

# 低碳情景下的复合轴辐式快递网络规划

张建军, 王嘉铭, 王天浩, 周一卓

(同济大学 经济与管理学院, 上海 200092)

**摘要:** 以快递网络规划问题为研究对象, 分析了中国情境下多层级多服务水平复合轴辐式快递网络的特点, 探讨了网络低碳化运营的内涵与情景, 在此基础上构建了碳税和碳交易 2 种情形下的复合轴辐式快递网络规划决策模型, 进而基于国内快递标杆企业的网络规划实践的实际数据、采用 Lingo 软件进行了相应的模型求解, 分析了成本最小化目标与低碳化目标之间的关联与影响机理。研究结果表明, 追求低碳化和节能减排并不会对传统的追求成本最小化目标的网络结构产生额外影响。

**关键词:** 复合轴辐式快递网络; 网络规划; 低碳化; 多层级; 多服务水平

**中图分类号:** F506

**文献标志码:** A

## Multi-Layered Multi-Service-Leveled Hybrid Hub-Spoke Network Design in Low-Carbon Scenarios

ZHANG Jianjun, WANG Jiaming, WANG Tianhao, ZHOU Yizhuo

(School of Economics and Management, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Aiming at express network designing and based on the real data from the network designing practice of a domestic benchmarking express enterprise, this paper discussed the research of the multi-layer multi-service-leveled hybrid hub-spoke network design in the Chinese situation and the influence mechanism of low-carbon on the network design. It constructed hub-spoke network design decision models in both the situations of carbon tax and carbon trading. In combination with the real data, it solved the models by adopting Lingo 14, and analyzed the connection between the cost-minimizing target and the low-carbon target, as well as the influence mechanism between them. The comparison between the

results illustrates that the pursuit of low-carbon, energy conservation and emission reduction will not impose extra influence on the traditional network structure that pursues the minimal cost.

**Key words:** hybrid hub-spoke express network; network design; low-carbon; multi-layer; multi-service-level

在低碳经济时代, 当全球、全社会已经取得降低碳排放、低碳化的共识之后, 接下来的任务是设计恰当的路径、机制来实现低碳化。我国对低碳化发展始终高度重视, 2020 年 9 月习近平主席在第七十五届联合国大会上提出, 中国将力争 2030 年前二氧化碳排放达到峰值, 努力争取 2060 年前实现碳中和。碳达峰、碳中和是党中央作出的重大战略决策, 着力推进经济社会绿色转型和系统性深刻变革。在这样的背景下, 作为能源消耗大户和碳排放大户, 物流活动的低碳化就成为了必然选择。另一方面, 在进行物流网络设计时, 考虑碳排放具有重要的现实意义<sup>[1]</sup>, 现有研究一般认为物流网络的结构对于物流活动的碳排放量有重要影响, 网络型物流企业通过优化自身网络结构来降低碳排放量是一种可行的运营减排方案<sup>[2]</sup>。

对此, Gallardo 等<sup>[3]</sup>结合跨学科转型创新、管理和工程 (InTIME) 方法用于现有货运系统的概念化、重新设计和重新开发, 构思了一个可以服务于当前货运任务的长期未来多式联运系统, 以实现石化能源消耗的下降。Zhang 等<sup>[4]</sup>发现在区域物流网络中扩大对物流基础设施建设的投资规模有助于降低碳排放量的价值。Bortolini 等<sup>[5]</sup>则针对一个生鲜配送网络进行了针对配送成本、碳排放量、配送时间等 3 类目标的最优化设计。Wang 等<sup>[6]</sup>针对供应链网络

收稿日期: 2021-09-01

基金项目: 国家自然科学基金(M-0310); 上海市软科学重点项目(22692108800)

第一作者: 张建军(1978—), 男, 副教授, 博士生导师, 管理学博士, 主要研究方向为物流与供应链管理。

E-mail: zhangjianjun@tongji.edu.cn

通信作者: 周一卓(1996—), 女, 博士生, 主要研究方向为应急物流与供应链管理。E-mail: zhouyizhuo@tongji.edu.cn



论文  
拓展  
介绍

设计问题构建了总成本和环境成本的多目标函数,进而根据减排强度确定设施选址与运输方式选择结果。浦徐进和李秀峰<sup>[7]</sup>针对存在多配送站的电商物流配送问题,考虑了实际装载量对物流配送过程中车辆燃料消耗量的影响,结合电商平台的承诺送达机制构建了最小化物流成本和延迟收货时间的多目标多配送站车辆路径规划混合整数规划模型。唐慧玲等<sup>[8]</sup>以车辆行驶里程最短和碳排放量最小为目标,构建了带有碳排放约束的多目标VRP(Vehicle Routing Problem)非线性规划模型,并提出了改进的蚁群系统算法进行求解。李进<sup>[9]</sup>以最小化物流成本和总碳排放为目标,建立了基于可信性的多目标模糊数学规划模型。何其超等<sup>[10]</sup>分析了低碳经济对销售物流网络规划的影响,提出了以网络总物流成本最小和网络碳排放总量最少为目标的多目标物流网络规划模型,并在碳排放权交易的约束下以排队论计算逆向物流节点的存储量,考虑物流网络的运输成本、存储成本、建设成本、时间惩罚成本及碳交易成本。文献<sup>[11]</sup>研究了以总成本最低为目标的闭环物流网络设计问题。唐金环等<sup>[12]</sup>通过构建嵌入碳配额差值和选址-路径-库存运作成本的非线性整数规划模型研究了碳配额差值对产供销一体化系统中的选址-路径-库存集成问题的影响,发现企业可以通过运作层的决策优化,以较小的经济成本获得较大的碳减排绩效。崔娥英等<sup>[13]</sup>在传统的物流网络设施选址问题的基础上,与环境因素进行结合,建立了单目标的绿色物流网络模型。类似的还有周章金等<sup>[14]</sup>、赵泉午等<sup>[15]</sup>和肖庆等<sup>[16]</sup>的研究。

现有研究从多目标的选择、决策模型构建等层面已经获得了较丰富的成果,其不足之处在于目前还比较缺乏对碳排放约束操作层面的考量。此外,在当前网络购物、电子商务迅猛发展的时代背景下,快递网络作为一类具有服务时限约束的特殊物流网络,其网络设计对于碳排放的影响机理亟待深入研究。为此,以快递网络规划问题为研究对象,基于一个国内快递标杆企业的网络规划实践的实际数据,研究了中国情景下多层级多服务水平复合轴辐式快递网络规划的决策方法以及低碳化情景对规划决策的影响机理。

## 1 低碳情景下快递网络规划决策分析

### 1.1 低碳情景内涵解析

当前日益严峻的环境形势使碳排放问题受到了

越来越多的重视和关注<sup>[17]</sup>。借鉴国际上典型碳排放法规,结合我国高时效物流产业发展特征,从有利于低碳排放和资源利用的角度,模拟设计以下2种碳排放政策约束情景:

(1)碳税情景:即根据企业的碳排放总量征收一定比例的碳税,这使得碳排放量成为企业的附加成本。

(2)碳交易情景:为企业指定一个碳排放量的配额,如果企业碳排放量控制较好、低于配额量,允许其在市场上销售剩余碳排放量;如果企业碳排放总量超过了配额量,同样允许其在市场上向其他企业购买超额碳排放量。

### 1.2 问题描述

快递网络是由节点和边构成的网络,节点由枢纽节点、各级转运中心和末端配送点组成,边由连接各节点的公路、铁路、航空等配送线路组成<sup>[18]</sup>。对于一个主流的纯轴辐式快递网络规划决策问题而言,通常可以归结为一个 $p$ -hub median数学规划模型,其决策目标通常为物流成本最小化,基本决策问题包括2类:①选择哪些网络节点为hub;②每个hub管辖哪些非hub节点。

本文以我国情境下的快递网络为基本研究对象。根据作者长期对中国快递企业的决策咨询经验,发现其有一定的自身特点,称之为“多层级多服务水平复合轴辐式快递网络”,具体特点可以概括为:①网络需运送短时限和长时限2类服务产品;②网络运输方式有公路运输、铁路运输和航空运输,其中铁路运输和航空运输主要用于hub之间;③在不考虑低碳情景时,网络规划需考虑3类成本:hub建设成本、hub运营成本和运输成本。

本文在此基础上讨论其低碳化规划决策问题,依次在快递企业被征收碳税和碳交易情境下,对此多层级多服务水平复合轴辐式快递网络规划问题构建了基本数学规划模型。

### 1.3 碳税情景下的决策模型

#### 1.3.1 符号与参数定义

(1)数据集合。 $N$ 为当前网络的全部城市集合, $N=\{i|i=1,2,\dots,n\}$ ,其中 $i$ 为城市, $n$ 为网络中城市总数; $H$ 为候选hub集合, $H\subseteq N$ 。

(2)成本参数。 $c_0$ 为通过汽车在非hub城市之间运输的单位费率; $c_t$ 为hub城市之间火车运输的单位费率,通常 $c_t=\delta c_0$  ( $0<\delta<1$ ); $c_a$ 为hub城市之间飞机运输的单位费率; $C(q)$ 为建设成本函数, $q$ 为年快件总数; $O(q)$ 为年运营成本函数。由于与决策无

关,故揽投成本被忽略。

(3)其他参数。 $m$ 为固定投资成本的回收年限; $d_{kij}$ 为城市 $i$ 与城市 $j$ 之间的公路( $k=0$ )或者铁路( $k=t$ )或者飞机( $k=a$ )运输距离, $i, j \in N$ ;  $S$ 为产品类型集合, $S=2$ 短时限产品(如表示次晨达、次日递、隔日递产品等), $S=1$ 表示长时限产品; $q_{Sij}$ 为从城市 $i$ 到城市 $j$ 的 $S$ 产品的总快件数, $i, j \in N$ ;  $w_{Sij}$ 为从城市 $i$ 到城市 $j$ 的 $S$ 产品的总重量, $i, j \in N$ ;  $K$ 为hub的数量; $D_1$ 为hub的最大覆盖半径; $D_2$ 为hub之间的最小距离。

### 1.3.2 决策模型构建

(1)决策变量。 $x_{ij}$ 为0、1决策变量, $x_{ij}=1$ 表示城市 $i$ 以城市 $j$ 为其hub, $x_{ij}=0$ 表示城市 $i$ 不以城市 $j$ 为其hub, $\forall i \in N, \forall j \in H$ 。

(2)目标函数。 $F_1$ 为hub与非hub节点之间的公路运输费用,

$$F_1 = \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \left( c_0 (\omega_{1ij} + \omega_{2ij}) \left( \sum_{o \in H} d_{0ij} x_{io} + \sum_{e \in H} d_{0je} x_{je} \right) \right);$$

$F_2$ 为hub之间短时限产品的航空运费与长时限产品的铁路运输费用,

$$F_2 = \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{o \in H} \sum_{e \in H} (c_t d_{ioe} \omega_{1ij} + c_a d_{aoe} \omega_{2ij}) x_{io} x_{je};$$

$F_3$ 为hub的建设总成本,按年分摊,

$$F_3 = \frac{1}{m} \sum_{h \in H} C \left( \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} (q_{1ij} + q_{2ij}) x_{ih} \right);$$

$F_4$ 为hub的年运营总成本, $F_4 = \sum_{h \in H} O \left( \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} (q_{1ij} + q_{2ij}) x_{ih} \right)$ ,其中, $e_1$

为hub与非hub节点之间的公路运输碳排放量, $e_1 =$

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \left( \frac{\epsilon \gamma}{100} \left( \sum_{o \in H} d_{0io} x_{io} + \sum_{e \in H} d_{0je} x_{je} \right) \right);$$

$e_2$ 为在hub之间短时限产品的航空运输碳排放量与长时限产品的铁路运输碳排放量,

$$\sum_{i, j \in N} \sum_{h_o, h_d \in H} (E_t (\omega_{1ij}, d_{th_o h_d}) + E_a (\omega_{2ij}, d_{ah_o h_d})) x_{ih_o} x_{jh_d};$$

$e_3$ 为hub运营所产生的碳排放总量, $e_3 =$

$$\sum_{h \in H} E_h \left( \sum_{i, j \in N} (q_{1ij} + q_{2ij}) x_{ih} \right);$$

$E_t, E_a, E_h$ 分别为铁路、航空、hub运营的碳排放计算函数; $\gamma$ 为公路运输的百km耗油量; $\epsilon$ 为单位耗油的碳排放量; $r$ 为碳税,元 $\cdot \text{kg}^{-1}$ 碳排放量。

### 1.3.3 决策模型

$$\min F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + re_1 + re_2 + re_3$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \sum_{h \in H} x_{ih} = 1, & i \in N & (1) \\ x_{ih} \leq x_{hh} (\forall i \in N), & h \in H & (2) \\ \sum_{h \in H} x_{hh} = K, & & (3) \\ d_{ih} x_{ih} \leq D_1, & h \in H, i \in N & (4) \\ \sum_{h_o, h_d \in H} d_{th_o h_d} x_{ih_o} x_{jh_d} \geq D_2, & i, j \in N & (5) \\ x_{ih} = \{0, 1\}, & i \in N, h \in H \end{cases}$$

其中,约束(1)表示任一个节点仅由一个hub管辖;约束(2)表示非hub节点不能管辖任何节点;约束(3)表示总共有 $K$ 个hub;约束(4)表示hub的最大覆盖半径为 $D_1$ ;约束(5)表示hub之间的距离应不小于 $D_2$ 。

## 1.4 碳交易情景下的决策模型

### 1.4.1 符号与参数定义

(1)数据集合。 $N$ 为当前网络的全部城市, $N = \{i | i = 1, 2, \dots, n\}$ ;  $H$ 为候选hub集合, $H \subseteq N$ 。

(2)成本参数。 $c_0$ 为通过汽车在非hub城市之间运输的单位费率; $c_t$ 为hub城市之间火车运输的单位费率,通常 $c_t = \delta c_0$  ( $0 < \delta < 1$ );  $c_a$ 为hub城市之间飞机运输的单位费率; $C(q)$ 为建设成本函数, $q$ 为年快件总数; $O(q)$ 为年运营成本函数。由于与决策无关,故揽投成本被忽略。

(3)其他参数。 $m$ 为固定投资成本的回收年限; $d_{kij}$ 为城市 $i$ 与城市 $j$ 之间的公路( $k=0$ )或者铁路( $k=t$ )或者飞机( $k=a$ )运输距离, $i, j \in N$ ;  $S$ 为产品类型集合, $S=2$ 短时限产品(如表示次晨达、次日递、隔日递产品等), $S=1$ 表示长时限产品; $q_{Sij}$ 为从城市 $i$ 到城市 $j$ 的 $S$ 产品的总快件数, $i, j \in N$ ;  $w_{Sij}$ 为从城市 $i$ 到城市 $j$ 的 $S$ 产品的总重量, $i, j \in N$ ;  $D_1$ 为hub的最大覆盖半径; $D_2$ 为hub之间的最小距离。

### 1.4.2 决策模型构建

(1)决策变量。 $x_{ij}$ 为决策变量,为0或1, $x_{ij}=1$ 表示城市 $i$ 以城市 $j$ 为其hub, $x_{ij}=0$ 表示城市 $i$ 不以城市 $j$ 为其hub, $\forall i \in N, \forall j \in H$ 。

(2)目标函数。

$$F_1 = \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \left( c_0 (\omega_{1ij} + \omega_{2ij}) \left( \sum_{o \in H} d_{0io} x_{io} + \sum_{e \in H} d_{0je} x_{je} \right) \right);$$

$$F_2 = \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{o \in H} \sum_{e \in H} (c_t d_{ioe} \omega_{1ij} + c_a d_{aoe} \omega_{2ij}) x_{io} x_{je};$$

$$F_3 = \frac{1}{m} \sum_{h \in H} C \left( \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} (q_{1ij} + q_{2ij}) x_{ih} \right); \quad F_4 =$$



$\sum_{h \in H} O \left( \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} (q_{1ij} + q_{2ij}) x_{ih} \right) x_{hh}$ ;  $F_5$  为购买超额碳排放指标的成本(或出售剩余碳排放额度得到的收益),  $F_5 = (e_1 + e_2 + e_3 - e^{**}) p_e$ 。其中,  $e^{**}$  为碳排放配额;  $p_e$  为碳排放指标市场交易的单价, 元·kg<sup>-1</sup>碳排放量。

#### 1.4.3 决策模型

$$\begin{aligned} \min \quad & F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5 \\ \text{s.t.} \quad & \begin{cases} \sum_{h \in H} x_{ih} = 1, & i \in N & (6) \\ x_{ih} \leq x_{hh} (\forall i \in N), & h \in H & (7) \\ \sum_{h \in H} x_{hh} = K, & & (8) \\ d_{ih} x_{ih} \leq D_1, & h \in H, i \in N & (9) \\ \sum_{h_a, h_d \in H} d_{ih_a h_d} x_{ih_a} x_{jh_d} \geq D_2, & i, j \in N & (5) \\ x_{ih} = \{0, 1\}, & i \in N, h \in H \end{cases} \end{aligned}$$

其中, 约束(6)表示任一个节点仅由一个hub管辖; 约束(7)表示非hub节点不能管辖任何节点; 约束(8)表示总共有  $K$  个hub; 约束(9)表示hub的最大覆盖半径为  $D_1$ ; 约束(10)表示hub之间的距离应不小于  $D_2$ 。

## 2 基于标杆企业实际数据的实证分析

基于研究的对象问题, 着眼于探究网络结构优化的经济目标与节能减排目标之间的关联是否与人们的预期相符, 并结合一个案例进行分析, 因此首先在分析国内物流能源消耗状况的基础上明确快递业的碳排放计算公式, 进而采用某国内标杆快递公司的案例进行数据分析。

### 2.1 快递网络碳排放的计算

为分析碳排放与网络规划之间的关联, 首先应深入调研、分析我国快递业务运作过程的典型组成环节、构建快递业务运营的碳排放计算模型。与现有研究基于国家、联合国有关计量模型不同的是, 本文对快递行业的碳排放相关参数进行了实际调查, 通过进一步研究发现, 快递网络中的碳排放主要发生在2个环节: 线路运输与分拣中心运作。为此设计了一个关于这2个环节物流能源消耗的问卷, 通过与典型企业(赛诚、马士基、中国邮政速递物流公司与各省分公司、宝钢运输部、云南红河集团运输部、宁波国际物流公司、上海市普陀区重点物流企业

等)进行访谈, 并结合网络在线调查, 基于第一手资料进行分析。

根据样本计算可得, 70%以上企业采用的燃料为柴油, 故采用柴油作为模型中的燃料。

根据物流企业样本数据和IPCC《国家温室气体排放清单指南》的单位能耗碳排放量数据得到运输环节的碳排放量基础计算公式:  $C_E = \alpha V (d_B F_B + d_T F_T)$ , 其中,  $C_E$  为碳排放量;  $V$  为货物运输量, kg;  $d_B$  为支线运输的运距, 100km;  $F_B$  为支线平均每100km·kg<sup>-1</sup>耗油量,  $F_B = 0.00383L \cdot (kg \cdot 100km)^{-1}$ ;  $d_T$  为干线运输的运距, 100km;  $F_T$  为干线平均每100km·kg<sup>-1</sup>耗油量,  $F_T = 0.00286L \cdot (kg \cdot 100km)^{-1}$ ;  $\alpha$  为燃料碳排放系数,  $\alpha = 2.63kg \cdot L^{-1}$ 。

### 2.2 低碳快递网络规划情景案例

基于低碳情景下的快递网络规划决策模型作进一步的分析。采用某国内标杆快递公司在长三角地区16个城市的实际流量流向数据, 结合碳排放量计算公式构建实际决策模型进行数值分析。案例有关数据如表1和表2所示。

1.3节和1.4节所构建的决策模型本质上  $p$ -hub median模型的改进, 是一个NP-Hard问题, 对于大规模问题而言难以短时间求出全局最优解。考虑到本案例中所分析的是一个仅有16个网络节点的小规模问题, 因此, 基于遍历过程采用商业软件Lingo 17.0对以上决策问题进行求解。

(1)情形1: 无低碳要求, 以最小化网络总成本为目标。最优网络规划方案如表3所示。

(2)情形2: 无成本要求, 以最小化网络碳排放总量为目标。经计算, 结果如表4所示。对照表4和表3可以发现, 数据分析结果支持了网络规划问题中成本最小化目标与碳排放量最小化目标的一致性。

(3)情形3: 碳税情景。经计算, 在碳税  $r$  从0.03至0.30以0.01的梯度递增变化过程中, 最优网络结构没有变化, 与表3保持一致。当碳税  $r$  增加至1.90时, 网络规划最优方案变为5个hub, 如表5所示。

表5表明, 在此案例中碳税并没有影响到网络结构。换言之, 在碳税征收力度为(0.03, 0.30)范围之内时不会影响企业对网络结构的决策结果。

(4)情形4: 碳交易情景。给定碳限额, 计算可得表6结果。

相应的最优网络规划方案为( $K=4$ ): 杭州(宁波, 绍兴, 台州), 上海(舟山), 苏州(常州, 湖州, 嘉兴, 南通, 无锡), 镇江(南京, 泰州, 扬州)

从表6中可以看到, 在此案例中, 碳排放配额的

表 1 流量流向数据  
Tab. 1 Data of flow direction

单位:件

起点	终点															
	常州	杭州	湖州	嘉兴	南京	南通	宁波	上海	绍兴	苏州	台州	泰州	无锡	扬州	镇江	舟山
常州	0	182 399	32 895	63 280	235 373	75 711	159 300	620 486	19 333	440 297	66 067	24 638	150 562	56 934	36 373	331
杭州	12 4365	0	78 428	154 754	230 735	61 383	407 340	2 358 092	203 725	165 920	295 713	25 176	101 556	48 708	41 221	0
湖州	12 144	102 284	0	5 159	22 325	12 677	7 697	167 620	3 018	21 557	2 747	9 571	13 815	5 688	3 669	0
嘉兴	57 123	182 008	5 157	0	43 807	16 087	15 198	434 615	3 901	28 417	9 584	973	17 311	4 114	4 967	0
南京	11 0154	126 039	19 633	25 673	0	120 096	77 477	969 567	22 954	232 056	47 314	63 752	182 879	81 278	92 480	3 690
南通	18 5675	268 480	42 250	90 366	307 461	0	248 593	790 482	78 897	322 000	101 157	42 879	224 026	112 625	82 749	43 420
宁波	27 858	373 371	6 583	7 206	53 228	40 894	0	556 047	10 513	70 591	15 433	1 0023	46 935	11 801	10 063	0
上海	64 1801	1 771 994	188 091	291 612	1 570 207	617 694	1 182 865	0	234 888	2 358 685	437 345	245 488	1 053 944	270 282	259 724	91 576
绍兴	15 757	1 053 170	1 692	1 003	28 280	17 998	3 627	142 344	0	19 388	2 171	5 366	8 004	3 092	3 292	0
苏州	37 4907	135 108	28 812	48 435	354 139	538 547	109 745	3 447 979	28 329	0	60 096	32 114	681 544	50 880	65 322	1 897
台州	22 907	131 782	3 283	12 209	79 926	22 795	25 527	135 500	4 286	96 723	0	6 227	35 532	7 721	16 250	0
泰州	17 715	87 234	5 162	18 778	70 006	16 591	58 727	137 592	19 211	33 363	25 301	0	24 500	10 910	7 489	6 197
无锡	57 350	77 203	14 205	26 791	154 444	54 291	67 287	315 500	12 819	241 498	50 711	8 666	0	23 784	22 429	542
扬州	66 652	297 882	31 939	78 236	255 482	52 397	207 936	583 956	71 051	196 087	98 451	32 117	116 781	0	62 446	14 068
镇江	35 932	101 080	14 768	34 663	249 649	91 172	96 260	465 924	26 732	79 093	56 625	17 197	55 545	27 230	0	13 199
舟山	211	0	0	0	0	241	0	897	0	373	0	120	241	100	0	0

表 2 公路运输距离  
Tab. 2 Highway transportation distance

单位:km

起点	终点															
	常州	杭州	湖州	嘉兴	南京	南通	宁波	上海	绍兴	苏州	台州	泰州	无锡	扬州	镇江	舟山
常州	0	208	136	172	128	153	310	181	283	96	482	97	55	111	78	384
杭州	208	0	81	89	277	248	155	178	64	160	270	313	203	292	270	230
湖州	136	81	0	100	205	196	235	150	144	94	350	228	151	220	198	310
嘉兴	172	89	100	0	294	173	149	99	122	85	321	238	128	275	241	223
南京	128	277	205	294	0	252	432	303	341	218	547	151	177	96	87	507
南通	153	248	196	173	252	0	207	129	284	105	479	128	125	170	168	380
宁波	310	155	235	149	432	207	0	221	118	230	175	383	273	420	387	85
上海	181	178	150	99	303	129	221	0	210	98	386	233	133	276	246	288
绍兴	283	64	144	122	341	284	118	210	0	196	218	349	240	355	333	192
苏州	96	160	94	85	218	105	230	98	196	0	395	160	50	197	164	296
台州	482	270	350	321	547	479	175	386	218	395	0	550	440	562	554	262
泰州	97	313	228	238	151	128	383	233	349	160	550	0	121	69	79	450
无锡	55	203	151	128	177	125	273	133	240	50	440	121	0	158	124	340
扬州	111	292	220	275	96	170	420	276	355	197	562	69	158	0	40	488
镇江	78	270	198	241	87	168	387	246	333	164	554	79	124	40	0	453
舟山	384	230	310	223	507	380	85	288	192	296	262	450	340	488	453	0

表 3 无低碳要求情形的最优网络规划方案  
Tab. 3 Optimal network planning scheme without low carbon requirements

K	总成本/元	枢纽城市 (hub)	所辖城市
4	7 816 788	杭州	宁波,绍兴,台州,杭州
		上海	舟山,上海
		苏州	常州,湖州,嘉兴,南通,无锡,苏州
		镇江	南京,泰州,扬州,镇江

表 4 K=4 时碳排放最小化的最优网络规划方案  
Tab. 4 Optimal network planning scheme for minimizing carbon emission (K = 4)

K	碳排放总量/kg	枢纽城市 (hub)	所辖城市
4	706 712	杭州	宁波,绍兴,台州,杭州
		上海	舟山,上海
		苏州	常州,湖州,嘉兴,南通,无锡,苏州
		镇江	南京,泰州,扬州,镇江

变化没有影响企业网络结构设计的最终结果,从而没有因此而影响网络的碳排放总量,这意味着碳交易制度同样没有对网络结构产生影响。

另一方面,从图 1 中可以看到企业年总成本与碳交易价格呈现逆向变化关系,换言之,碳交易价格的上升使得企业年总成本下降。尤其在给定的年碳

表 5 碳税  $r=1.90$  时最优网络规划方案

Tab. 5 Optimal network planning scheme at a carbon tax  $r$  of 1.90

$K$	总成本/元	枢纽城市 (hub)	所辖城市
5	9 184 367	常州	南京,泰州,扬州,镇江,常州
		杭州	绍兴,杭州
		上海	上海
		苏州	湖州,嘉兴,南通,无锡,苏州
		宁波	台州,舟山

表 6  $K=4$  时碳交易情形的规划结果

Tab. 6 Planning results of carbon trading scenario at a  $K$  of 4

年碳排放配额/kg	低碳价情形( $p=30$ 元· $t^{-1}$ )		高碳价情形( $p=300$ 元· $t^{-1}$ )	
	年总成本/元	年碳排放量/kg	年总成本/元	年碳排放量/kg
600 000	7 819 990	706 712	7 848 802	706 712
700 000	7 816 990	706 712	7 818 802	706 712
800 000	7 813 990	706 712	7 788 802	706 712
900 000	7 810 990	706 712	7 758 802	706 712

排放配额超过 700 000kg 之后,企业的年总成本低于不考虑碳排放情形。

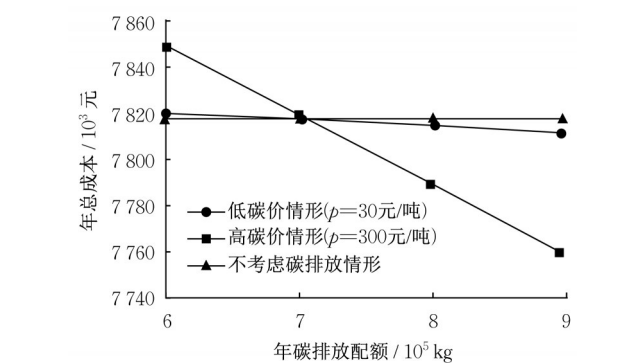


图 1 碳配额与成本的关系

Fig. 1 Carbon quota versus cost

## 2.3 研究结果讨论

在获得标杆企业数据的基础上,采用所构建的低碳情景下多层次多服务水平复合轴辐式快递网络规划方法和决策模型构建了相应的网络规划模型。从分析过程中,有以下判断:

(1)所构建的低碳情景下多层次多服务水平复合轴辐式快递网络规划方法和决策模型能够有效地指导企业网络规划实践。

(2)对结果的数据对比分析表明,在正常的碳税、碳价和碳排放配额等参数之下,追求低碳化、节能减排并不会对传统的追求成本最小化目标的网络结构产生额外影响。

(3)不容回避的是,结论(2)依赖于所给定的参数(如运输成本、碳税率、油耗参数等等)。这意味着,数据本身对网络规划决策结果的影响与决策方法同样重要,但是,网络规划通常是一项战略决策问题,参数本身通常是不确定的,甚至是模糊的。因此,通过科学的决策方法来保证决策科学的同时,还需要探讨参数本身的模糊性所导致的决策结果的实践可靠性和可操作性。

## 3 结论

主要创新之处在于构建了低碳情景下的多层次多服务水平复合轴辐式快递网络规划的基本决策模型,进而基于一个具体情景案例的数据分析了低碳化对网络规划决策影响,个案分析结果支持本文之前提出的观点:在一般情形下,低碳化考量对于网络规划结果影响非常有限。这一结论具有一定的现实意义:实现碳达峰碳中和是推动高质量发展的内在要求,在当前形势下交通、物流等是低碳化发展重点领域。企业是具体执行端之一,在以新能源车辆、清洁能源等新设备、新技术实现企业节能减排发展之外,企业运营结构变革是否有助于推进碳减排一直是争论话题,本研究结论为此提供了一个清晰的佐证。

基于长三角城市数据的实例研究结论有比较清晰的实践启发:对于网络型物流企业而言,在碳税较低( $0.03\sim0.30$  元· $kg^{-1}$ )的情境之下,着眼于总体运作成本最小化的网络结构优化方案同时也符合节能减排的优化目标。实际上,2019年已实施碳税政策国家的最低碳税(英国碳税)为 $0.14$  元· $kg^{-1}$ 。换言之,如果物流企业网络已经实现了基于经济目标的最优化,则其同时亦基本实现了节能减排目标的优化,节能减排任务并不会为企业运营带来新的挑战。

就政府政策制定而言,实例分析说明:征收碳税对于推动企业从管理层面开展运营优化以降低碳排放的效果可能无法让人满意;同时,开展碳交易时,虽然物流企业参与碳交易的积极性会随着碳价和碳排放配额的变化呈现出高敏感系数的正向关联,但是,这一政策对于企业的管理减排而言,其效果与碳税政策类似。

当然,本文结论主要基于个案分析得出,尚存在一定的局限性:①以长三角 16 个城市为例,网络小、范围小②数据不完全准确。模型参数在实践中的具



体取值对于结果可能有重要的影响,而不准确的数据可能会误导结果;③hub运营的碳排放未考虑。这些不足有待于后续收集充分数据的基础上开展深入研究。

#### 作者贡献声明:

张建军:论文的整体研究设计与模型建构。

王嘉铭:数据采集与分析。

王天浩:论文起草与初稿撰写。

周一卓:实证分析。

#### 参考文献:

- [1] 程发新,李莉,潘婷.碳税政策下多目标再制造物流网络优化[J].工业工程与管理,2017,22(5):135.  
CHENG Xinfu, LI Li, PAN Ting. Multi-objective remanufacturing logistics network optimization under carbon tax policy [J]. Industrial Engineering and Management, 2017, 22 (5):135.
- [2] MCKINNON A, HALLDORSSON A, RIZET C. Theme issue on sustainable freight transport [J]. Research in Transportation Business & Management, 2014, 12:1.
- [3] GALLARDO P, MURRAY R, KRUMDIECK S. A sequential optimization-simulation approach for planning the transition to the low carbon freight system with case study in the North Island of New Zealand [J]. Energies, 2021, 14 (11): 3339.
- [4] ZHANG D, ZHAN Q, CHEN Y, *et al.* Joint optimization of logistics infrastructure investments and subsidies in a regional logistics network with CO<sub>2</sub> emission reduction targets [J]. Transportation Research Part D, 2018, 60:174.
- [5] BORTOLINI M, FACCIO M, Ferrari E, *et al.* Fresh food sustainable distribution: Cost, delivery time and carbon footprint three-objective optimization [J]. Journal of Food Engineering, 2016, 174:56.
- [6] WANG F, LAI X, SHI N. A multi-objective optimization for green supply chain network design [J]. Decision Support Systems, 2011, 51 (2): 262.
- [7] 浦徐进,李秀峰.基于电商承诺送达机制的多目标低碳MDVRP优化研究[J].中国管理科学,2021,29(8):57.  
PU Xujin, LI Xiufeng. Multi-objective low carbon MDVRP optimization based on e-commerce commitment delivery mechanism [J]. Chinese Journal of Management Science, 2021, 29(8): 57.
- [8] 唐慧玲,唐恒书,朱兴亮.基于改进蚁群算法的低碳车辆路径问题研究[J].中国管理科学,2021,29(7):118.  
TANG Huiling, TANG Hengshu, ZHU Xingliang. Research on low-carbon vehicle routing problem based on modified ant colony algorithm[J]. Chinese Journal of Management Science, 2021, 29(7): 118.
- [9] 李进.基于可信性的低碳物流网络设计多目标模糊规划问题[J].系统工程理论与实践,2015,35(6):1482.  
LI Jin. Credibility-based multi-objective fuzzy programming problem for low-carbon logistics network design [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2015, 35(6):1482.
- [10] 何其超,骆温平,胡志华,等.基于碳排放权交易与排队论的闭环物流网络设计[J].计算机应用研究,2015,32(6):1638.  
HE Qichao, LUO Wenping, HU Zhihua, *et al.* Low-carbon closed-loop logistics network design based on carbon emission permits trade and queuing theory [J]. Application Research of Computers, 2015, 32(6):1638.
- [11] 何其超,胡列格,钱红波.基于多目标规划的低碳销售物流网络规划方法[J].系统工程,2013,31(7):37.  
HE Qichao, HU Liege, QIAN Bohong. Low-carbon sales logistics network planning method based on multi-objective planning[J]. Systems Engineering, 2013, 31(7):37.
- [12] 唐金环,戢守峰,朱宝琳.考虑碳配额差值的选址-路径-库存集成问题优化模型与算法[J].中国管理科学,2014,22(9):114.  
TANG Jinhuan, JI Shoufeng, ZHU Baolin. Optimization model and algorithm considers carbon-capped difference in the collaboration of location-routing-inventory problem [J]. Chinese Journal of Management Science, 2014, 22(9):114.
- [13] 崔娥英,罗俊浩,季建华.碳税和碳交易环境下的物流网络设计问题研究[J].科技管理研究,2012,22:239.  
CUI Eying, LUO Junhao, JI Jianhua. Research on logistics network design problem under carbon tax and carbon trading scheme [J]. Science and Technology Management Research, 2012, 22:239.
- [14] 周章金,符小玲,李敏.基于碳排放的废弃产品回收站点分布研究[J].中国管理科学,2018,26(4):41.  
ZHOU Zhangjin, FU Xiaoling, LI Min. Research on stations distribution of waste collection based on carbon emission [J]. Chinese Journal of Management Science, 2018, 26(4):41.
- [15] 赵泉午,赵军平,林娅.基于O2O的大型零售企业城市配送网络优化研究[J].中国管理科学,2017,25(9):159.  
ZHAO Quanwu, ZHAO Junping, LIN Ya. A city logistics network optimization model for large chain retailers under online-offline channel interaction [J]. Chinese Journal of Management Science, 2017, 25(9):159.
- [16] 肖庆,马士华,唐尧.存在三重属性节点的物流网络选址分配问题研究[J].运筹与管理,2016,25(5):59.  
XIAO Qing, MA Shihua, TANG Yao. Research on logistics network location and allocation problem with triple-attribute nodes [J]. Operations Research and Management Science, 2016, 25(5):59.
- [17] 张希良,张达,余润心.中国特色全国碳市场设计理论与实践[J].管理世界,2021,37(8):80.  
ZHANG Xiliang, ZHANG Da, YU Runxin. Theory and practice of China's national carbon emissions trading system [J]. Management World, 2021, 37(8): 80.
- [18] ZHANG J, TANG O, ZHAO J, *et al.* CPEL redesigns its land express network [J]. Interfaces, 2013, 43(3): 221.