

基于多式联运视角的港口补贴机制研究

曲晨蕊, 曾庆成, 鞠惠竹

(大连海事大学航运经济与管理学院, 辽宁 大连 116026)

摘要: 以港口为核心的多式联运系统之间存在激烈竞争, 为了解决干支线运输系统高效运营和协调的问题, 在考虑托运人、支线承运人、港口、干线承运人竞争与合作关系的基础上, 构建了港口补贴模型, 提出了一种实现系统协调的港口补贴激励策略. 研究表明, 干线港的补贴策略影响市场运价均衡、支线承运人间竞争, 以及干支线运输系统整体效益. 选取干线承运人作为补贴对象, 有利于港口的市场份额和运输系统的总收益, 而对托运人提供补贴, 则能更有效地降低市场运价. 因此, 在考虑系统内各环节运营成本的基础上, 港口可以制定最优补贴策略以实现阶段性发展目标.

关键词: 集装箱运输; 支线承运人; 港口补贴

中图分类号: U691

文献标识码: A

文章编号: 1000-5781(2021)04-0509-15

doi: 10.13383/j.cnki.jse.2021.04.006

Port subsidy policy from the perspective of multimodal transportation system

Qu Chenrui, Zeng Qingcheng, Ju Huizhu

(School of Maritime Economics and Management, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: There is fierce competition among port-oriented main-feeder transport systems. In order to improve the connecting efficiency and coordination between main lines and feeder lines, a model of port subsidy is developed, considering the competition and cooperation among multiple participants in the multimodal transport system, such as shippers, feeder carriers, port authorities, and main line carriers. Moreover, the optimal subsidy policies are provided and compared. Results indicate that subsidy policies have significant impacts on the competition relationship and market equilibrium state. Subsidizing main line carriers improves the market share of ports and net revenue of the whole transport system. Meanwhile, subsidy to shippers can reduce the equilibrium freight rate. Therefore, port authorities should design a customized strategy for phased development goals based on the various operational costs of the participants in the multimodal transport system.

Key words: container shipping; feeder carriers; port subsidy

1 引言

全球经济一体化和国际贸易的发展推动了国际集装箱运输的快速发展. 迄今为止, 全球集装箱班轮航线的运营范围已经覆盖了世界96%以上的港口, 形成了干支线衔接、规模庞大、可达性强的集装箱班轮网络. 港口是国际物流网络的关键节点, 是影响国际运输与供应链效率的重要因素^[1]. 随着船舶大型化的不断发

收稿日期: 2019-02-11; 修订日期: 2021-06-17.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71671021; 72101043); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(3132021265).

展,港口之间的竞争日趋激烈,港口之间的竞争正逐步演变为以港口为核心的多式联运系统或港口供应链之间的竞争^[2],班轮航线结构也由传统的多点挂靠向轴辐式网络(干支线中转)发展^[3-5]。从班轮运输网络、多式联运系统的角度研究港口竞争受到越来越多的关注。以港口为核心的干支线运输系统是双向物流系统,由支线运输、港口作业、干线运输等环节构成,涉及托运人、支线港口、支线承运人、干线港口、干线承运人等多个主体,可以为托运人提供全程运输服务。港口衔接着干线和支线运输,港口供应链内部多种运输方式的整合能够提升供应链竞争力^[6-9]。如何吸引支线货源,提升干支线运输系统效率成为港口竞争的关键问题^[10]。

在多式联运系统中,多方市场参与者的定价决策行为相互影响^[11],系统内各主体的博弈、港口间的竞争等问题得到了广泛的研究^[12-18]。Ishii等^[19]通过非合作博弈理论研究了港口竞争和合理收费问题。与支线承运人相比,干线承运人之间的竞争更为激烈,对港口成本更加敏感^[10]。集装箱的全程运输流程包含多个环节,影响各主体决策行为的因素也有所不同。支线网络、腹地货运量、装卸作业费、港口位置与作业效率等是影响干线承运人选择挂靠港口的主要因素。支线承运人作为衔接托运人与干线港口的关键主体,是港口和干线承运人提升市场份额的营销重点。同时,港口收费和服务质量影响托运人的选择行为,进而影响港口的腹地份额和收益^[20-24]。现有的文献多是站在单一决策主体的视角下,针对港口竞争、港口定价决策和托运人的选择行为进行研究,然而考虑单一主体的决策行为对多式联运系统整体的影响也是十分必要的。此外,干线港口作为多式联运系统中的关键节点,其营销策略不但影响自身货量和收益,还会产生连锁效应,影响系统其他主体(托运人、干支线承运人)的选择行为。有学者研究政府补贴^[25]、收益共享^[26]、数量折扣^[27]、返利与惩罚^[28]、回购契约^[29,30]等激励机制在供应链管理领域的适用性和有效性,针对港口当局/政府激励机制的定量分析有待进一步研究。

补贴机制作为一种宏观调控方法,以其操作简便、无偿性等特征,应用范围广,对促进多个行业的发展有积极的作用。在港航领域,港口城市纷纷出台补贴、优惠等扶植政策,以吸引箱源向干线港口聚集、促进港口吞吐量增长。福州市自2012年起,实施港口生产发展补贴政策,适度减免船舶挂靠的港口使费,对中转箱、内贸箱、外贸箱的增量均有额外补贴。2015年南京市设立港口物流发展专项资金,新增对货主企业的直接补贴项目。2017年,河北省为完善航线网络和促进“水水”中转、海铁联运等多式联运的发展,推进沿海港口集装箱运输的发展,对23家船公司共投入748.41万元补贴资金。2018年,温州港实施港口物流优惠补助,对内支线船公司给予单箱100元补贴,对国际班轮航线也给予相应补贴,同时,免收集装箱堆存费和空箱调拨费等多项优惠政策。近年来,虽然补贴激励机制在港航物流领域有所应用,但是该机制的有效性和实际效果仍有待评估。干支线运输系统中不同主体间具有复杂的竞争与合作关系,补贴对象、补贴额度、补贴方式等多个因素均会对其产生影响,港口采取补贴激励能否达到预期效果有待进一步研究。

本文以多式联运的视角,研究港口补贴激励机制的设计问题,并考虑了港口供应链之间的横向竞争关系和多主体定价决策之间的影响。为此,本文在考虑支线承运人竞争腹地货源的基础上,结合港口补贴激励机制,构建了港口补贴模型,充分分析了不同港口补贴机制对运输定价的直接影响以及对多式联运系统竞争力的间接影响。此外,基于不同的补贴对象,设计了最优港口补贴激励机制,定量分析了不同港口补贴策略对提升市场份额和多式联运系统的影响作用。通过横向对比不同港口补贴机制的效果,为评估补贴政策的有效性、构建海运领域的补贴制度提供参考和理论支撑。

2 问题描述

国际集装箱班轮运输属于产业集中度较高的行业,可以看作多寡头垄断市场^[31]。集装箱班轮运输网络是由若干干支线运输系统构成,干线港和支线港之间通过支线网络衔接,干线港和干线港之间通过干线网络连接,网络中的任一港口均可作为起运港或目的港,具有很强的可达性。本文以图1所示的干支线运输系

统为研究对象, 即由1个起运港(支线港)、1个目的港、 I 个中转港(干线港)构成, 支线港口腹地是多个干线港的交叉腹地, 干线港1, 2, ..., I 等多个港口能够对同一支线港口提供集装箱中转服务, 每个干线港由一个支线承运人服务, 托运人选择支线承运人的行为直接影响着干线港的市场份额, 一旦托运人选择了一个港口, 支线和干线承运人的选择随之确定. 在此系统中, 运输全程包括支线运输、港口作业、干线运输等三个环节. 托运人选择支线承运人, 与其签订全程运输合同; 支线承运人收取全程运费, 将货物通过支线运输至对应的干线港进行中转作业; 由干线承运人运至目的港, 支线承运人从收取的全程运费中支付干线运费.

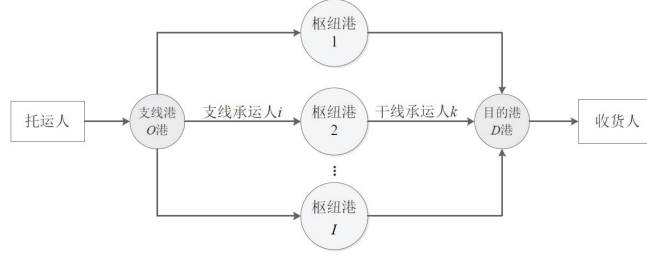


图1 多式联运运输系统

Fig. 1 Multimodal transportation system

以 Q_{od} 表示起运港O到目的港D之间的货运需求, q_{od}^i 表示支线承运人 i 的市场份额, 则有 $Q_{od} = \sum_{i=1}^I q_{od}^i$. 本文假设支线港口腹地市场的货运需求与运输价格具有线性相关关系. 本文参考Xu等^[32]等相关文献建立的运输服务需求模型, 建立干支线运输服务的反需求函数 $p_{od}^i = \alpha_{od} - \beta_{od} Q_{od}$, 其中 p_{od}^i 表示支线承运人 i 收取的由支线起运港O港运至目的港D港的全程运价, α_{od} 和 β_{od} 为市场需求参数. 假设所有支线承运人提供同质服务, 船舶始终处于适航状态, 其运输成本为 $c_i = c_0 + c_s q_{od}^i + 2c_h q_{od}^i$. 支线运输成本 c_i 由资本成本 c_0 、航运成本 $c_s q_{od}^i$ 和中转港装卸成本 $2c_h q_{od}^i$ 构成, 其中资本成本是指支线承运人为购置或租赁支线船舶所需支付的费用. 当支线承运人、港口、干线承运人三个市场主体进行分散决策时, 支线承运人 i 的净收益为 $\pi_i = p_{od}^i q_{od}^i - c_i - p_{kd}^i q_{od}^i$, 其中 p_{kd}^i 表示支线承运人 i 向干线承运人 k 支付的干线运价.

假设支线承运人能够准确把握O港腹地市场的运输需求曲线, 在已知其他支线承运人运力水平的情况下, 做出投放运力数量的决策. 令 $\frac{d\pi_i}{dq_{od}^i} = \alpha_{od} - \beta_{od} \sum_{i=1}^I q_{od}^i - \beta_{od} q_{od}^i - (c_s + 2c_h) - p_{kd}^i = 0$, 可得到支线承运人 i 的反应曲线 $q_{od}^i = \frac{1}{2\beta_{od}} \left[\alpha_{od} - \beta_{od} \sum_{i'=1, i' \neq i}^I q_{od}^{i'} - (c_s + 2c_h + p_{kd}^i) \right]$, 即支线承运人 i 投入的最优运力是关于其他支线承运人运力水平的函数, 根据竞争者的运力水平, 可以调整自己的支线运力, 以实现自身收益的最大化.

当达到均衡状态时, 各支线承运人(干线港)的市场份额及市场均衡运价分别表示为

$$q_{od}^{i*} = \frac{1}{(I+1)\beta_{od}} \left[\alpha_{od} - (c_s + 2c_h) - (I+1)p_{kd}^i + \sum_{i=1}^I p_{kd}^i \right], \quad (1)$$

$$p_{od}^{i*} = \frac{1}{I+1} \left[\alpha_{od} + I(c_s + 2c_h) + \sum_{i=1}^I p_{kd}^i \right]. \quad (2)$$

可以看出, 支线运输成本、干线港装卸成本、干线运价等三个因素对市场均衡状态产生影响. 令干线承运人干线运输成本表示为 c_k , 且假设忽略干线港的装卸操作成本, 当达到支线承运人竞争均衡状态时, 干支线运输系统的总收益为

$$\Pi = (p_{od}^{i*} - c_s - c_k) q_{od}^{i*} - c_0.$$

以一个简单的干支线系统(1个支线港、1个目的港、3个干线港)为例,分析交叉腹地市场的供求关系及市场均衡状态.图2中,需求曲线 D 描述了全程运价与市场运输需求量的变化关系.供给曲线 S_1 、 S_2 、 S_3 分别表示三个支线承运人提供的运力水平与全程运价水平的关系,则市场总供给曲线 S 表示三个支线承运人总运力与全程运价的关系.总供给曲线与需求曲线的交点为市场均衡点,即达到市场均衡状态时,均衡运价和均衡运量分别为 p_{od}^i 和 Q_{od} , q_{od}^1 、 q_{od}^2 、 q_{od}^3 表示不同支线承运人在该均衡状态下的市场份额.

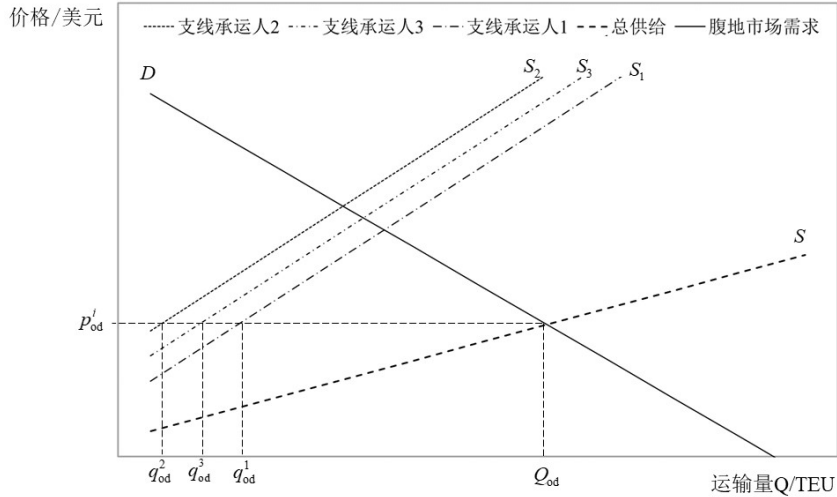


图2 无补贴的市场均衡状态

Fig. 2 Equilibrium state without subsidy policy

命题1 无补贴策略的市场均衡状态下,需求价格弹性只受到参数 α_{od} 的影响,不因参数 β_{od} 的变化而变化.市场规模越大,均衡点处的需求价格弹性越小,干线港口采用降低运价的策略来吸引货运量的效果越差.

证明 在无补贴的初始市场均衡状态 $(p_{od}^{i*}, Q_{od}^{i*})$ 下,需求价格弹性为 $|E_d| = \frac{1}{\beta} \frac{p_{od}^{i*}}{Q_{od}^{i*}} = \frac{p_{od}^{i*}}{\alpha - p_{od}^{i*}}$.假设市场反需求函数变为

$$p_{od}^i = \alpha'_{od} - \beta'_{od} Q_{od}. \quad (3)$$

此时,均衡状态下的需求价格弹性变为 $|E'_d| = \frac{1}{\beta'} \frac{p_{od}^{i*'}}{Q_{od}^{i*'}} = \frac{p_{od}^{i*'}}{\alpha - p_{od}^{i*'}}$.随着腹地市场需求函数的变化,均衡点处的需求弹性变化值

$$\Delta E_d = |E_d| - |E'_d| = \frac{\alpha'_{od} - \alpha_{od}}{(I+1)(\alpha_{od} - p_{od}^{i*})(\alpha'_{od} - p_{od}^{i*'})} \left[I(c_s + 2c_h) + \sum_{i=1}^I p_{kd}^i \right]. \quad (4)$$

由此可以看出,托运人对价格的敏感度 β_{od} 对均衡点处的需求价格弹性无影响.而腹地市场的需求规模 α_{od} 的变化则会影响均衡点处的需求价格弹性.当需求规模变大时, $\alpha'_{od} > \alpha_{od}$,则 $|E_d| > |E'_d|$,需求价格弹性变小.反之,均衡点处的需求价格弹性变大.因此,随着腹地市场运输需求规模的增大,均衡点处的需求价格弹性变小,需求量对于降价的敏感程度越小,降低运价的策略效果越不显著.

3 港口补贴模型

以干线港为核心的干支线运输系统中, 支线承运人、干线港口、干线承运人等市场主体的定价决策行为相互影响, 通过竞争达到均衡状态. 此时, 若港口采取以补贴为主的营销策略, 将改变市场中的均衡运价和运量. 干支线运输系统涉及托运人、支线承运人、干线承运人等多个主体, 港口选择不同主体作为补贴对象, 其效果也不同. 这里构建以干线承运人或托运人作为补贴对象的港口补贴模型, 验证港口补贴策略的影响.

3.1 情景1: 干线港补贴干线承运人

当干线港选择干线承运人作为补贴对象时, 干线承运人降低干线运输费率水平, 向支线承运人收取单箱干线运费 $p_{\text{kd}}^i - p_s$ (p_s 为单箱补贴额), 支线承运人的供给曲线向右移动. 在港口对上游提供补贴的情景下, 市场均衡运价为

$$p_{\text{od}}^{i(\text{up})} = \frac{1}{I+1} \left[\alpha_{\text{od}} + I(c_s + 2c_h) + \sum_{i=1}^I p_{\text{kd}}^i - p_s \right]. \quad (5)$$

采取补贴策略的干线港 i 吸引到的运输需求量为

$$q_{\text{od}}^{i(s)} = \frac{1}{(I+1)\beta_{\text{od}}} \left[\alpha_{\text{od}} - (c_s + 2c_h) - (I+1)p_{\text{kd}}^i + Ip_s + \sum_{i=1}^I p_{\text{kd}}^i \right]. \quad (6)$$

未采取补贴策略的干线港的市场份额为

$$q_{\text{od}}^{i(us)} = \frac{1}{(I+1)\beta_{\text{od}}} \left[\alpha_{\text{od}} - (c_s + 2c_h) - (I+1)p_{\text{kd}}^i - p_s + \sum_{i=1}^I p_{\text{kd}}^i \right]. \quad (7)$$

托运人需要支付的全程运费 $p_{\text{od}}^{i(\text{up})}$ 是关于 p_s 的单调递减函数. 提供补贴的干线港 i 占有的市场份额 $q_{\text{od}}^{i(s)}$ 是 p_s 的单调递增函数, 而未提供补贴干线港的市场份额 $q_{\text{od}}^{i(us)}$ 是 p_s 的单调递减函数. 即港口 i 提供的补贴额越高, 全程运价越低, 其市场份额越高, 其他港口的市场份额越低. 在市场均衡状态下, 均衡总运输量为

$$Q_{\text{od}}^{(\text{up})} = \frac{1}{(I+1)\beta_{\text{od}}} \left[I\alpha_{\text{od}} - I(c_s + 2c_h) + \sum_{i=1}^I p_{\text{kd}}^i + p_s \right]. \quad (8)$$

Q_{od} 是关于干线港补贴额 p_s 的单调递增函数, 因此, 干线港采取补贴策略会提高市场总运输量.

在港口采取补贴策略的运输系统中, 干线承运人的单箱收入不变, 总收益函数 $\pi_k = (p_{\text{kd}}^i - c_k)q_{\text{od}}^{i(s)}$ 是 p_s 的单调递增函数. 随着干线承运人的运价变化, 支线承运人的全程运价同向变化, 市场份额增加. 支线承运人 i 的收益函数为

$$\pi_i^s = \frac{1}{(I+1)^2\beta_{\text{od}}} \left[\alpha_{\text{od}} - (c_s + 2c_h) + Ip_s - (I+1)p_{\text{kd}}^i + \sum_{i=1}^I p_{\text{kd}}^i \right]^2 - c_0. \quad (9)$$

支线承运人的收益是关于单箱补贴额的凸函数, 收益函数的极值点为

$$p_{s1}^* = \frac{(c_s + 2c_h) + (I+1)p_{\text{kd}}^i - \alpha_{\text{od}} - \sum_{i=1}^I p_{\text{kd}}^i}{I}. \quad (10)$$

由于 $p_{s1}^* < 0$, 说明随着港口补贴额的增加, 支线承运人的总收益逐步增加.

在干线港口不提供补贴策略的运输系统中, 支线承运人的收益函数为

$$\pi_i^{us} = \frac{1}{(I+1)^2\beta_{od}} \left[\alpha_{od} - (c_s + 2c_h) - p_s^i - (I+1)p_{kd}^i + \sum_{i=1}^I p_{kd}^i \right]^2 - c_0. \quad (11)$$

π_i^{us} 是关于 p_s 的凸函数, 极值点为

$$p_{s2}^* = \alpha_{od} - (c_s + 2c_h) - (I+1) \max_{1 \leq i \leq I} \{p_{kd}^i\} + \sum_{i=1}^I p_{kd}^i. \quad (12)$$

即当干线港 i 提供的单箱补贴在 $[0, p_{s2}^*]$ 范围内增加时, 未采取补贴策略的运输系统中支线承运人的总收益逐渐降低.

港口采取补贴策略后, 补贴总额为 S_i , 此时港口总收益为

$$\pi_p = 2c_h q_{od}^i - S_i = \frac{2c_h - p_s}{(I+1)\beta_{od}} \left[\alpha_{od} - (c_s + 2c_h) + Ip_s - (I+1)p_{kd}^i + \sum_{i=1}^I p_{kd}^i \right]. \quad (13)$$

π_p 是关于单箱补贴额 p_s 的凸函数, 令其一阶导数为0, 可得

$$p_{s3}^* = - \frac{\alpha_{od} - (c_s + 2c_h) - 2Ic_h - (I+1)p_{kd}^i + \sum_{i=1}^I p_{kd}^i}{2I}. \quad (14)$$

由于极值点 $p_{s3}^* > 0$, 即港口单箱补贴额在 $[0, p_{s3}^*]$ 范围内, 港口的总收益随着单箱补贴额的增加而持续下降.

当港口选取干线承运人作为补贴对象时, 干支线运输系统的总收益为

$$\Pi(p_s^{up}) = (p_{od}^{i(up)} - c_s - c_k)q_{od}^{i(s)} - c_0. \quad (15)$$

干支线运输系统的总收益包含支线承运人、干线港、干线承运人等三个市场主体的收益之和. 干支线运输系统总收益是关于单箱补贴额的凹函数, 因此, 为实现运输系统的总收益最大的目标, 港口应当对干线承运人提供的最优单箱补贴额为

$$p_{s4}^* = \frac{I\Delta_1 - \Delta_2}{2I}, \quad (16)$$

其中 $\Delta_1 = \alpha_{od} + \sum_{i=1}^I p_{kd}^i + 2Ic_h - c_s - (I+1)c_k$, $\Delta_2 = \alpha_{od} + \sum_{i=1}^I p_{kd}^i - 2c_h - c_s - (I+1)p_{kd}^i$.

命题2 干港对干线承运人采取补贴策略, 能够提升干支线运输系统的总收益.

将港口对上游干线承运人采取补贴策略时干支线运输系统总收益与初始均衡状态的系统总收益进行对比. 计算采取补贴策略后, 系统收益的变化值为

$$\Pi(p_s^{up}) - \Pi = \frac{p_{s4}^*}{(I+1)^2\beta_{od}} (I\Delta_1 - \Delta_2 - Ip_{s4}^*). \quad (17)$$

经整理化简可得

$$\Pi(p_s^{up}) - \Pi = \frac{(I\Delta_1 - \Delta_2)^2}{4I(I+1)^2\beta_{od}} > 0.$$

由于系统收益的变化值恒为正, 说明干线港采取该补贴策略, 能够提高干支线运输系统的总收益.

以干线港1的运输系统为例, 干线港1补贴干线承运人1、而干线港2和干线港3未提供补贴, 此时, 支线承运人1的运输成本降低, 供给曲线由 S_1 向右移动至 S'_1 , 使得市场总供给曲线同向移动至 S' . 从图3中可以清晰

地看出,在该情景下,市场均衡点由A点变动至B点,市场均衡总运量 Q_{od} 增加,均衡运价降低,其中支线承运人1的市场份额增加,而支线承运人2和支线承运人3的市场份额下降.也就是说,干线港对干线承运人提供补贴时,对多个市场主体(托运人、支线承运人、干线承运人等)均有不同程度的帮助.

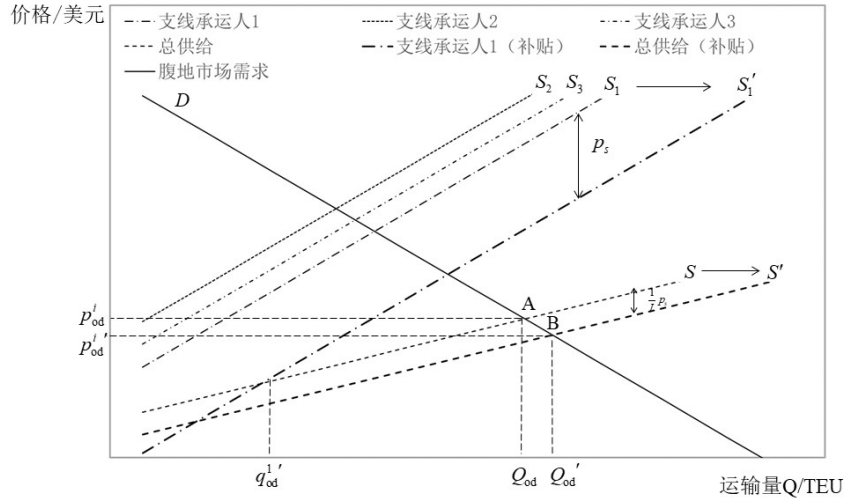


图3 情景1: 港口1对干线承运人提供补贴

Fig. 3 Scenario 1: Port authority offers subsidy policy to the mainline carrier

3.2 情景2: 干线港补贴托运人

当任一干线港对托运人提供补贴时,腹地市场需求曲线向右移动,市场均衡点随之变化.均衡运价和市场均衡总运输需求量分别为

$$p_{od}^{i(down)} = \frac{1}{I+1} \left[\alpha_{od} + I(c_s + 2c_h) + \sum_{i=1}^I p_{kd}^i + p_s \right], \quad (18)$$

$$Q_{od}^{(down)} = \frac{I}{(I+1)\beta_{od}} \left[\alpha_{od} - (c_s + 2c_h) - \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I p_{kd}^i + p_s \right]. \quad (19)$$

在干线港补贴托运人的情景下,各干线港口的市场份额为

$$q_{od}^{i(s)} = \frac{1}{(I+1)\beta_{od}} \left[\alpha_{od} - (c_s + 2c_h) - (I+1)p_{kd}^i + \sum_{i=1}^I p_{kd}^i + p_s \right]. \quad (20)$$

港口选取托运人作为补贴对象,干线承运人的定价策略保持不变,总收益表示为

$$\pi_k = \frac{p_{kd}^i - c_k}{(I+1)\beta_{od}} \left[\alpha_{od} - (c_s + 2c_h) - (I+1)p_{kd}^i + \sum_{i=1}^I p_{kd}^i + p_s \right]. \quad (21)$$

支线承运人的总收益函数为

$$\pi_i = \frac{1}{(I+1)^2\beta_{od}} \left[\alpha_{od} - (c_s + 2c_h) - (I+1)p_{kd}^i + \sum_{i=1}^I p_{kd}^i + p_s \right]^2 - c_0. \quad (22)$$

由于支线承运人的收益是关于港口提供的单箱补贴额的凸函数,因此,存在一个极值点使得 π_i 达到最小

值,该极值点为

$$p_{s5}^* = -\alpha_{od} + (c_s + 2c_h) + (I + 1)p_{kd}^i - \sum_{i=1}^I p_{kd}^i. \quad (23)$$

该极值点恒为负,即当干线港采取补贴策略,并且随着港口提供的单位补贴额逐渐增加,支线承运人的总收益随之增加.

在该补贴策略下,港口运营商的总收益为

$$\pi_p = \frac{2c_h - p_s}{(I + 1)\beta_{od}} \left[\alpha_{od} - (c_s + 2c_h) - (I + 1)p_{kd}^i + \sum_{i=1}^I p_{kd}^i + p_s \right]. \quad (24)$$

港口收益是关于单位补贴额的凹函数,由于极值点恒为负值,表明港口总收益随着单位补贴额的增加而减少.

此时,干支线运输系统总收益为

$$\Pi(p_s^{(\text{down})}) = (p_{kd}^{i(\text{down})} - c_k)q_{od}^{i(s)} + (p_{od}^{i(\text{down})} - p_{kd}^{i(s)} - c_s - 2c_h)q_{od}^{i(\text{down})} - c_0 + (2c_h - p_s)q_{od}^{i(\text{down})}. \quad (25)$$

随着港口单位补贴的增加,干支线运输系统总收益呈现先上升后下降的变化趋势.若以系统的总收益最大为目标,港口需要提供的最优补贴额为

$$p_{s6}^* = \max \left\{ 0, \frac{1}{2I} \left[-(I - 1)(\alpha_{od} - c_s + \sum_{i=1}^I p_{kd}^i) + 4Ic_h - (I + 1)c_k + (I^2 + I)p_{kd}^i \right] \right\}. \quad (26)$$

命题3 干线港对托运人采取补贴策略,也能够提升干支线运输系统的总收益.

将港口对下游腹地市场的托运人采取补贴策略时干支线运输系统总收益与初始均衡状态的系统收益进行对比.计算采取补贴策略后,系统收益的变化值为

$$\Pi(p_s^{(\text{down})}) - \Pi = \frac{p_{s6}^*}{(I + 1)^2\beta_{od}} (\Delta_1 - I\Delta_2 - Ip_{s6}^*). \quad (27)$$

经整理化简可得

$$\Pi(p_s^{(\text{down})}) - \Pi = \frac{(\Delta_1 - I\Delta_2)^2}{4I(I + 1)^2\beta_{od}} \geq 0.$$

由于系统收益的变化值非负,说明干线港采取第二种补贴策略,对改善系统收益也是有帮助的.

以干线港1的运输系统为例,干线港1率先采取补贴策略,对托运人提供补贴时,选择干线港1的托运人仅需支付低于均衡价格的全程运费,即能获得同质的运输服务,其他干支线运输系统中的干线港或支线承运人对托运人提供相同的补贴,才可避免港口1吸引腹地的全部运输需求.因此,当干线港补贴托运人时,腹地市场需求曲线向右移动至 D' (图4),市场均衡状态由A点移动至B点,该补贴策略同时提高了均衡运价和均衡总运量,每一个支线承运人的市场份额有相同幅度的提升.虽然市场均衡运价有小幅提升,但上升幅度小于港口补贴额度,因此托运人实际支付的全程运价反而降低.

3.3 补贴策略的对比分析

港口是干支线运输系统的关键节点,上游衔接着干线承运人,下游通过支线承运人衔接腹地托运人.港口选取不同的补贴对象,对托运人的选择行为和支线承运人的竞争力产生影响,从而对补贴激励机制的实施效果有显著影响.为对比两种补贴策略的效果,本文选取市场份额、运输价格、承运人收益、港口收益等的评价指标,指标表达式如附表1所示.

命题4 在单位补贴额相同的条件下,干线港对干线承运人采取补贴策略(情景1),更利于提升干线承运

人和支线承运人收益. 干线承运人的单箱利润越高, 情景1的策略优势越显著. 干线运输价格越低, 情景1对提升支线承运人收益的优势越显著.

证明 将两种情景下干线承运人的收益进行对比, 计算收益差值

$$\Delta\pi_k = \pi_k(p_s^{(\text{up})}) - \pi_k(p_s^{(\text{down})}) = \frac{p_{kd}^i - c_k}{(I+1)\beta_{od}} [(I-1)p_s]. \quad (28)$$

由于干线承运人的收益差值非负, 说明在单位补贴额度相同的条件下, 干线港采取第一种补贴策略, 对干线承运人更有利. 此外, 干线承运人的收益差值是关于单箱利润的单调递增函数, 运输服务的单位利润越高, 收益差值越大.

将支线承运人的收益进行对比, 计算收益差值

$$\begin{aligned} \Delta\pi_i &= \pi_i(p_s^{(\text{up})}) - \pi_i(p_s^{(\text{down})}) \\ &= \frac{1}{(I+1)^2\beta_{od}} \left[(I^2-1)p_s^2 + 2p_s(I-1)(\alpha_{od} - (c_s + 2c_h)) - (I+1)p_{kd}^i + \sum_{i=1}^I p_{kd}^i \right]. \end{aligned} \quad (29)$$

由于支线承运人的收益差值非负, 说明在单位补贴额度相同的条件下, 干线港采取第一种补贴策略, 同样对支线承运人更有利. 此外, 干线承运人的收益差值是关于干支线运输系统内干线运输价格的单调递减函数, 干线服务运价越低, 收益差值越大.

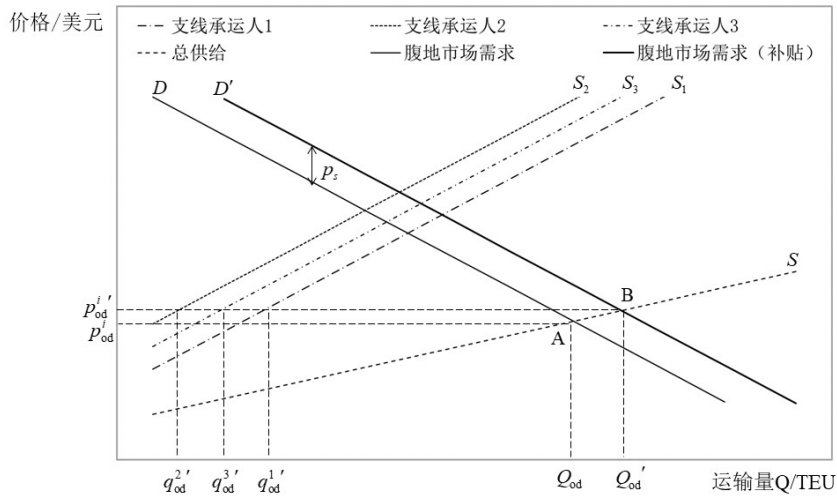


图4 情景2: 港口1对托运人提供补贴

Fig. 4 Scenario 2: Port authority offers subsidy policy to shippers

命题5 在单位补贴额相同的条件下, 干线港对托运人采取补贴策略, 更利于降低运输价格.

证明 将两种情景下腹地市场的全程运输价格进行对比, 计算运价差值

$$\Delta p_{od}^i = p_{od}^i(p_s^{(\text{up})}) - p_{od}^i(p_s^{(\text{down})}) = \frac{I-1}{I+1} p_s. \quad (30)$$

由于 Δp_{od}^i 恒为非负, 在情景2下托运人需要支付的运输价格更低, 说明在单位补贴额度相同的条件下, 干线港口采取第二种补贴策略, 对托运人更有利.

4 算例分析

假设支线港的腹地市场反需求函数为 $p_{od}^i = 2050 - 0.15Q_{od}$, 托运人可以从三个港口中任选一个作为中转港, 托运人选定中转港即选定对应的支线承运人(每个支线由一个支线承运人负责). 各支线承运人提供同质服务, 支线运输的资本成本 c_0 、单箱单次装卸成本 c_h 以及运输成本 c_s 分别为10 000 USD、50 USD/TEU/次、70 USD/TEU. 此外, 干线港与干线承运人一一对应, 三个港口对应的干线运输价格分别为1 000 USD/TEU、1 100 USD/TEU 和1 050 USD/TEU, 干线运输成本分别为500 USD/TEU、700 USD/TEU、470 USD/TEU. 参考不提供补贴的市场均衡水平, 对比分析干线港采取两种补贴策略的效果.

在第一种补贴策略下, 干线港补贴干线承运人, 市场均衡状态发生变化(见表1), 无补贴均衡状态和三个港口分别提供补贴的情况如表1~表4行数据所示, 以干线港1 采取补贴策略, 干线港2和干线港3均不采取补贴策略为例, 分析第一种补贴策略的效果. 当三个干线港口均不采取补贴策略, 则在支线承运人竞争均衡状态下, 托运人所需支付的全程运价 p_{od}^i 为1 427.5 USD/TEU, 当第一个干线港对运输系统内的干线承运人提供单箱补贴时, 最优补贴额为228.52 USD/TEU, 在新的均衡状态下, 全程运输价格为1 370.37 USD/TEU, 托运人的运输成本降低了57.13 USD/TEU. 市场总运输量 Q_{od} 由4 150 TEU增长至4 530.86 TEU, 说明该补贴策略有助于提升腹地市场总福利. 从各港口的市场份额来看, 采取补贴策略的干线港1 的市场份额有显著的提升, 增幅达到了1 142.59 TEU, 同时, 未提供补贴策略的干线港2以及干线港3的市场份额则分别下降了380.86 TEU和380.86 TEU. 综上可知, 第一种补贴策略对降低托运人运输成本、提升补贴港口市场份额和腹地市场总运量有明显的效果. 同理, 当干线港2和干线港3采取该策略时, 也有类似的积极作用.

表1 情景1的市场均衡状态(单位: USD/TEU 或TEU)
Table 1 Equilibrium state in Scenario 1 (Unit: USD/TEU or TEU)

	p_s^*	p_{od}^i	q_{od}^1	q_{od}^2	q_{od}^3	Q_{od}
无补贴	0	1 427.5	1 716.67	1 050	1 383.33	4 150
$i = 1$	228.52	1 370.37	2 859.26	669.14	1 002.47	4 530.86
$i = 2$	198.89	1 377.78	1 385.19	2 044.44	1 051.85	4 481.48
$i = 3$	271.48	1 359.63	1 264.20	597.53	2 740.74	4 602.47

注1 p_s^* 表示最优补贴额度; p_{od}^i 表示均衡状态的全程运价; q_{od}^i 表示干线港的市场份额; Q_{od} 表示腹地市场的总运输量.

采取补贴策略后, 市场主体(干线承运人、支线承运人、干线港)的收益变化情况如表2所示. 初始均衡状态(无补贴)下, 在干线港1的干支线运输系统中, 干线承运人和支线承运人的总收益分别是85.83万美元和43.20万美元, 而当干线港1对系统内的上游干线承运人采取补贴策略后, 承运人的总收益均有一定的提升, 分别增加至142.96 万美元和56.29万美元. 从系统总收益来看, 变化量为33.47万美元, 增幅达25.94%. 相反, 干线港1的收益由盈利状态(17.17万美元)转为亏损状态(-36.75 万美元). 此时, 对于未补贴的运输系统, 我们发现系统内的市场主体(干线承运人、支线承运人、干线港)的收益, 以及运输系统的总收益均有不同程度的降低. 如, 在干线港2的干支线运输系统中, 干线承运人的收益由42.00万美元降至26.77 万美元, 支线承运人的收益由15.54万美元降至5.72万美元, 干线港的收益由10.50万美元降至6.69万美元, 系统总收益下降了18.37万美元.

此外, 补贴策略对不同干线港的适用性也有所不同. 本文定义“补贴收益比”指标 r (式(31)), 衡量干线港采取补贴策略的经济性, 指标值越低, 则港口采取补贴策略的经济性越好.

$$r = \frac{p_s^* q_{od}^i}{\Delta \pi} \times 100\%. \quad (31)$$

以干线港1为例,当港口采取第一种补贴策略时,使得系统总收益增加了33.47万美元,干线港1的补贴收益比为195.22%。同理可知,干线港2和干线港3的补贴收益比分别为162.26%和180.20%。横向对比三个港口的补贴收益比指标可知,干线港2的补贴经济性最高。

在第二种情景下,市场均衡状态和市场主体收益变化情况如表3和表4所示。同样以干线港1的运输系统为例,对第二种补贴策略的效果进行分析。在原市场均衡状态下,均衡运价和总运量分别为1 427.5 USD和4 150 TEU,采取第二种补贴策略后,二者分别变为1 441.67 USD/TEU和4 433.33 TEU。显然,支线腹地市场的运输量增加,又由于干线港直接对托运人提供补贴,最优补贴额为56.67 USD/TEU,因此,托运人的净支付额为1 385.00 USD/TEU,说明托运人同样能够从港口的第二种补贴策略中获益。

表2 情景1的市场主体收益(单位: 10^4 USD)
Table 2 Profits of market participants in Scenario 1 (Unit: 10^4 USD)

	$\pi_k (k = 1)$	$\pi_k (k = 2)$	$\pi_k (k = 3)$	$\pi_i (i = 1)$	$\pi_i (i = 2)$	$\pi_i (i = 3)$
无补贴	85.83	42.00	80.23	43.20	15.54	27.70
$i = 1$	142.96	26.77	58.14	56.29	5.72	14.07
$i = 2$	69.26	81.78	61.01	27.78	21.03	15.60
$i = 3$	63.21	23.90	158.96	22.97	4.36	37.27
	$\pi_p (p = 1)$	$\pi_p (p = 2)$	$\pi_p (p = 3)$	Π_1	Π_2	Π_3
无补贴	17.17	10.50	13.84	129.04	57.54	107.94
$i = 1$	-36.75	6.69	10.02	162.51	39.17	82.24
$i = 2$	13.85	-20.22	10.52	110.89	82.60	87.12
$i = 3$	12.64	5.98	-47.00	98.82	34.23	149.23

注2 π_k 、 π_i 和 π_p 分别表示干支线运输系统中,干线承运人、支线承运人和干线港的收益; Π 表示运输系统的总收益。

表3 情景2的市场均衡状态(单位: USD/TEU 或TEU)
Table 3 Equilibrium state in Scenario 2 (Unit: USD/TEU or TEU)

	p_s^*	p_{od}^i	q_{od}^1	q_{od}^2	q_{od}^3	Q_{od}
无补贴	0	1 427.5	1 716.67	1 050	1 383.33	4 150
$i = 1$	56.67	1 441.67	1 811.11	1 144.44	1 477.78	4 433.33
$i = 2$	123.33	1 458.33	1 922.22	1 255.56	1 588.89	4 766.67
$i = 3$	176.67	1 471.67	2 011.11	1 344.44	1 677.78	5 033.33

注3 p_s^* 表示最优补贴额度; p_{od}^i 表示均衡状态的全程运价; q_{od}^i 表示干线港的市场份额; Q_{od} 表示腹地市场的总运输量。

表4详细列明了市场主体(干线承运人、支线承运人、干线港)的收益变化情况。第一,干线港1对下游托运人采取补贴策略时,干线承运人和支线承运人的总收益有小幅提升,分别由85.83万美元和43.20万美元增加至90.56万美元和48.20万美元。第二,从系统总收益来看,变化量为17.57万美元,增幅为13.62%。第三,对干线港来说,港口收益变为7.85万美元,仍能保持盈利状态。从上述指标看,第一种补贴策略的效果对提升承运人收益和系统收益的效果更为明显。然而,采取第二种补贴策略,能够有效保护港口利益。第四,三个干线港的补贴收益比分别为58.42%, 124.88%和167.18%,则干线港1采取第二种补贴策略的补贴经济性最高。

以无补贴的情景作为基础,可以发现港口采取补贴策略对托运人和干支线承运人均有积极影响,在两种补贴策略下,托运人需要支付的运输价格更低,干支线承运人的市场份额和收益均有提高。横向对比两种

补贴策略可以发现,当选取托运人作为补贴对象时,托运人支付的全程运价更低,而补贴干线承运人对提升自身干支线运输系统的腹地市场份额的贡献更大,对提升承运人总收益的效果更加明显.从港口角度来看,补贴干线承运人时,港口需要支付的补贴总额更高.另外,不同港口选取相同市场主体作为补贴对象时,效果也不同.从干线承运人收益来看,干线承运人的单箱利润越高,干线承运人总收益增量越大,港口补贴效果越好.将支线承运人收益进行比较,干线运价越低,支线承运人的总收益增值越大,港口补贴效果更显著.

表 4 情景2的市场主体收益(单位: 10^4 USD)
Table 4 Profits of market participants in Scenario 2 (Unit: 10^4 USD)

	$\pi_k (k = 1)$	$\pi_k (k = 2)$	$\pi_k (k = 3)$	$\pi_i (i = 1)$	$\pi_i (i = 2)$	$\pi_i (i = 3)$
无补贴	85.83	42.00	80.23	43.20	15.54	27.70
$i = 1$	90.56	45.78	85.71	48.20	18.65	31.76
$i = 2$	96.11	50.22	92.16	54.42	22.65	36.87
$i = 3$	100.56	53.78	97.31	59.67	26.11	41.22
	$\pi_p (p = 1)$	$\pi_p (p = 2)$	$\pi_p (p = 3)$	Π_1	Π_2	Π_3
无补贴	17.17	10.50	13.84	129.04	57.54	107.94
$i = 1$	7.85	4.96	6.40	146.61	69.38	123.87
$i = 2$	-4.49	-2.93	-3.71	146.05	69.94	125.32
$i = 3$	-15.42	-10.31	-12.86	144.81	69.58	125.67

注 4 π_k 、 π_i 和 π_p 分别表示干支线运输系统中,干线承运人、支线承运人和干线港的收益; Π 表示运输系统的总收益.

港口是全球运输网络中的关键节点,经济和贸易的全球化发展更凸显了港口的战略地位.从长期发展的角度看,补贴策略具有一定的带动作用.港口具有公有属性,其运营目标不仅在于经营利润,更重要的是通过补贴策略挖掘腹地市场,提升港口竞争力,带动区域及港口城市的经济增长.反过来,区域经济增长也会持续扩大班轮运输市场空间,带动腹地运输需求的增长.相同的单位补贴额度,两种补贴政策却会产生不同的激励力度,所适用的市场环境也有所不同.

第一,港口补贴承运人的策略适用于港口规模扩张阶段.船舶在港口挂靠产生的港口使费,是航运公司运营成本的重要部分.港口向航运公司提供补贴政策,可以间接降低港口使费的支出额.从而,吸引更多船公司挂靠港口,培育新的跨洋航线,丰富航线网络.与同一区域内的其他港口相比,提供异质化的运输航线和服务产品,进一步产生拉动效应,刺激运输需求.在港口规模扩张阶段,港口当局要以投资为导向,实现港口竞争力的提升.然而,港口属于资本密集型产业,仅通过自身收益投资基础设施建设以提升竞争力和运作效率,是很难实现的.对于航运公司来说,如果在某一港口的货物吞吐量长期处于一个较高水平,港口可以通过推行码头私有化改革,吸引船公司进行码头投资,创造双赢局面.一方面,可以大幅降低航运公司的交易成本,另一方面,港务局可以将港口规模扩张的投资压力转移给航运公司,减轻政府财政负担.

第二,港口补贴托运人的策略适用于港口持续发展阶段和市场低谷期.在运输需求淡季,港口直接补贴给托运人,能够有效降低托运人的运输成本,吸引有限的货运需求.此外,能够扩大港口的辐射范围,弥补港口的地理区位优势,吸引远距离的腹地需求.多式联运供应链之间的竞争,并不只局限于同一区域的不同港口之间的竞争,多种运输方式之间同样存在竞争.在港口持续发展阶段,可以通过针对性的补贴策略,引导托运人选择“水水”中转或海铁联运等集疏运方式,有效缓解公路运输带来的拥堵和污染问题.当港口以社会福利最大化为目标时,自身利益有时难以得到保障,此时,港口可以通过争取国家和政府的投资,弥补产生的经济损失.

5 结束语

随着以港口为核心的运输系统之间的竞争越发激烈,各港口采取补贴策略来吸引支线腹地货源,提高港口吞吐量和系统竞争力,加快提升港口地位。本文以多式联运系统为研究对象,量化分析港口选取多式联运系统内不同市场主体作为补贴对象的策略效果。港口的补贴策略有助于降低托运人的运输成本,刺激腹地市场的运输需求。其中港口补贴干线承运人是以牺牲港口自身利益为代价,实现港口的市场份额、承运人的个体收益和干支线运输系统整体收益的显著提升,适用于港口规模扩张期。港口对托运人提供补贴,能够在保护各市场主体利益的基础上,更有助于降低托运人所需支付的全程运价,较为适用于航运市场低谷期或港口持续发展阶段。此外,本文确定了在不同情形下的最优补贴额度,为构建海运领域的补贴制度提供理论支撑、降低政策风险。

参考文献:

- [1] Ha M H, Yang Z, Lam J S L. Port performance in container transport logistics: A multi-stakeholder perspective. *Transport Policy*, 2019, 73: 25–40.
- [2] Song D P, Lyons A, Li D, et al. Modeling port competition from a transport chain perspective. *Transportation Research, Part E: Logistics and Transportation Review*, 2016, 87: 75–96.
- [3] 徐国平, 宗蓓华, 李文顺. 海上集装箱运输中轴辐式航线结构的经济性分析. *管理工程学报*, 2008, 22(1): 53–57.
Xu G P, Zong B H, Li W S. Analysis on the economical advantages of Hub-and-Spoke route structure in maritime container transportation. *Journal of Industrial Engineering and Engineering Management*, 2008, 22(1): 53–57. (in Chinese)
- [4] Ducruet C, Notteboom T. The worldwide maritime network of container shipping: Spatial structure and regional dynamics. *Global Networks*, 2012, 12(3): 395–423.
- [5] 赵宇哲, 周晶淼, 迟国秦. 竞争环境下轴——辐式海运网络设计与定价决策. *系统工程学报*, 2018, 33(5): 615–626.
Zhao Y Z, Zhou J M, Chi G T. Hub-and-spoke shipping network design and pricing decision in a competitive environment. *Journal of Systems Engineering*, 2018, 33(5): 615–626. (in Chinese)
- [6] Lai K, Ngai E W T, Cheng T C E. Measures for evaluating supply chain performance in transport logistics. *Transportation Research, Part E: Logistics and Transportation Review*, 2002, 38(6): 439–456.
- [7] Lam J S L, Yap W Y. Dynamics of liner shipping network and port connectivity in supply chain systems: Analysis on East Asia. *Journal of Transport Geography*, 2011, 19(6): 1272–1281.
- [8] Seo Y J, Dinwoodie J, Roe M. The influence of supply chain collaboration on collaborative advantage and port performance in maritime logistics. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 2016, 19(6): 562–582.
- [9] Vural C A, Göçer A, Halldórsson á. Value co-creation in maritime logistics networks: A service triad perspective. *Transport Policy*, 2019, 84: 27–39.
- [10] Chang Y T, Lee S Y, Tongzon J L. Port selection factors by shipping lines: Different perspectives between trunk liners and feeder service providers. *Marine Policy*, 2008, 32(6): 877–885.
- [11] Lee H, Boile M, Theofanis S, et al. Modeling the oligopolistic and competitive behavior of carriers in maritime freight transportation networks. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 2012, 54: 1080–1094.
- [12] Tongzon J L. Port choice and freight forwarders. *Transportation Research, Part E: Logistics and Transportation Review*, 2009, 45(1): 186–195.
- [13] Hung S W, Lu W M, Wang T P. Benchmarking the operating efficiency of Asia container ports. *European Journal of Operational Research*, 2010, 203(3): 706–713.
- [14] Luo M, Liu L, Gao F. Post-entry container port capacity expansion. *Transportation Research, Part B: Methodological*, 2012, 46(1): 120–138.

- [15] Wang H, Meng Q, Zhang X. Game-theoretical models for competition analysis in a new emerging liner container shipping market. *Transportation Research, Part B: Methodological*, 2014, 70: 201–227.
- [16] De Oliveira G F, Cariou P. The impact of competition on container port (in) efficiency. *Transportation Research, Part A: Policy and Practice*, 2015, 78: 124–133.
- [17] 范 洋, 高田义, 乔 晗. 基于博弈模型的港口群内竞争合作研究: 以黄海地区为例. *系统工程理论实践*, 2015, 35(4): 955–964.
Fan Y, Gao T Y, Qiao H. Competition and collaborative strategies within ports cluster in Huanghai area: A game theory approach. *Systems Engineering: Theory & Practice*, 2015, 35(4): 955–964. (in Chinese)
- [18] Zhang Q, Wang W, Peng Y, et al. A game-theoretical model of port competition on intermodal network and pricing strategy. *Transportation Research, Part E: Logistics and Transportation Review*, 2018, 114: 19–39.
- [19] Ishii M, Lee P T W, Tezuka K, et al. A game theoretical analysis of port competition. *Transportation Research, Part E: Logistics and Transportation Review*, 2013, 49(1): 92–106.
- [20] 吉阿兵, 朱道立. 网络外部性下的港口竞争策略设计. *系统工程理论与实践*, 2006, 26(7): 105–111.
Ji A B, Zhu D L. The port competitive strategies with network externality. *Systems Engineering: Theory & Practice*, 2006, 26(7): 105–111. (in Chinese)
- [21] Talley W K. Maritime transport chains: Carrier, port and shipper choice effects. *International Journal of Production Economics*, 2014, 151: 174–179.
- [22] Steven A B, Corsi T M. Choosing a port: An analysis of containerized imports into the US. *Transportation Research, Part E: Logistics and Transportation Review*, 2012, 48(4): 881–895.
- [23] Martínez Moya J, Feo Valero M. Port choice in container market: A literature review. *Transport Reviews*, 2017, 37(3): 300–321.
- [24] Vega L, Cantillo V, Arellana J. Assessing the impact of major infrastructure projects on port choice decision: The Colombian case. *Transportation Research, Part A: Policy and Practice*, 2019, 120: 132–148.
- [25] 田一辉, 朱庆华. 政府价格补贴下绿色供应链管理扩散博弈模型. *系统工程学报*, 2016, 31(4): 526–535.
Tian Y H, Zhu Q H. Game model for diffusion of green supply chain management based on price subsidies of the government. *Journal of Systems Engineering*, 2016, 31(4): 526–535. (in Chinese)
- [26] Raza S A. Supply chain coordination under a revenue-sharing contract with corporate social responsibility and partial demand information. *International Journal of Production Economics*, 2018, 205: 1–14.
- [27] Venegas B B, Ventura J A. A two-stage supply chain coordination mechanism considering price sensitive demand and quantity discounts. *European Journal of Operational Research*, 2018, 264(2): 524–533.
- [28] 谢 勇, 向 莉, 陈 双, 等. 供应链返利与惩罚契约研究. *系统工程学报*, 2013, 28(5): 625–632.
Xie Y, Xiang L, Chen S, et al. Research on rebate and penalty contract for supply chain coordination. *Journal of Systems Engineering*, 2013, 28(5): 625–632. (in Chinese)
- [29] 简惠云, 许民利. 风险规避下基于Stackelberg 博弈的供应链回购契约. *系统工程学报*, 2017, 32(6): 829–842.
Jian H Y, Xu M L. Supply chain buyback contract based on Stackelberg game with the assumption of risk-aversion. *Journal of Systems Engineering*, 2017, 32(6): 829–842. (in Chinese)
- [30] 刘云志, 樊治平. 考虑损失规避与质量水平的供应链协调契约模型. *系统工程学报*, 2017, 32(1): 89–102.
Liu Y Z, Fan Z P. Supply chain coordination contract model considering loss aversion and quality level. *Journal of Systems Engineering*, 2017, 32(1): 89–102. (in Chinese)
- [31] Sys C. Is the container liner shipping industry an oligopoly. *Transport Policy*, 2009, 16(5): 259–270.
- [32] Xu L, Govindan K, Bu X, et al. Pricing and balancing of the sea-cargo service chain with empty equipment repositioning. *Computers & Operations Research*, 2015, 54: 286–294.

作者简介:

曲晨蕊 (1990—), 女, 辽宁沈阳人, 讲师, 研究方向: 港口与航运管理, Email: quchenrui@dlmu.edu.cn;

曾庆成 (1978—), 男, 山东沂南人, 博士, 教授, 研究方向: 港口与物流系统优化, Email: qzeng@dlmu.edu.cn;

鞠惠竹 (1995—), 女, 山东烟台人, 博士生, 研究方向: 港口与航运管理, Email: 937464688@qq.com.

附录 港口补贴效果对比

附录 港口补贴效果对比

Appendix Comparison between different subsidy policies

指标	情景1:补贴干线承运人	情景2:补贴托运人
单位最优补贴额 p_s^*	$\frac{1}{I(2I+3)} \left[-\alpha_{od} + c_s + (2I^2 + 2I + 2)c_h + (I+1)^2 p_{kd}^i - \sum_{i=1}^I p_{kd}^i - I(I+1)c_k \right]$	$\max \left\{ 0, \frac{1}{2I} \left[-(I+1)(\alpha_{od} - c_s + \sum_{i=1}^I p_{kd}^i) + 4Ic_h - (I+1)c_k + (I^2 + I)p_{kd}^i \right] \right\}$
市场份额 q_{od}^i	$\frac{1}{(I+1)\beta_{od}} \left[\alpha_{od} - (c_s + 2c_h) - (I+1)p_{kd}^i + \sum_{i=1}^I p_{kd}^i + Ip_s \right]$	$\frac{1}{(I+1)\beta_{od}} \left[\alpha_{od} - (c_s + 2c_h) - (I+1)p_{kd}^i + \sum_{i=1}^I p_{kd}^i + p_s \right]$
托运人的全程运价 p_{od}^i	$\frac{1}{(I+1)} \left[\alpha_{od} + I(c_s + 2c_h) + \sum_{i=1}^I p_{kd}^i - p_s \right]$	$\frac{1}{(I+1)} \left[\alpha_{od} + I(c_s + 2c_h) + \sum_{i=1}^I p_{kd}^i - Ip_s \right]$
干线承运人收益 π_k	$\frac{p_{kd}^i - c_k}{(I+1)\beta_{od}} \left[\alpha_{od} - (c_s + 2c_h) - (I+1)p_{kd}^i + \sum_{i=1}^I p_{kd}^i + Ip_s \right]$	$\frac{p_{kd}^i - c_k}{(I+1)\beta_{od}} \left[\alpha_{od} - (c_s + 2c_h) - (I+1)p_{kd}^i + \sum_{i=1}^I p_{kd}^i + p_s \right]$
支线承运人收益 π_i	$\frac{1}{(I+1)^2\beta_{od}} \left[\alpha_{od} - (c_s + 2c_h) - (I+1)p_{kd}^i + \sum_{i=1}^I p_{kd}^i + Ip_s \right]^2 - c_0$	$\frac{1}{(I+1)^2\beta_{od}} \left[\alpha_{od} - (c_s + 2c_h) - (I+1)p_{kd}^i + \sum_{i=1}^I p_{kd}^i + p_s \right]^2 - c_0$
港口收益 π_p	$\frac{2c_h - p_s}{(I+1)\beta_{od}} \left[\alpha_{od} - (c_s + 2c_h) - (I+1)p_{kd}^i + \sum_{i=1}^I p_{kd}^i + Ip_s \right]$	$\frac{2c_h - p_s}{(I+1)\beta_{od}} \left[\alpha_{od} - (c_s + 2c_h) - (I+1)p_{kd}^i + \sum_{i=1}^I p_{kd}^i + p_s \right]$