

# 考虑碳交易政策的集装箱多式联运网络优化

林莹, 邓丽娟

(集美大学航海学院, 福建 厦门 361021)

[摘要] 基于集装箱多式联运网络, 引入碳交易政策, 将运输网络中的碳排放转化成总成本中的一部分, 以总成本最低为决策目标来研究运输网络优化, 探究最有利于成本节约和碳减排的碳免费配额。以广东省为例, 通过对运输网络优化结果进行分析, 确定最优碳排放配额, 并给出相应的政策建议。

[关键词] 多式联运; 碳交易; 碳免费配额; 碳减排

[中图分类号] U 15

## Optimization of Container Multimodal Transport Network Considering Carbon Trading Policy

LIN Ying, DENG Lijuan

(Navigation College of Jimei University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** On the basis of studying the container multimodal transport network, this paper studies the existing carbon trading policies. By introducing carbon trading policies, the carbon emissions in the transport network are converted into a part of the total cost, and the optimization research of the transport network is carried out with the decision goal of the lowest total cost. Explore the carbon free allowances through adjusting different free carbon quotas, the best quota is explored for economic conservation and carbon reduction. Taking Guangdong Province as an example, the optimal carbon emission quota is determined by analyzing the results of transportation network optimization, with corresponding policy recommendations given.

**Keywords:** multimodal transport; carbon trading; free carbon credits; carbon emission reduction

## 0 引言

随着我国物流市场的不断扩张和货运总量的不断增长, 社会物流成本和碳排放问题也日益引起人们的重视。物流运输网络优化除考虑成本和效益外, 还需考虑环境责任。出于环保目的考虑, 2023年5月, 欧盟对(EU) 2015/757号条例进行修订, 将海运活动纳入欧盟碳排放交易体系。面对碳减排的号召, 我国也采取相应的措施和建议, 其中碳交易政策是我国为应对气候问题而采取的重要手段。

碳交易政策是为了减少二氧化碳排放而推出的一种市场机制, 即建立一个交易市场, 将二氧化碳排放权作为一种商品, 企业可以在该交易市场对碳排放权进行买卖。我国的碳排放交易市场在2021

[收稿日期] 2024-06-01

[基金项目] 省新型智库-重大项目“深化综合立体‘交通强省建设助推交通强国’先行区高质量发展研究”(23MZKA18)

[作者简介] 通信作者: 邓丽娟(1973—), 女, 博士, 副教授, 从事交通运输规划与管理方向研究。E-mail: lindadeng2002@sina.com

年正式全面启动上线交易<sup>[1]</sup>。碳交易市场的启动,将会对运输过程产生一定的影响,如何降低货物在运输过程产生的碳排放已成为当下研究中的热点问题。孙家庆等<sup>[2]</sup>分析碳交易和碳税制度对冷藏集装箱路径选择的影响,为多式联运经营人决策绿色路径提供理论依据。孙秋洋<sup>[3]</sup>利用碳交易制度将碳排放引入成本中,构建总成本最小的多式联运服务网络优化模型,并用蚁群算法进行优化研究。Farrukh 等<sup>[4]</sup>构建多式联运路径优化模型,采用遗传算法求解出不考虑与考虑碳排放成本两种情况下的最优运输路径。Janic<sup>[5]</sup>构建多式联运网络社会总成本最小化模型,在求解结果上重点研究运输政策对结果产生的影响。Dai 等<sup>[6]</sup>探讨在碳税和碳交易机制下的货运网络分配优化模型,将运输网络的碳排放量内化为成本,并通过实例对模型进行验证。Zakeri 等<sup>[7]</sup>引入碳交易政策构建出运输网络总成本最小化模型,并分析了碳交易政策下的优化结果。Zhang 等<sup>[8]</sup>利用双层规划模型,对碳定价策略进行分析,得出组合多策略类型对运输网络具有更好的优化效果。Chen 等<sup>[9]</sup>研究引入碳减排政策后运输网络中运输方式和运输路径的改变,着重研究碳减排政策对运输方案选择的影响。

多式联运是指两种或两种以上运输方式互相衔接、转运而共同完成的运输过程,是一种有效的减排方式。近年来对多式联运的研究重点多以减少货物运输的碳排放为主。Bouchery 等<sup>[10]</sup>分析了内陆多式联运网路的特点,综合多方面因素对多式联运网络进行合理的设计。Lam 等<sup>[11]</sup>建立了包含运输总成本、运输时间以及运输碳排放最小的多式联运网络优化模型,同时深入探究了不同碳排放限制对多式联运网络优化的影响程度。Dai 等<sup>[12]</sup>综合考虑运输总成本及总排放,研究了不同程度的碳排放约束对多式联运网络优化的影响。当前我国的集装箱运输主要依靠公路运输,铁路、水路运输的规模相对较小,导致集装箱多式联运发展缓慢,而仅仅采用公路运输会消耗大量燃料,必然导致大量的碳排放产生。因此在集装箱多式联运的基础上对碳交易政策展开研究能够更有效地减少运输产生的碳排放。

目前针对低碳运输中三种及以上的多式联运方式的研究比较少见,现有研究大多只是在低碳背景下对运输方式和运输路径及选址问题等进行研究,极少对碳交易政策中的碳免费配额比例进行深入研究,而不同的碳免费配额比例对于运输方案的选择也有着重要影响。因此,本文将公、铁、水三种运输方式联合考虑,基于集装箱多式联运网络对现有的碳交易政策进行研究,通过调整不同的碳免费配额比例,确定利于节省成本的最优运输方案和碳免费配额比例,为实现集装箱运输网络的有效减排决策提供数据支撑。

## 1 问题描述

本文基于集装箱多式联运网络,研究不同的碳免费配额对运输成本与碳排放的影响。在本文中,物流企业需要制定一个计划,将货物从腹地城市运输到海港,并最大限度地减少货运成本,以提高运输利润。政府考虑到 CO<sub>2</sub> 的排放对环境的影响,所以会通过政策手段对企业运输的排放设定一定的限制,在此情况下,物流企业选择运输方案时考虑的因素不仅包括运价、运输时间、便利性,还包括 CO<sub>2</sub> 排放所产生的成本,会优先选择成本最小的运输方式。

## 2 模型构建

### 2.1 模型假设和符号说明

为简化模型,本文作出如下假设:1) 运输方式的转换只在多式联运中转节点处;2) 每个多式联运中转节点都有容量限制;3) 碳交易政策中,初始碳免费配额由政府免费发放;4) 研究周期为1年;5) 腹地城市到海港的货物运输中转次数最大为2次;6) 公路运输线路的运能始终能承载运输任务。

### 2.2 相关符号说明

本文所涉及的参数和变量描述如表1所示。

表 1 模型参数描述表  
Tab.1 Model parameter description table

符号	描述
集合变量	$I$ 内陆城市 $i$ 的集合, $i \in I$
	$T$ 所有内陆多式联运中转节点的集合, $T = T_D \cup T_R, T_D$ 为无水港, $T_R$ 为内河港口
	$H$ 海港 $h$ 的集合, $h \in H$
	$N$ 运输方式 $n$ 的集合, $n \in N = \{1, 2, 3\}$ , 其中 1 为公路, 2 为铁路, 3 为水路
参数变量	$\beta$ 货物在途时间价值
	$D_i$ 腹地城市的运输需求
	$C_d, C_1, C_2$ 直达、经一次中转、经两次中转所需路程成本
	$C_{ih}^n$ 节点 $i$ 到 $h$ 使用运输方式 $n$ 的单位运输成本
	$d_{ih}^n$ 节点 $i$ 到 $h$ 使用运输方式 $n$ 的运输距离
	$e^n$ 采用运输方式 $n$ 时的碳排放因子
	$e_j^{nn'}, e_k^{nn'}$ 在中转节点 $j, k$ 处由运输方式 $n$ 转为 $n'$ 时的碳排放因子
	$C_j, T_j$ 在中转节点 $j$ 单位存储成本、储存时间
	$C_j^{nn'}$ $n$ 与 $n'$ 交通工具转换时的单位操作成本
	$T_j^{nn'}$ 货物在中转节点 $j$ 时由运输方式 $n$ 换为 $n'$ 的操作时间
	$G_{ih}^1, G_{ij}^1, G_{ik}^1$ 节点 $i$ 到 $h, i$ 到 $j, i$ 到 $k$ 的公路运输能力限制
	$G_{jh}^2, G_{jk}^2$ 节点 $j$ 到 $h, j$ 到 $k$ 的铁路运输能力限制
	$G_{kh}^3, G_{kj}^3$ 节点 $k$ 到 $h, k$ 到 $j$ 的水路能力限制
	$U_j, U_k, U_h$ 节点 $j, k, h$ 最大容量限制
	$f_d, f_t$ 路程成本、中转成本
	$f_1, f_T$ 货物运输成本、时间成本
	$A$ 碳排放限额
	$p$ 碳交易价格
目标函数	$f, f_c$ 货物运输总成本、碳排放量
决策变量	$x_j, x_k$ 0-1 决策变量, 货物若经过无水港 $j$ 或内河港口 $k$ , 则决策变量为 $x_j = 1$ 或 $x_k = 1$ , 否则 $x_j = 0$
	$Q_{ih}$ 节点 $i$ 到港口 $h$ 的货运量
	$Q_{ijh}, Q_{ikh}$ 节点 $i$ 经由无水港 $j$ 或内河港口 $k$ 到达海港 $h$ 的货运量
	$Q_{ijkh}, Q_{ikjh}$ 从节点 $i$ 经 $k, j$ 节点进行二次中转至海港 $h$ 的运输量

2.3 目标函数

结合上文所述的集装箱网络的成本结构及模型假设, 在本文问题中主要涉及三类成本: 运输成本、时间成本以及 CO<sub>2</sub> 排放产生的碳交易成本。

1) 运输成本

运输成本是指集装箱从腹地城市至沿海港口的整个过程所需花费的运输费用总和  $f_1$ , 主要由在途路程成本  $f_d$  和在中转节点转运成本  $f_t$  组成。即

$$\begin{aligned} f_d = & \sum_{i \in I} \sum_{h \in H} Q_{ih} \times C_{ih}^1 + \sum_{i \in I} \sum_{j \in T_D} Q_{ijh} \times (C_{ij}^1 + C_{jh}^2) + \sum_{i \in I} \sum_{k \in T_R} Q_{ikh} \times (C_{ik}^1 + C_{kh}^3) + \\ & \sum_{i \in I} \sum_{h \in H} \sum_{j \in T_D} \sum_{k \in T_R} (C_{ij}^1 + C_{jk}^2 + C_{kh}^3) \times Q_{ijks} + \\ & \sum_{i \in I} \sum_{h \in H} \sum_{j \in T_D} \sum_{k \in T_R} (C_{ik}^1 + C_{kj}^3 + C_{jh}^2) \times Q_{ikjs}, \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned} f_t = & (\sum_{i \in I} \sum_{j \in T_D} (C_j^{12} + C_j) \times x_j \times Q_{ijh} + \sum_{i \in I} \sum_{k \in T_R} (C_k^{13} + C_k) \times x_k) \times Q_{ikh} + \\ & \sum_{i \in I} \sum_{j \in T_D} \sum_{k \in T_R} (C_j + C_j^{12} + C_k + C_k^{23}) \times x_j \times x_k \times Q_{ijkh} + \\ & (C_k + C_k^{13} + C_j + C_j^{32}) \times x_k \times x_j \times Q_{ikjh}, \end{aligned} \tag{2}$$

$$f_1 = f_d + f_t \quad (3)$$

## 2) 货物时间成本

时间成本  $f_T$  是指在运输过程、中转过程及堆存过程中耗时而产生的成本。公式为

$$f_T = \sum_{i \in I} \sum_{h \in H} \beta \times d_{ih}^1 / v^1 \times Q_{ih} + f_{T_1} + f_{T_2}, \quad (4)$$

$$f_{T_1} = \sum_{i \in I} \sum_{j \in T_D} \beta \times (d_{ij}^1 / V^1 + T_j + T_j^{12}) \times x_j \times Q_{ijh} + \sum_{i \in I} \sum_{k \in T_R} \beta \times (d_{ik}^1 / v^1 + T_k + T_k^{13}) \times x_k \times Q_{ikh}, \quad (5)$$

$$f_{T_2} = \sum_{i \in I} \sum_{h \in H} \sum_{j \in T_D} \sum_{k \in T_R} \beta \times \{d_{ij}^1 / v^1 + T_j + T_j^{12} + d_{jk}^2 / V^2 + T_k + T_k^{23} + d_{kh}^3 / v^3\} \times x_j \times x_k \times Q_{ijkh} + \sum_{i \in I} \sum_{h \in H} \sum_{k \in T_R} \sum_{j \in T_D} \beta \times \{d_{ij}^1 / v^1 + T_k + T_k^{13} + d_{kj}^3 / v^3 + T_j + T_j^{32} + d_{kh}^3 / v^3\} \times x_k \times x_j \times Q_{ikjh} \quad (6)$$

## 3) 碳排放量

先由不同碳排放因子来计算运输总  $\text{CO}_2$  排放量  $f_C$ , 再由  $f_C$  来确定碳交易成本。公式为

$$f_C = \sum_{i \in I} \sum_{h \in H} e^1 \times d_{ih}^1 \times Q_{ih} + \sum_{i \in I} \sum_{j \in T_D} (e^1 \times d_{ij}^1 + e^{12} + e^2 \times d_{jh}^2) \times x_j + \sum_{i \in I} \sum_{k \in T_R} (e^1 \times d_{ik}^1 + e^{13} + e^3 \times d_{kh}^2) \times x_k + \sum_{i \in I} \sum_{j \in T_D} \sum_{k \in T_R} (e^1 \times d_{ij}^1 + e^{12} + e^2 \times d_{jk}^2 + e^{23} + e^3 \times d_{kh}^3) \times x_j \times x_k \times Q_{ijkh} + \sum_{i \in I} \sum_{k \in T_R} \sum_{j \in T_D} (e^1 \times d_{ik}^1 + e^{13} + e^3 \times d_{kj}^3 + e^{32} + e^2 \times d_{jh}^2) \times x_k \times x_j \times Q_{ikjh} \quad (7)$$

## 4) 目标函数

目标函数公式为

$$\min f = f_1 + f_T + p \times (f_C - A) \quad (8)$$

$$\min f_C = \sum_{i \in I} \sum_{h \in H} e^1 \times d_{ih}^1 \times Q_{ih} + \sum_{i \in I} \sum_{j \in T_D} (e^1 \times d_{ij}^1 + e^{12} + e^2 \times d_{jh}^2) \times x_j + \sum_{i \in I} \sum_{k \in T_R} (e^1 \times d_{ik}^1 + e^{13} + e^3 \times d_{kh}^2) \times x_k + \sum_{i \in I} \sum_{j \in T_D} \sum_{k \in T_R} (e^1 \times d_{ij}^1 + e^{12} + e^2 \times d_{jk}^2 + e^{23} + e^3 \times d_{kh}^3) \times x_j \times x_k \times Q_{ijkh} + \sum_{i \in I} \sum_{k \in T_R} \sum_{j \in T_D} (e^1 \times d_{ik}^1 + e^{13} + e^3 \times d_{kj}^3 + e^{32} + e^2 \times d_{jh}^2) \times x_k \times x_j \times Q_{ikjh} \quad (9)$$

其中: 式 (5)、式 (6) 表示货物经一次、二次中转运输的时间成本; 式 (8) 表示模型的目标函数是求总成本最小值, 该目标函数由运输成本、时间成本以及  $\text{CO}_2$  排放产生的碳交易成本构成; 式 (9) 表示求模型的目标函数总  $\text{CO}_2$  排放最小。

## 2.4 模型的约束条件

### 1) 容量约束

(1) 中转节点容量限制为

$$\sum_{i \in I} \sum_{h \in H} Q_{ijh} + \sum_{i \in I} \sum_{k \in T_R} \sum_{h \in H} Q_{ijkh} \leq U_j \times x_j, j \in T_D, \quad (10)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{h \in H} Q_{ikh} + \sum_{i \in I} \sum_{j \in T_D} \sum_{h \in H} Q_{ikjh} \leq U_k \times x_k, k \in T_R \quad (11)$$

(2) 各海港容量限制为

$$\sum_{i \in I} Q_{ih} + \sum_{i \in I} \sum_{j \in T_D} Q_{ijh} + \sum_{i \in I} \sum_{k \in T_R} Q_{ikh} + \sum_{i \in I} \sum_{j \in T_D} \sum_{k \in T_R} Q_{ijkh} + \sum_{i \in I} \sum_{k \in T_R} \sum_{j \in T_D} Q_{ikjh} \leq U_h, h \in H \quad (12)$$

### 2) 运输能力约束

(1) 内陆无水港与沿海港口之间的铁路能力限制为

$$\sum_{i \in I} Q_{ijh} + \sum_{i \in I} \sum_{k \in T_R} Q_{ikjh} \leq G_{jh}^2, j \in T_D \quad (13)$$

(2) 内河港口与沿海港口之间的水路能力约束为

$$\sum_{i \in I} Q_{ikh} + \sum_{i \in I} \sum_{k \in T_R} Q_{ijkh} \leq G_{kh}^3, k \in T_R \circ$$

(14)

(3) 中转节点之间的水路或铁路运输能力限制为

$$\sum_{i \in I} \sum_{h \in H} Q_{ijkh} \leq G_{jk}^2, j \in T_D, k \in T_R,$$

(15)

$$\sum_{i \in I} \sum_{h \in H} Q_{ikjh} \leq G_{kj}^3, j \in T_D, k \in T_R \circ$$

(16)

3) 决策变量

$$X_j = \begin{cases} 0, & \text{没经过该中转节点} \\ 1, & \text{经过该中转节点} \end{cases}, j \in T = T_D \cup T_R \circ$$

(17)

4) 整数约束、非负约束

$$Q_{ih} \in N, Q_{ijh} \in N, Q_{ikh} \in N, Q_{ijkh} \in N, Q_{ikjh} \in N.$$

(18)

3 实例分析

3.1 实例描述及数据收集

广东省内集装箱货物运输大部分于广州港、深圳港和珠海港出口，因此，以广东省内集装箱运输网络为例，广东省内城市产生的集装箱货运需求经过多式联运运输网络流向海港，并在海港等待出口。选取广州港、深圳港和珠海港作为海港节点；21 个地级城市作为货运需求节点。而对于中转节点的选取，由于广东省内既有能承担水运集装箱中转服务的内河港口又有可以提供铁路中转服务的无水港，因此将广东省内能够承担集装箱中转服务的内河港口和无水港都列入中转节点。

根据调查和数据收集，所选择的腹地城市、中转节点以及海港汇总如下。

1) 海港：广州港（南沙集装箱码头）、深圳港（深圳盐田港）、珠海港。

2) 内河港口（出自广东省内河港口布局规划）：佛山港、江门港、中山港、珠海港、东莞虎门港、肇庆港。

3) 无水港（即内陆铁路中转节点）：广州南沙港南站、茂名东货场、深圳平湖南站、东莞铁路口岸货场、惠州站。

4) 腹地城市：广州市、深圳市、佛山市、东莞市、中山市、珠海市、江门市、肇庆市、惠州市、汕头市、潮州市、揭阳市、汕尾市、湛江市、茂名市、阳江市、云浮市、韶关市、清远市、梅州市、河源市。

实例研究选取广东省内城市产生的货物运输，由于研究对象是国内集装箱多式联运运输网络，因此为计算统一，在计算中均选用人民币作为货币单位，并以 TEU（twenty-feet equivalent unit）为集装箱的标准单位。模型需要的参数数据及来源见表 2，其中碳排放因子由于受到各种因素的影响，且估算方法也各不相同，因此不同条件下所求的碳排放因子也各不相同。本文中涉及到的碳排放系数采用张蝶<sup>[15]</sup>针对我国公路、水路、铁路集装箱运输的实际情况研究的结果，公路、铁路和水路碳排放系数分别取 2.189、0.423、0.094 kg/(TEU·km)，能更好地反映我国集装箱运输的排放特点。

表 2 模型参数来源表  
Tab.2 Sources of model parameters

描述	数据来源
货物在途时间价值	取 1.7339 元/(TEU·h) <sup>[6]</sup>
腹地城市的运输需求	查询广东省各腹地城市 2022 年国民经济和社会发展统计公报
单位运输成本	取戴倩调研所得的单位运输费用 <sup>[13]</sup> ，铁路的单位集装箱运费按《铁路货物运价率表 2023》的费用标准
运输距离	公路运输距离通过地图查询获得；水路运输距离通过中国港口网船舶跟踪测距获得；铁路运输距离通过查询“中国铁路客户服务中心——货运服务”网站获得

续表	
描述	数据来源
单位存储成本、储存时间	出自《中国港口年鉴 2017》 <sup>[14]</sup>
中转操作成本、操作时间	
节点最大容量限制	根据各节点设计集装箱容量得到
碳交易价格	使用 2022 年中国平均碳交易价格

3.2 碳交易模型求解

模型采用遗传算法进行求解, 在 MATLAB R2017b 软件中进行编程并改进, 具体求解流程如图 1 所示。在碳交易模型中, 本文先计算出未引入碳交易政策时的总 CO<sub>2</sub>排放量, 并将其作为基础数据 (即模型中无碳排放成本时所求结果), 按 5% 的下降幅度得出一系列碳排放配额。在模型计算结果 (见表 3) 中发现, 当碳免费配额比例低于 90% 时, 运输网络总碳排放量并没有明显降低, 而总成本在线性上升, 所以在 90% ~ 100% 的碳免费配额比例中, 又按 2% 的下降幅度细分一系列碳排放配额。

与一般的遗传算法不同的是, 本文中的模型在运算过程中加入移民算子对算法进行改进。从一个种群中选择一定数量适应度较高的个体作为移民候选, 再将所选中的个体移民到目标种群中, 将最差个体进行替换, 上述做法能够确保选出较好的种群内较好的个体, 从而提高解的质量。

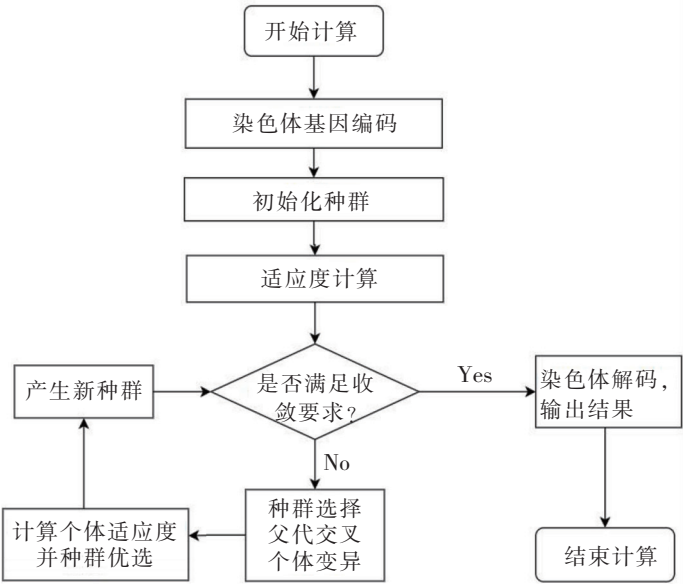


图 1 模型求解流程图  
Fig.1 Flowchart of model solving

表 3 碳交易机制下的广东省集装箱多式联运网络的模型求解结果

Tab.3 Model solution results of container multimodal transport network in Guangdong Province under carbon trading mechanism

项目	碳免费配额比例/%									
	100	98	96	95	94	92	90	85	80	0
碳免费配额/t	28 130	27 568	27 005	26 724	26 442	25 880	25 317	23 911	22 504	0
总成本/元	260 932	260 058	264 977	267 936	270 153	275 546	280 922	294 230	307 667	522 777
总碳排放量/t	28 130	27 500	27 468	27 426	27 380	27 380	27 380	27 380	27 380	27 380
可交易的碳排放额/t	0	68	463	702	938	1501	2 063	3 470	4 876	27 380
海港货流量 /TEU	广州港	3 055 374	3 072 909	3 355 391	3 201 851	3 209 416	3 209 416	3 209 416	3 209 416	3 209 416
	深圳港	133 603	252 308	123 366	123 366	123 366	123 366	123 366	123 366	123 366
	珠海港	407 345	271 105	117 565	110 000	117 565	117 565	117 565	117 565	117 565
	直达	291 284	110 000	110 000	110 000	110 000	110 000	110 000	110 000	110 000
	在无水港中转	2 918 053	2 933 833	2 780 293	2 770 056	2 770 056	2 770 056	2 770 056	2 770 056	2 770 056
联运货流量 /TEU	在内河港口中转	540 525	706 030	706 030	716 267	723 832	723 832	723 832	723 832	723 832

3.2.1 碳交易政策实施对路径和流量变化的影响

以 98% 的配额比例来看（表 3 中的第 3 列），当碳交易政策引入时，得到的结果相对于未引入碳交易政策的总成本有明显的降低，其对应的网络总 CO<sub>2</sub> 排放量这时出现低于给定的碳免费配额 A 的情况，即  $f_c < A$ ，运输企业或货主可以得到碳交易带来的利润，以减少自身原本的运输总成本。换句话说，在该碳免费配额下，运输网络不仅将 CO<sub>2</sub> 排放量减少到给定的 A 之下，物流企业还因卖出碳排放权获得额外收益，在一定程度上同时达到节约成本和 CO<sub>2</sub> 减排的目标，这也是政府部门和企业希望看到的情况。

由表 3 中后 3 行的分析可知，在引入碳交易政策时，许多企业会选择将公路运输转换为铁路或是水路运输，以减少运输过程中所产生的碳排放。当由于分配的碳免费配额高于企业现在的运输所产生的碳排放，企业就可以拿出多余的碳配额来进行交易，以获得利润来减少总成本。而当碳免费配额不断降低时，企业通过调整运输方案已经做不到让运输网络 CO<sub>2</sub> 总排放量低于给定的 A，即  $f_c > A$ ，所以企业需要付出额外的经济成本去购买 CO<sub>2</sub> 排放额来维持其运输活动，也就是模型中的碳交易成本。

表 3 中的流量分配结果也说明，随着碳免费配额比例的不断降低，经内河港口进行中转的水路中转模式得到很好发展，在内河港口进行中转的货流量明显增多；而相对的，公路运输由于碳排放量较大，企业选择该模式运输的货流量明显减少。由此可见，碳交易政策的引入能有效促使广东省集装箱多式联运网络的部分货流转向更低碳的运输模式，使运输网络达到更好的减排效果。此外，表 3 的结果表明，受碳交易政策实施的影响，刚开始有少量无水港中转货流运输模式转为内河港口中转运输模式，但在碳免费配额比例不断降低的情况下，在无水港中转的货流量趋于稳定。碳交易政策对运输网络的影响主要集中在公路运输上，如部分腹地城市距离港口的距离较远，采用公路运输会产生大量的碳排放，给企业带来巨大的经济负担，多式联运能有效解决这一问题。将单一运输方式改为多式联运时，虽路程成本及中转成本会明显增加，但相对于碳排放引起的成本并不明显，故在碳交易政策的实施下，多式联运会更加受企业的青睐。

3.2.2 碳交易政策实施对总成本和总排放的影响

一般来说，企业追求的经济目标和政府的排放目标之间是相互冲突的，但引入碳交易政策之后，可以将排放量转变成为运输总成本的一部分，排放量的变化时刻影响总成本的变化。

从图 2 中可以看出，引入碳交易政策后，CO<sub>2</sub> 排放得到有效控制，说明碳交易政策的引入有利于低碳运输。在碳交易机制下，随着碳免费配额比例的减少，运输总排放量在明显地降低，在刚引进碳交易政策时总排放降低得最为明显；总成本一直呈现缓慢地、较均匀地增长趋势，在刚引进碳交易政策时总成本有降低表现，后续均是增长趋势。

从图 2 中不难发现，广东省集装箱多式联运网络在 94% ~ 100% 的配额比例区间中不仅可以得到可观的减排效果，同时运输网络总成本增长幅度也不大；在配额比例低于 94% 后，运输网络总成本依旧在较均匀地增长，而此时运输网络总排放没有明显的变化。因此，94% ~ 100% 之间的配额比例对于广东省集装箱多式联运网络来说，是较为重要的决策点。在这些碳免费配额比例中，98% 的碳免费配额比例能使运输网络在减少碳排放的同时也减少企业的运输成本，在一定程度上既实现碳减排的目标又节省企业成本，这是行业部门和决策者希望看到的情形；94% 的碳免费配额比例能使运输网络达到最小碳排放，此时该运输网络虽然能实现最优

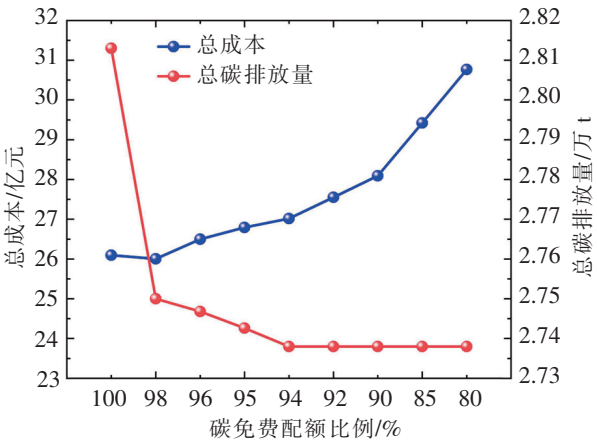


图 2 碳交易机制下的广东省集装箱运输网络总成本和总 CO<sub>2</sub> 排放变化图

Fig.2 The total cost and total CO<sub>2</sub> emissions of the container transport network in Guangdong Province under the carbon trading scheme

低碳发展,但是运输总成本相比之下会更高一些。

4 分析与讨论

需要注意的是,表3的模型求解结果均由2022年碳交易平均价格计算所得,由于碳交易价格过低,碳排放成本在总成本里边所占比例就会相对较低,对运输网络的影响也相对会低一些。由市场碳交易价格看来,大多数国家目前的市场碳交易价格是偏低的,当前我国市场碳交易价格大概在40~60元/t<sup>[16]</sup>,而欧盟排放交易体系(EUETS)的碳交易价格均价已超过80欧元/t<sup>[17]</sup>,因此我国碳市场价格还有较大的增长空间。当碳交易价格上涨时,碳排放成本占总成本的比重开始上升,此时碳排放对运输网络的影响也会有所上升。当政府给的碳免费配额不足以满足企业排放需求时,企业就需要从碳交易市场购入碳排放额,碳交易市场需求就会上涨,碳市场交易价格也受市场需求波动而上涨,此时碳排放成本增长程度就会比计算结果高许多,占总成本比例也更高。当碳排放成本所占比例大于路程成本或时间成本时,企业的运输方案也会随之进行调整。除此之外,本文所选取的部分固定的参数在现实运输中其实并不确定,如每个城市的运输需求和货物运输的运输速度、运输距离、单位运输成本等,不同的参数会使运输方案发生改变,进一步影响碳减排政策对集装箱多式联运网络的碳减排效果。其中每个城市的运输需求需引起更多关注。货物运输需求的不确定性对运输网络货流分配结果的影响相对较大,若距离港口较近的腹地城市有着更大的货运需求,运输网络中的流量分配也会发生相应的改变,当运输中的路程成本及时间成本的占比远多于碳排放成本时,货物运输采用公路运输的可能性也会增大。因此,在后续研究中可以考虑加入不确定因素对货运需求进行讨论,减少不确定因素对模型本身的影响。

在碳配额交易制度中,本文讨论的是政府免费分配碳配额,即政府根据企业过去的碳排放水平来确定其未来的碳免费配额。政府免费分配碳配额降低了企业的减排压力,为高碳排放企业提供过渡期以适应新的碳配额交易机制,增强了对企业的吸引力;但同时也有着不可忽视的缺点,它削弱了碳配额交易的市场力量和价格信号,造成碳配额交易制度的低效。由于本次模型只考虑广东省内集装箱运输网络运输,腹地城市、中转节点及海港较少,其相对于全国的集装箱运输网络来说是较小的一部分,在网络中能选择的运输路径也相对较少,所以在碳免费配额较高的时候运输方案已经达到满足最小碳排放的最优解。在上面的计算中,本文得到94%的碳免费配额比例能使运输网络达到最小碳排放,此时该运输网络能实现最优低碳发展,但实际情况是,政府难以给到如此高的碳免费配额,此时政府和企业就要有相应的措施来应对。

在我国“双碳”背景之下,加入铁路和水路的多式联运模式是最有效的减排方式,这也就要求相关部门进一步扩大对于铁路和水路的建设和补贴力度,让企业在运输方案的选择中能够更偏向低碳运输。对于运输中为有效减排而更换运输方式导致成本增加的企业,政府也可制定相应的补贴政策来鼓励,以促进企业运输方式的转化。当国家分配的免费碳配额较低时,物流企业也可以通过别的方式来降低运输成本,例如推广使用清洁能源车辆、优化货车装载率、减少空载运输、减少停车怠速等,降低能源消耗和碳排放。

5 建议

1) 在碳交易政策的启示下,本文探索不同的碳免费配额比例对广东省集装箱运输网络优化决策的影响,得出能实现广东省多式联运运输网络有效减排的碳免费配额比例为94%~100%。其中98%的碳免费配额比例能使运输网络在碳排放减少的同时也减少企业的运输成本,在一定程度上同时达到节约成本和CO<sub>2</sub>减排的目标,这是行业部门和决策者最希望看到的情形;而94%的碳免费配额比例能使运输网络达到最小碳排放,此时运输网络虽然能实现最优低碳发展,但是运输总成本相比之下会更高一些。政府在碳交易政策的制定方面,可将这两个碳免费配额比例纳入考虑。

2) 在运输策略上,通过对广东省集装箱多式联运网络的分析可以看出引入碳交易政策确实有一定程度的减排效果,能有效带动多式联运的发展。在内河港口进行中转的货流量明显增长,这意味着政府相关部门需要更加关注内河港口基础设施完善与扩建,以应对交通运输业的低碳发展需求。

3) 以上结论虽然是针对广东省集装箱运输网络展开的研究,但其方法和研究思路同样也可运用于其他更大或更复杂的物流运输网络,同样可为政府或行业部门在低碳发展方面提供政策决策支撑。

## [ 参 考 文 献 ]

- [1] 高敬,何欣荣,王默玲,等. 全国碳排放权交易市场正式启动上线交易[EB/OL]. (2021-07-17)[2022-9-12]. <http://www.financeun.com/newsDetail/43810.shtml>.
- [2] 孙家庆,王胜男,闫淑贤. 考虑碳排放的冷藏集装箱多式联运路径选择[J]. 大连海事大学学报,2022,48(2):57-65.
- [3] 孙秋洋. 考虑碳交易的集装箱多式联运服务网络优化研究[D]. 北京:北京交通大学,2021.
- [4] FARRUKH I, 马晓旦. 碳交易背景下的多式联运路径优化[J]. 物流技术,2022,41(11):72-75,116.
- [5] JANIC M. Modelling the full costs of an intermodal and road freight transport network[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment,2007,12(1):33-44.
- [6] DAI Q, YANG J, LI D. Modeling a three-mode hybrid port-hinterland freight intermodal distribution network with environmental consideration; the case of the Yangtze River economic belt in China[J]. Sustainability,2018,10(9):3081.
- [7] ZAKERI A, DEHGHANIAN F, FAHIMNIA B, et al. Carbon pricing versus e-missions trading: a supply chain planning perspective[J]. International Journal of Production Economics,2015,164(6):197-205.
- [8] ZHANG M, JANIC M, TAVASSZY L A. A freight transport optimization model for integrated network, service, and policy design[J]. Transportation Research Part E: logistics and transportation review,2015,77:61-76.
- [9] CHEN X, WANG X J. Effects of carbon emission reduction policies on transportation mode selections with stochastic demand[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review,2016,90:196-205.
- [10] BOUCHERY Y, FRANSOO J. Cost, carbon emissions and modal shift in intermodal network design decisions[J]. International Journal of Production Economics,2015,164:388-399.
- [11] LAM S L, GU Y M. A market-oriented approach for intermodal network optimisation meeting cost, time and environmental requirements[J]. International Journal of Production Economics,2016,171:266-274.
- [12] DAI Q, YANG J Q. A Distributionally robust chance-constrained approach for modeling demand uncertainty in green port-hinterland transportation network optimization[J]. Symmetry,2020,12(9):1492.
- [13] 戴倩. 考虑碳排放的港口腹地集装箱多式联运网络优化研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2021.
- [14] 中国港口年鉴编辑部. 中国港口年鉴(2017年版)[M]. 北京:中国港口杂志社,2017:37-43.
- [15] 张蝶. 基于低碳理论的集装箱港口集疏运网络优化研究[D]. 大连:大连海事大学,2015.
- [16] 林静. 协同减排视角下我国碳税制度研究[J]. 重庆科技学院学报(社会科学版),2024(2):28-36.
- [17] 佚名. 《路孚特 2022 年全球碳市场年报》节选:2022 年全球碳市场交易额同比增 14%,再创新高[EB/OL]. (2023-04-04)[2024-06-01]. [https://www.eco.gov.cn/news\\_info/63120.html](https://www.eco.gov.cn/news_info/63120.html).

(责任编辑 朱雪莲 英文审校 周云龙)