

文章编号:1000-4653(2025)04-0167-09

# 基于 Stackelberg 博弈的岸电推广研究 ——补贴与碳交易政策双参与

王超

(上海海事大学 交通运输学院, 上海 201306)

**摘要:**在港口岸电背景下,研究不同政策对港航企业的影响,有利于提高岸电使用率、实现既定减排目标。为了探究政策对港航企业影响问题,构建港口主导、航运公司跟随的 Stackelberg 博弈模型,旨在解决岸电设备创新问题,增加创新补贴,并将补贴与碳交易政策结合,探讨其对港航企业的影响。运用逆向求解法进行求解,使用 Matlab 进行数值仿真。研究表明:在减排初期,补贴政策有利于创新水平提高,在岸电技术成熟后政府实施双政策有利于督促港航业持续研发岸电技术进行减排降碳。为此,建议政府初期采取措施扩大市场规模、提高社会低碳意识、增加创新补贴力度以促进岸电使用率,待技术成熟后,通过调整补贴比例与碳价维持岸电的使用。

**关键词:**岸电;碳交易政策;补贴政策;Stackelberg 博弈模型

中图分类号:F224.32;F552

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.1000-4653.2025.04.019

## Research on the promotion of shore power based on Stackelberg game model: dual participation of subsidy and carbon trading policies

WANG Chao

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

**Abstract:** In the context of port shore power deployment, studying the impact of different policies on port and shipping enterprises is crucial for improving shore power utilization and achieving established emission reduction goals. To explore the policy effects on these enterprises, a Stackelberg game model was constructed with the port as the leader and shipping companies as the follower, incorporating innovation subsidies into the framework. This model aims to address innovation challenges in shore power equipment and examines the combined impact of subsidies and carbon trading policies on port and shipping enterprises. The model is solved using backward induction and numerically simulated via Matlab. The results indicate that in the early stages of emission reduction, subsidy policies help enhance innovation levels, while after the maturation of shore power technology, the implementation of dual policies involving both subsidies and carbon trading is more effective in motivating the industry to develop emission reduction technologies. Therefore, it is recommended that the government take measures to expand market scale, strengthen societal low-carbon awareness, and increase innovation subsidies in the early phase to promote shore power utilization. After the technology matures, the subsidy ratio and carbon price can be adjusted to sustain the utilization of shore power.

**Key words:** shore power; carbon trading policy; subsidy policy; Stackelberg game model

针对气候变化与环境污染的挑战,各国采取一系列措施应对港口区域污染,如划分排放控制区 (Emission Control Area, ECA)、使用清洁燃料、构建可替代电力系统等<sup>[1]</sup>。而岸电是一种对船、岸设施

收稿日期:2024-07-13

基金项目:国家重点研发计划政府国际科技创新合作项目“港口碳减排技术评价与数字化支持工具研发”(2022YFE0115100);上海市“科技创新行动计划”政府间国际科技合作项目(21160710800)资助

第一作者:王超(1997—),男,硕士,研究方向为国际航运现代化管理。E-mail: 13761678758@163.com

引用格式:王超.基于 Stackelberg 博弈的岸电推广研究——补贴与碳交易政策双参与[J].中国航海,2025,48(4):167-175.

WANG C. Research on the promotion of shore power based on Stackelberg game model: dual participation of subsidy and carbon trading policies[J]. Navigation of China, 2025, 48(4): 167-175. (in Chinese)

改造,使船舶靠泊时使用陆基供电、减少副机供电进而减少港区排放的技术。ZIS 等<sup>[2]</sup>基于船舶靠港数据估算岸电可以减少 48% ~ 70% 的船舶碳排放量。2017 年政府出台《港口岸电布局方案》,鼓励港航业建设和使用岸电<sup>[3]</sup>,但船、岸两侧岸电投资成本高、接电难度大、航运公司对岸电可靠性忧虑以及缺乏强制性政策支持等原因导致岸电使用积极性不高。根据亚洲清洁空气中心《蓝港先锋 2022: 中国典型港口空气与气候协同力评价》报告:2021 年 13 个中国沿海港口岸电平均覆盖率为 73%,停靠沿海港口的船舶受电设施配备率仅为 5%,岸电平均使用率更低。政府作为碳排放监管者,可以对港航企业实施激励政策,解决岸电使用率低、积极性不足等问题。

目前,港航层面实施的减排政策有碳税、碳交易机制以及补贴政策。2013 年,欧盟推出航海碳税,征收对象为所有驶入、驶出、途径欧盟成员国港口的 5 000 吨及以上船舶<sup>[4]</sup>。相较于发达国家,中国投入巨额成本建造船舶,若实施碳税政策可能导致港航风险。LEE 等<sup>[5]</sup>研究表明:若没有处理好碳税与经济增长平衡问题,盲目征收碳税会对经济造成损失。2019 年,欧盟将航运业纳入碳交易机制,旨在

形成一个设定碳排放值的交易市场,主体之间购买或出售碳额度实现减排目标。ZHONG 等<sup>[6]</sup>设计非线性规划模型得出碳交易机制对港口最优减排策略有促进作用。除碳交易政策在北京、上海、深圳等地试点交易外,中国多地也实施针对岸电的补贴政策,如表 1 所示。WANG 等<sup>[7]</sup>提出岸电补贴优化框架以实现泊位减排的最大补贴效率,得出当港口岸电供应和船舶岸电需求达到平衡时政府补贴效率最优。YIN 等<sup>[8]</sup>根据补贴政策分别估算港口和船舶岸电改造成本和投资回收年限,得出补贴政策的有效性决定港口和船公司回收成本的速度。针对减排政策分析发现:第一,岸电技术成熟度低,缺乏创新改造。国内外船舶电压频率不同,岸电系统既要变频又要变压会出现接电故障。第二,现有补贴政策多对港口进行建设补贴、对船舶进行电费补助,而忽略船舶受电设施改造成本高昂以及老旧船舶不具备改造条件等。因此,为了实现“3060”目标,有必要在不同时期实施不同的减排政策,所以政策之间的对比分析尤为重要。本文加入了针对老旧船舶改造难度大的创新补贴,将补贴政策与碳交易政策形成的双参政策与纯补贴政策进行对比研究,从创新水平、港航服务价格以及利润上进行对比分析。

表 1 中国主要港口岸电补贴政策

Tab. 1 China's main port electricity subsidy policy

城市	对港口补贴	对船舶补贴
深圳	建设补贴:对港口已建成并通过验收的岸电设施按不超过项目建设费用 30% 的标准资助 运营补贴:对港口岸电设施因接入电网而发生的供电需电量进行全额补贴	给予受电设施改造的深圳籍货物运输船舶 30% 改造费用资助
上海	建设补贴:对通过竣工满足要求的岸电项目给予 30% 岸电建设补贴,港口建设费按照 1:1 的补贴比例给予补贴 运营补贴:进行电费差价补贴与岸电设施运行维护成本补贴	岸电服务费采用与新加坡普氏(PLATTS)公开市场的船用燃料油(Marine Diesel Oil, MDO)价格相挂钩的方式确定
厦门	建设补贴:对已经通过建设验收的港口岸电设备设施给予奖励	对港口岸电供电服务的奖励标准与新加坡普氏(PLATTS)公开市场的 380CST 船用燃料油价格挂钩的方式确定
广州	建设补贴:对已通过验收的岸电设施或电动船配套充电桩,按项目建设费用 50% 的标准资助 运营补贴:结算电费与港口企业岸电电费成本差价由政府补足	船舶靠港期间使用岸电设施,均按照 0.1 元/kW·h 的优惠电价结算电费

在研究方法方面,博弈论是研究利益主体相互影响与制衡关系的工具,相较于其他研究方法,其能研究各个利益相关方的行为改变和可能的决策结

果,广泛应用在港航减排主体之间的交互博弈关系中,尤其是岸电的推广研究。周海英等<sup>[9]</sup>构建补贴下港口和船舶采用岸电减排的博弈模型,并分析了

分散决策与集中决策下港航减排决策问题。WANG 等<sup>[10]</sup>建立用于优化补贴方案的政府、港口和船舶 Stackelberg 模型,得出船舶补贴应优先港口补贴。ZHOU<sup>[11]</sup>研究补贴政策下港航企业的排放控制技术决策以及客户低碳偏好,构建三个博弈模型比较低硫燃油与岸电的相关指标。使用博弈论研究岸电,多数从岸电与低硫燃油对比、分散决策与集中决策对比角度分析,而本文结合实际情况考虑以港口为主导、航运公司跟随的供应链系统,运用 Stackelberg 博弈理论将补贴与碳交易政策结合,并与纯补贴政策进行对比研究,为减排政策的实施、岸电使用率提高提供理论借鉴。

通过对岸电背景以及文献分析可得,第一:当前的岸电研究多从技术、经济以及减排能力角度分析其可行性,涉及岸电的减排政策大多分析单一政策的影响,极少进行政策之间的对比研究。第二:补贴政策中极少对岸电设施进行创新改造补贴,忽略了老旧船舶岸电改造难度大的问题。为解决上述问题,本文以岸电为背景,构建港口、航运公司的 Stackelberg 博弈模型,模型中加入补贴效率更高的创新补贴,将补贴与碳交易政策组合的双参政策与纯补贴政策进行对比分析,并通过实际数据与公式推导,从创新水平、港航服务价格以及利润角度讨论岸电减排政策对港口、航运公司产生的影响,并结合数据仿真结果为岸电技术普及以及政府减排政策的实施提供建议。

## 1 问题描述与假设

### 1.1 问题描述

从经济角度分析,港口、航运公司需要进行岸电设施的投资与创新改造,涉及的成本诸如:运营、维护、保养等。港航企业为了利益最大化,对岸电使用的积极性往往不高。政府作为监管方可以采取政策法规对利益主体减排决策产生影响。那么,针对补贴、双参两种政策下,政府如何进行政策的选择、哪种政策可以维持港航企业利润最大化是需要重点研究的问题。本文针对以上难点,重点研究两种政策下港口和航运公司的博弈问题以及需求量、创新水平、服务价格、利润等指标,并探讨两种政策对港航企业减排策略的影响。表 2 汇总了相关参数和决策变量。

### 1.2 模型假设

假设所有参与者都是理性的,同时假设如下:

1)港口和航运公司具有完全信息,是理性博弈参与方。

表 2 参数说明

Tab. 2 Parameter description

参数	含义
$q$	货物的需求量
$a$	市场容量
$b$	价格敏感系数
$\varepsilon$	客户需求对减排力度的敏感系数
$\beta$	岸电设施的创新补贴力度
$t_1$	船舶装卸单位货物的靠港停泊时间
$t_2$	靠港时岸电设备单位货物连接准备时间
$\pi_s$	航运公司利润
$\pi_p$	港口利润
$n$	船舶的创新成本系数
$h$	港口的创新成本系数
$p_a$	副机燃油价格
$\lambda$	副机利用率
$r$	副机燃油消耗率
$w_a$	副机功率
$p_m$	船舶向港口购买的岸电价格
$p_n$	港口向电力公司购买的岸电价格
$Q$	岸电功率
$t$	碳排放交易价格
$m_e$	运输单位货物产生的初始碳排放量
$\varphi_e$	碳减排影响系数
$k$	碳排放配额
决策变量	含义
$p$	航运公司单位货物运费
$w$	港口单位货物服务价格
$e$	供应链绿色创新水平

2)为了简化模型,假设港口和航运公司各自的绿色创新水平  $e$  和补贴比例  $\beta$  相同。

3)参考 LI 等<sup>[12]</sup>研究,绿色补贴分为创新补贴和产品补贴,从补贴效率最大化角度看,绿色创新补贴总是优于绿色产品补贴。因此本文设定  $\beta$  比例的岸电创新补贴。

4) $a, b, \varepsilon, n, h, t, e$  均大于 0。

5)《上海市 2021 年碳排放配额分配方案》:船舶的碳收集难度大,仅有港口被纳入碳排放配额企业名单。本文依据现实情况,仅将港口纳入碳交易政策。

6) 在船舶到港期间, 货物需求不发生改变。

7) 为了成本的可追述性, 假设港口的电价利润  $(p_m - p_n)$  为 1, 外生参数赋值不影响决策。这与 WANG 等<sup>[13]</sup> 研究保持一致, 其将光伏发电价格与火力发电价格差值设为 1, 分析了光伏发电行业补贴政策退出博弈问题。

## 2 Stackelberg 博弈模型的构建

Stackelberg 博弈是一个两阶段完全信息博弈, 主要思想是双方根据对方可能的策略选择使自己利益最大化的决策。其中, 先做决策为主导者, 后做决策为跟随者。近年来, 港口对供应链上下游布局, 迫使航运公司因货主需求将港口纳入航运网络。例如, 全球最大港口运营商之一 DP World 与 AD Ports Group 并购多家航运企业提高货物运输速度。相较于其他研究方法, Stackelberg 博弈模型能结合实际需求, 将港口作为主导者, 航运公司作为跟随者, 分析政策对双方的影响, 并得出使其利益最大化的均衡解。本文研究岸电技术下, 补贴以及双参政策如何影响港航企业。岸电的改造创新离不开港航企业的共同参与, 所以补贴政策对港航双方均提供创新补贴, 用于解决老旧船舶岸电改造以及船舶接电设备覆盖等问题。结合实际情况并借鉴 YANG 等<sup>[14]</sup>, 本文碳交易政策的实施对象为港口。基于 Stackelberg 理论, 由单个港口与船公司组成的两级海运服务供应链中, 将港口作为主导者、航运公司作为跟随者, 跟随者根据主导者的行为调整决策。政府首先制定针对岸电的减排政策, 在观测到政策后, 港航双方决定单位服务价格、供应链绿色创新水平以追求最大利润。双参政策下利益方的关系, 如图 1 所示。

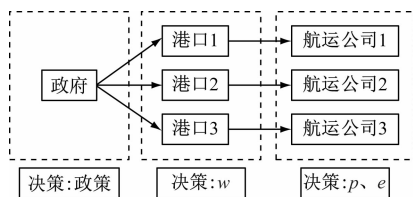


图1 双参政策下利益方关系

Fig. 1 Stakeholder relationship diagram under the dual participation policy

### 2.1 补贴政策影响下的决策模型: 基础情形

采取补贴政策时, 港航企业对岸电进行创新投入, 政府给予  $\beta$  比例的创新补贴。航运公司通过岸电创新投入  $\frac{ne^2}{2}$  来影响需求。根据 MA 等<sup>[15]</sup> 研究方法, 假设需求  $q_1$  是市场服务价格和创新水平的线性函数。即客户需求随着航运公司运费的升高而降

低, 随着绿色创新水平的提高而升高。补贴政策下需求函数表达式为:

$$q_1 = a - bp + \varepsilon e \quad (1)$$

船舶靠港连接岸电期间由副机提供电力。连接后岸电代替副机发电, 并支付港口电费, 航运公司利润函数  $\pi_s$  为:

$$\pi_s = (p - w)q_1 - \frac{(1 - \beta)n}{2}e^2 - 10^{-6}l_2q_1p_a\lambda r w_a - Q(l_1 - l_2)q_1p_m \quad (2)$$

其中,  $(p - w)q_1$  为航运公司赚取的服务利润,  $\frac{(1 - \beta)n}{2}e^2$  为政府给予航运公司  $\beta$  比例创新补贴后的创新成本, 借鉴 ZIS<sup>[16]</sup> 靠港燃油消耗表达式,  $10^{-6}l_2q_1p_a\lambda r w_a$  为船舶靠港接电准备期间副机发电的燃油成本,  $Q(l_1 - l_2)q_1p_m$  为船舶使用岸电系统支付的用电成本。

港口的利润函数  $\pi_p$  为:

$$\pi_p = wq_1 - \frac{(1 - \beta)h}{2}e^2 + Q(l_1 - l_2)q_1(p_m - p_n) \quad (3)$$

其中,  $wq_1$  为港口货物装卸的利润,  $\frac{(1 - \beta)h}{2}e^2$  为政府给予港口  $\beta$  比例创新补贴后创新成本,  $Q(l_1 - l_2)q_1(p_m - p_n)$  为港口收取的岸电费用。

### 2.2 双参政策影响下的决策模型: 对比情形

采取碳交易政策时, 将港口企业纳入碳交易市场并设定碳排放限额。当港口区域碳实际排放额超过给定配额, 需要在碳交易市场购买碳额度。当港口区域碳实际排放额低于给定配额, 可以选择在碳交易市场出售多余碳额度, 而碳交易价格是由碳交易市场外在决定的。在模型中, 假设政府给定碳排放配额  $k$ , 港航企业通过岸电技术减少港口区域的碳排放。借鉴 LI 研究, 货主可以选择绿色或非绿色方式运输, 碳交易政策会促进货主选择更为绿色低碳的运输方式, 进而提高货物的需求量。政府双参政策下需求函数表达式为:

$$q_2 = a - bp + \varepsilon e + t \quad (4)$$

航运公司的利润函数  $\pi_s$  为:

$$\pi_s = (p - w)q_2 - \frac{(1 - \beta)n}{2}e^2 - 10^{-6}l_2q_2p_a\lambda r w_a - Q(l_1 - l_2)q_2p_m \quad (5)$$

其中,  $(p - w)q_2$  为航运公司为货主服务的利润,  $\frac{(1 - \beta)n}{2}e^2$  为政府给予航运公司  $\beta$  比例创新补贴后的创新成本,  $10^{-6}l_2q_2p_a\lambda r w_a$  为船舶靠港接电准备期间副机发电产生的燃油成本,  $Q(l_1 - l_2)q_2p_m$  为船舶

使用岸电系统后支付的用电成本。

港口的利润函数  $\pi_p$  为:

$$\pi_p = wq_2 - \frac{(1-\beta)h}{2}e^2 - [(m_e - \varphi_e)q_2 - k]t + Q(l_1 - l_2)q_2(p_m - p_n) \quad (6)$$

其中,  $wq_2$  为港口进行货物装卸带来的利润,  $\frac{(1-\beta)h}{2}e^2$  为政府给予港口  $\beta$  比例创新补贴后的创新成本,  $[(m_e - \varphi_e)q_2 - k]t$  为港口采用岸电技术后进行碳交易的成本或收入,  $Q(l_1 - l_2)q_2(p_m - p_n)$  为港口岸电设施与船舶连接后向船舶收取的用电费用。

### 3 模型求解与数值仿真

#### 3.1 Stackelberg 模型的求解

根据 Stackelberg 理论,探讨两种博弈模型:补贴政策、双参政策对港航企业的影响,并分别用上标 1,2 表示。本文以港口作为博弈主导者,航运企业作为跟随者。博弈主要分为两个阶段:第一阶段:港口根据不同政策决定单位服务价格,第二阶段:航运企业根据港口决策决定货物运费与供应链绿色创新

水平。本文采用逆向法求解不同情形下港航企业的服务价格、利润、供应链绿色创新水平等,并对两种情形下的不同参数进行分析。表 3 与表 4 为两种政策下相关参数的均衡解。

表 3 补贴政策下相关参数的均衡解

Tab.3 Equilibrium solution of related parameters under two policies

补贴政策	
$w^1$	$\frac{a - 3Q(l_1 - l_2) - 10^{-6}l_2p_a\lambda rw_a}{2}$
$p^1$	$\frac{3a + Q(l_1 - l_2)}{4} - \frac{\varepsilon^2[a - Q(l_1 - l_2) - 10^{-6}l_2p_a\lambda rw_a]}{4(\varepsilon^2 + 2\beta - 2)} + \frac{10^{-6}l_2p_a\lambda rw_a}{4}$
$e^1$	$-\frac{\varepsilon[a - Q(l_1 - l_2) - 10^{-6}l_2p_a\lambda rw_a]}{\varepsilon^2 + 2\beta - 2}$
$\pi_p^1$	$\frac{(\beta - 1)[a - Q(l_1 - l_2) - 10^{-6}l_2p_a\lambda rw_a]^2}{4(\varepsilon^2 + 2\beta - 2)}$
$\pi_s^1$	$\frac{(\beta - 1)[a - Q(l_1 - l_2) - 10^{-6}l_2p_a\lambda rw_a]^2}{8(\varepsilon^2 + 2\beta - 2)}$

表 4 双参政策下相关参数的均衡解

Tab.4 Equilibrium solution of relevant parameters under the dual parameter policy

双参政策	
$w^2$	$\frac{a + t - 3Q(l_1 - l_2) + t(m_e - \varphi_e) - 10^{-6}l_2p_a\lambda rw_a}{2}$
$p^2$	$\frac{3(a + t) + Q(l_1 - l_2) + t(m_e - \varphi_e) + 10^{-6}l_2p_a\lambda rw_a}{4} - \frac{\varepsilon^2[a + t - Q(l_1 - l_2) - t(m_e - \varphi_e) - 10^{-6}l_2p_a\lambda rw_a]}{4(\varepsilon^2 + 2\beta - 2)}$
$e^2$	$-\frac{\varepsilon[a + t - Q(l_1 - l_2) + t(\varphi_e - m_e) - 10^{-6}l_2p_a\lambda rw_a]}{2(\varepsilon^2 + 2\beta - 2)}$
$\pi_p^2$	$\frac{(\beta - 1)[a + t - Q(l_1 - l_2) + t(\varphi_e - m_e) - 10^{-6}l_2p_a\lambda rw_a]^2}{4(\varepsilon^2 + 2\beta - 2)}$
$\pi_s^2$	$\frac{(\beta - 1)[a + t - Q(l_1 - l_2) + t(\varphi_e - m_e) - 10^{-6}l_2p_a\lambda rw_a]^2}{8(\varepsilon^2 + 2\beta - 2)}$

#### 3.2 仿真与分析

为了更好地验证模型与分析命题,本节通过数学推导并使用 Matlab 对模型部分进行数值模拟与仿真,有利于观察不同政策对港航企业的决策影响。命题的设置原因与预期结果,如表 5 所示,相关的数据来源,如表 6 所示。其中市场容量与价格敏感系数参考吴俊妮等<sup>[17]</sup>,碳减排影响系数与辅机相关参数参考 YANG 与 ZIS,补贴力度参考《深圳市绿色低碳港口建设补贴资金管理暂行办法》,碳价取自上海环境能源交易所,结合实际情况,具体模型参数设

置、来源说明如下。

##### 3.2.1 创新水平比较分析

1) 命题 1:不同政策下创新水平满足下列关系:

$$\begin{aligned} \frac{\partial e^1}{\partial a} > 0, \frac{\partial e^1}{\partial \varepsilon} > 0, \frac{\partial e^1}{\partial \beta} > 0, \frac{\partial e^1}{\partial l_2} > 0, \\ \frac{\partial e^2}{\partial a} > 0, \frac{\partial e^2}{\partial \varepsilon} > 0, \frac{\partial e^2}{\partial m_e} < 0, \frac{\partial e^2}{\partial \beta} > 0, \\ \frac{\partial e^2}{\partial l_2} > 0, \frac{\partial e^2}{\partial t} < 0 \end{aligned}$$

命题 1 表明,供应链绿色创新水平与市场容量  $a$ 、货主对减排力度的敏感系数  $\varepsilon$ 、补贴比例  $\beta$  以及

表5 命题设置原因与预期结果

Tab.5 Proposition sets cause and expected effect

命题	设置原因	预期结果
命题1,3,5	分析比较决策变量 $e, w, p$ 对有关参数的影响	得出决策变量与市场容量 $a$ 、货主对减排力度敏感系数 $\varepsilon$ 、补贴比例 $\beta$ 、船舶接电准备时间 $l_2$ 、初始碳排放量 $m_e$ 、碳交易价格 $t$ 的关系
命题2,4,6	数值仿真与数学推导两种角度比较不同政策下决策变量 $e, w, p$ 对碳排放量的影响	得出不同初始碳排放量下两种政策中决策变量的对比关系

表6 模型参数数值设置

Tab.6 Model parameter value settings

参数符号	数值	来源
$a$	500	
$b$	0.2	
$l_1$	$2 \times 10^{-1} \text{h}$	吴俊妮,等 <sup>[17]</sup>
$l_2$	$2 \times 10^{-1} \text{h}$	
$w_a$	1.97 kW	
$\lambda$	0.6	
$p_a$	5 000 元	ZIS <sup>[16]</sup>
$r$	260	
$Q$	1.32 kW	
$\beta$	0.3	《深圳市绿色低碳港口建设补贴资金管理办》
$\varepsilon$	0.3	模型设置上海环境能源交易所
$t$	48.4 元/t	
$\varphi_e$	100	YANG,等 <sup>[14]</sup>

船舶接电准备时间  $l_2$  成正比关系,而在双参政策下与初始碳排放量  $m_e$ 、碳交易价格  $t$  呈反比关系。考虑到企业成本问题,在涉及碳交易政策时,港航企业针对岸电技术的创新程度会下降。所以,政府可以扩大航运市场规模,提高社会低碳意识以及增加对岸电基础设施的补贴力度,进而提高港航供应链的绿色创新水平,进一步增加对于岸电设施的投入,提升岸电技术成熟度与普及率。

2) 命题2: 本文设置补贴政策为基础情形,将双参政策的创新水平对比分析可得:

$$e^2 - e^1 = \frac{\varepsilon(a - t - Q(l_1 - l_2) - t(\varphi_e - m_e) - 10^{-6}l_2p_a\lambda r w_a)}{2(\varepsilon^2 + 2\beta - 2)} \quad (7)$$

令其等于0,可得关于  $m_e$  的交点:

$$m_e^1 = \varphi_e - \frac{a - t - Q(l_1 - l_2) - 10^{-6}l_2p_a\lambda r w_a}{t} \quad (8)$$

由式(7)、式(8)可得命题2:

当  $m_e < m_e^1$  时,  $e^2 > e^1$ ; 当  $m_e > m_e^1$  时,  $e^2 < e^1$ 。

结合图2与命题2表明,当  $m_e \geq \varphi_e - \frac{a - t - Q(l_1 - l_2) - 10^{-6}l_2p_a\lambda r w_a}{t}$  时,即初始碳排放水平远大于岸电技术减排影响水平时,政府补贴政策下的创新水平大于双参政策,即岸电技术不成熟时,港航企业在政府的补贴政策下更倾向于响应政策号召努力提高岸电技术水平;当  $m_e \leq \varphi_e - \frac{a - t - Q(l_1 - l_2) - 10^{-6}l_2p_a\lambda r w_a}{t}$  时,即随着岸电技术减排能力不断成熟可以减少在港船舶大部分碳排放,政府补贴政策相较于双参政策对创新水平的促进作用减小。所以在减排初期,补贴政策更适合港航创新水平的提高,而在岸电技术成熟后,政府可以施加一定的惩罚措施督促港航业持续研发新技术进行减排降碳。

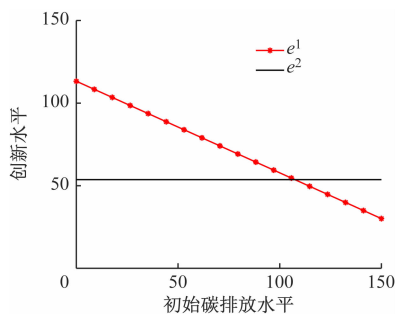


图2 两种政策初始碳排放水平与创新水平关系

Fig.2 The relationship between the initial carbon emission level and innovation level of two policies

### 3.2.2 价格比较分析

1) 命题3: 不同政策下港口服务价格满足下列关系:

$$\frac{\partial w^1}{\partial a} > 0; \text{当 } Q \geq \frac{10^{-6}p_a\lambda r w_a}{3} \text{ 时, } \frac{\partial w^1}{\partial l_2} \geq 0;$$

$$\text{当 } Q < \frac{10^{-6}p_a\lambda r w_a}{3} \text{ 时, } \frac{\partial w^1}{\partial l_2} < 0, \frac{\partial w^2}{\partial a} > 0;$$

$$\text{当 } Q \geq \frac{10^{-6} p_a \lambda r w_a}{3} \text{ 时, } \frac{\partial w^2}{\partial l_2} \geq 0;$$

$$\text{当 } Q < \frac{10^{-6} p_a \lambda r w_a}{3} \text{ 时, } \frac{\partial w^2}{\partial l_2} < 0,$$

$$\frac{\partial w^2}{\partial m_e} > 0, \frac{\partial w^2}{\partial t} > 0;$$

命题3表明,港口服务价格与市场容量  $\alpha$ 、初始碳排放量  $m_e$ 、碳交易价格  $t$  成正比关系,而当岸电功率  $Q \geq \frac{10^{-6} p_a \lambda r w_a}{3}$  时,港口服务价格随着船舶靠港接电准备时间的增加而增加;当  $Q < \frac{10^{-6} p_a \lambda r w_a}{3}$

时,港口服务价格随着船舶靠港接电准备时间的增加而降低。即在以港口主导的港航供应链中,在岸电技术成熟后( $Q \geq \frac{10^{-6} p_a \lambda r w_a}{3}$ ),岸电的服务效率进一步提高,港口更倾向于提高服务价格以获取更多的利润。因此,在岸电技术达到一定水平后,政府可以向船舶进行一定的电费补助或者规范电费价目表,防止船舶用电成本高于燃油成本而造成岸电使用率下降的结果。

2) 命题4:与命题2类似,分析不同政策下港口的服务价格:

$$w^2 - w^1 = \frac{t(m_e - \varphi_e + 1)}{2} \quad (9)$$

令其等于0,可得关于  $m_e$  的交点:

$$m_e = \varphi_e - 1 \quad (10)$$

由式(9)、式(10)可得命题4:

当  $m_e < \varphi_e - 1$  时,  $w^2 < w^1$ ; 当  $m_e \geq \varphi_e - 1$  时,  $w^2 \geq w^1$ 。

结合图3和命题4表明,在港口初始碳排放量小于减排影响水平时,双参政策下港口服务价格小于补贴政策对应值,根本原因在于:在使用岸电技术后,港区的碳排放总量下降,港口无需支付或支付较少的碳排放成本,而在初始碳排放量高于减排影响系数时,港口因为双参政策需要支付一定的碳排放成本。基于现实情况,政府可以针对第一、二、三产业制定不同的碳排放配额,减轻减排措施不成熟初期企业减排的资金压力。

3) 命题5:

$$\text{当 } Q \geq \frac{10^{-6} p_a \lambda r w_a (\varepsilon^2 + 2\beta - 2)}{\varepsilon^2 + 2\beta - 1} \text{ 时, } \frac{\partial p^1}{\partial l_2} \leq 0;$$

$$\text{当 } Q < \frac{10^{-6} p_a \lambda r w_a (\varepsilon^2 + 2\beta - 2)}{\varepsilon^2 + 2\beta - 1} \text{ 时, } \frac{\partial p^1}{\partial l_2} > 0,$$

$$\frac{\partial p^1}{\partial a} > 0, \frac{\partial p^1}{\partial \beta} > 0, \frac{\partial p^2}{\partial a} > 0;$$

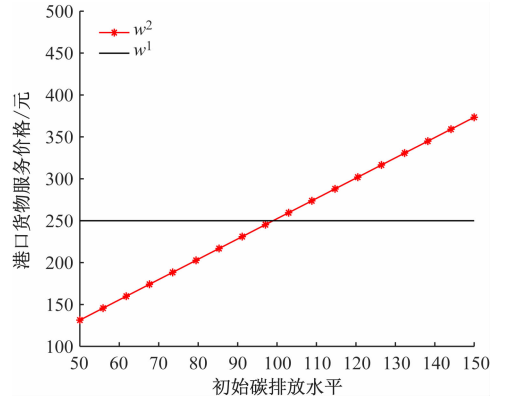


图3 两种政策下初始碳排放水平与港口服务价格关系  
Fig. 3 The relationship between initial carbon emission level and port service price under two policies

$$\text{当 } Q \geq \frac{10^{-6} p_a \lambda r w_a}{\varepsilon^2 + \beta - 1} \text{ 时, } \frac{\partial p^2}{\partial l_2} \leq 0;$$

$$\text{当 } Q < \frac{10^{-6} p_a \lambda r w_a}{\varepsilon^2 + \beta - 1} \text{ 时, } \frac{\partial p^2}{\partial l_2} > 0;$$

$$\text{当 } m_e \geq \varphi_e - \frac{\varepsilon^2 + 3\beta + 3}{\varepsilon^2 + \beta + 1} \text{ 时, } \frac{\partial p^2}{\partial t} \geq 0;$$

$$\text{当 } m_e < \varphi_e - \frac{\varepsilon^2 + 3\beta + 3}{\varepsilon^2 + \beta + 1} \text{ 时, } \frac{\partial p^2}{\partial t} < 0;$$

$$\frac{\partial p^2}{\partial m_e} > 0.$$

命题5表明:航运公司单位运费与市场规模、补贴比例、初始碳排放水平成正比关系,而当  $Q \geq \frac{10^{-6} p_a \lambda r w_a}{\varepsilon^2 + \beta - 1}$  时,即岸电技术较为成熟时,单位运费会随着接电时间的增加而减少,根本原因在于接电时间越长,在港船舶的燃油消耗成本越低,总利润越高。即由港口主导的供应链体系中,航运公司将港口增加的服务费用转嫁至货主,而随着航运公司总利润的增加,倾向于降低货物的运费而提高货运量;

当  $Q < \frac{10^{-6} p_a \lambda r w_a}{\varepsilon^2 + \beta - 1}$  时,单位运费随着接电时间的增加而增加,即岸电功率不能满足船舶在港期间的使用甚至会影响船舶的船期,船舶倾向于选择燃油发电方式。运费还会受到碳交易价格的影响,当  $m_e \geq \varphi_e - \frac{\varepsilon^2 + 3\beta + 3}{\varepsilon^2 + \beta + 1}$  时,即初始碳排放量较高或岸电减排效果不明显时,运费随着碳交易价格的增加而增加;

而当  $m_e < \varphi_e - \frac{\varepsilon^2 + 3\beta + 3}{\varepsilon^2 + \beta + 1}$  时,即岸电技术成熟后,运费随着碳交易价格的增加而减少。

4) 分析不同政策下航运公司的服务价格:

$$p^2 - p^1 = \frac{t(3 + m_e - \varphi_e)}{4} - \frac{t\varepsilon^2(1 - m_e - \varphi_e)}{4(\varepsilon^2 + 2\beta - 2)} \quad (11)$$

令其等于0,可得关于 $m_e$ 的交点:

$$m_e^3 = \frac{(3 - \varphi_e)(1 - \beta) - \varepsilon^2}{\varepsilon^2 + \beta - 1} \geq 0 \quad (12)$$

由式(11)、式(12)可得命题6:当 $m_e \geq 0$ 时, $p^2 > p^1$ 。

结合图4和命题6可得,在初始碳排放量大于0时,双参政策下的航运公司服务费用总是高于补

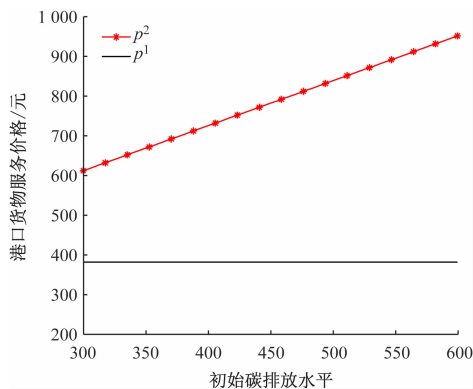
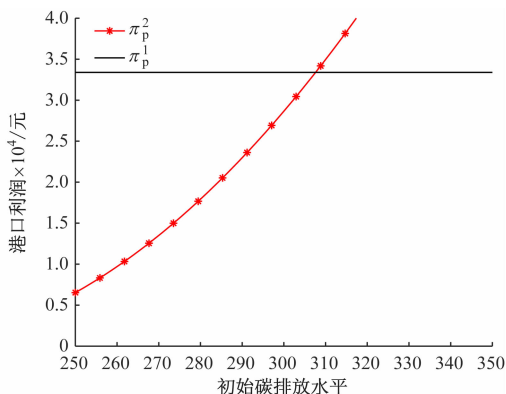
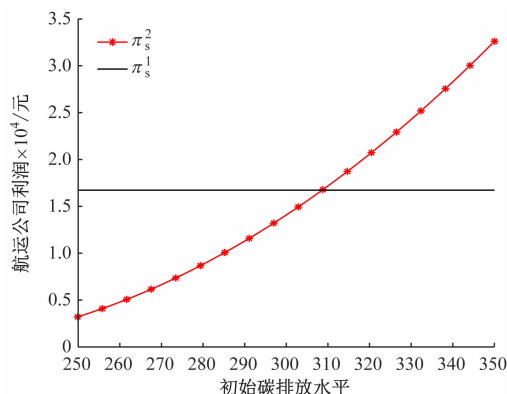


图4 两种政策下初始碳排放水平与航运公司运费关系

Fig. 4 The relationship between initial carbon emission level and shipping company freight under two policies



(a) 港口利润对比



(b) 航运公司利润对比

图5 两种政策下初始碳排放水平与利润关系

Fig. 5 The relationship between initial carbon emission level and profit under two policies

## 4 结束语

本文研究岸电背景下,针对港口与航运公司实施补贴与碳交易双参政策之间的比较分析,分别探究了两种政策对港航企业的创新水平、服务价格以及利润的影响。通过仿真试验结果可得:政府可以通过扩大航运市场规模,提高社会低碳意识以及增加对岸电基础设施的补贴力度,提高港航供应链的绿色创新水平,促进岸电技术成熟度与普及率。在减排初期,补贴政策更适合港航创新水平与岸电使用率的提高;而在岸电技术成熟后,政府可以施加一定的惩罚措施督促港航业持续研发新技术进行减排降碳。政府可以通过规范价目表以及补助等方式防

止出现岸电使用率下降的情况。双参政策中的碳交易政策会将港口的一部分成本转嫁至航运公司并持续影响航运公司的服务定价,航运公司也倾向于将这部分减排成本通过提高单位运费的方式转嫁给货主进而保证企业有可持续的利润。

### 3.2.3 利润比较分析

结合图5可分析出,随着初始碳排放量的增加,在双参政策下港口和航运公司的利润进一步增大,且港口的增长幅度明显高于航运公司。由于船舶的碳收集难度较大,目前只针对港口采取碳交易政策,结合命题5和命题6,港口会进一步提高服务费用弥补高额的碳排放支出与创新投入,而航运公司进一步提高运费将港口服务费用、创新投入转嫁至货主。在岸电较为成熟后,双参政策对于港航利润的促进作用小于补贴政策,可以得出:政策对于港航企业的利润影响较大,在岸电技术不成熟、普及率较低时,补贴政策有利于岸电的推广,而当船、港岸电受电设施成熟后,双参政策可以作为奖惩措施持续督促港航企业进一步减排降碳。

止出现岸电使用率下降的情况。

不论实施哪一种政策,港航企业均倾向于将额外成本转嫁给供应链下游,若单纯施加碳交易政策,随着碳价的不断提高将给整个供应链系统造成冲击,进一步增加港航企业的额外成本,港航企业不得不提高服务费用将成本转嫁出去,而根据需求函数可得出服务价格的提高又将造成市场需求量的降低,进而导致市场低迷。当碳交易政策与补贴共同实施时,既可以提高岸电技术的使用率,又可以降低港航企业的减排成本,提高供应链利润,实现环境与经济双赢局面。

在现实情况中,岸电使用率不仅受到政策的影响,还会受诸如:船舶靠港使用岸电燃油减少量不及

靠港船舶实际消耗量;岸电设施建设仅减少了空气污染物的排放并没有为企业带来实际利润;船舶接电断电准备时间可能远超停泊时间等因素影响。未来可以改变货物需求量,增加对不同的减排政策进行对比分析,为政府提升岸电使用率提供有力的理论支撑与决策建议。

### 参 考 文 献

- [1] ALAMOUSH A S, BALLINI F, ÖÇER A I. Ports' technical and operational measures to reduce greenhouse gas emission and improve energy efficiency: a review [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2020, 160: 111508.
- [2] ZIS T, NORTH R J, ANGELOUDIS P, et al. Evaluation of cold ironing and speed reduction policies to reduce ship emissions near and at ports [J]. *Maritime Economics & Logistics*, 2014, 16(4): 371-398.
- [3] 港口岸电布局方案 [J]. *集装箱化*, 2017, 28(9): 20-22.  
Port shore power layout plan [J]. *Containerization*, 2017, 28(9): 20-22. (in chinese)
- [4] 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.  
ZHANG L. Maritime carbon tax and the green development path of China's shipping industry [J]. *Navigation of China*, 2018, 41(1): 113-116. (in chinese)
- [5] LEE T C, CHANG Y T, LEE P T W. Economy-wide impact analysis of a carbon tax on international container shipping [J]. *Transportation Research Part A: Policy & Practice*, 2013, 58: 87-102.
- [6] ZHONG H L, HU Z W, YIP T L. Carbon emissions reduction in China's container terminals: optimal strategy formulation and the influence of carbon emissions trading [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 219: 518-530.
- [7] WANG Y B, DING W Y, DAI L, et al. How would government subsidize the port on shore side electricity usage improvement? [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 278: 123893.
- [8] YIN M, WANG Y, ZHANG Q. Policy implementation barriers and economic analysis of shore power promotion in China [J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2020, 87.
- [9] 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.  
ZHOU H Y, DENG Y Y. Research on decision making for coastal power emission reduction under the "dual carbon" goal [J]. *Science and Technology Management Research*, 2022, 42(11): 229-235. (in chinese)
- [10] WANG Y B, GUO S Q, DAI L, et al. Shore side electricity subsidy policy efficiency optimization: from the game theory perspective [J]. *Ocean and Coastal Management*, 2022, 228.
- [11] ZHOU H Y. Decisions on technologies for emissions control in port areas under subsidy and low-carbon preferences of customers [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2022, 2022.
- [12] LI Y N, TONG Y, YE F, et al. The choice of the government green subsidy scheme: innovation subsidy vs. product subsidy [J]. *International Journal of Production Research*, 2020, 58(16): 4932-4946.
- [13] WANG J L, GENG X, HU H, et al. A game - theory analysis of the subsidy withdrawal policy for China's photovoltaic power generation industry [J]. *IET Renewable Power Generation*, 2021, 15(13): 3014-3024.
- [14] YANG L, CAI Y J, WEI Y L, et al. Choice of technology for emission control in port areas: a supply chain perspective [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 240: 118105.
- [15] 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.
- [16] ZIS T P V. Prospects of cold ironing as an emissions reduction option [J]. *Transportation Research Part A: Policy & Practice*, 2019, 119: 82-95.
- [17] 吴俊妮, 吕靖, 林驿. 基于三阶段博弈模型的船舶使用岸电条件下港口减排策略研究 [J]. *数学的实践与认识*, 2020, 50(7): 27-37.  
WU J N, LV J, LIN Y. Research on port emission reduction strategies under the condition of ship using shore electricity based on a three stage game model [J]. *Mathematical Practice and Understanding*, 2020, 50(7): 27-37. (in chinese)