

# 控制与决策

Control and Decision

## 需求不确定下的低碳物流配送中心选址

林殿盛, 张智勇, 王佳欣, 梁希, 石永强

引用本文:

林殿盛, 张智勇, 王佳欣, 等. 需求不确定下的低碳物流配送中心选址[J]. *控制与决策*, 2020, 35(2): 492–500.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.0646>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

### 考虑模型响应不确定性的稳健参数设计

Multi-response robust parameter design based on uncertainty of model response

*控制与决策*. 2019, 34(2): 233–242 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.0995>

### 舰载机弹药调运不确定系统的T-S模糊优化模型

T-S fuzzy optimization model for uncertain weapons transporting system in carrier aircraft

*控制与决策*. 2018, 33(4): 639–643 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2017.0271>

### 竞争市场新进企业的容量设施选址研究

Study on capacitated facility location of new enterprises in competitive market

*控制与决策*. 2018, 33(10): 1789–1794 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2017.0630>

### 基于证据马尔可夫随机场模型的图像分割

Image segmentation based on evidential Markov random field model

*控制与决策*. 2017, 32(9): 1607–1613 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2016.0901>

### 基于延迟定价策略的供应链分散与集中决策

Decentralized and centralized decision-making of supply chain based on price-postponement strategy

*控制与决策*. 2016, 31(7): 1258–1264 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2015.0699>

### 基于库存切换的不确定动态供应链网络系统模糊鲁棒控制

Fuzzy robust control of uncertain dynamic supply chain network system based on switched inventory

*控制与决策*. 2015, 30(5): 892–898 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2014.0124>

### 两级车辆路径问题下的应急物资配送策略与绩效

Emergency resource delivery strategy and performance based on two echelon vehicle routing problem

*控制与决策*. 2015(2): 266–270 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2013.1696>

### 基于最大灵敏度的加热系统分数阶内模控制

Maximum sensitivity based fractional order internal model control for heating system

*控制与决策*. 2015(10): 1899–1902 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2014.1389>

## 需求不确定下的低碳物流配送中心选址

林殿盛, 张智勇, 王佳欣, 梁希, 石永强<sup>†</sup>

(华南理工大学 经济与贸易学院, 广州 510006)

**摘要:** 针对低碳物流配送中心选址问题, 结合需求不确定的现实问题, 采用随机规划理论, 建立以包含碳排放成本在内的总成本最低为目标、以不确定性需求为随机约束的选址模型, 通过实例运用验证模型的有效性, 能够为企业在实际市场需求波动下的选址投入以及收益提供一定的参考价值. 另外, 对不确定性需求的置信水平和标准差进行灵敏度分析, 案例分析结果显示: 碳排放因素与需求的不确定性对配送中心选址结果存在较为显著的影响, 选址总成本与需求的不确定程度密切相关, 碳排放成本也会随着需求的变动产生较大的波动.

**关键词:** 低碳物流; 配送中心; 选址; 随机规划; 需求不确定

**中图分类号:** F224; F252

**文献标志码:** A

## Low-carbon logistics distribution center location with uncertain demand

LIN Dian-sheng, ZHANG Zhi-yong, WANG Jia-xin, LIANG Xi, SHI Yong-qiang<sup>†</sup>

(School of Economics and Commerce, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** Aiming at the location problem of low carbon logistics distribution center, a location model that takes the lowest total cost including carbon emission costs as the goal and the uncertainty requirements as the random constraint is proposed, with stochastic programming theory, the model is validated to be effective by the use of actual examples. It is proved that the model can provide a certain reference value for the location investment and income of the enterprise under the fluctuation of actual market demand. In addition, the sensitivity analysis of confidence level and standard deviation of the uncertainty demand is carried out, which shows that the uncertainty of carbon emission and demand have significant impacts on the distribution center location results; the total cost of location is closely related to the degree of uncertainty of demand, and the cost of carbon emissions will also fluctuate greatly with changes in demand.

**Keywords:** low-carbon logistics; distribution center; location; stochastic programming; uncertain demand

### 0 引言

随着全球性温室气体问题日益严峻、绿色循环低碳发展的理念日益深入人心, 低碳经济也愈发受到国际社会、政府以及民众的关注, 以减少 CO<sub>2</sub> 等为代表的温室气体排放的话题也成为各国纷纷议论和关注的对象. 国际能源署曾在其发布的相关报告中指出, 全球 CO<sub>2</sub> 排放量中约有四分之一来自于交通业. 而交通业中的一个中流砥柱——物流业作为高耗能、高排放的行业, 在当前发展低碳经济中发挥着重要的作用. 发展低碳物流, 是我国实现可持续化发展的必然选择, 而构建低碳的配送网络, 作为实现低碳物流的重要手段之一, 不仅能降低物流业的能耗, 还能以先进的物流技术来引导低碳化的运作方式, 降低经济的整体运行成本.

低碳物流的概念在 21 世纪初被提出, 突出强调要在物流过程中降低二氧化碳为代表的温室气体排

放. 目前为止, 对低碳物流的研究主要还集中在碳排放测算与运输路径优化上. Xiao 等<sup>[1]</sup> 将油耗率作为因素对传统 VRP 模型进行拓展, 并认为除了运输距离, 载重量同样对燃料消耗存在影响. 葛显龙等<sup>[2]</sup> 分析了能耗与碳排放之间的相互关系, 提出了一种物流配送问题的碳排放计算方法并用于研究路径优化问题. Guo 等<sup>[3]</sup> 提出了低碳环境下生鲜食品电商的正/逆向物流网络和闭环路径规划模型.

配送中心作为物流运作中的一个重要节点, 其选址问题与碳排放问题关系密切, 目前国内外对于具体的低碳物流配送中心选址研究主要为基于宏观层面或供应链网络的分析. Tarek 等<sup>[4]</sup> 以碳排放总成本最小为目标, 进行了考虑低碳的运输与选址集成研究. Zakeri 等<sup>[5]</sup> 分别基于碳交易和碳税制度构建了供应链物流网络优化模型, 通过对比分析不同政策下的成本得出了一系列结论. Martí 等<sup>[6]</sup> 则是在考虑碳排

收稿日期: 2018-05-15; 修回日期: 2018-08-08.

基金项目: 国家自然科学基金项目(71572058); 教育部人文社会科学基金项目(17YJC630230).

<sup>†</sup>通讯作者. E-mail: yqshi@scut.edu.cn.

放的配送中心选址问题下,引入了需求不确定因素,并构建模型求解.

现实中企业总是面临着需求、风险等多种不确定因素,其中客户需求不是波动不确定就是一种较为常见的不确定问题,对此国内外学者都进行了很多研究. Jena等<sup>[7]</sup>归纳现有的几种动态设施选址问题的公式并提出了一种新的线性规划松弛方法,研究随机需求下设施关闭和重启以及有容量限制的选址问题. Albareda-Sambola等<sup>[8]</sup>研究了伯努利分布需求下的设施选址问题, Milena<sup>[9]</sup>在其基础上又进一步将结果拓展到离散需求和随机需求的任意分布,提出了任意分布随机需求建模的设施选址问题. 彭春等<sup>[10]</sup>考虑了需求和运输成本的不确定性,建立了鲁棒设施选址模型.

上述文献的研究各有侧重点,但是在配送中心的选址问题研究中,很少会同时结合热点的低碳环境问题与实际需求变动一起讨论研究,而往往这两者在现今研究趋势中是非常贴合企业实际发展的. 基于以上分析,本文选择将需求不确定下的低碳物流配送中心选址作为研究对象,即对企业在物流配送中心选址决策时进行优化分析,在需求不确定的情况下尽可能地减少碳排放,同时又考虑企业的物流成本,最终达到总体成本最小化的目的.

## 1 问题描述及条件假设

### 1.1 问题描述

本文研究的是针对单一类别商品的三级物流配送网络中,物流配送中心如何选址以实现包含碳排放成本在内的总成本最小.

在传统的物流中心选址模型中,大都假设物流系统中所涉及的库存费用、车辆费用、需求量、运输时间等关键因素为已知常数,然后根据要求确定一个或多个物流中心. 但是在实际情况中,企业在确定物流中心的选址前不可能对各个需求点的商品需求量和运输时间等有精确无误的掌握,通常情况下他们都是根据各个区域进行市场调研,然后进行分析来预测各区域的需求量,同时给出在一个上下浮动范围内的预测值,从而理论上得出包含实际需求量的预测值. 这些预测需求量虽然是随机的,但其往往会符合一定的规律性.

### 1.2 条件假设

本文提出数项基本模型假设:

- 1) 配送的商品为某单一类别商品,不考虑单个商品的实际规格及重量;
- 2) 配送车辆的数量没有限制且为某单一车型,车

辆的规格一致;

- 3) 不考虑供应商及零售商环节的碳排放成本;
- 4) 考虑配送中心的容量限制;
- 5) 各个备选配送中心建设规模、面积、运营成本等完全相同;
- 6) 不考虑车辆数目限制及所遇到的不可抗拒时间,运输车辆能正常往返于配送及运输过程中;
- 7) 各个零售商对货物的需求是未知的,且都服从正态分布,并且各零售商的需求是相互独立的,相互之间不发生串货,彼此之间不干扰;
- 8) 整个过程中运输费用与运输量成正比;
- 9) 考虑到规模效应的问题,由于处理货物的过程中就会产生碳排放,配送中心的处理成本及碳排放成本均为流量的凹函数,设两者的函数一样;
- 10) 每个配送中心可由多个供应商送货,每个零售商可由多个配送中心配送,但不存在调货;
- 11) 每个零售商的期望时间都能得到满足,单位产品的运输成本及单位距离的碳排放量不随零售商期望时间变化;
- 12) 零售商期望时间只考虑从配送中心到零售商的配送时间,不考虑装卸货等时间,若多配送中心对该零售商配送,则规定配送中心同时开始配送.

## 2 模型构建

### 2.1 符号说明

假设某区域有  $i(i = 1, 2, \dots, l)$  个供应商、 $j(j = 1, 2, \dots, m)$  个配送中心和  $k(k = 1, 2, \dots, n)$  个零售商. 模型变量如下:  $G_i$  为供应商  $i$  的供应能力;  $P_j$  为配送中心  $j$  处理货物的最大能力;  $f_j$  为配送中心  $j$  处理单位产品的费用;  $C_j$  为配送中心  $j$  的固定建设成本;  $U_j$  为配送中心  $j$  的吞吐量;  $R_k$  为零售商  $k$  的需求量;  $X_{ij}$  为从供应商  $i$  运送至配送中心  $j$  的货物量;  $Y_{jk}$  为从配送中心  $j$  运送至零售商  $k$  的货物量;  $F_{ij}$  为从供应商  $i$  运送单位产品至配送中心  $j$  的运输费用;  $E_{jk}$  为从配送中心  $j$  配送单位产品至零售商  $k$  的运输费用;  $W_j$  为物流配送中心  $j$  固定的碳排放量;  $H_j$  为物流配送中心  $j$  处理单位产品的碳排放量;  $t_{jk}$  为物流配送中心  $j$  配送到零售商  $k$  的运输时间;  $T_k$  为零售商  $k$  期望到货的时间;  $d_{ij}$  为节点  $i$  到节点  $j$  的距离;  $d_{jk}$  为节点  $j$  到节点  $k$  的距离;  $v$  为车辆行驶速度;  $\rho$  为单位距离燃料消耗量;  $\gamma$  为车辆单位距离的  $\text{CO}_2$  排放系数;  $\lambda$  为碳税价格;  $\alpha$  为满足需求的置信水平,即只要满足所有需求的概率水平达到  $\alpha$  即可;  $M_{\max}$  为车辆的最大载货量;  $\rho_{\max}$  为车辆满载时的燃油消耗量;  $\rho_0$  为车辆空载时的燃油消耗量;  $EE_j$  为所消耗的电能

(单位 MWh);  $\delta_1$  为电能的碳排放因子;

$$Z_j = \begin{cases} 1, & \text{在备选地点 } j \text{ 处建立配送中心;} \\ 0, & \text{不在备选地点 } j \text{ 处建立配送中心;} \end{cases}$$

$$B_{jk} = \begin{cases} 1, & \text{配送中心 } j \text{ 对零售商 } k \text{ 进行配送;} \\ 0, & \text{配送中心 } j \text{ 对零售商 } k \text{ 不进行配送;} \end{cases}$$

$(U_j)^\omega$  为假设凹函数,  $\omega \in \{0, 1\}$ .

## 2.2 低碳物流中心选址模型构建

低碳选址模型与传统选址模型的区别在于在选址成本中加入碳排放成本进行规划. 不过物流网络中碳排放的计算实际上是一个非常复杂的过程, 碳排放的来源很多, 很多文献中碳排放的计算往往只局限于某一环节或笼统地进行估计, 且很多环节的计算是以常量来替代, 忽略了很多细节. 为了更准确地计算碳排放, 本文在配送中心选址碳排放成本计算时充分考虑了运输及运营环节的多种碳排放来源.

### 2.2.1 传统配送中心选址物流成本

物流成本主要包括固定建设成本、货物流转处理成本、运输及配送成本等, 其中固定建设成本指场地租赁、设备购置以及仓库建设等成本, 货物流转处理成本指物流配送中心处理货物的成本, 运输及配送成本指从供应商到配送中心、配送中心到顾客的配送成本.

综上, 配送中心选址的物流成本函数为

$$F_1 = \sum_{j=1}^m C_j Z_j + \sum_{j=1}^m (U_j)^\omega f_j Z_j + \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^m X_{ij} F_{ij} Z_j + \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n Y_{jk} E_{jk} Z_j B_{jk}. \quad (1)$$

### 2.2.2 配送中心选址低碳成本计算

在物流配送过程中会产生大量的  $\text{CO}_2$ , 主要来源于运输环节以及配送中心仓储运营环节的碳排放.

对于运输环节而言, 配送过程中的碳排放主要来自于车辆消耗能源, 其燃料消耗量与运输距离、车速以及载重等因素都有直接关系. 本文结合 Xiao 等<sup>[11]</sup>的消耗燃油量计算方法和 Bowyer 等<sup>[12]</sup>的即时碳排放模型来实现运输环节的碳排放量计算.

通过将车辆的重量分成车辆空载重量  $M_0$  和车辆负载  $m$ , 分析得出单位距离下运载  $m$  消耗燃油量是一个线性函数, 即

$$\rho(m) = \beta(M_0 + m) + c. \quad (2)$$

将空载和满载时的燃油量  $\rho_0$  和  $\rho_{\max}$  代入式(2)可得

$$\rho(m) = \frac{\rho_{\max} - \rho_0}{M_{\max}} m + \rho^0. \quad (3)$$

现需计算满载和空载下的燃油消耗量来求单位距离下车辆负载  $m$  时的碳排放量. 假设汽车始终保持匀速行驶, 因此根据 Bowyer 的即时模型, 可得单位距离燃油消耗量为

$$f_L = \rho\beta_1 b_1 + \rho\beta_1 b_2 v^2 + \frac{\rho\alpha}{v} + \frac{9.81\rho\beta_1 MG}{100000}. \quad (4)$$

其中:  $\alpha$  为空转时的燃料消耗率(单位 mL/s, 通常介于 0.375~0.556 之间);  $\beta_1$  为与发动机相关的能耗的效率系数(单位 mL/kJ, 通常介于 0.08~0.09 之间);  $v$  表示速度 (m/s);  $b_1$  为滚动摩擦的阻力(单位 kN, 通常介于 0.1~0.7 之间);  $b_2$  为滚动气动力 ( $\text{kN}/(\text{m}/\text{s})^2$ );  $M$  表示车辆总重 (kg);  $G$  为坡度, 下坡时取负值;  $\rho$  为车辆使用燃油的密度值.

由公式碳排放量 = 燃料消耗量  $\times$   $\text{CO}_2$  排放系数可知, 在三级物流网络中, 供应商  $i$  提供商品运输到备选物流配送中心  $j$  再配送到零售商  $k$ , 这之间产生单位距离的碳排放量可以表示为

$$\epsilon = \gamma\rho(m). \quad (5)$$

根据式(4)求解空载和满载时的燃油消耗量  $\rho_0$  和  $\rho_{\max}$  后, 由式(3)可求得  $\rho(m)$ , 进而将  $\rho(m)$  代入到式(5)即可求解出车辆运输过程中的单位距离碳排放量  $\epsilon$ .

由式(3)和(4)可得运输过程中的碳排放量为

$$Q_1 = \left( \frac{\rho_{\max} - \rho_0}{M_{\max}} m + \rho^0 \right) (d_{ij} + d_{jk}). \quad (6)$$

本文将仓储运营环节能耗产生的碳排放分为两个方面计算: 固定能源消耗和变动能源消耗, 即

运营环节碳排放量 =

固定碳排放量 + 变动碳排放量.

配送中心固定的能耗主要包括照明、恒温、机械作业3部分的能耗. 一般情况下配送中心的照明以及恒温主要是以电能消耗为主, 机械作业中设备运行所消耗的燃油或电能为主. 不同能源的碳排放参考系数不同, 考虑本文案例中涉及使用的能源为柴油, 特列表1.

表1 本文涉及能源的碳排放参考系数

| 能源种类 | 平均低位<br>发热量 | 单位热值含碳量<br>kJ/kg | 碳氧化率<br>t · C/TJ | 二氧化碳排放系数<br>kg · CO <sub>2</sub> /kg |
|------|-------------|------------------|------------------|--------------------------------------|
| 柴油   | 42 652      | 20.2             | 0.98             | 3.095 9                              |

电能消耗所产生的碳排放量的计算公式为

$$E_1 = EE_j \delta_1. \quad (7)$$

燃油的消耗参考联合国政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 在 2006 年研究得到的计算  $\text{CO}_2$  排放量的模型

二氧化碳排放量 =

[燃料消费量 × 转换因子 × 单位热值燃料含碳量 - [固碳量] × 碳氧化因子 × 44/12.

设所消耗的燃油量为  $OE_j$  kg 燃料的低位发热值为  $\delta_2$ , 燃料的单位热值含碳量  $\delta_3$ , 燃料的碳氧化率为  $\delta_4$ , 便于计算不考虑实际固碳率, 则燃油消耗所产生的碳排放量的计算公式为

$$E_2 = \frac{44}{12} OE_j \delta_2 \delta_3 \delta_4. \quad (8)$$

由上述综合可得配送中心固定的碳排放量计算公式为

$$W_j = EE_j \delta_1 + \frac{44}{12} OE_j \delta_2 \delta_3 \delta_4. \quad (9)$$

变动的碳排放主要来自处理货物消耗的能源, 由上述参数可得变动碳排放成本计算公式为

$$O_j = \sum_{j=1}^m Z_j H_j (U_j)^\omega. \quad (10)$$

综上所述, 配送中心运营过程中的碳排放量为

$$Q_2 = EE_j \delta_1 + \frac{44}{12} OE_j \delta_2 \delta_3 \delta_4 + \sum_{j=1}^m Z_j H_j (U_j)^\omega. \quad (11)$$

由前文可知, 选址过程中的碳排放成本主要为运输过程和运营过程的碳排放成本, 详细来说只要包括固定碳排放成本、配送中心处理货物时产生的碳排放成本、从供应商到配送中心再到顾客这整个运输配送中产生的碳排放成本. 因此配送中心选址的碳排放成本函数为

$$F_2 = \lambda \left\{ \sum_{j=1}^m W_j Z_j + \sum_{j=1}^m (U_j)^\omega H_j Z_j + \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^m \gamma X_{ij} d_{ij} Z_j + \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n \gamma Y_{jk} d_{jk} Z_j B_{jk} \right\}. \quad (12)$$

将式(3)、(4)和(6)代入(12), 可得总碳排放成本函数为

$$F_2 = \sum_{j=1}^m \lambda \left( EE_j \delta_1 + \frac{44}{12} OE_j \delta_2 \delta_3 \delta_4 \right) Z_j + \sum_{j=1}^m \lambda (U_j)^\omega H_j Z_j + \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^m \lambda \gamma \left( \frac{\rho_{\max} - \rho_0}{M_{\max}} X_{ij} + \rho^0 \right) d_{ij} Z_j + \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^m \lambda \gamma \left( \frac{\rho_{\max} - \rho_0}{M_{\max}} Y_{jk} + \rho^0 \right) d_{jk} Z_j B_{jk}. \quad (13)$$

### 2.2.3 低碳配送中心选址总成本模型

综合考虑上述各类成本, 建立以总成本最小的如下碳排放约束下的物流配送中心选址模型:

$$\begin{aligned} \min F = & \sum_{j=1}^m C_j Z_j + \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^m X_{ij} F_{ij} Z_j + \sum_{j=1}^m (U_j)^\omega f_j Z_j + \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n Y_{jk} E_{jk} Z_j B_{jk} + \sum_{j=1}^m \lambda \left( EE_j \delta_1 + \frac{44}{12} OE_j \delta_2 \delta_3 \delta_4 \right) Z_j + \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^m \lambda \gamma \left( \frac{\rho_{\max} - \rho_0}{M_{\max}} X_{ij} + \rho^0 \right) d_{ij} Z_j + \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^m \lambda \gamma \left( \frac{\rho_{\max} - \rho_0}{M_{\max}} Y_{jk} + \rho^0 \right) d_{jk} Z_j B_{jk} + \sum_{j=1}^m \lambda (U_j)^\omega H_j Z_j. \end{aligned} \quad (14)$$

$$\text{s.t. } \sum_{j=1}^m X_{ij} \leq G_i; \quad (15)$$

$$\sum_{i=1}^l X_{ij} \leq Z_j P_j; \quad (16)$$

$$\sum_{i=1}^l X_{ij} = \sum_{k=1}^m Y_{jk} = U_j; \quad (17)$$

$$\Pr \left\{ R_k \leq \sum_{j=1}^m Y_{jk} B_{jk} \right\} \geq \alpha; \quad (18)$$

$$\max \{ t_{j1}, t_{j2}, \dots, t_{jk} \} \leq T_k; \quad (19)$$

$$\sum_{j=1}^m B_{jk} \geq 1; \quad (20)$$

$$B_{jk} \leq Z_j; \quad (21)$$

$$X_{ij} \geq 0, Y_{jk} \geq 0. \quad (22)$$

其中: 式(15)表示供应能力约束; 式(16)表示物流配送中心  $i$  的处理能力约束; 式(17)表示物流中心  $j$  的运进量和运出量的平衡; 式(18)表示在需求不确定的情况下, 并不要求符合所有场景满足所有的需求, 而是只要能使得满足全部需求的概率大于  $\alpha$  即可; 式(19)表示配送时间不超过零售商期望时间; 式(20)表示每一个零售商的需求都会被满足; 式(21)表示备选的配送中心  $j$  只有被选为建造时, 才能满足对零售商  $k$  进行配送的条件; 式(22)为变量取值限制, 运输及配送的货物量应为正值.

### 2.3 随机约束转换

考虑到实际情景下需求的不确定性,建立了机会约束模型,假设满足全部需求的限制为达到概率 $\alpha$ 即可.但是在对模型的求解过程中,由于约束 $\Pr\left\{R_k \leq \sum_{j=1}^m Y_{jk} B_{jk}\right\} \geq \alpha$ 的存在,该模型的求解难度较复杂,根据等价转换进行转化求解.

本文参考等价转化方法<sup>[13]</sup>,将随机规划问题转化为有意义的机会约束规划模型.

对于约束(18),令 $S = R_k - \sum_{j=1}^m Y_{jk} B_{jk}$ ,则 $S$ 的期望值和方差分别为

$$E(S) = E(R_k) - \sum_{j=1}^m B_{jk} Y_{jk}, \quad (23)$$

$$D(S) = D(R_k). \quad (24)$$

令 $\eta = \frac{S - E(S)}{\sqrt{D(S)}}$ ,因为 $S = R_k - \sum_{j=1}^m Y_{jk} B_{jk} \leq 0$ ,其等价于 $\eta = \frac{S - E(S)}{\sqrt{D(S)}} \leq -\frac{E(S)}{\sqrt{D(S)}}$ ,所以约束(18)可以表示为 $\Pr\left(\eta \leq -\frac{E(S)}{\sqrt{D(S)}}\right) \geq \alpha$ .

设 $\eta$ 的密度概率函数为 $\Phi(\eta)$ ,若随机约束(18)在当前的置信水平 $\alpha$ 时成立,则当且仅当 $\Phi(\eta)^{-1} \leq -\frac{E(S)}{\sqrt{D(S)}}$ ,根据式(23)和(24)可得

$$\Phi(\eta)^{-1} \sqrt{D(R_k + E(R_k))} \leq \sum_{j=1}^m B_{jk} Y_{jk}, \quad (25)$$

其中 $D(R_k)$ 和 $E(R_k)$ 分别为零售商 $k$ 需求的方差和期望均值. 综上,约束(18)可转换为约束(25).

### 3 求解算法设计

由模型可看出,除处理成本为吞吐量的非线性函数以及其他常数项函数外,决策变量均为0-1变量,因此本文构建的选址模型为0-1非线性混合整数规划模型,属于NP非确定性多项式问题.

LINGO可以用于求解线性或非线性规划、整数规划等,也可以用于求解一些线性和非线性方程组等问题. 一般而言,LINGO中建立的优化模型可以由5段组成.

集合段 (SETS): 定义必要的集合变量及其元素

和属性;

目标与约束段: 定义目标函数、约束条件等;

数据段 (DATA): 对集合的属性输入必要的常数数据;

初始段 (INIT): 对集合的属性定义初值;

计算段 (CALC): 对一些原始数据进行计算处理.

本文在LINGO软件中编制程序对数学模型求解,根据构建的模型,设计目标函数的程序如下:

$$\text{cost 1} = @\text{sum}(\text{dc}(j) : C(j) * Z(j));$$

$$\text{cost 2} =$$

$$@\text{sum}(\text{linksd}(i, j) : X(i, j) * FF(i, j) * Z(j));$$

$$\text{cost 3} =$$

$$@\text{sum}(\text{dc}(j) : @\text{pow}(U(j), 0.5) * f(j) * Z(j));$$

$$\text{cost 4} = @\text{sum}(\text{linkdr}(j, k) :$$

$$Y(j, k) * E(j, k) * Z(j) * B(j, k));$$

$$\text{cost 5} = @\text{sum}(\text{dc}(j) : W(j) * Z(j));$$

$$\text{cost 6} =$$

$$@\text{sum}(\text{dc}(j) : @\text{pow}(U(j), 0.5) * H(j) * Z(j));$$

$$\text{cost 7} =$$

$$@\text{sum}(\text{linksd}(i, j) : \text{ro} * X(i, j) * d_1(i, j) * Z(j));$$

$$\text{cost 8} = @\text{sum}(\text{linksd}(ij) : m d_1(i, j) * Z(j));$$

$$\text{cost 9} = @\text{sum}(\text{linkdr}(j, k) :$$

$$\text{ro} * Y(j, k) * d_2(j, k) * Z(j) * B(j, k));$$

$$\text{cost 10} =$$

$$@\text{sum}(\text{linkdr}(j, k) : m * d_2(j, k) * Z(j) * B(j, k));$$

$$\text{min} = \text{cost 1} + \text{cost 2} + \text{cost 3} + \text{cost 4} + \text{cost 5} +$$

$$\text{cost 6} + \text{cost 7} + \text{cost 8} + \text{cost 9} + \text{cost 10}.$$

### 4 算例验证及结果分析

#### 4.1 算例验证

已知某集团在华南区有一个工厂,位于广州市经济技术开发区. 在该集团前期的战略中,计划在广东省各市新建配送中心,现通过市场需求分布、运输便利性、地价和政府政策等综合分析后,选出了5个备选配送中心. 已知各备选配送中心的具体坐标分布、单位产品处理费用、固定建设成本、建筑面积以及服务能力等相关数据,如表2所示.

因实际只有一家工厂在运作,故供应商只有一家,其具体坐标分布及供应能力如表3所示.

表2 备选配送中心相关数据

| 编号     | z 坐标                    | 单位处理费用/(千元/吨) | 固定成本/千元 | 服务能力/吨 |
|--------|-------------------------|---------------|---------|--------|
| D1(中山) | (22.549 64, 113.338 97) | 0.4           | 1 700   | 70     |
| D2(惠州) | (23.126 87, 114.485 60) | 0.2           | 900     | 50     |
| D3(佛山) | (22.988 62, 113.028 16) | 0.3           | 2 300   | 90     |
| D4(深圳) | (22.704 28, 114.026 96) | 0.5           | 3 100   | 110    |
| D5(东莞) | (23.058 13, 113.972 60) | 0.4           | 2 100   | 80     |

表3 供应商坐标及供应能力表

| 配送中心编号 | 坐标                     | 供应能力/吨 |
|--------|------------------------|--------|
| S1     | (23.194 25,113.554 09) | 350    |

已知需求点为分布在珠三角地区的各大商超,包括大润发、沃尔玛、家乐福等共56个大卖场,本文仅列出其中的部分门店数据.表4为部分零售门店的具体的坐标分布.

表4 零售门店坐标(部分)

| 门店 | 坐标(纬度,经度)               | 门店 | 坐标(纬度,经度)               |
|----|-------------------------|----|-------------------------|
| 1  | (22.834 75, 113.269 31) | 24 | (22.999 28, 113.738 48) |
| 2  | (23.011 26, 113.107 73) | ∴  | ∴                       |
| 3  | (22.822 05, 113.256 46) | 54 | (22.578 78, 113.894 78) |
| ∴  | ∴                       | 55 | (22.611 58, 114.137 49) |
| 22 | (23.015 34, 113.744 93) | 56 | (22.724 89, 114.248 64) |

由于上述地址左边均为经纬度,在计算两地距离时,本文以欧氏距离为使用距离,令*i*点的经度为 $lat_i$ ,纬度为 $lng_i$ , $R$ 取地球平均半径(6371.004 km),则两地的距离 $d_{ij}$ 的计算公式如下:

$$d_{ij} = 2R \sin^{-1} \left( \sin^2 \left( \frac{\pi}{180} \Delta lat_{ij} \right) + \cos \left( \frac{\pi}{180} lat_i \right) \cos \left( \frac{\pi}{180} lat_j \right) \sin^2 \left( \frac{\pi}{180} \Delta lng_{ij} \right) \right)^{1/2}, \quad (26)$$

$$\Delta lat_i = \frac{lat_i - lat_j}{2}, \quad (27)$$

$$\Delta lng_i = \frac{lng_i - lng_j}{2}. \quad (28)$$

由式(26)可分别求得供应商*i*与备选配送中心*j*间的距离 $d_{ij}$ 和各备选配送中心*j*与各需求点*k*间的距离 $d_{jk}$ .同时假设货物的运输方式均采用公路运输,依据国内大型物流配送企业的运费标准,可假设单位距离运费为0.01/(元/(kg·km)),可得配送距离及单位重量运费如表5和表6所示.已知各零售的需求服从正态分布 $N(\mu_k, \sigma_k^2)$ ,表7为置信水平为0.9时的需求量.

表5 供应商与配送中心距离及单位运费表

| 编号 | D1 | D2   | D3   | D4   | D5   |      |
|----|----|------|------|------|------|------|
| S1 | 距离 | 75   | 96   | 59   | 73   | 45   |
|    | 运费 | 0.75 | 0.96 | 0.59 | 0.73 | 0.45 |

表6 配送中心与需求点距离及单位运费表(部分)

| 编号 | D1 |      | D2  |      | D3  |      | D4  |      | D5 |      |
|----|----|------|-----|------|-----|------|-----|------|----|------|
|    | 距离 | 费用   | 距离  | 费用   | 距离  | 费用   | 距离  | 费用   | 距离 | 费用   |
| 1  | 33 | 0.33 | 129 | 1.29 | 30  | 0.3  | 79  | 0.79 | 76 | 0.76 |
| 2  | 57 | 0.57 | 142 | 1.42 | 9   | 0.09 | 100 | 1    | 89 | 0.89 |
| 3  | 31 | 0.31 | 130 | 1.3  | 30  | 0.3  | 80  | 0.8  | 78 | 0.78 |
| ∴  | ∴  | ∴    | ∴   | ∴    | ∴   | ∴    | ∴   | ∴    | ∴  | ∴    |
| 22 | 66 | 0.66 | 77  | 0.77 | 73  | 0.73 | 45  | 0.45 | 24 | 0.24 |
| 23 | 70 | 0.7  | 74  | 0.74 | 76  | 0.76 | 46  | 0.46 | 21 | 0.21 |
| 24 | 65 | 0.65 | 78  | 0.78 | 73  | 0.73 | 44  | 0.44 | 25 | 0.25 |
| ∴  | ∴  | ∴    | ∴   | ∴    | ∴   | ∴    | ∴   | ∴    | ∴  | ∴    |
| 54 | 57 | 0.57 | 86  | 0.86 | 100 | 1    | 19  | 0.19 | 54 | 0.54 |
| 55 | 82 | 0.82 | 67  | 0.67 | 121 | 1.21 | 15  | 0.15 | 52 | 0.52 |
| 56 | 95 | 0.95 | 51  | 0.51 | 128 | 1.28 | 23  | 0.23 | 47 | 0.47 |

表7 零售门店需求均值、标准差、 $\alpha = 0.9$ 下的需求量(部分)

| 需求点 | 均值/吨 | 标准差 | $\alpha = 0.9$ 下需求量/吨 |
|-----|------|-----|-----------------------|
| 1   | 2.9  | 0.8 | 3.93                  |
| 2   | 2.4  | 0.5 | 3.04                  |
| 3   | 2.6  | 0.6 | 3.37                  |
| ∴   | ∴    | ∴   | ∴                     |
| 22  | 3.6  | 0.5 | 4.24                  |
| 23  | 3.6  | 0.3 | 3.98                  |
| 24  | 2.7  | 0.3 | 3.08                  |
| ∴   | ∴    | ∴   | ∴                     |
| 54  | 3.2  | 0.1 | 3.33                  |
| 55  | 2.4  | 0.3 | 2.78                  |
| 56  | 2.3  | 0.5 | 2.94                  |

已知各零售商对于商品到货的期望时间,如表8所示.

表8 零售门店期望时间表(部分)

| 需求点 | 期望时间 | 需求点 | 期望时间 | 需求点 | 期望时间 |
|-----|------|-----|------|-----|------|
| 1   | 5.2  | 22  | 6.6  | 54  | 4.8  |
| 2   | 6    | 23  | 4.8  | 55  | 6.1  |
| 3   | 6.3  | 24  | 5.7  | 56  | 6.2  |
| ∴   | ∴    | ∴   | ∴    |     |      |

对于配送中心的能量消耗和碳排放的测量主要依据的是配送中心的面积、燃油及电量的消耗.因为实际情况下仓库的照明、制冷制热、机械设备等消耗

的绝大部分为电能损耗,配送中心又多以电动叉车为主,因此实际燃油消耗量很小. 综上可得配送中心能耗和碳排放量数据,如表9所示.

表9 备选配送中心相关数据

| 配送中心编号 | 电能消耗/(kw·h) | 燃油消耗/kg | 单位碳排放量/kg |
|--------|-------------|---------|-----------|
| D1     | 1320        | 12      | 0.15      |
| D2     | 1002        | 9       | 0.1       |
| D3     | 1508        | 14      | 0.25      |
| D4     | 1862        | 18      | 0.3       |
| D5     | 1623        | 16      | 0.2       |

本文碳税价格依据澳大利亚政府于2012年7月1日起实施的碳税法案中的征收标准: 每吨碳排放征收23澳元,折合人民币约每千克CO<sub>2</sub>征收0.11425元,假设我国碳税价格为每千克CO<sub>2</sub>0.2元.

同时表1以及查阅资料可得其他各相关常量取值,如表10所示.

表10 相关常量取值

| 常量          | 数值     | 单位                      |
|-------------|--------|-------------------------|
| $\delta_1$  | 0.8959 | t·CO <sub>2</sub> /MWh  |
| $\delta_2$  | 42652  | kJ/kg                   |
| $\delta_3$  | 20.2   | t·C/TJ                  |
| $\delta_4$  | 0.98   |                         |
| $\gamma$    | 3.0959 | kg·CO <sub>2</sub> /kg  |
| $\lambda$   | 0.2    | ¥/(kg·CO <sub>2</sub> ) |
| $\rho$ (柴油) | 0.85   | g/ml                    |
| $\omega$    | 0.5    |                         |

依据表9和表10中数据,由式(9)可知各备选配送中心的固定碳排放量分别为

$$W_1 = 1219.74 \text{ kg}, W_2 = 925.56 \text{ kg},$$

$$W_3 = 1394.36 \text{ kg}, W_4 = 1723.89 \text{ kg},$$

$$W_5 = 1503.58 \text{ kg}.$$

本案例所使用的车辆为单一车型A,参考文献[11]中的相关研究以及网上资料,得到车型的相关参数数值如表11所示.

表11 A型开车相关参数

| 变量         | 含义   | 车型A       |
|------------|--|-----------|
| $\alpha$   | 车辆空转燃油消耗率/(mL/s)                           | 0.527     |
| $\beta_1$  | 发动机能源效率系数/(mL/kJ)                          | 0.08      |
| $\beta_2$  | 加速过程造成的能耗的效率系数/(mL/(kJ·m/s <sup>2</sup> )) | 0.02~0.03 |
| $M_0$      | 车辆自重/kg                                    | 8000      |
| $M_{\max}$ | 最大载重/kg                                    | 25000     |
| $b_1$      | 滚动摩擦的阻力/kN                                 | 0.698     |
| $b_2$      | 滚动气动力(kN/m/s <sup>2</sup> )                | 0.00358   |
| $G$        | 坡度(下坡时取负值)                                 | 0.1       |

通过查阅近年来珠三角地区年均车速等相关数据,假设车辆为柴油货车,行驶过程中保持匀速

行驶,取车辆行驶速度 $v$ 为40km/h,将该车型数据代入式(4)可分别求得满载下单位距离的油耗量 $\rho_{\max} = 0.14 \text{ kg/km}$ ,空载下单位距离油耗量为 $\rho_0 = 0.12 \text{ kg/km}$ .

### 4.2 结果分析

取 $\alpha$ 为0.9,运用LINGO软件求解,得到如下结果: 总成本为4260.555千元,其中 $Z(D1) = 1, Z(D2) = 0, Z(D3) = 0, Z(D4) = 0, Z(D5) = 1$ . 这表明应选择备选配送中心中的D1和D5这两个地址建立配送中心才能使得总成本最小.

表12 选址各类成本说明表

| 各类成本           | 说明                | 费用/千元       |
|----------------|-------------------|-------------|
| cost 1         | 选址决策中的固定成本        | 3800        |
| cost 2         | 供应商运输到所选配送中心的运输成本 | 159.897     |
| cost 3         | 配送中心处理总货物量的流转成本   | 9388.317    |
| cost 4         | 配送中心到配送的门店的总配送成本  | 109.0292    |
| cost 5         | 配送中心的固定碳排放成本      | 2.72332     |
| cost 6         | 配送中心处理货物的碳排放成本    | 4.152402    |
| cost 7+cost 8  | 供应商到配送中心运输的碳排放成本  | 8.924112402 |
| cost 9+cost 10 | 配送中心到所有门店运输的碳排放成本 | 166.4410007 |

由表12中的结果来看,总成本中物流成本TC1为cost 1到cost 4之和,共计4078.31千元,碳排放成本为cost 5到cost 10之和,共计182.24千元. 同时可得供应商与配送中心之间的送货关系及各零售商与配送中心之间的关系,如表13和表14所示.

表13 供应商与配送中心供货量表

| 编号 | D1    | D2 | D3 | D4 | D5     | 总量     |
|----|-------|----|----|----|--------|--------|
| S1 | 117.4 | 0  | 0  | 0  | 159.66 | 277.06 |

表14 (部分)各配送中心向零售商送货量表

| 需求点 | D1    | D2 | D3 | D4 | D5     | 需求量    |
|-----|-------|----|----|----|--------|--------|
| 1   | 6.04  | 0  | 0  | 0  | 0      | 6.04   |
| 2   | 3.92  | 0  | 0  | 0  | 0      | 3.92   |
| 3   | 4.62  | 0  | 0  | 0  | 0      | 4.62   |
| ⋮   | ⋮     | ⋮  | ⋮  | ⋮  | ⋮      | ⋮      |
| 22  | 0     | 0  | 0  | 0  | 5.72   | 5.72   |
| 23  | 0     | 0  | 0  | 0  | 4.8    | 4.8    |
| 24  | 0     | 0  | 0  | 0  | 3.63   | 3.63   |
| ⋮   | ⋮     | ⋮  | ⋮  | ⋮  | ⋮      | ⋮      |
| 54  | 0     | 0  | 0  | 0  | 3.53   | 3.53   |
| 55  | 0     | 0  | 0  | 0  | 3.24   | 3.24   |
| 56  | 0     | 0  | 0  | 0  | 3.77   | 3.77   |
| 总计  | 117.4 | 0  | 0  | 0  | 159.66 | 277.06 |

从上述结果可以看出,5个备选的配送中心选取了D1和D5两个配送中心进行商品的配送,同时基于当置信水平为0.9时需满足每个零售门店的需求为前提,由式(15)得出的需求量如表14所示. 整个物

流配送网络起始由位于广州经济开发区的工厂,然后分别将117.4t商品运输到位于中山的D1配送中心,159.66t商品运输到位于东莞的D5配送中心.同时从表14可以看到,位于中山的D1配送中心主要对中山和佛山两市的大商超进行配送,另外还有零星几家深圳的商超进行配送;位于东莞的D5配送中心主要对东莞、惠州、深圳等三市的大商超进行配送.

为了证明算法的有效性,以遗传算法作为对照算法进行同样条件下的最优选址求解,在Matlab R2014a环境下运行程序,得到如图1所示的结果.

```

>> bestindividual
Bestindividual =
Columns 1 through 10
1.0000    0    1.0000    0    0    44.1844    0    58.8187    0    0
Columns 11 through 20
0.5956    0.6446    1.3171    1.3942    1.3985    0.1071    0.7427    0.2061    1.6163    0.2806
Columns 21 through 30
1.0513    0.7557    1.3905    1.3696    0.0610    0.0170    0.2268    0.4352    0.1441    0.8786
Columns 31 through 40
1.5228    0.3174    0.5775    0.1959    0.9219    1.3465    0.7035    1.5685    1.3353    0.3949
Columns 41 through 50
0.3105    0.3622    1.5455    1.6377    0.1992    0.3560    0.3523    0.7296    1.4076    1.6536
Columns 51 through 60
0.4113    1.2848    0.0605    0.5651    0.5249    1.5078    0.6462    1.5451    1.3127    0.9912
Columns 61 through 70
0.3755    0.1205    0.7690    0.3132    1.1002    1.5869    0    0    0    0
  
```

图1 遗传算法运行结果(部分)

图1中,Columns 1 through 10中前5个数字表示5个备选中心是否建设,1表示建设,0表示不建设;第6到第10个数字表示供应商向配送中心的供货量;Columns 11 through 70表示配送中心与客户点之间的配送量.

对比两种算法的结果,如表15所示.

表15 算法结果对比

| 备选地  | D1 | D2 | D3 | D4 | D5 | 总费用/千元   | 运行时间/s |
|------|----|----|----|----|----|----------|--------|
| 本文算法 | 1  | 0  | 0  | 0  | 1  | 4260.555 | 120    |
| 遗传算法 | 1  | 0  | 1  | 0  | 0  | 4522.8   | 149.8  |

由表15可知,本文算法计算出来的总费用相对少一些,并且计算时间也比较短,这是因为智能算法大多适合在数据量较大的场景下的选址模型的求解,在数据量较小的情况下,这些智能优化算法并不十分适用.而本文算法可以快速地得到较好解,由此可知,本文设计的算法是有效的.

### 4.3 灵敏度分析

在上文的案例求解中,假设置信水平 $\alpha$ 为0.9,而为了得到进一步的结论,现依次计算置信水平 $\alpha$ 从0.05到0.95,以0.05累加递增时各置信水平下的各成本,通过本文算法计算各自置信水平下满足各自需求情况时的最优解,观察其变化,可得到如图2所示变化曲线.

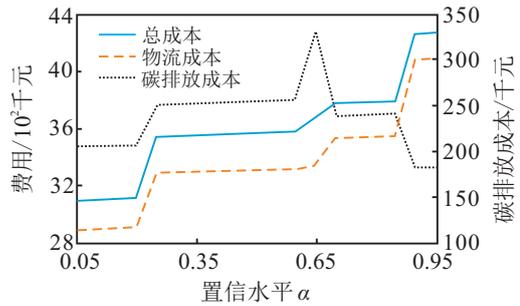


图2 成本变化分析

通过分析可知,总成本和物流成本的变化趋势基本保持一致,说明物流成本总体占比相对较高,碳排放成本的总体占比则相对较小.因此,对于企业在做选址决策时,从整体成本角度上来看选择在哪建立配送中心以及建立几个配送中心至关重要.

此外,由图2可以看出,在置信水平不断上升过程中,企业投入的成本也在逐渐的变大.这是因为置信水平实质上代表着企业的运输配送量可以满足多少比例的零售端需求量,当处于需求不确定的情况时,企业要想尽可能地满足零售端的所有需求,他所要付出的成本也应该越来越大.同时,可以通过调整标准差 $\sigma$ 进一步分析对成本的影响.当需求量的标准差变化时,实际需求量会发生变化,标准差经常用来评估不确定因素的影响程度,标准差越大往往不确定性越大.对此,将表7中各个零售门店的标准差 $\sigma$ 均增加0.2,可得到如图3所示结果.

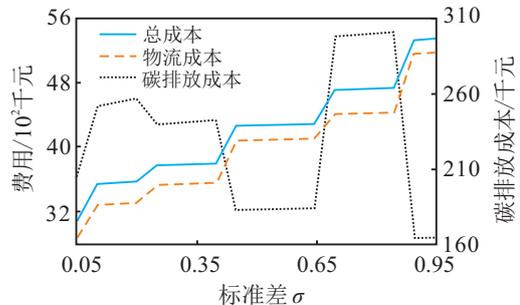


图3  $\sigma$ 变化时各成本变化趋势

由图3可以看出,由于各零售门店需求标准差 $\sigma$ 的变化,总成本和物流成本仍随着置信水平的增大而递增,反映出随着标准差 $\sigma$ 的变化,整体成本递增趋势未发生改变,但可以看到碳排放成本发生了较大波动,且上下浮动比例较大,说明碳排放成本随标准差 $\sigma$ 变化波动明显.

## 5 结论

本文以包含碳排放成本在内的总成本最低为决策目标构建物流配送中心选址模型.在构建模型的过程中,充分考虑了在配送网络中与配送中心选址决策相关的各环节的碳排放,避免造成结果误差.同时,

本文基于随机规划理论考虑了现实问题中的不确定因素,将随机需求等价转化成选址模型中的一项随机约束,减小了需求不确定对选址结果造成的影响.最后通过一个企业的实际算例验证了模型的有效性,并通过灵敏度分析得到一系列结论.从研究的结果发现,碳排放因素和需求不确定因素会影响企业选址决策,企业的选址决策同样会影响整个物流网络中的碳排放成本.

本文的研究仍然存在一些局限性,这是因为低碳物流配送中心选址问题是一项复杂的系统工程,本文的研究仅考虑了需求不确定的问题,而实际情况当中,预算限制、交通限制、周边人力资源限制等因素都影响着低碳物流配送中心的选址,这些都有待在以后的工作中不断摸索.

#### 参考文献(References)

- [1] Xiao Y, Zhao Q, Kaku I, et al. Development of a fuel consumption optimization model for the capacitated vehicle routing problem[J]. *Computers & Operations Research*, 2012, 39(7): 1419-1431.
- [2] 葛显龙, 苗国庆, 谭柏川. 开放式污染路径问题优化建模与算法研究[J]. *工业工程与管理*, 2015, 20(4): 46-53.  
(Ge X L, Miao G Q, Tan B C. Research on optimization modeling and algorithm for open pollution routing problem[J]. *Industrial Engineering and Management*, 2015, 20(4): 46-53.)
- [3] Guo J, Wang X, Fan S, et al. Forward and reverse logistics network and route planning under the environment of low-carbon emissions: A case study of Shanghai fresh food E-commerce enterprises[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2017, 106: 351-360.
- [4] Tarek Abdallah, Ali Farhat, Ali Diabat, et al. Green supply chains with carbon trading and environmental sourcing: Formulation and life cycle assessment[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2012, 36(9): 4271-4285.
- [5] Zakeri A, Dehghanian F, Fahimnia B, et al. Carbon pricing versus emissions trading: A supply chain planning perspective[J]. *International Journal of Production Economics*, 2015, 164: 197-205.
- [6] Martí J M C, Tancrez J S, Seifert R W. Carbon footprint and responsiveness trade-offs in supply chain network design[J]. *International Journal of Production Economics*, 2015, 166: 129-142.
- [7] Jena Sanjay Dominik, Cordeau Jean-Francois, Gendron Bernard. Dynamic facility location with generalized modular capacities[J]. *Transportation Science*, 2015, 49(3): 484-499.
- [8] Albareda-Sambola M, Fernández E, Saldanha-Da-Gama F. The facility location problem with Bernoulli demands[J]. *Omega*, 2011, 39(3): 335-345.
- [9] Milena Bieniek. A note on the facility location problem with stochastic demands[J]. *Omega: The International Journal of Management Science*, 2015, 55: 53-60.
- [10] 彭春, 李金林, 冉伦, 等. 基于两个不确定参数乘积的鲁棒设施选址模型[J]. *系统工程理论与实践*, 2017, 37(12): 3170-3181.  
(Peng C, Li J L, Ran L, et al. Robust facility location model with two multiplicative uncertainties[J]. *Systems Engineering — Theory & Practice*, 2017, 37(12): 3170-3181.)
- [11] Xiao Yiyong, Zhao Qihong, Kou Kaku, et al. Development of a fuel consumption optimization model for the capacitated vehicle routing problem[J]. *Computers & Operations Research*, 2012, 39(7): 1419-1431.
- [12] Bowyer D P, Akcelik R, Biggs D C. Fuel consumption analyses for urban traffic management[J]. *Institute of Transportation Engineers*, 1986, 56(12): 31-34.
- [13] 刘宝碇, 赵瑞清. 随机规划与模糊规划[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998.  
(Liu B D, Zhao R Q. *Stochastic programming and fuzzy programming*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1998.)

#### 作者简介

林殿盛(1977—), 男, 博士生, 从事供应链管理、城市配送的研究, E-mail: 309938220@qq.com;

张智勇(1970—), 男, 教授、博士生导师, 从事供应链管理、决策理论等研究, E-mail: zhyzhang@scut.edu.cn;

王佳欣(1994—), 女, 硕士生, 从事物流与供应链管理的研究, E-mail: 1297826096@qq.com;

梁希(1990—), 男, 硕士生, 从事供应链管理、城市配送的研究, E-mail: liangxisde@163.com;

石永强(1975—), 男, 副教授, 从事港口管理、物流金融、物流优化等研究, E-mail: yqshi@scut.edu.cn.

(责任编辑: 孙艺红)