨在验证模型的预测能力和实际应用价值,参数设置见表2。

表2 参数设置

Tab.2 Summary of relevant parameters

参数	具体取值	现实背景
$a$	4 000 <sup>[5]</sup>	深圳港
$g$	[0,5] <sup>[5]</sup>	
$m$	[60 000,120 000] <sup>[5,13]</sup>	各货代
$n$	[80 000,160 000] <sup>[5,13]</sup>	各航运公司
$e$	5 <sup>[7]</sup>	
$r$	[5,15] <sup>[7]</sup>	台州港
$i$	[0,0.5]	相关政策法规

### 4.1 不同权力结构下各参数对博弈双方决策变量的影响

客户低碳敏感系数对决策变量的影响见表3。通过分析表3可知,随着低碳敏感系数的增加,碳减排水平显著提升,但这也导致TEU市场价格略微上

涨。随着低碳敏感系数的进一步增加,价格上涨幅度也随之增大。

因此,面对消费者日益增强的低碳意识,航运公司和货代为了保持市场竞争力,倾向于提高碳减排水平,并将由此产生的低碳成本转嫁给消费者。

碳税对决策变量的影响见表4。通过分析表4可知,碳税增加时,碳减排水平显著提升,尤其是在双方权利对等的模式下,碳减排效果最为明显。然而,在货代主导的模式中,碳税的增加会导致TEU市场价格上升,而在其他模式下,碳税对TEU市场价格影响不大。

因此,提高碳减排水平的另一有效途径是增加碳税,这将对碳减排产生显著影响。但需要注意的是,在货代主导模式下,过高的碳税可能导致TEU市场价格大幅上涨。

政府补贴对决策变量的影响见表5。通过分析表5可知,随着政府补贴的增加,碳减排水平普遍提升,尤其是在集中决策模式下,提升最为显著。然而,在货代主导的模式中,政府补贴的增加会导致TEU市场价格大幅上升,而在其他模式下,TEU市场价格则呈现出略微下降的趋势。

表3 客户低碳敏感系数对决策变量的影响

Tab.3 The impact of customer low-carbon sensitivity coefficient on decision variables

$m = 90\ 000, n = 120\ 000, r = 10, i = 0.2$								
$g$	$T^*$	$R^*$	$T_1$	$R_1$	$T_2$	$R_2$	$T_3$	$R_3$
0	2 010.1	0.59	3 017.3	0.51	3 006.0	0.51	2 671.8	0.69
1	2 010.2	0.60	3 017.5	0.52	3 006.2	0.52	2 672.0	0.70
2	2 010.2	0.61	3 017.8	0.53	3 006.5	0.53	2 672.2	0.71
3	2 010.2	0.62	3 018.0	0.55	3 006.8	0.54	2 672.5	0.73
4	2 010.2	0.64	3 018.3	0.56	3 007.1	0.55	2 672.8	0.74
5	2 010.3	0.65	3 018.6	0.57	3 007.5	0.57	2 673.1	0.76

表4 碳税对决策变量的影响

Tab.4 The impact of carbon tax on decision variables

$m = 90\ 000, n = 120\ 000, g = 2, i = 0.2$								
$r$	$T^*$	$R^*$	$T_1$	$R_1$	$T_2$	$R_2$	$T_3$	$R_3$
5	2 008.8	0.32	3 007.2	0.28	3 004.8	0.28	2 672.3	0.37
7	2 010.9	0.43	3 011.5	0.38	3 005.8	0.38	2 672.9	0.51
9	2 010.5	0.55	3 015.0	0.48	3 006.4	0.48	2 672.7	0.65
11	2 009.5	0.67	3 020.3	0.59	3 006.4	0.59	2 671.5	0.78
13	2 007.5	0.79	3 024.9	0.69	3 005.9	0.69	2 669.3	0.92
15	2 004.0	0.91	3 030.5	0.80	3 004.9	0.79	2 666.2	1.07

表 5 政府补贴对决策变量的影响  
Tab. 5 The impact of government subsidies on decision variables

$i$	$m = 90\ 000, n = 120\ 000, g = 2, r = 10$							
	$T^*$	$R^*$	$T_1$	$R_1$	$T_2$	$R_2$	$T_3$	$R_3$
0	2 013. 19	0. 49	3 016. 6	0. 43	3 007. 6	0. 43	2 674. 4	0. 57
0. 1	2 011. 86	0. 54	3 017. 1	0. 47	3 007. 2	0. 47	2 673. 4	0. 63
0. 2	2 010. 21	0. 61	3 017. 7	0. 53	3 006. 5	0. 53	2 672. 2	0. 71
0. 3	2 008. 08	0. 70	3 018. 5	0. 61	3 005. 7	0. 61	2 670. 6	0. 82
0. 4	2 005. 23	0. 82	3 019. 5	0. 72	3 004. 5	0. 71	2 668. 5	0. 96
0. 5	2 001. 22	0. 99	3 021. 0	0. 86	3 002. 9	0. 86	2 665. 5	1. 15

因此,政府补贴通过直接降低企业的绿色投资成本,在四种权力结构下均显著促进了碳减排水平。然而,在货代主导模式下,过高的政府补贴可能导致 TEU 市场价格上涨。

4. 2 不同权力结构下各参数对博弈双方的利润影响

低碳敏感系数对双方利润的影响见表 6。通过分析表 6 可知,随着低碳敏感系数的增加,LMSC 的整体利润和航运公司及货代的利润均呈现出正向增

长的趋势。

因此,消费者低碳意识的提高不仅有助于提升碳减排水平,还能推动 LMSC 整体利润和各方利润的增长。

碳税对双方利润的影响见表 7。通过分析表 7 可知,随着碳税的增加,LMSC 的整体利润和双方的利润均有所下降,尤其对航运公司而言,碳税增加的负面影响更加显著。

表 6 低碳敏感系数对双方利润的影响  
Tab. 6 The impact of low-carbon sensitivity coefficient on profits of both parties

$g$	$m = 90\ 000, n = 120\ 000, r = 10, i = 0. 2$									
	$U_z^*$	$U_{1,1}$	$U_{2,1}$	$U_{z,1}$	$U_{1,2}$	$U_{2,2}$	$U_{z,2}$	$U_{1,3}$	$U_{2,3}$	$U_{z,3}$
0	3 929 865	978 317	1 966 314	2 944 632	1 963 093	978 330	2 941 424	1 741 135	1 746 877	3 488 012
1	3 931 056	978 444	1 966 966	2 945 411	1 963 613	978 459	2 942 072	1 741 439	1 747 418	3 488 856
2	3 932 270	978 574	1 967 632	2 946 206	1 964 143	978 589	2 942 733	1 741 749	1 747 969	3 489 717
3	3 933 510	978 706	1 968 310	2 947 017	1 964 684	978 723	2 943 407	1 742 065	1 748 531	3 490 596
4	3 934 773	978 841	1 969 003	2 947 843	1 965 236	978 859	2 944 095	1 742 387	1 749 104	3 491 491
5	3 936 061	978 978	1 969 708	2 948 686	1 965 798	978 997	2 944 795	1 742 715	1 749 689	3 492 403

表 7 碳税对双方利润的影响  
Tab. 7 The impact of carbon tax on profits of both parties

$r$	$m = 90\ 000, n = 120\ 000, g = 2, i = 0. 2$									
	$U_z^*$	$U_{1,1}$	$U_{2,1}$	$U_{z,1}$	$U_{1,2}$	$U_{2,2}$	$U_{z,2}$	$U_{1,3}$	$U_{2,3}$	$U_{z,3}$
5	3 958 745	988 475	1 979 776	2 968 252	1 978 835	988 476	2 967 311	1 757 847	1 759 522	3 517 369
7	3 946 385	984 324	1 973 950	2 958 274	1 972 184	984 328	2 956 512	1 750 954	1 754 098	3 505 052
9	3 936 386	980 428	1 969 415	2 949 843	1 966 566	980 438	2 947 004	1 744 668	1 749 744	3 494 412
11	3 928 746	976 781	1 966 173	2 942 954	1 961 978	976 804	2 938 782	1 738 978	1 746 461	3 485 439
13	3 923 474	973 377	1 964 231	2 937 608	1 958 422	973 420	2 931 842	1 733 874	1 744 252	3 478 126
15	3 920 588	970 207	1 963 601	2 933 808	1 955 902	970 283	2 926 185	1 729 348	1 743 124	3 472 472

因此,在制定碳税政策时,应综合考虑其对 LM-SC 整体收益和各方利润的影响,确保在实现碳减排目标的同时,尽量减少对利润的不利影响。

政府补贴对双方利润的影响见表 8。通过分析

表 8 可知,随着政府补贴的增加,LMSC 的整体利润和航运公司及货代的利润均有所提升,尤其是对航运公司来说,政府补贴增加的正面影响更加明显。

表 8 政府补贴对双方利润的影响

Tab.8 The impact of government subsidies on profits of both parties

$i$	$m = 90\ 000, n = 120\ 000, g = 2, r = 10$									
	$U_z^*$	$U_{1,1}$	$U_{2,1}$	$U_{z,1}$	$U_{1,2}$	$U_{2,2}$	$U_{z,2}$	$U_{1,3}$	$U_{2,3}$	$U_{z,3}$
0	3 925 900	977 893	1 964 143	2 942 036	1 961 362	977 903	2 939 264	1 740 121	1 745 079	3 485 200
0.1	3 928 729	978 196	1 965 692	2 943 888	1 962 597	978 208	2 940 805	1 740 845	1 746 362	3 487 207
0.2	3 932 270	978 574	1 967 632	2 946 206	1 964 143	978 589	2 942 733	1 741 749	1 747 969	3 489 717
0.3	3 936 833	979 060	1 970 131	2 949 191	1 966 135	979 080	2 945 215	1 742 911	1 750 039	3 492 950
0.4	3 942 933	979 706	1 973 473	2 953 179	1 968 797	979 734	2 948 531	1 744 460	1 752 806	3 497 267
0.5	3 951 505	980 609	1 978 172	2 958 780	1 972 536	980 649	2 953 185	1 746 629	1 756 696	3 503 325

因此,适度增加政府补贴,不仅能够提高各方利润,还能有效促进碳减排目标的实现。

## 5 结束语

在消费者绿色意识不断增强、货代地位日益突出、碳税政策存在不确定性及政府大量补贴低碳发展的多重背景下,本文通过分析低碳海运供应链中不同权力结构下的决策和收益,揭示了多种因素对碳减排和经济效益的影响。研究结果表明:

1) 航运公司与货代的合作能够实现供应链整体利润最大化,而双方权利平等时的利润次之,当供应链中存在任何一方作为领导者时利润最低。

2) 在双方地位对等的情况下,碳减排水平最高。仅当货代协助减排的成本高于航运公司减排成本时,航运公司主导的情况下碳减排水平才会超过货代主导模式。

3) 政府补贴和提高消费者低碳意识是实现双赢的有效手段,能够同时提升碳减排水平和整体利润。然而,提高消费者的低碳意识可能导致企业借机涨价,而增加政府补贴在货代主导模式下会引起价格上涨,在其他权力结构下则可能导致价格下降。

4) 尽管碳税能够提升碳减排水平,但它会降低各方的利润,且在货代主导模式下显著推高市场价格。

本文研究了由航运公司和货代组成的 LMSC,但更现实的 LMSC 模型还需要考虑港口对供应链的影响。此外,本文在博弈模型中仅探讨了政府补贴、碳税和绿色偏好的机制,未来研究可以进一步引入其他更符合实际的博弈机制,以深化研究成果。

## 参 考 文 献

- [1] 王卓凡. 船运业纳入欧盟碳排放交易体系的影响分析[J]. 国际石油经济, 2023(10): 42-49.  
WANG Z F. Impact of the shipping industry's inclusion in the EU ETS[J]. International Petroleum Economics, 2023(10): 42-49. (in Chinese)
- [2] 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.  
YU D Y. Research on shipping route schedule optimization for container liner considering carbon emission cost[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2015. (in Chinese)
- [3] CULLINANE K, CULLINANE S. Atmospheric emissions from shipping: the need for regulation and approaches to compliance [J]. Transport Reviews, 2013, 33(4): 377-401.
- [4] 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.  
ZHOU H Y, LI B T. 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 [J]. Navigation of China, 2022, 45(3): 72-79. (in Chinese)
- [5] 陈星星. 碳交易机制下港航企业减排策略研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2022.  
CHEN X X. Research on the strategy of emission reduction of port and shipping enterprises under carbon trading mechanism [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2022. (in Chinese)
- [6] ZHOU H Y, ZHANG W J. Choice of emission control

technology in port areas with customers' low-carbon preference[J]. Sustainability, 2022, 14(21): 13816.

[7] WANG J J, LIU J G, ZHANG X. Service purchasing and market-entry problems in a shipping supply chain [J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2020, 136: 101895.

[8] HUANG X Y, LIU G Y, ZHENG P J. Dynamic analysis of a low-carbon maritime supply chain considering government policies and social preferences[J]. Ocean & Coastal Management, 2023, 239: 106564.

[9] WANG J, ZHU W B. Analyzing the development of competition and cooperation among ocean carriers considering the impact of carbon tax policy [J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2023, 175: 103157.

[10] 梁志超,蒋冉. 碳限额与交易政策下不同权力结构绿色海运供应链博弈[J]. 经济研究导刊, 2023(4): 77-82.

LIANG Z C, JIANG R. Game analysis of green maritime supply chains with different power structures under cap and trade policy [J]. Economic Research Guide, 2023(4): 77-82. (in Chinese)

[11] 陈婉婷,胡志华. 不同市场竞争环境下港口绿色减排与价格决策模型[J]. 上海海事大学学报, 2024, 45(1):55-61.

CHEN W T, HU Z H. Port green emission reduction and price decision model under various market competition environments [J]. Journal of Shanghai Maritime University, 2024, 45(1): 55-61. (in Chinese)

[12] MA P, WANG H Y, 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.

[13] CHEN X L, ZHOU J H. The complexity analysis and chaos control in omni-channel supply chain with consumer migration and advertising cost sharing [J]. Chaos, Solitons & Fractals, 2021, 146: 110884.

附录

命题 1 证明如下:

$$U_a^* - U_a = \frac{(m+n)(1-i)(a-er)^2}{2[2(m+n)(1-i)-(er+g)^2]} - \frac{(a-er)^2[6n^2(1-i)^2-(n+m)(1-i)(er+g)^2]}{2[4n(1-i)-(er+g)^2]^2} = \frac{(a-er)^2[2n^2(m+n)(1-i)^3-(er+g)^2(2n-m)(1-i)^2m]}{[2(m+n)(1-i)-(er+g)^2][4n(1-i)-(er+g)^2]^2}$$

当  $m > n$  时,  $(1-i)^2(m-n)^2 > 0$ , 即  $n^2(1-i)^2 > (2n-m)(1-i)^2m$  恒成立, 又  $2(m+n)(1-i) > (er+g)^2$ , 所以  $2n^2(m+n)(1-i)^3 - (er+g)^2(1-i)^2(2n-m)m > 0$ , 所以  $U_a^* > U_a$ 。

命题 4 证明如下:

$$R_1 - R_2 = \frac{n(er+g)(a-er)}{(m-2n)(er+g)^2 + 4n^2(1-i)} - \frac{(1-i)(er+g)(a-er)}{4n(1-i)-(er+g)^2} = \frac{(a-er)(n-m)(er+g)^3}{[(m-2n)(er+g)^2 + 4n^2(1-i)][4n(1-i)-(er+g)^2]}$$

易得: 当  $n > m$ ,  $R_1 > R_2$ , 当  $n < m$ ,  $R_1 < R_2$ 。其余的证明同上。