

# 低碳经济模式下城市群物流网络优化

曾媛,邹浩,孙威虎  
(湖南财政经济学院,湖南长沙 410205)

**[摘要]**对低碳经济模式下的城市群物流网络进行了研究。采用混合整数规划模型,以碳排放量、距离、成本等要素进行约束,构建了以最小碳排放以及最低运费为目标的优化模型,之后利用LINGO软件对模型求解。最后以长株潭城市群作为案例进行算例分析,选取了实际物流节点,并为之设置合理的运价,通过算例分析验证了模型的科学性与可行性。

**[关键词]**低碳经济模式;城市群;物流网络;敏感度分析

**[中图分类号]**F224.0;F252

**[文献标识码]**A

**[文章编号]**1005-152X(2020)12-045-04

## Optimization of Urban Cluster Logistics Network under Low-carbon Economic Model

Zeng Yuan, Zou Hao, Sun Weihu

(Hunan University of Finance & Economics, Changsha 410205, China)

**Abstract:** In this paper, asserting logistics network optimization as an important way to realize low-carbon economy, we studied the logistics network of an urban cluster under the low-carbon economy model. With carbon emissions, distance, cost, etc., as constraints, we set up the mixed integer programming model of the logistics network, as well as the optimization model of the logistics network with minimum carbon emissions and lowest freightage as the objective. Then we used the LINGO software to solve the model. At the end, in the case of the Chang-Zhu-Tan urban cluster, we attempted to analyze numerically the rationality and feasibility of the model by setting reasonable freight rate for actual logistics nodes. Moreover, through sensitivity analysis of the model, and from the two aspects of demand and decision-making, we examined the key indexes and factors that may change in actual production operations and observe the impact of their adjustment on the ultimate outcome.

**Keywords:** low-carbon economic model; urban cluster; logistics network; sensitivity analysis

## 1 引言

随着经济社会的发展,建设低碳社会、发展低碳经济成为中国发展战略重点,通过低碳生活方式与低碳经济模式来改变20世纪的传统经济增长模式势在必行。从物流行业着手减少二氧化碳排放对于缓解温室效应、缓解气候变化的负面影响是十分有效的手段之一。

近年来,关于低碳经济模式下物流网络的研究不少,很多学者从不同的角度对其进行了详尽研

究。文献[1]利用两阶段随机优化模型来解决动态供应商情况下的反向物流网络设计问题;文献[2]建立了一个多周期的绿色逆向供应链模型来探讨相互关联的决策;文献[3]建立了一个多阶段的绿色正向和逆向的物流网络设计模型。

对于低碳经济模式中的物流优化,文献[4]指出现阶段中国绿色物流还不完善;文献[5]提出了低碳经济视角下的绿色物流,指出企业应该从资源配置方面,逆向物流方面,包装、仓储与运输方面实现绿色化;文献[6]运用模糊物元法为京津冀地区建立了

**[收稿日期]**2020-09-21

**[基金项目]**2020年度湖南省大学生研究性学习和创新性实验计划项目“大数据背景下物流共享仓储模式的设计与研究—以百世物流湖南基地为例”(湘教通[2020]191-4096);湖南省教育厅科学研究青年项目“低碳经济模式下供应链网络优化设计与均衡分析研究”(18B484)

**[作者简介]**曾媛(1999-),女,湖南娄底人,研究方向:物流管理;邹浩(1986-),男,湖南长沙人,博士研究生,讲师,研究方向:物流与供应链系统优化;孙威虎(1997-),男,湖南长沙人,研究方向:物流与供应链系统优化。

低碳物流能力评价指标体系。

对于城市群物流网络,文献[7]针对长江经济带区域的109个城市,利用引力模型、泰尔指数、轴辐式理论等方法分析得出层级化的轴辐式网络结构。文献[8]测算了我国多个主要城市群,为城市群物流网络发展研究提供支撑。文献[9]基于关系数据,主要研究了城市群物流网络结构的特点。

考虑到物流网络优化,许多学者也进行了研究,文献[10]从宏观调控的角度对中欧班列的运输网络进行优化;文献[11]对随机条件下的轴辐式公铁联运网络进行优化,降低运输成本并保证运输的时效性;文献[12]研究了甘肃省的区域物流网络,构建了基于物流需求和路网配流的区域物流网络模型;文献[13]指出物流网络优化设计对资源配置的要求很高,选址问题对于物流网络设计至关重要;文献[14]考虑了低碳约束,针对运输方式、运输工具及运输路径等因素建立了模型;文献[15]考虑动态物流规划,构建了多阶段三级物流网络,并运用动态自适应的多目标差分进化算法进行了求解。

已有的研究成果从政策、评价方法以及网络设计等方面出发,降低物流成本。但是没有考虑到二氧化碳排放的具体阶段,其主要目标仍然是只考虑降低经济成本。本文将二氧化碳的排放量化,并将各个作业过程中的碳排放以碳费的形式进行约束。在考虑经济成本的同时优化网络设计,以实现实时可行的碳排放控制。在经济成本与碳排放成本中找到最佳的处理方式,在低碳经济模式下实现利益最大化。

## 2 符号说明及基本假设

近年来,长株潭城市群的物流体量飞速增加,形成了成熟的高速公路路网,对区域物流的发展起到了很大的促进作用。同时,问题也非常明显:区域物流资源分散,各个节点的协调性差,这就对物流网络的规划有很高的要求,企业选取的路径是否为最佳路线,路途经过的物流主要枢纽是否在最佳的点位,需要对城市群物流网络有一个优化计算,给企业提出策略性的指导。本文符号说明如下: $K$ 表示所有物流节点的集合; $I$ 表示所有需求节点的集合; $J$ 表

示所有目的地集合; $F$ 表示碳费与运费的总和; $E_{ij}$ 表示运输作业过程中的碳排放量; $c_{ij}$ 表示运价; $X_{ij}$ 表示物流节点*i*与节点*j*之间的货运量; $d$ 表示货物运输距离; $T$ 表示设定顾客直接发货的最小距离,其中 $T=30\text{km}$ ; $D$ 表示物流需求量的集合; $Q_k$ 表示单个物流转运中心的处理能力; $a, b$ 表示模型中碳费与运费的权重,其中 $a+b=1$ 。

城市群物流作业有如下特征:车辆行驶的时间往往不受城市限行规则,可以全天运行;物流企业为了保证经济效益,往往会使车辆满载,并且长时间运行;各个物流企业的车辆使用维护情况区别较大,车辆能耗会随着车辆年限的增长而增加。基于以上特征,全文做如下假设:

(1)每个集货中心都是24h全天候作业,不会过载。

(2)车辆完成单次运输作业以后不需要返回其原有集货地。

(3)车辆的碳排放量只与载货量和行驶距离有关。

## 3 模型构建

基于以上符号设置,本文将构建低碳经济背景下的城市群物流网络优化模型,并利用混合整数规划方法对模型进行描述及约束。目标函数为最少的碳排放量和最小的运费。决策变量为集货中心是否被取用。针对以上约束条件建立模型:

$$\begin{aligned} \min F = & a \times \left( \sum_{i=0}^k \sum_{k=0}^k X_{ik} E_{ik} d_{ik} + \sum_{i=0}^j \sum_{j=0}^j X_{ij} E_{ij} d_{ij} + \sum_{k=0}^j \sum_{j=0}^j X_{kj} E_{kj} d_{kj} + \sum_{k=0}^k E_k Z_k \right) + \\ & b \times \left( \sum_{i=0}^k \sum_{k=0}^k X_{ik} c_{ik} d_{ik} + \sum_{i=0}^j \sum_{j=0}^j X_{ij} c_{ij} d_{ij} + \sum_{k=0}^j \sum_{j=0}^j X_{kj} c_{kj} d_{kj} + \sum_{k=0}^k c_k Z_k \right) \end{aligned} \quad (1)$$

其中 $X_{ik}$ 表示从第*i*个客户手中运输至转运中心*k*的货量( $\text{kg}$ ); $E_{ik}$ 表示从客户到转运中心的运输过程中产生的碳排放量( $\text{kg/L}$ ); $X_{ij}$ 表示客户的货物不经过装运中心,直接发往目的地*j*的货量( $\text{kg}$ ); $E_{ij}$ 表示该过程中产生的碳排放( $\text{kg/L}$ ); $X_{kj}$ 表示货物从转运中心*k*发往目的地*j*的货量( $\text{kg}$ ); $E_{kj}$ 表示该运输过程中所产生的碳排放量( $\text{kg/L}$ ); $E_k$ 为建设转运中心所产生的碳排放量( $\text{kg/m}^2$ ); $Z_k$ 为0,1变量, $Z_k=1$ 表示第*K*个转运中心被选中,反之, $Z_k=0$ 则

未被选中;  $c$  表示单位运价,此处设定单位运价为1。

相关约束条件如下:

(1)客户需求约束条件。每个客户的需求都必须得到满足:

$$\sum_{k=1}^K X_{kj} + \sum_{i=1}^I X_{ij} = D_j \quad (2)$$

从需求点发往转运中心的货物与直接发往目的地的货物量之和必须等于该目的地的需求量。

(2)转运中心的处理能力约束条件。每个转运中心的处理能力都是固定的,且只有被选中的中心会参与运输过程。每个转运中心的周转量应该与其输入量和输出量匹配,即流出的货物量应该小于等于流入量。

式(3)使得每个转运中心的流入量小于其吞吐量,式(4)保证了转运中心的流入量不小于其流出量。

$$\sum_{i=1}^I X_{ik} \leq Q_k \quad (3)$$

$$\sum_i X_{ik} \geq \sum_{j=1}^J X_{kj} \quad (4)$$

(3)运量约束条件。只有当单个订单运量较大时,才会将顾客的货物不经过转运中心而直接发往目的地,需要对直接运输的货物量进行约束。

$$d_{ij} \geq \delta_{ij} T \quad (5)$$

$$d_{ij} \leq \delta_{ij} M \quad (6)$$

式(5)、式(6)中  $\delta_{ij}$  为0, ..., 1变量,  $\delta_{ij}=1$  表示被选中,反之,  $\delta_{ij}=0$  则未被选中。  $T$  为约定好的最小直接发货距离;  $M$  为一较大整数,远大于目的地的距离。

式(5)、式(6)保证了顾客需要直接运送货物的距离为一大于最小直接发货量距离的值,否则该值为零。

(4)决策变量。

$$X_{ik}, X_{ij}, X_{kj} \geq 0 \quad (7)$$

$$Z_k = \begin{cases} 0, & \text{备选的转运中心未被选中} \\ 1, & \text{备选的转运中心被选中} \end{cases} \quad (8)$$

式(7)为变量的非负约束,式(8)为0-1变量。

## 4 数值选取

### 4.1 车辆相关参数

车辆行驶的碳排放量受速度、载重量、坡度、发

动机与燃油种类等多种因素影响,本文参考 Demir 等<sup>[15]</sup>的碳排放量模型,燃油消耗量的确定方法为:

$$FR = \varphi(\lambda NV_s + P/\eta)/\mu \quad (9)$$

$$P = \frac{P_{tract}}{\varepsilon} + P_{acc} \quad (10)$$

其中:  $P_{tract}$  是车辆发动机的功率;  $P_{acc}$  是车辆的其他能量需求,本文中为方便起见,设置为0。  $\varepsilon$  为车辆传动系统效率。  $P_{tract}$  可以由下式计算:

$$P_{tract} = (Ma + Mg \sin \theta + 0.5C_d A \rho v^2 + Mg \cos \theta)v/1000 \quad (11)$$

其中:  $M = \omega + f$ ,  $\omega$  为空车重量,  $f$  为车载货物重量。运输过程中所消耗的燃油量  $F$  可以由下式计算:

$$F = FR \cdot d/v\psi \quad (12)$$

每升燃油燃烧释放的碳排放一般情况下维持不变,综上,运输过程中所产生的碳排放为  $E_{ij} = e_i \cdot F$ 。

相关参数定义及取值具体见表1。

表1 参数定义及取值

参数	定义	取值
$W$	车重(kg)	1 000
$\phi$	燃料与空气的质量比	1
$\lambda$	发动机摩擦因子(kJ/L)	0.2
$N$	发动机转速(r/s)	33
$V_s$	发动机排量(L)	5
$\eta$	柴油发动机效率参数	0.9
$\mu$	柴油的热值(kJ/g)	44
$\varepsilon$	传动系统效率	0.4
$\alpha$	加速度	0
$\theta$	道路坡度	0
$C_d$	空气阻力系数	0.7
$C_r$	滚动阻力系数	0.01
$A$	车辆迎风面积( $m^2$ )	3.912
$\rho$	空气密度( $kg/m^3$ )	1.204 1
$g$	重力加速度( $m/s^2$ )	9.81
$\psi$	换算因子,燃料单位从g/s转化为(L/s)	737
$e_i$	欧洲碳排放标准(kg/L)	2.62

### 4.2 物流设施相关参数

物流设施在建设过程中也会产生二氧化碳的排放,参照曹静,等<sup>[16]</sup>对现浇式建筑的碳排放计算模型,考虑预制件生产阶段、原材料运输阶段、施工阶段中所产生的二氧化碳排放,得到其最终的单位面积碳排放,见表2。

表2 现浇式建筑单位面积碳排放

不同阶段	现浇式单位面积碳排放(kg/m <sup>2</sup> )
运输	1.73
施工	22.147
合计	23.877

由此可得:

$$q_k = S \cdot e_c \quad (13)$$

其中,  $S$  为被选中的物流转运中心面积 ( $m^2$ );  $e_c$  为  $23.877kg/m^2$ 。

### 5 算例分析

以长株潭地区现有的物流设施现状为背景,研究其在低碳经济模式下的物流网络优化。假定长沙望城物流园、株洲高新区物流园区、湘潭高新物流园区为长株潭地区主要的物流需求节点(编号分别为3号、11号、17号)。长沙金霞物流园区、长沙岳麓物流园区、株洲铜塘湾物流园区、醴陵物流园区、湘潭九华物流园区为主要的货物目的地(编号分别为1号、6号、8号、9号、15号)。剩余9个物流园区为模型中备选的物流转运中心。根据地图工具测算出个点之间的直线距离,作为其在LINGO软件中的位置参数。

本文选取的混合整数规划模型约束条件较多,求解较为复杂,故选取LINGO软件求解。LINGO软件是一款专门用于求解最优化问题的软件,它利用分支定界方法来求解混合整数规划问题。本文利用LINGO软件编写了针对上述模型的求解程序,能够快速求出模型最优解。

假设每个物流中心的建筑面积为  $5000m^2$ ,根据设定好的建筑碳排放参数  $23.877kg/L$ ,计算出单个物流设施的建筑碳排放为  $1193850kg$ 。单个物流设施的成本设定  $10000$ 。假设每趟运输作业都是满载且不出放空情况,计算得出单个车辆在运输过程中每  $1kg$  货物产生的二氧化碳排放量为  $0.001kg/km^2$ 。单个物流周转中心的处理能力为  $80$  万  $t$ 。模型中碳费与运费的权重为  $a=0.3, b=0.7$ 。三个主要物流需求地的物流需求量设定、目的地货量以及长株潭地区物流设施选取情况见表3-表5。

表3 物流需求表

编号	3	11	17
物流需求(t)	100	70	60

表4 目的地货量表

编号	1	6	8	9	15
目的地货量(t)	80	5	25	75	45

表5 物流转运中心编号表

城市	编号	名称
长沙	1	长沙金霞物流园区
	2	长沙空港物流园区
	3	长沙望城物流园区
	4	长沙雨花物流园区
	5	长沙天心物流园区
	6	长沙岳麓物流园区
	7	长沙暮云物流园区
株洲	8	株洲铜塘湾物流园区
	9	醴陵物流园区
	10	渌口物流园区
	11	株洲高新区物流园区
	12	芦淞物流园区
	13	荷塘物流园区
	14	云龙物流园区
湘潭	15	湘潭九华物流园区
	16	荷塘现代综合物流园区
	17	湘潭高新区物流园区

经过对模型的求解,得到结果为当选择7号与13号节点作为物流转运中心时,物流运输过程中产生的碳费以及运费最小,为  $721117.0$ 。

根据不同决策者提供的抉择可以为网络模型的优化提供参考与依据。当企业寻求的是外包物流服务时,运费是其主要考虑因素,这时碳费与运费的权重应当调整为倾向于运费部分,在满足相应政策条款时尽可能的节省运费;当考虑的情况为提供物流服务的企业时,其主要的成本为车辆使用的固定成本,适当的增加发车频率、减少单车的载重可以有效减少碳排放,而且不会大幅增加运费,此时就应当将权重多偏向于碳费部分,以获取最佳的优化方案。

### 6 结论

从低碳经济模式下的角度出发,本文将二氧化碳的排放作为作业过程的主要成本,计算出了每个操作步骤所释放的具体碳排放,这样的作法可以直观、准确地反映出当前物流网络的碳排放情况。

本文基于已有的理论、科学的研究范式,综合运用各种技术手段和研究方法,所取得的研究结论和提出的路径对策具有一定的科学有效性。但囿于自身学术水平有限和现有条件所限,此次研究存在些许缺陷和局限性,在为物流网络优化提供有利信息的同时仍存在诸多不足。例如,本文考虑的是三级转运结构,并不能保证准确性。尤其当有重大事件发生时,预测更加不准确,有可能会(下转第160页)