

面向网购的低碳供应链设计模型及其应用分析

吴义生, 白少布

(南京工程学院 经济与管理学院, 南京 211167)

摘要: 针对网购中的低碳供应链网络设计问题, 利用凹函数对碳排放成本、物流成本和配送中心固定成本之和进行最小化建模. 由于该模型不能被直接求解, 首先, 应用拉格朗日松弛法将其分解成单一供应商选址和凹背包两个问题, 在此基础上提出了基于子问题求解的拉格朗日启发式算法; 然后, 从供应链网络运营成本和供应链网络设计两个方面进行应用分析. 结果表明, 考虑碳排放成本的供应链设计能够优化网购环境下低碳供应链资源的配置.

关键词: 网购; 低碳供应链; 碳排放; 模型

中图分类号: F273

文献标志码: A

Low-carbon supply chain design model and its application analysis based on online shopping

WU Yi-sheng, BAI Shao-bu

(School of Economics & Management, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China. Correspondent: WU Yi-sheng, E-mail: wyslqh@163.com)

Abstract: With regard to the network design problem of the low-carbon supply chain based on online shopping, the concave function is used to minimize the supply chain operation cost including the carbon emission cost, the logistics cost and the fixed cost of the distribution center. Firstly, the Lagrangian relaxation algorithm is used to decompose the problem into two sub-problems, because the problem can not be solved directly. And the Lagrangian heuristic algorithm is proposed based on the sub-problem solution. Then, the model is analyzed by the simulation application on the supply operation cost and the network design of the supply chain. Finally, the analysis results show that resources allocation of the low carbon supply chain can be optimized if the carbon emission cost is considered during supply chain designing.

Keywords: online shopping; low-carbon supply chain; carbon emission; model

0 引言

网购已经成为我国消费者重要的一种日常购物方式. 网购使顾客、销售商、生产商、供应商和物流商等供应链成员企业有效地联系在一起, 促进了按订单生产模式的发展, 减少了生产的盲目性. 因此, 网购能够减少能源的消耗, 降低碳排放. 同时, 全球低碳意识的快速觉醒和市场竞争的日益加剧, 低碳、节能、环保等理念已逐渐渗透到供应链之中, 供应链以及链中企业要得到社会的认可, 并达到企业效益最大化的目标, 实施低碳供应链管理是必行之路. 这是因为在供应链领域, 其各个环节都涉及到能源的消耗和二氧化碳的排放, 而某些环节还是二氧化碳的排放大户. 在上述背景下, 网购和低碳供应链必须相互协调发展才

能实现低碳目标. 一方面, 低碳供应链必须对网购的需求作出快速反应; 另一方面, 网购只有在低碳供应链的系统思想指导下, 才能整合相关资源, 实现超越线下购物的经济社会效益.

对于低碳供应链设计的研究, 主要集中在考虑碳排放的范围和供应链的运营环境两个方面. 现有的文献对此研究大都经历了3个阶段: 首先是从运输的角度考虑供应链碳排放, 然后是从供应链运营的角度考虑碳排放, 最后是从网购的角度考虑供应链设计. 也就是说, 研究的范围是由点到线到面, 研究的背景越来越接近供应链运营的实际情况.

从单个运输的角度考虑碳排放的相关研究有: Agatz等^[1]运用收益管理的方法, 针对快递业务, 通过

收稿日期: 2014-01-22; 修回日期: 2014-05-21.

基金项目: 教育部人文社会科学研究青年基金项目(13YJCZH201); 南京工程学院创新基金项目(CKJB201213, CKJA201208, CKJ2011008).

作者简介: 吴义生(1973—), 男, 副教授, 博士, 从事物流与供应链管理等研究; 白少布(1964—), 男, 教授, 博士, 从事供应链管理等研究.

设计合适的定价机制激励客户选择与其邻居相近的送货,以缩短送货时间,减少快递公司的运送距离,从而减少物流造成的碳排放量;Ballot等^[2]针对法国零售企业,分析了物流网络的碳排放规律,并通过算例表明了共享供应网络可以降低25%的碳排放量;Pan等^[3]的研究表明,通过公路和铁路的联合运输可以降低52%的碳排放量;Hoen等^[4]在传统运输模型中考虑了碳排放因素,对运输方式的选择进行了分析。

从供应链运营的角度考虑碳排放的相关研究有:Matthews等^[5]认为,仅仅通过企业内部的有效运作很难有效实现碳减排,将碳减排的重点放在供应链企业关键业务的协同上,才能实现碳减排的目标。Hsu等^[6]通过实证分析了影响供应商选择的碳管理因素,表明碳信息管理和规范的碳管理培训是影响供应商选择的最重要的两个因素。Caro等^[7]通过对定量模型的研究表明,在供应链中可通过强制设定减排上限的执法来促使供应链成员尽最大努力进行碳减排活动。陈剑^[8]在对供应链管理研究现状总结的基础上,指出供应链上的“碳排放”成本分布与科学度量是低碳供应链管理的重点之一。赵道致等^[9]针对碳排放权限制及其对低碳供应链的影响,为确保低碳供应链的经营持续性,考虑了碳排放权限制及其交易的影响,根据低碳供应链中各企业的边际减排成本的不同和低碳因素对各企业产品价值贡献的不同,设计了低碳供应链运营策略,并构建了低碳供应链减排优化模型,综合运用定性和定量的方法解决了低碳供应链减排运营问题。李昊等^[10]提出了不同的碳排放权交易机制,并分析了不同机制对企业低碳运营决策的影响,以便在保障供应链利益的同时,找到促进企业低碳化行为的决定性因素。仿真结果显示,碳排放有偿分配机制和基于公开拍卖的碳排放价格机制能有效地促进企业降低碳排放量。杨珺等^[11]运用系统动力学建立了单个供应商与销售商的供应链模型,并提出了强制排放和碳税两种碳排放政策,分析了两种排放政策对于供应链成本和碳排放的影响。在强制排放政策下,碳排放额度不同,销售商选择的订货周期也不同,因此,需要设定合理的排放额度,才能降低供应链碳排放;在碳税政策下,碳税税率的提高,会增加政府的收益,但会带来供应链运营成本的增加,也可能使得供应链碳排放增加,因此,需要合理制定碳税税率,才能降低供应链碳排放。丛明军等^[12]从供应链增值的角度,运用投入产出表,采用增值碳排放系数计算供应链的碳排放,并证实了通过增值碳排放系数能有效寻找到供应链碳排放的薄弱环节。

另外,还有少数学者对网购环境下的供应链进行了研究,这方面的研究有:朱道立等^[13]提出了网购供应链的概念,指出网购背景下的供应链由制造商、网

店运营商、快递服务商和顾客构成,电子商务平台实现购买商品的信息流和资金流,而快递实现购买商品的“物流”;多条网购供应链组成网购供应链网络;在此基础上,对网购供应链特点和网络结构进行了描述,并探讨了网购供应链网络中的竞争和协调问题。胡一竑等^[14]在分析快递公司竞争行为的基础上,运用变分不等式分析了网购供应链竞争均衡条件,指出了网购行为与一般购物行为之间的差异,同时对均衡条件进行了经济解释,并在此基础上建立了面向网购的供应链网络均衡模型。

综上所述,现有的考虑碳排放的供应链设计模型已有一些研究成果,而考虑网购环境下的供应链运作规律的研究相对较少,综合考虑碳排放和网购的供应链设计模型的研究暂未发现。鉴于上述分析,本文提出一个面向网购的低碳供应链设计模型。该模型将碳排放成本作为目标函数之一,通过在网购的配送网络中合理设置配送中心位置,以便同时最小化碳排放成本、物流成本和配送中心的固定成本;然后综合应用拉格朗日松弛算法和启发式算法对模型进行求解,并对模型进行了仿真应用分析。分析结果表明,考虑碳排放成本的供应链设计能够优化网购环境下低碳供应链资源的配置。

1 模 型

1.1 模型构建

本文假设网购运营商自营物流,如京东商城。网购运营商在全国设有一个总的配送中心,在其他地区设有二级配送中心。该二级配送中心相当于总的配送中心的客户。下文将总的配送中心简称配送中心,二级配送中心简称客户。

设面向网购的低碳供应链由*i*个供应商、*j*个配送中心和*k*个客户构成。配送中心*j*的最大容量为 V_j ,配送中心的固定成本为 FC_j ,客户的需求是 D_k 。单位重量的产品从供应商*i*到配送中心*j*的物流成本是 LC_{ij} ,单位重量的产品从配送中心*j*到客户*k*的物流成本是 LC_{jk} 。另外,分别引进决策变量 p_{ij} 、 t_{jk} 和 s_j 。其中: p_{ij} 为连续变量,表示从供应商*i*到配送中心*j*的产品流量; t_{jk} 和 s_j 为二进制变量, t_{jk} 表示如果配送中心*j*向客户*k*供应产品,则等于1,否则等于0; s_j 表示如果配送中心*j*开放,则等于1,否则等于0。假设供应商的供应量是无限的,根据上述参数和变量,建立一个混合整数规划模型如下:

$$\begin{aligned} \min & \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n f(p_{ij}) + \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^q f(D_k t_{jk}) + \\ & \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n LC_{ij} p_{ij} + \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^q LC_{jk} D_k t_{jk} + \\ & \sum_{j=1}^n FC_j s_j. \end{aligned} \quad (1)$$

$$\text{s.t. } \sum_{j=1}^n t_{jk} = 1, \forall k; \tag{2}$$

$$\sum_{i=1}^m p_{ij} = \sum_{k=1}^q D_k t_{jk}, \forall j; \tag{3}$$

$$\sum_{i=1}^m p_{ij} \leq V_j s_j, \forall j; \tag{4}$$

$$\sum_{k=1}^q D_k t_{jk} \leq V_j s_j, \forall j; \tag{5}$$

$$t_{jk}, s_j \in \{0, 1\}, p_{ij} \geq 0, \forall i, j, k. \tag{6}$$

模型的前两项分别表示: 产品在供应商与配送中心之间流动的碳排放成本, 产品在配送中心与客户之间流动的碳排放成本, $f(x)$ 是排放成本函数. 第3项~第5项分别表示: 产品在供应商与配送中心之间流动的物流成本, 产品在配送中心与客户之间流动的物流成本, 以及配送中心的固定成本. 约束条件(2)确保每个客户都能从某一配送中心得到产品, 约束条件(3)表示配送中心产品的进出量相等, 即约束条件(2)和(3)确保客户需求能得到满足; 约束条件(4)和(5)表明配送中心是有最大容量限制的.

1.2 碳排放成本计算

一般而言, 车辆碳排放的主要因素是车速和车辆重量, 另外, 还与车辆发动机类型、行车地形和驾驶员的驾驶习惯有关^[5]. 本文假设在运输过程中车速一定, 考虑的主要因素是车辆重量, 忽略其他因素. 另外, 供应链物流过程中的碳排放主要是运输工具消耗石油所引起的二氧化碳排放, 因此, 要计算碳排放成本, 首先应计算石油消耗量, 接着计算碳排放量, 在此基础上计算碳排放成本.

1) 石油消耗量.

石油消耗量不仅与运输距离有关, 还与载货量等因素有关, 单位距离的石油消耗量可以表示为一个依赖于车辆载货量的线性函数^[6]

$$F(Q) = a(Q_0 + Q) + b. \tag{7}$$

其中: Q_0 表示车辆自重, Q 表示车辆载货量.

2) 碳排放量.

单位距离碳排放量可由下式计算^[7]:

$$E(Q) = eF(Q). \tag{8}$$

其中: e 为 CO_2 排放系数, 表示单位石油消耗所产生的 CO_2 排放量.

3) 碳排放成本.

在供应链网络中, 若从物流节点 i 运送 p_{ij} 单位的物品到节点 j , 则在此运输过程中所产生的碳排放成本可以表示为

$$f(p_{ij}) = cE(p_{ij})d_{ij}. \tag{9}$$

其中: c 为单位碳排放费用, d_{ij} 为物流节点 i 到物流节点 j 的距离.

另外, 为方便石油消耗量的计算, 特进行以下数学变换:

设车辆最大载货量为 Q_{\max} , 满载时单位距离石油消耗量为 F_{\max} , 空载时单位距离石油消耗量为 F_0 , 则

$$F_0 = aQ_0 + b, \tag{10}$$

$$F_{\max} = a(Q_0 + Q_{\max}) + b. \tag{11}$$

从而

$$a = (F_{\max} - F_0)/Q_{\max}. \tag{12}$$

将式(12)代入(10), 得

$$b = F_0 - aQ_0. \tag{13}$$

于是, 将式(12)和(13)代入(7), 可得单位距离的能源消耗量

$$F(Q) = F_0 + (F_{\max} - F_0)Q/Q_{\max}. \tag{14}$$

在地形、车速等保持不变的情况下, 式(14)表示的就是单位距离石油消耗量与载货量之间的线性关系.

2 模型求解

由模型(1)的结构可知, 无法对其进行直接求解. 为此, 首先应用拉格朗日松弛算法来探析模型(1)的结构, 然后再利用启发式算法进行求解.

2.1 拉格朗日松弛算法

用拉格朗日乘法系数 λ_j 来松弛约束条件(3), 松弛结果如下:

$$\begin{aligned} \min & \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n f(p_{ij}) + \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^q f(D_k t_{jk}) + \\ & \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (\text{LC}_{ij} - \lambda_j) p_{ij} + \\ & \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^q (\text{LC}_{jk} D_k + D_k \lambda_j) t_{jk} + \sum_{j=1}^n \text{FC}_j s_j; \end{aligned} \tag{15}$$

s.t. 式(2), (4), (5)和(6).

上述结果可以分解成以下两个子问题:

1) 物品在配送中心与客户之间流动时, 在碳排放成本、物流成本和配送中心的固定成本最小化的前提下, 如何给客户分配配送中心. 该问题可以用下面的表达式描述:

$$\begin{aligned} \min & \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^q f(D_k t_{jk}) + \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^q (\text{LC}_{jk} D_k + \\ & D_k \lambda_j) t_{jk} + \sum_{j=1}^n \text{FC}_j s_j; \end{aligned} \tag{16}$$

s.t. 式(2)和(5).

2) 物品从供应商到配送中心的流动过程中, 在碳排放成本和物流成本最小化的前提下, 如何对配送中心进行选址的问题. 该问题可以用下面的表达式描述:

$$\min \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n f(p_{ij}) + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (\text{LC}_{ij} - \lambda_j) p_{ij}; \quad (17)$$

s.t. 式 (4).

由于 $j = 1, 2, \dots, n$, 问题 (17) 包含如下 n 个子问题:

$$\min \sum_{i=1}^m f(p_{ij}) + \sum_{i=1}^m (\text{LC}_{ij} - \lambda_j) p_{ij}; \quad (18)$$

s.t. 式 (4).

显然, 式 (18) 是一个凹背包问题. 由于凹函数具有“在一定范围内的某些端点可以求解”的属性^[18], 问题 (18) 在 $p_{ij} \geq 0$, 且 $\sum_{i=1}^m p_{ij} \leq V_j$ 范围内的端点有最优解, 即 $p_{ij} = V_j$ 时, 问题 (18) 有最优解. 因此, 式 (18) 又可以改写成以下形式:

$$\min \left[\sum_{i=1}^m f(V_j) + \sum_{i=1}^m (\text{LC}_{ij} - \lambda_j) V_j \right]. \quad (19)$$

显然, 式 (19) 是一个线性背包问题.

2.2 启发式算法

由 2.1 节的分析可知, 根据子问题 (16) 表达式中的 t_{jk}^h 和 s_j^h , 可以确定每个配送中心的需求. 既然每个配送中心的需求是确定的, 问题 (1) 便可以转化为连续运输问题. 该问题是有可行解的, 其描述如下:

$$\min \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^p (f(D_k) + \text{LC}_{jk} D_k) t_{jk}^h + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n f(p_{ij}) + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \text{LC}_{ij} p_{ij} + \sum_{j=1}^n \text{FC}_j s_j^h; \quad (20)$$

$$\text{s.t. } \sum_{i=1}^m p_{ij} = \sum_{k=1}^p D_k t_{jk}^h, \quad \forall j. \quad (21)$$

问题 (20) 是存在最优端点的凹问题, 这意味着每个配送中心将有唯一的供应商, 而且货物由单一类型的车辆运输, 而不是由多个类型的车辆运输. 因此, 从供应商到配送中心的最优运量等于配送中心的需求量, 从而可以将问题 (20) 改写成下面的资源分配问题:

$$\min \sum_{i=1}^m \left(f \left(\sum_{k=1}^p D_k t_{jk}^h \right) + \text{LC}_{ij} \left(\sum_{k=1}^p D_k t_{jk}^h \right) \right) \delta_{ij} + \alpha; \quad (22)$$

$$\text{s.t. } \sum_{i=1}^m \left(\sum_{k=1}^p D_k t_{jk}^h \right) \delta_{ij} = \sum_{k=1}^p D_k t_{jk}^h, \quad \forall j. \quad (23)$$

上述算法为一启发式算法. 其中: α 表示常量部分; δ_{ij} 表示这样的值, 当配送中心 j 由供应商 i 供货时, 其值为 1, 否则为 0.

2.3 启发式算法质量评价

根据文献 [15], 启发式算法的质量 (HQ) 可以通过比较可行解成本 (FSC) 和最优拉格朗日边界 (BLB) 来评价. 评价计算公式如下:

$$\text{HQ} = 100 \times ((\text{FSC} - \text{BLB}) / \text{BLB}). \quad (24)$$

根据最优拉格朗日边界原理, 本文中的 BLB 可以通过下面的表达式求解:

$$\begin{aligned} \max_{\lambda} \min_{h \notin I_x} & \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^p (f(D_k) + \text{LC}_{jk} D_k + \\ & D_k \lambda_j) t_{jk}^h + \sum_{j=1}^n \text{FC}_j s_j^h + \\ & \sum_{j=1}^n \min_{h_j \in I_{yj}} \left[\sum_{i=1}^m f(V_j) + \right. \\ & \left. \sum_{i=1}^m (\text{LC}_{ij} - \lambda_j) V_j^{h_j} \right]. \end{aligned} \quad (25)$$

其中: 表达式 (25) 中的 I_x 属于下列整数集:

$$\left\{ (t_{jk}^h, s_j^h) : \sum_{j=1}^n t_{jk}^h = 1; \sum_{k=1}^p D_k t_{jk}^h \leq V_j s_j^h; \forall j, k \right\}; \quad (26)$$

I_{yj} 属于下列端点集:

$$\left\{ (p_{ij}^{h_j}) : \sum_{i=1}^m p_{ij}^{h_j} \leq V_j; p_{ij}^{h_j} \geq 0, \forall i \right\}. \quad (27)$$

综上所述, 可以将式 (25) 改写成如下形式:

$$\max \varphi_0 + \sum_{j=1}^n \varphi_j. \quad (28)$$

$$\begin{aligned} \text{s.t. } \varphi_0 - \sum_{j=1}^n \left(\sum_{k=1}^p D_k t_{jk}^h \right) \lambda_j \leq \\ \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^p (f(D_k) + \text{LC}_{jk} D_k) t_{jk}^h + \\ \sum_{j=1}^n \text{FC}_j s_j^h, \quad h \in I_x; \end{aligned} \quad (29)$$

$$\begin{aligned} \varphi_j + \sum_{i=1}^m p_{ij}^{h_j} \lambda_j \leq \\ \sum_{i=1}^m f(p_{ij}^{h_j}) + \sum_{i=1}^m \text{LC}_{ij} p_{ij}^{h_j}, \quad h_j \in I_{yj}. \end{aligned} \quad (30)$$

式 (28) 是一个线性规划问题. 根据式 (29) 和 (30), 可得出下面表达式:

$$\begin{aligned} \varphi_0 - \sum_{j=1}^n \left(\sum_{k=1}^p D_k t_{jk}^{\bar{a}} \right) \lambda_j \leq \\ \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^p (f(D_k) + \text{LC}_{jk} D_k) t_{jk}^{\bar{a}} + \sum_{j=1}^n \text{FC}_j s_j^{\bar{a}}, \end{aligned} \quad (31)$$

$$\varphi_j + \sum_{i=1}^m p_{ij}^{\bar{b}_j} \lambda_j \leq \sum_{i=1}^m f(p_{ij}^{\bar{b}_j}) + \sum_{i=1}^m \text{LC}_{ij} p_{ij}^{\bar{b}_j}, \quad \forall j. \quad (32)$$

3 应用分析

本文应用 Matlab 7.10 R 2010a 软件来运行算法, 对问题进行仿真求解.

3.1 参数说明

为便于仿真分析, 特对相关参数的计算进行以下说明.

1) 配送中心容量比. 表示配送中心容量与客户需求的比值, 即

$$r = \sum_{j=1}^n V_j / \sum_{k=1}^p D_k. \quad (33)$$

本文设定, 当 $r=2$ 时, 配送中心处于低容量状态; 当 $r=4$ 时, 配送中心处于中等容量状态; 当 $r=8$ 时, 配送中心处于超容量状态^[15].

2) 配送中心负荷率. 其百分比负荷率表示供应链系统中所有运营中的配送中心容量与所有客户需求的百分比, 可通过下式计算:

$$LR_p = 100 \times \left(\sum_{j=1}^n V_j \cdot s_j / \sum_{k=1}^p D_k \right). \quad (34)$$

3) 配送中心固定成本. 其百分比成本表示如下:

$$FC_p = 100 \times \left(\sum_{j=1}^n FC_j \cdot s_j \right) / TC, \quad (35)$$

其中 TC 表示供应链总成本.

4) 物流成本. 其百分比成本表示如下:

$$LC_p = 100 \times ((A + B) / TC). \quad (36)$$

其中: $A = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n LC_{ij} p_{ij}, B = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^p LC_{jk} D_k t_{jk}.$

5) 碳排放成本. 其百分比成本表示如下:

$$EC_p = 100 \times ((M + N) / TC). \quad (37)$$

其中: $M = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n f(p_{ij}), N = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^p f(D_k t_{jk}).$

6) 比例参数. 为便于问题的分析, 设 l, d 和 c 分别为物流成本比例参数、配送中心固定成本比例参数和碳排放成本比例参数. 由于物流过程有两个阶段, 分别是 从供应商到配送中心, 以及从配送中心到客户, 对应的物流成本比例参数分别为 l_1 和 l_2 . 这些参数根据分析对象的不同而设置不同的值. 设比例参数的基础值分别为 $l_1 = l_2 = 1, d = 1, c = 1$, 针对该数值的应用实例为基本实例.

7) 求解时间. 子问题 1、子问题 2、启发式算法和主问题的求解百分比时间分别用 $P1_p, P2_p, H_p$ 和 MP_p 表示, 总的求解时间用 T 表示, 单位为 s.

另外, ITs 是指迭代次数 (Its, iteration times). 基本实例的仿真结果如表 1 所示.

表 1 基本实例仿真结果

i, j, k	LR _p	FC _p	LC _p	EC _p	ITs	HQ	P1 _p	P2 _p	H _p	MP _p	T
4, 8, 16	92.7	41.3	49.2	9.5	3	0.10	91.6	5.2	1.6	1.6	2.2
4, 8, 32	89.6	37.9	52.8	9.3	3	0.09	98.2	1.1	0.3	0.4	12.0
4, 8, 48	86.8	35.1	54.5	10.4	3	0.10	98.4	1.0	0.1	0.5	19.8
6, 12, 40	95.7	49.4	43.3	7.3	3	0.05	93.8	3.7	1.4	1.1	166
6, 12, 60	96.2	38.8	51.7	9.5	3	0.02	99.2	0.4	0.2	0.2	323
8, 16, 40	98.8	46.2	45.2	8.6	3	0.03	99.3	0.4	0.2	0.1	765
$r=2$ 8, 16, 60	95.4	40.6	50.5	8.9	3	0.06	99.4	0.2	0.1	0.3	597
8, 16, 80	98.2	41.7	49.3	9.0	3	0.01	99.5	0.2	0.2	0.1	1234
8, 16, 100	99.1	37.2	52.8	10.0	3	0.01	99.5	0.1	0.2	0.2	1132
8, 16, 120	99.0	37.4	53.6	9.0	4	0.01	99.7	0.1	0.1	0.1	1892
min	86.8	35.1	43.3	7.3	3	0.01	91.6	0.1	0.1	0.1	2.2
mean	95.2	40.6	50.3	9.2	3.1	0.05	97.9	1.3	0.4	0.4	614.3
max	99.1	49.4	54.5	10.4	4	0.10	99.7	5.2	1.6	1.6	1892
4, 8, 16	85.9	40.8	49.5	9.7	3	0.06	84.0	9.7	3.2	3.1	0.74
4, 8, 32	82.8	34.0	56.1	9.9	3	0.08	97.6	1.4	0.4	0.6	5.97
4, 8, 48	82.7	29.2	60.7	10.1	3	0.04	97.8	1.3	0.4	0.5	13.9
6, 12, 40	92.7	43.2	46.5	10.3	4	0.04	92.6	4.8	1.5	1.1	129
6, 12, 60	89.7	40.8	47.9	11.3	3	0.04	94.2	2.8	1.4	1.6	148
8, 16, 40	98.0	38.1	51.6	10.3	3	0.01	95.7	2.3	0.8	1.2	512
$r=4$ 8, 16, 60	94.7	35.2	54.0	10.8	3	0.02	99.8	0.1	0.1	0.1	677
8, 16, 80	94.5	35.5	54.3	10.2	3	0.02	99.5	0.4	0.1	0.1	802
8, 16, 100	90.7	29.1	54.4	16.5	3	0.04	99.7	0.2	0.1	0.1	976
8, 16, 120	92.6	18.2	64.3	17.5	3	0.04	98.7	0.9	0.2	0.2	1321
min	82.8	18.2	46.5	9.7	3	0.01	84.0	0.1	0.1	0.1	0.74
mean	91.4	34.4	54.0	11.7	3.1	0.04	96.0	2.4	0.8	0.8	458.56
max	98.0	43.2	64.3	17.5	4	0.08	99.8	9.7	3.2	3.1	1321

续表

i, j, k	LR _p	FC _p	LC _p	EC _p	ITs	HQ	P1 _p	P2 _p	H _p	MP _p	T
4, 8, 16	63.3	48.2	40.1	11.7	3	0.20	99.8	0.1	0.1	0.1	1.3
4, 8, 32	66.5	27.2	55.3	17.5	3	0.04	94.6	3.1	1.3	1.0	1.8
4, 8, 48	65.0	28.5	61.3	10.2	2	0.06	95.6	2.8	0.8	0.8	5.2
6, 12, 40	91.4	36.4	32.1	11.5	3	0.04	99.2	0.4	0.3	0.1	13.7
6, 12, 60	78.2	34.2	53.9	11.9	3	0.12	92.6	4.8	1.5	1.1	27.3
8, 16, 40	91.2	43.1	42.2	14.7	3	0.05	99.7	0.1	0.1	0.1	55.4
$r = 8$ 8, 16, 60	99.9	33.2	58.9	7.9	3	0.01	96.6	1.9	0.8	0.7	67.2
8, 16, 80	65.6	34.1	55.2	10.7	3	0.03	99.8	0.1	0.1	0.1	87.4
8, 16, 100	93.7	28.2	56.1	15.7	4	0.01	99.6	0.2	0.2	0.1	138.9
8, 16, 120	70.3	18.1	67.2	14.7	3	0.04	98.5	1.1	0.1	0.3	152
min	63.3	18.1	40.1	7.9	2	0.01	92.6	0.1	0.1	0.1	1.3
mean	78.5	33.1	54.2	12.7	3	0.06	97.6	1.5	0.5	0.4	55.0
max	99.9	48.2	67.2	17.5	4	0.20	99.8	4.8	1.5	1.1	152

表2 供应链运营成本仿真结果

i, j, k	LR _p	FC _p	LC _p	EC _p	ITs	HQ	P1 _p	P2 _p	H _p	MP _p	T
4, 8, 16	97.0	82.6	14.8	2.6	3	0.10	90.6	5.7	1.4	2.2	1.2
4, 8, 32	98.8	75.7	20.2	4.1	3	0.03	97.2	1.0	0.9	0.9	276
4, 8, 48	99.9	71.0	24.3	4.7	3	0.01	99.0	0.6	0.3	0.1	11.7
6, 12, 40	97.2	88.5	10.1	1.4	4	0.05	84.6	9.7	3.6	2.1	1.1
6, 12, 60	95.8	79.6	15.7	4.7	4	0.04	98.4	0.8	0.5	0.3	3 121
8, 16, 40	99.9	85.4	12.3	2.3	4	0.01	98.9	0.6	0.3	0.2	2 012
FC 8, 16, 60	98.1	81.3	16.2	2.5	4	0.03	98.8	0.7	0.3	0.2	1 132
8, 16, 80	98.8	83.6	13.6	2.8	4	0.02	99.1	0.4	0.4	0.1	40.2
8, 16, 100	99.9	79.4	19.5	1.1	3	0.01	99.3	0.4	0.2	0.1	231
8, 16, 120	99.5	76.5	18.2	5.3	4	0.01	99.2	0.5	0.2	0.1	176
min	97.0	71.0	43.3	1.1	3	0.01	84.6	0.4	0.2	0.1	1.1
mean	98.5	80.4	50.3	3.2	3.7	0.03	96.5	2.0	0.8	0.6	700.2
max	99.9	88.5	54.5	5.3	4	0.10	99.3	9.7	3.6	2.2	3 121
4, 8, 16	59.2	18.2	78.0	3.8	4	0.12	74.2	12.8	7.6	5.4	0.5
4, 8, 32	62.8	12.8	85.2	2.0	3	0.05	96.8	1.5	1.0	0.7	3.8
4, 8, 48	55.3	16.3	80.9	2.8	3	0.09	96.2	1.8	1.3	0.7	2.6
6, 12, 40	82.1	20.8	75.6	3.6	4	0.06	90.8	5.2	2.4	1.6	1.7
6, 12, 60	88.6	17.3	80.3	2.4	3	0.04	92.1	4.1	2.4	1.4	1.8
8, 16, 40	72.4	23.1	74.8	2.1	3	0.06	93.8	4.2	1.1	0.9	2.8
LC 8, 16, 60	78.3	18.2	78.1	3.7	4	0.03	98.7	0.8	0.3	0.2	82.3
8, 16, 80	68.2	13.7	82.6	3.7	3	0.05	99.2	0.5	0.2	0.1	96
8, 16, 100	79.9	12.8	83.7	3.5	4	0.02	99.1	0.6	0.2	0.1	102
8, 16, 120	78.4	11.7	84.1	4.2	3	0.03	99.3	0.5	0.1	0.1	188
min	55.3	12.8	74.8	2.0	3	0.02	74.2	0.5	0.1	0.1	0.5
mean	72.5	16.5	80.3	3.1	3.4	0.06	94.0	3.2	1.8	1.1	48.2
max	88.6	23.1	85.2	4.2	4	0.12	99.3	12.8	7.6	5.4	188
4, 8, 16	68.3	40.5	28.2	31.3	4	0.98	95.2	3.3	0.9	0.6	1.8
4, 8, 32	57.2	33.5	34.1	32.4	3	0.75	88.3	5.9	3.7	2.1	0.8
4, 8, 48	66.5	23.5	39.8	36.7	3	0.52	99.3	0.3	0.2	0.2	25.1
6, 12, 40	89.2	30.6	33.6	35.8	3	0.34	99.5	0.3	0.1	0.1	789
6, 12, 60	87.4	24.2	41.1	34.7	4	0.45	98.1	1.3	0.4	0.2	5.8
8, 16, 40	84.1	30.4	36.8	32.8	3	0.41	97.8	1.4	0.5	0.3	4.8
EC 8, 16, 60	73.8	37.7	30.4	31.9	3	0.58	99.6	0.2	0.1	0.1	169
8, 16, 80	74.1	30.0	37.9	32.1	3	0.47	99.4	0.3	0.2	0.1	24.8
8, 16, 100	81.8	31.1	36.9	31.8	4	0.43	99.7	0.1	0.1	0.1	178
8, 16, 120	74.7	28.5	39.3	32.2	3	0.66	98.2	0.5	0.2	0.1	22.4
min	57.2	23.5	28.2	31.3	3	0.34	88.3	0.1	0.1	0.1	0.8
mean	75.7	31.0	35.8	33.2	3.3	0.56	97.6	1.4	0.6	0.4	122.2
max	89.2	40.5	41.1	36.7	4	0.98	99.7	5.9	3.7	2.1	789

3.2 供应链网络运营成本分析

为了测试算法和供应链网络设计的特性, 本文从供应链网络的配送中心固定成本、物流成本和碳排放成本等3个方面进行分析; 而且, 为便于分析的

统一性, 所有这些分析是基于中等容量的配送中心, 即 $r = 4$.

1) 配送中心的固定成本分析.

为便于分析, 本部分放大配送中固定成本比例参

数, 即令 $d = 5$, 而物流成本比例参数、碳排放成本比例参数仍为基础值, 即 $l_1 = l_2 = 1, c = 1$. 仿真结果如表 2 第 1 部分所示.

从表 2 第 1 部分可以看出, 相对于基本实例, 配送中心的平均负荷率变大了. 这是由于模型求解时, 为了减少配送中心固定成本, 必须减少配送中心数量. 这样, 配送中心容量的利用率得到提高, 从而导致配送中心的平均负荷率变大.

2) 物流成本分析.

为便于分析, 本部分放大物流成本比例参数, 令 $l_1 = l_2 = 5$, 而配送中心固定成本比例参数、碳排放成本比例参数仍为基础值, 即 $d = 1, c = 1$. 仿真结果如表 2 第 2 部分所示.

从表 2 第 2 部分可以看出, 相对于基本实例, 碳排放成本降低了. 这是由于模型求解时, 为了降低物流成本, 必须缩短运输距离, 从而降低了碳排放量, 最终导致碳排放成本的降低.

3) 碳排放成本分析.

为便于分析, 本部分放大碳排放成本比例参数, 令 $c = 5$, 而物流成本比例参数、配送中心固定成本比例参数仍为基础值, 即 $l_1 = l_2 = 1, d = 1$. 仿真结果如表 2 第 3 部分所示.

从表 2 第 3 部分可以看出, 相对于基本实例, 配送中心的平均负荷率减少了. 这是由于碳排放量与运输距离成正相关关系, 求解时为了减少碳排放成本, 必须减少碳排放量, 也就必须缩短运输距离, 而缩短运输距离, 就必须设立更多的配送中心. 这样就存在配送中心的容量没有被充分利用的现象, 从而导致了配送中心负荷率的降低.

表 1 和表 2 还体现了算法运算时间的分配. 在配送中心容量不变的条件下, 随着 i, j 和 k 的增加, 算法总的运算时间 T 是增加的. 这表明, 随着决策变量的增加, 计算量也随着增加; 而且, 大多数算法运算时间用在求解子问题 1, 占整个求解时间的 84%~99.8%. 另外, 从表 1 和表 2 还可以看出, 启发式算法的求解质量较高, 误差范围在 0.01~0.2 之间.

3.3 供应链网络设计分析

本文考虑零排放和高排放两种情况的供应链网络设计, 两种情况的供应商位置、配送中心的固定成本和容量以及客户需求是相同的. 为便于比较分析, 两种情况都是基于中等容量的配送中心, 即 $r = 4$.

在零排放模型中, 令碳排放成本比例参数 $c = 0$, 在高排放模型中, 令碳排放成本比例参数 $c = 5$. 在两种排放模型中, 物流成本比例参数、配送中心固定成本比例参数为基础值, 即 $l_1 = l_2 = 1, d = 1$. 为简化运

算量, 网络设计参数设定如下: 2 个供应商、3~6 个可选的配送中心和 10 个客户, 它们的初始相对位置是已知的, 如图 1 所示. 其中: 方形表示供应商, 圆形表示配送中心, 三角形表示客户. 网络设计的仿真结果如图 2 和图 3 所示.

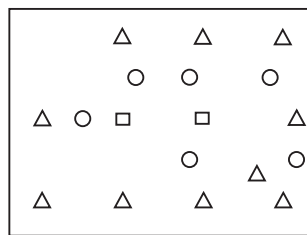


图 1 初始供应链网络

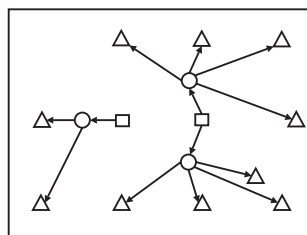


图 2 零排放条件下的供应链网络

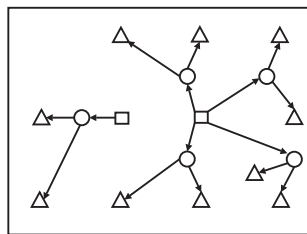


图 3 高排放条件下的供应链网络

图 2 表示零排放的供应链网络. 该网络包括 2 个供应商、3 个配送中心和 10 个客户, 其中一个供应商为 1 个配送中心供货, 另一个供应商为 2 个配送中心供货. 配送中心靠近供应商, 且靠近供应链局部网络的中心位置, 每个客户就近分配配送中心. 由于特定的客户需求和配送中心容量, 至少要开放 3 个配送中心, 以满足客户需求.

图 3 表示高排放的供应链网络. 相对于零排放中的 3 个配送中心而言, 高排放中配送中心增加到 5 个. 在高排放条件下, 供应链网络内部的运输距离变长, 碳排放量增多. 因此, 要减少碳排放成本就必须设置更多的配送中心, 以减少运输距离, 降低碳排放成本.

4 结 论

本文针对网购背景下的低碳供应链网络设计问题, 利用凹函数建立了相应的设计模型. 该模型对供应链运营成本进行了最小化处理. 由于对该模型进行直接求解比较困难, 运用拉格朗日松弛算法将该模型分解成能够求解的两个子模型. 在此基础上, 提出了

基于子模型求解的拉格朗日启发式算法,并对模型进行了仿真应用分析.分析结果表明,考虑碳排放成本的供应链设计,能优化网购环境下低碳供应链资源的配置.这主要体现在以下两个方面:1)考虑网购背景下的碳排放,配送中心容量的利用率得到了有效提高,减少了配送中心资源,尤其是仓储资源的闲置;2)考虑网购背景下的碳排放,决策者能根据供应链碳排放量的大小合理设置配送中心的数量.本文的研究能够为网购背景下的低碳供应链设计提供一种新思路.

参考文献(References)

- [1] Agatz N, Campbell A M. Challenges and opportunities in attended home delivery[J]. *Operations Research/Computer Science Interfaces*, 2008, 43: 379-396.
- [2] Ballot E, Fontane F. Reducing transportation CO² emissions through pooling of supply networks: Perspectives from a case study in French retail chains[J]. *Production Planning & Control*, 2010, 21(6): 644.
- [3] Pan S, Ballot E, Fontane F. The reduction of greenhouse gas emissions from freight transport by pooling supply chains[J]. *Int J of Production Economics*, 2013, 143(1): 86-94.
- [4] Hoen K, Tan T, Fransoo J C, et al. Effect of carbon emission regulations on transport mode selection under stochastic demand[R]. Eindhoven: School of Industrial Engineering, Eindhoven University of Technology, 2011.
- [5] Matthews H S, Hendrickson C T, Weber C L. The importance of carbon footprint estimation boundaries[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 42(16): 5839-5842.
- [6] Hsu C W, Kuo T C, Chen S H, et al. Using DEMATEL to develop a carbon management model of supplier selection in green supply chain management[J]. *J of Cleaner Production*, 2013, 56(1): 164-172.
- [7] Caro F, Corbett C, Tan T, et al. Carbon-optimal and carbon-neutral supply chains[R]. Los Angeles: Anderson School of Management, UCLA, 2011.
- [8] 陈剑. 低碳供应链管理研究[J], *系统管理学报*, 2012, 21(6): 721-728.
(Chen J. Study on supply chain management in a low-carbon era[J]. *J of Systems & Management*, 21(6): 721-728.)
- [9] 赵道致, 吕金鑫. 考虑碳排放权限制与交易的供应链整体低碳化策略[J]. *工业工程与管理*, 2012, 17(5): 65-71.
(Zhao D Z, Lv J X. Carbon-efficient strategy for integrated supply chain considering carbon emission rights and trading[J]. *Industrial Engineering and Management*, 2012, 17(5): 65-71.)
- [10] 李昊, 赵道致. 碳排放权交易机制对供应链影响的仿真研究[J]. *科学学与科学技术管理*, 2012, 33(11): 118-123.
(Li H, Zhao D Z. The simulation research on the impact of carbon permits trading on supply chain[J]. *Science of Science and Management of S & T*, 2012, 33(11): 118-123.)
- [11] 杨珺, 李金宝, 卢巍. 系统动力学的碳排放政策对供应链影响[J]. *工业工程与管理*, 2012, 17(4): 21-30.
(Yang J, Li J B, Lu W. The impact of emission policies on supply chain based on system dynamics[J]. *Industrial Engineering and Management*, 2012, 17(4): 21-30.)
- [12] 丛明军, 穆东. 基于增值碳排放系数的供应链碳排放测度[J]. *综合运输*, 2013(8): 37-42.
(Cong M J, Mu D. The carbon emission measurement of supply chain based on carbon emission valued-added coefficient[J]. *Integrated Transport*, 2013(8): 37-42.)
- [13] 朱道立, 胡一旻, 徐最. 网购供应链中的竞争和协调若干问题[J]. *上海理工大学学报*, 2011, 33(3): 248-252.
(Zhu D L, Hu Y H, Xu Z. Competition and coordination in online shopping supply networks[J]. *J University of Shanghai for Science and Technology*, 2011, 33(3): 248-252.)
- [14] 胡一旻, 李学迁, 张江华, 等. 网购供应链网络均衡模型研究[J]. *运筹与管理*, 2012, 21(4): 34-40.
(Hu Y H, Li X Q, Zhang J H, et al. An equilibrium model of online shopping supply chain network[J]. *Operations Research and Management Science*, 2012, 21(4): 34-40.)
- [15] Samir Elhedhli, Ryan Merrick. Green supply chain network design to reduce carbon emissions[J]. *Transportation Research Part D*, 2012, 17(5): 370-379.
- [16] Xiao Y Y, Zhao Q H, Kaku L, et al. Development of a fuel consumption optimization model for the capacitated vehicle routing problem[J]. *Computers & Operations Research*, 2012, 39(7): 1419-1431.
- [17] 周叶, 王道平, 赵耀. 中国省域物流作业的 CO₂ 排放量测评及低碳化对策研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2011, 21(9): 81-87.
(Zhou Y, Wang D P, Zhao Y. Study on the CO₂ emission evaluation of the provincial logistics operation and low-carbon strategy in china[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2011, 21(9): 81-87.)
- [18] Pardalos P, Rosen J. Methods for global concave minimization: A bibliographic survey[J]. *SIAM Review*, 1986, 28 (3): 367-379.

(责任编辑: 曹洪武)