

考虑碳排放的冷链物流配送中心选址及路径优化研究

宁梦霞, 陈虎杰

上海理工大学管理学院, 上海

收稿日期: 2024年12月20日; 录用日期: 2025年1月13日; 发布日期: 2025年1月17日

摘要

近年来, 为提高企业的服务质量, 提高客户满意度, 我国冷链物流公司已进行相应的改进, 以提高企业的经济效益, 但也加大了CO₂的排放。因此, 本文针对碳排放的冷链物流配送中心选址及车辆路径的协调优化问题, 提出一系列可行的解决办法, 以促进企业的低碳转型。本文首先对协同优化问题进行了研究, 对其能耗和影响因子进行了分析, 并提出了相应的计算公式。以碳税为基础, 将物流配送中心的建设与运营成本、车辆固定成本等因素综合考虑, 构建了协同优化模型, 提出了解决方案。在此基础上, 利用计算机Matlab软件实现了两阶段遗传算法的求解。以芜湖市A公司为例, 分别对有无碳排放成本的两种协同优化方法进行了研究。结果表明, 提高碳税税率后, 通过对两种方案比较, 发现考虑碳排放成本的协同优化方案在总体费用和总排放量方面都是最小的, 从而验证了该方案的可行性。

关键词

低碳, 冷链, 配送中心选址, 路径优化

Research on Optimization of Location and Route for Cold Chain Logistics Distribution Center Considering Carbon Emission

Mengxia Ning, Hujie Chen

Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Dec. 20th, 2024; accepted: Jan. 13th, 2025; published: Jan. 17th, 2025

Abstract

In recent years, in order to improve the service quality of enterprises and improve customer

文章引用: 宁梦霞, 陈虎杰. 考虑碳排放的冷链物流配送中心选址及路径优化研究[J]. 建模与仿真, 2025, 14(1): 690-702. DOI: 10.12677/mos.2025.141065

satisfaction, China's cold chain logistics companies have made corresponding improvements to improve the economic benefits of enterprises, but also increase CO₂ emissions. Therefore, this paper proposes a series of feasible solutions for the coordination and optimization of the location and transportation path of the cold chain logistics distribution center with carbon emissions, so as to promote the low-carbon transformation of enterprises. This paper initially investigates the collaborative optimization problem, analyzing its energy consumption and influencing factors, and proposes corresponding computational formulas. Based on carbon tax, a collaborative optimization model is constructed by comprehensively considering factors such as the construction and operational costs of logistics distribution centers, and the fixed costs of vehicles, along with their proposed solutions. Subsequently, a two-stage genetic algorithm is implemented using Matlab software for solution seeking. Taking Company A in Wuhu City as an example, the paper studies two collaborative optimization methods, one with and one without considering carbon emission costs. Results indicate that after increasing the carbon tax rate, comparison of the two schemes reveals that the collaborative optimization scheme considering carbon emission costs results in the lowest overall costs and total emissions, thereby verifying the feasibility of this approach.

Keywords

Low Carbon, Cold Chain, Location of Distribution Center, Path Optimization

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着全球性气候事件爆发频率的逐年递增,世界各国愈加关注环境问题。我国始终致力于完成自己的“双碳”计划,并已经对企业征收碳税等相关费用,这些措施都在提醒着我们要更加重视低碳问题。因此,将碳排放考虑到冷链物流配送中心选址及路径协调优化中来具有一定的现实意义,并能在理论上证明此方案的可行性。

Panda [1]等探讨了在冷藏商品到达时间和需要时间不相同情况下食品冷链运输和易腐物品的库存模型,利用最小化不同时期的设备运营成本并制定最优预测的补给政策,该模式实现的灵敏度研究提供了一个解决该难题的方法。Montanari [2]指出大多数的易腐食品和他们的保质期都可以极大地受温度变化影响。针对冷链产业的迅速流行,快速和合理地跟踪和管理工作过程也是必须研究的一个重要问题点。其通过研究给出了结构化框架以制定最合适的企业管理方案,以便使物流成本最小。Uysal 和 Tosun [3]通过充分考虑运行成本和费用等社会经济因素,并均衡仓储对附近区域所造成的自然和社会经济影响,在仓库选择可连续的前提下,通过灰色方式做出了优选。确定了供应链中仓库选址主要标准,构建了选址的层次结构,为可持续发展研究建立了一个更全面的供应链管理模型。

毋庆刚[4]重新定义了中国冷链物流的定义和特征,并认为冷链物流除了受国际贸易影响之外,还受中国经济体制的影响。并建议逐步实行冷链物流的封闭式经营,建立完善的冷链货运配送体系,以促进我国冷链物流持续、快速、健康发展。孙春华[5]首先阐述了中国生鲜农产品冷链物流的基本含义,以及目前中国农产品冷链物流的发展现状,并依据制约了中国冷藏食品运输发展的多重影响原因,有针对性地提出了发展冷链物流的对策。方凯[6]等人建立了基于绿色供应链管理的中国冷链物流企业绩效评价系统,并采用了三个阶段的DEA模式评估了冷链物流企业绩效,结果显示,制约中国冷链物流公司发展的最主要因素是没有较高的规模效益。雷国[7]认为目前我国冷链物流的整体发展水平和发达国家相比差

异较大, 且冷链物流发展水平仍落后于中国经济社会发展, 因此根据目前我国的冷链物流发展状况, 从宏观和微观角度给出了合理化的建议。

冷链物流配送过程中, 能源消耗和排放的废气会生成大量的二氧化碳, 从而加重了对环境的污染。鉴于此, 学术界不断加强了对有关问题的深入研究。

Rizet [8]等人提供了一个测算供应链中二氧化碳排放量的有效办法, 对在欧盟某三个成员国冷链运输中产生的碳排放量和能源消耗做出了合理的衡量与评估。刘倩晨[9]对冷冻食品配送业务进行研究与数据分析, 形成了考虑碳排放量的冷链库存模型, 经过计算, 得出低碳下冷冻商品配送的最优仓储策略, 并比较了考虑碳排放量成本前后的相对变动, 研究了供应量各个环节的最优方案的差异。田丽娜[10]首次测算了新疆葡萄冷链运输的碳足迹, 并进而利用单级供应链利润模式对冷链运输体系展开了深入研究与解析。最终发现将碳排放加入考虑因素中去既利于企业发展又利于环保。潘茜茜[11]等针对中国当今生态恶化问题日益加剧的现实现状, 提出了综合考量运输成本、货损成本和碳排放量等成本的冷链食品物流及配送的选址方法。结果显示, 考虑碳成本的冷链配送中心选址可减少社会总成本, 并促进了社会对公共资源的优化配置。

实际上, 冷链物流的相关研究是在普通物流问题研究的基础上发展起来的。国内外学者对选址及路径优化问题有了较为详细的研究。因此, 冷链物流的协同优化问题可以借鉴相关物流的研究方法和求解方法, 只是冷链物流的问题更加多元化和复杂化。

Siddhartha [12]将相关成本考虑到物流配送和运输成本中, 使选址及路径优化问题得到了极大的拓展。最终选择了基于拉格朗日的启发式算法和仿真退火算法, 对问题进行了深入的探讨。Montanari [2]为了确保冷冻食品得以最迅速、正确的到达, 他首次应用了欧拉算法和拉格朗日方式求解了物流中心的选择和路径优化模型, 并通过具体案例论证了该办法的切实可行。陈红丽[13]为了控制冷链配送成本, 优化3级冷链物流网络节点空间布局, 提出了一种基于需求存在模糊随机性的选址-路径-库存多目标优化模型。

2. 相关理论概述

2.1. 影响因素

初步拟定备选物流中心的自然条件、设施条件、运营条件等因素, 仅考虑物流成本、服务水平和环境。因此, 在物流成本、服务水平和环境保护等因素的作用下, 物流配送中心的选址和运输路线的选择会产生较大的影响。

2.1.1. 物流成本

物流成本主要包括建筑成本花费、营业成本花费、固定资产管理花费以及车辆耗费。物流公司寻求收益最大化是其基本的目标, 但公司收益大部分源自营收与成本费用之间的差值, 对现代冷链物流而言, 控制企业成本费用是主要收益源泉, 所以物流成本是公司重要考量因素。

2.1.2. 客户服务的水平

冷链物流相关业务水平的高低表现在配送准时性、货损率以及能否满足随机性需求。售后服务水平高的企业一般能够准时交货、最小化商品损坏率, 并符合顾客随机性要求。在本文中, 主要采用配送的准时性来判断服务水平。

2.1.3. 环境因素

近年来国家政策中关于环保的要求逐渐变高, 并且针对物流行业也出台了节能减排的政策, 而冷链物流公司也会因为其巨大能耗这一特性而导致环境污染, 以上种种就促使冷链物流公司必须更加关注环

境保护。考虑到物流配送中心经营和物流服务对环保的影响都很大, 所以必须在冷链物流配送服务中心选择和路线优化过程中充分考虑其影响。本文通过对碳成本进行考量来反映企业的环保意识。

分析可知, 影响成本的各种因素间也存在着效益背反关系, 并且不能被忽略。如果只考虑其中的一个原因, 虽然能产生一些利益, 但由于其所带来的综合经济损失过大, 会造成整体效益的降低, 所以需要进行综合考虑。

2.2. 能耗分析与碳排放量计算

2.2.1. 能耗分析

物流配送中心运作过程中的能耗主要与企业各项生产经营活动相关, 具体能源消耗与类型如表 1 所示。

Table 1. Energy consumption and types of consumption in distribution centers

表 1. 配送中心能源消耗及消耗类型

能源消耗活动	能源消耗类型
信息处理	电能
装卸搬运	电能、柴油、汽油
分拣	电能
流通加工及包装	电能
储存	电能

2.2. 碳排放计算

为减少研究的复杂程度, 仅考察了货物处理对能耗的影响。因此, 如果假定物流配送中心的耗能仅和物流配送方案中所处理的货物数量有关, 那么物流配送中心的消耗量就将随着所处理货数量的增多而提高, 并且在物流配送中的能源与处理量之间又有一种非线性关系, 即当处理的货数达到了某个值时, 消耗量就会迅速增加, 而在超过了一定量之后, 耗能就又将随着处理量的增多而以较慢速度提高。电能、汽油和柴油等的功率方程式如下:

$$E_1 = \sum_{i \in D} h'_1 (T_i u_i)^w z_i \quad (1)$$

$$E_2 = \sum_{i \in D} h'_2 (T_i u_i)^w z_i \quad (2)$$

$$E_3 = \sum_{i \in D} h'_3 (T_i u_i)^w z_i \quad (3)$$

上式中, E_1 、 E_2 、 E_3 代表各物流配送中心电能、汽油和柴油的消耗总和; h'_1 、 h'_2 、 h'_3 分别表示为单位货物消耗的能源; u_i 代表为每天经过物流配送中心 i 中转的货物数量; T_i 代表配送中心 i 订货周期; w 是位于 0-1 之间的常量, 代表规模指数; z_i 为 0, 1 变量, $z_i = 0$ 表示不在 i 处建立配送中心, 反之 $z_i = 1$ 。碳排放总量可以通过能源消耗量与碳排放系数相乘得出, 具体如下:

$$em_{op} = E_1 \gamma_1 + E_2 \gamma_2 + E_3 \gamma_3 \quad (4)$$

根据式(1)~(3)可得:

$$\begin{aligned} em_{op} &= (h'_1 \gamma_1 + h'_2 \gamma_2 + h'_3 \gamma_3) \sum_{i \in D} (T_i u_i)^w z_i \\ &= \lambda \sum_{i \in D} (T_i u_i)^w z_i \end{aligned} \quad (5)$$

上式中, em_{op} 表示配送中心碳排放总量; γ_1 、 γ_2 、 γ_3 分别表示电、汽油和柴油的碳排放系数;

$\gamma = h'_1\gamma_1 + h'_2\gamma_2 + h'_3\gamma_3$ 代表物流中心处理单位商品的平均碳排放量。

(3) 车辆的碳排放计算

车辆的能源消耗主要和技术、车载、转速、行驶距离、交通、路况、气候, 和司机动作以及维持的制冷环境等因素有关。因为交通条件、路况、气候和驾驶方式等较为多变, 故为简化研究则忽略这些因素。本文假设车辆在运输过程中匀速前行, 根据能量守恒定律可知各种类型车辆的燃料消耗量:

$$E_5 = \sum_{i \in D} \sum_{j \in S} \left[\frac{T_i u_i}{Q_1} \right] (p_1^* + p_1^0) y_{ij} d_{ij} + \sum_{i \in D} \sum_{j \in S} \left[2p_1^0 + \frac{p_1^* - p_1^0}{Q_1} \left(T_i u_i - \left\lfloor \frac{T_i u_i}{Q_1} \right\rfloor Q_1 \right) \right] y_{ij} d_{ij} \quad (6)$$

$$E_6 = T_i \sum_{i \in G} \sum_{j \in G} \sum_{k \in M} \left(p_2^0 + \frac{p_2^* - p_2^0}{Q_2} q_{ijk} \right) d_{ij} x_{ijk} \quad (7)$$

上式中 E_5 、 E_6 分别代表运输车辆和配送车辆的油耗总和; E_7 代表保证良好制冷条件所消耗的燃料总和; T_i 代表订货周期; u_i 代表配送中心 i 中转产品数; Q_1 代表运输车所能装载的最大重量; p_1^* 代表运输车装满货物时的单位距离能源消耗; p_1^0 代表运输车不载货时单位距离能源消耗; d_{ij} 代表 i 到 j 之间的路程; y_{ij} 代表决策变量, $y_{ij} = 0$ 代表物流配送中心 i 不受供应商 j 供应商品, 否则 $y_{ij} = 1$; p_2^* 代表配送车装满货物时单位距离能源消耗; p_2^0 代表配送车不载货物时的单位距离能源消耗; x_{ijk} 是 0, 1 变量, $x_{ijk} = 1$ 表示配送车辆 k 从节点 i 行驶到节点 j , 否则 $x_{ijk} = 0$ 。故碳排放总量 em_{tr} 测算如下:

$$em_{tr} = (E_5 + E_6 + E_7) \gamma_3 \quad (8)$$

3. 冷链物流配送中心选址及车辆路径优化模型

3.1. 问题描述

本文所要解决的问题可以描述为: 在一个特定的地区, 由一家第三方物流公司为顾客和供应商提供有关的专业服务。其将顾客从供货商所购买的货物运输至物流配送中心进行暂存, 然后物流配送中心按照顾客的需求量对顾客实施多频次、小批量的物流配送。考虑车型限重和顾客需求量的条件下, 综合考量时间惩罚成本、碳排放量的相关成本、车辆货物运输费用、车辆固定成本和物流配送中心的建造和运营成本, 以寻找上述总成本最低的最优研究方法。

3.2. 模型构建

3.2.1. 模型假设

为了能够对抽象问题构建模型, 先做出如下假设:

- (1) 供应商可以满足所有顾客的需求;
- (2) 所有备选配送中心的容量都无限制;
- (3) 供应商、顾客需求地点和备选物流中心的地点都是已知的;
- (4) 每个顾客的需求量和时间窗均为可知的, 且供应商并无时间窗限定;
- (5) 车辆行驶路径已确定, 且每辆车仅服务一位顾客, 完成任务后返回出发点;
- (6) 在暂定物流时间或配送过程中无特殊状况发生, 整车保持匀速行驶;
- (7) 每次提供配送业务的顾客需求点为预先设定的, 不能在中途服务其他新顾客。

3.2.2. 目标函数分析

本文同时兼顾了公司利润和环保因素, 并希望寻找经济收益和环保效益同时最优的方法。因此所建

立的模型并不是碳排放总成本最低, 而是以综合成本最低为最终目的。具体成本如下:

(1) 配送中心建造及运作成本

物流配送中心建设成本费用 C_{dc} 和运营成本费用 C_{do} 可分别描述为:

$$C_{dc} = \sum_{i \in D} T_i u_i \left(\frac{f_i + \theta}{l} \right) z_i \quad (9)$$

式中 f_i 为物流中心 i 土地征用费; l 表示物流中心使用年限; θ 表示单位建筑规模所需要的建设费用和购置设备费; u_i 表示每日经由物流配送中心 i 中转的商品总量; T_i 表示物流配送中心 i 订货周期; z_i 为 0, 1 变量, $z_i = 0$ 表示未在 i 处设立物流配送中心, 否则 $z_i = 1$ 。

$$C_{do} = \sum_{i \in D} h(T_i u_i) z_i \quad (10)$$

(2) 车辆固定成本

计算公式如下:

$$C_v = \sum_{i \in D} c_1 \left(\frac{T_i u_i}{Q_1} \right) z_i + \sum_{i \in D} \sum_{j \in l} \sum_{k \in M} c_3 x_{ijk} \quad (11)$$

式中 C_v 为总固定成本, c_1 所述的是运输车辆在起步时所发生的固定费用; Q_1 表示运输车辆的最大载重量; c_3 表示配送车辆启动时产生的固定费用; x_{ijk} 为 0, 1 变量, $x_{ijk} = 1$ 表示配送车 k 由节点 i 运行至节点 j , 否则 $x_{ijk} = 0$ 。

(3) 碳排放成本

本文以碳税收政策为基础, 对其进行了测算。根据国际碳税规定, 通过将所测算出的碳排放量与实际碳税税率相乘, 得出公司所要支付的碳税, 也就是碳排放总量。它的计算公式是:

$$C_e = (em_{do} + em_t) c_5 \quad (12)$$

式中 C_e 表示碳排放总成本; em_{do} 表示配送中心碳排放总量; em_t 表示车辆碳排放总量; c_5 表示碳税税率。

(4) 运输成本

为了使模型更加简洁, 本文中假设汽车在均匀的车速下。由于在物流与配送流程中, 所使用的型号是不同的, 所以, 车辆的运输费用包含了从供货商到配送中心的和分拨中心到顾客的分拨费用。若用 C_t 代表车辆的运输费用, 则可以表达为:

$$C_t = \sum_{i \in D} \sum_{j \in S} c_2 \left(\frac{T_i u_i}{Q_1} \right) d_{ij} y_{ij} + \sum_{i \in G} \sum_{j \in G} \sum_{k \in M} c_4 d_{ij} x_{ijk} \quad (13)$$

式中 c_2 表示运输车辆的单位距离运输费用; y_{ij} 为 0, 1 变量, $y_{ij} = 1$ 表示配送中心 i 有供应商 j 供应货物, 否则 $y_{ij} = 0$; c_4 表示配送车辆的单位距离运输费用。

(5) 时间惩罚成本

考虑到顾客对商品的急迫, 或者顾客在某一时期内可以方便地收到商品, 顾客会给出一段时间期限, 也就是时间窗口, 在规定的时限之内, 如果不能及时送达, 就要付出相应的处罚费用, 惩罚费用随时间窗口的变化而变化。

硬时间窗是指顾客设定一定的时限, 在此期间, 配送车辆必须在一定时限内提供配送服务, 如果早到或晚到, 顾客就会拒绝接收, 从而导致车辆不能按时抵达, 造成更大的处罚费用, 具体如图 1 所示。

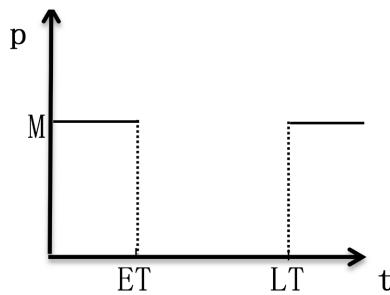


Figure 1. Costs associated with hard time windows
图 1. 硬时间窗相关成本

与硬时间窗不同, 软时间窗的处罚如图 2 所示。

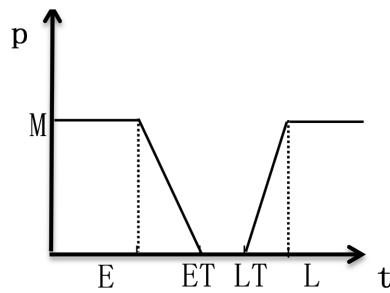


Figure 2. Costs associated with soft time windows
图 2. 软时间窗相关成本

$[ET, LT]$ 为最佳时间, $[E, L]$ 为能够顾客容忍的最大时间范围, 最佳时间内无相关费用, 但如果在 $[E, ET]$ 和 $[LT, L]$ 时间内抵达, 则按照超出的时效长短来计算惩罚费用, 而如果在 $[E, L]$ 之外抵达, 则将产生更大的惩罚费用, 如图 3 所示:

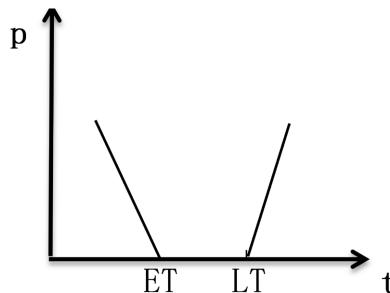


Figure3. Costs associated with mixed time windows
图 3. 混合时间窗相关成本

故本文定义了一个时间窗口的惩罚函数, 即:

$$C_p(AT_{ik}) = \begin{cases} c_6(ET_i - AT_{ik}), & AT_{ik} < ET_i \\ 0, & ET_i \leq AT_{ik} \leq LT_i \\ c_7(AT_{ik} - LT_i), & AT_{ik} > LT_i \end{cases} \quad (14)$$

则配送过程中产生的时间惩罚成本可以表示为:

$$C_p = T_i \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in M} c_6 \max(ET_i - AT_{ik}, 0) x_{ijk} + T_i \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in M} c_7 \max(AT_{ik} - LT_i, 0) x_{ijk} \quad (15)$$

式中 C_p 表示时间惩罚成本; c_6 表示早于最佳时间的单位成本; c_7 表示晚于最佳时间的单位成本; $[ET_i, LT_i]$ 表示最佳送达时间; AT_{ik} 表示车辆 k 抵达 i 的时间。

3.2.3. 模型建立

因此, 在考虑碳排放的情况下, 可以将配送中心位置和路线最优模型表达为:

$$\min Z = C_{do} + C_{dc} + C_f + C_e + C_p \quad (16)$$

s.t.

$$\sum_{j \in S} y_{ij} = 1, i \in D \quad (17)$$

$$\sum_{i \in G} \sum_{k \in M} x_{ijk} = 1, j \in I \quad (18)$$

$$\sum_{j \in G} \sum_{k \in M} x_{ijk} = 1, i \in I \quad (19)$$

$$x_{ijk} = 0; i \in D, j \in G, k \in M \quad (20)$$

$$\sum_{j \in G} x_{ijk} - \sum_{i \in G} x_{ijk} = 0, i \in G, k \in M \quad (21)$$

$$\sum_{j \in G} \sum_{k \in M} x_{ijk} = \sum_{i \in G} \sum_{k \in M} x_{ijk}, i \in D \quad (22)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} x_{ijk} \leq |N| - 1, 2 \leq |N| \leq |I| \quad (23)$$

$$u_i = \sum_{j \in G} \sum_{k \in M} q_{ijk} x_{ijk}, i \in D \quad (24)$$

$$\sum_{i \in D} \sum_{j \in G} \sum_{k \in M} q_{ijk} x_{ijk} = \sum_{j \in G} r_j \quad (25)$$

$$\sum_{i \in D} a_{ij} = 1, j \in I \quad (26)$$

$$a_{ij} = 0, a_{ii} = 1; i, j \in D \quad (27)$$

$$a_{ij} - a_{iu} \leq (1 - x_{ujk} - x_{uik}), i \in D; j, u \in G; k \in M \quad (28)$$

$$-(1 - x_{ujk} - x_{uik}) \leq a_{ij} - a_{iu}, i \in D; j, u \in G; k \in M \quad (29)$$

$$a_{ij} \geq x_{ijk}, i \in D, j \in I, k \in M \quad (30)$$

$$q_{ijk} = q_{juk} + r_j; i, j, u \in G; k \in M \quad (31)$$

$$q_{ijk} = 0, i \in I, j \in D, k \in M \quad (32)$$

$$q_{ijk} x_{ijk} \leq Q_2, i \in D, j \in G, k \in M \quad (33)$$

(16)是最优化目标函数; (17)确保只有一家供应商为各个配送中心供货; (18)、(19)确保仅对配送点服务一次; (20)确保不同配送中心之间无服务; (21)确保配送过程中车辆唯一; (22)是指从某个配送中心出发的车辆, 在完成工作后, 再回到配送中心; (23)消除了分配期间的环路; (24)是通过某个配送中心转运的商品的数量的大小; (25)表明每天经过物流配送中心的货物量等于顾客的总需求; (26)~(30)确保整个运输路线上的需求点仅存在一个配送中心(31)确保配送货物重量与需求量之间的关系; (32)确保车辆载重与需求点需求量一致; (33)确保车辆不超载。

3.3. 实例分析

在对以上冷链物流配送的选址与路线优化方面的研究基础上, 结合芜湖市 A 公司实际情况, 探讨了

其协同优化问题。对考虑碳排放和不考虑碳排放的两种优化方案进行了比较, 以检验所构建的模型与算法的正确性。

3.3.1. 实例背景

本文以芜湖市 A 物流公司为研究对象。公司拥有自己的运输车辆和配送车辆、租赁配送中心, 为芜湖各大连锁超市的配送和配送服务。随着公司的发展, 目前已有 10 家超市服务对象, 业务覆盖鸠江区和镜湖区。而随着顾客不断增多, 原有的冷链物流模式也暴露出了更多的问题, 因此, A 公司希望通过冷链物流的再一次规划, 使配送中心的选址和运输路线进一步协调, 从而达到降低成本、提高效率的目的。鉴于发展的需要和成本的考量, A 公司决定自行建设物流中心, 目前已经选定了 2 个分中心, 现需根据实际情况进行物流中心的选址及车辆路径的优化。

3.3.2. 实例数据

为便于探讨, 对实际位置进行了编号, 其中 8 表示货物批发市场, 1、2、3、4、5、9、10、11 表示各超市, 6 和 7 表示配送中心候选位置。

(3) 超市相关信息

通过实地询问和网络探索收集了相关超市的信息, 具体如表 2 所示。

Table 2. Demand, time windows, and service efficiency information for various supermarkets
表 2. 各超市需求量、时间窗及服务时效相关信息

超市门店	编号	时间窗	需求量(t/天)	服务时间(min)
城市名人壹	3	[4:30,5:30]	1.2	28
世纪联华(镜湖路店)	2	[5:30,6:00]	1.3	30
大润发(鸠江店)	1	[5:10,5:40]	1.2	25
永辉超市(鸠江店)	9	[6:00,6:40]	1.3	20
农品汇生鲜超市	12	[6:10,6:40]	0.4	19
优品生鲜	10	[5:10,6:40]	0.3	10
818 生鲜超市	11	[6:10,7:00]	0.3	10
景姐百货	5	[7:10,7:40]	0.2	10
玉兰超市	4	[7:10,7:40]	0.2	10
亿家人生鲜超市	13	[6:10,6:40]	0.3	15

(2) 候选配送中心相关信息

在此基础上, 利用候选配送中心的地理位置信息, 对每个配送中心的单位面积土地征收费用进行了测算, 并根据其实际运行状况, 分别计算出相应的单位货物处理费用和使用年限。参数具体情况如表 3 和表 4 所示。

Table 3. Land expropriation costs for distribution centers
表 3. 配送中心土地征用成本

配送中心	7 永盛物流园	6 万开物流园
单位规模建设土地成本(元/月*吨)	11500	8000

Table 4. Additional parameters for distribution centers
表 4. 配送中心其他参数

参数	符号	数值	单位
单位货物量的处理成本	h	45	元/吨
处理单位货物的碳排放量	ε	5	kg/吨
配送中心的使用年限	l	600	月
单位规模的建设成本	θ	3000	元/吨
规模指数	w	0.98	-

(4) 其他参数信息

基于本文所述的实例背景, 顾客需要在五点到七点之间完成运输, 在这个时候, 交通非常顺畅, 很少会发生交通堵塞, 所以我们假定物流车的车速是 60 km/h。结合具体情况, 对相关数值进行收集与测算具体数值如表 5 所示。

Table 5. Other pertinent parameters
表 5. 其他相关参数

参数	符号	数值	单位
配送中心的订货周期	T_i	30	天
配送车辆的行驶速度	v	60	公里/小时
运输车辆的固定成本	c_1	300	元/辆
运输车辆的单位距离运输成本	c_2	3	元/公里
配送车辆的固定成本	c_3	200	元/辆
配送车辆的单位距离运输成本	c_4	2	元/公里
早于客户时间窗到达的单位时间惩罚成本	c_6	25	元/小时
晚于客户时间窗到达的单位时间惩罚成本	c_7	35	元/小时
运输车辆的最大载重量	Q_1	10	吨
配送车辆的最大载重量	Q_2	3	吨
运输车辆满载时单位运输距离的燃油消耗量	p_1^*	0.47	L/km
配送车辆满载时单位运输距离的燃油消耗量	p_2^*	0.35	L/km
运输车辆空载时单位运输距离的燃油消耗量	p_1^0	0.22	L/km
配送车辆空载时单位运输距离的燃油消耗量	p_2^0	0.18	L/km
单位燃油碳排放系数	γ	2.8	kg/L
碳税税率	c_5	47.9	元/吨

3.3.3. 实例求解及分析

(1) 碳税率分析

本文应用 Matlab 程序编制了所提算法, 并将其设置为 100 个初始群体、500 个演化代数、0.8 的交叉概率和 0.3 的突变概率。采用两阶段遗传算法分别求解了考虑碳排放和不考虑碳排放情况下的协同优化问题, 并给出了相应的求解结果, 如表 6 所示。

Table 6. Information on different collaborative optimization schemes
表 6. 不同协同优化方案信息

配送中心编号	车辆编号	配送路径	不考虑碳排放的总成本(元)	考虑碳排放的总成本(元)
配送中心 7	1	7-9-12-2-7		
	2	7-13-3-11-10-7	35626.98	35524.5
	3	7-1-5-4-7		

从上面的表格可以看出, 无论考虑碳排放量还是不考虑碳排放量, 最初的方案都是完全相同的, 他们都选择了物流中心 7, 而且都用 3 辆车来运送货物。第一批是 9、12、2 号超市, 其次是 13、3、11、10 号超市, 最后一批是 1、5、4 号超市。

为了进一步分析碳排放对优化的影响, 本文列举了各项成本因素及占比, 具体数值如下表 7 所示。

Table 7. Cost Items and their proportions
表 7. 各项成本及占比

各项成本	成本(元)	占比
运输成本	4286.4	12.06%
碳排放成本	554.81	1.58%
配送中心建设成本	2928	8.24%
配送中心运营成本	10276.6	28.93%
配送成本	15078	42.44%
时间惩罚成本	2400.69	6.75%
总成本	35524.5	100%

从上表可以看到, 在所有的费用中, 运输费用是最高的, 为 15078 元, 占全部费用的 42.44%, 而碳排放费用最低, 为 554.81 元, 仅为 1.58%, 而运输费用是碳排放的 20 倍以上。由于碳排放的比例太小, 不能明显影响方案优化, 因此, 两个方案的总体费用差异不大, 而且路线布局也是一样的。而碳排放成本与碳税的价格相关, 表明目前设定的碳排放定价条件下在进行协同优化时仍然可以忽略碳排放, 故现有定价并不合适。

(2) 不同目标方案的结果对比分析

从上一节可以看出, 由于现行的碳税税率太低, 无明显影响, 故将碳税的税率设定在 3 元/千克。本节在新的碳税税率中, 将其它各参数的数值保留, 分别给出了两种方案的最优选择, 分别见表 8 和表 9。

Table 8. Site selection and routing optimization scheme without considering carbon emissions
表 8. 不考虑碳排放的选址及路径优化方案

配送中心编号	车辆编号	配送路径	总成本(元)	碳排放总量(kg)
配送中心 7	1	7-9-12-2-7		
	2	7-13-3-11-10-7	70274.99	11582.67
	3	7-1-5-4-7		

Table 9. Site selection and routing optimization scheme considering carbon emissions
表 9. 考虑碳排放的选址及路径优化方案

配送中心编号	车辆编号	配送路径	总成本(元)	碳排放总量(kg)
配送中心 7	1	7-9-12-2-7		
	2	7-13-3-11-7	65162.22	9879.24
	3	7-1-10-5-4-7		

从上述两张表格中可以看到, 尽管有两种方案均是在备选地点 7 设立配送中心且使用 3 辆车进行配送, 但它们的路线并不一致。不考虑碳排放量的方案保持不变, 考虑碳排放量的方案则改变了原来的分配路线, 成本比较结果见表 10。

Table 10. Comparison of costs across different schemes
表 10. 不同方案各项成本对比

各项指标	不考虑碳排放的方案	考虑碳排放的方案
运输车辆数(辆)	1	1
运输成本(元)	4286.4	4528
配送中心数量(个)	1	1
配送中心建设成本(元)	8784	10614
配送中心运营成本(元)	8806.96	8371.68
运输车辆碳排放成本(元)	4687.28	5198.66
配送中心碳排放成本(元)	8154.66	6704.14
时间惩罚成本(元)	2400.69	1584.7
配送车辆数(辆)	3	3
配送成本(元)	12078	9458
配送车辆碳排放成本(元)	9490.33	8818.8
总碳排放量(kg)	11582.67	9879.24
总成本(元)	70274.99	65162.22

将两个方案的总费用与总体排放量进行比较, 结果显示, 在不计碳排放的情况下, 总体费用和二氧化碳排放量均较高, 分别为 70274.99 元和 11582.67 千克。与前者相比, 考虑碳排放量的方案总体费用下降了 5112.77 元, 二氧化碳排放量下降 1703.43 千克。因此, 在合适的碳税税率下, 由于其整体费用和二氧化碳排放量都是最低的, 故公司将会优先考虑到碳排放。

计算发现增加碳税将会影响到路线优化, 同时, 在碳税比较高的情况下, 将碳排放成本作为考量因素来建立一个综合的供应链物流配送中心, 可以有效地降低企业的总成本, 同时也可以减少碳排放量。这也给我们提供了一些启发, 只有制定合理的碳税税率, 才能有效降低二氧化碳的排放。

4. 结论与展望

本文首先简要地介绍了影响协同优化的影响因素, 并说明了碳排放量的测算方式, 进而建立了考虑碳排放成本的冷链物流配送中心选址与车辆路径优化的数学模型, 并给出并说明了相应的求解方法和算法。主要结果与结论如下。

本文建立了考虑碳排放的协同优化模型。提出了一个总成本最低的数学模型, 该模型研究的影响因素比较全面, 也比较现实。根据建立的模型, 给出了相应的求解思路, 通过分步求解法简化了求解过程, 该模型对冷链物流中心选址和车辆路径协调优化问题的研究具有一定的借鉴意义。通过实例求解, 比较了考虑碳排放与不考虑碳排放两种不同情况下的优化方案后, 发现目前的碳税税率偏低, 使得碳排放费用难以对配送中心的选址和路线布局造成显著影响。在提高了碳税税率后, 再次对不同方案进行了研究。结果表明, 考虑碳排放的解决方案总体费用与碳排放量都更低, 因此, 本文所述方案是可行的。

本文不仅可以为我国的物流企业减少碳排放提供理论依据, 而且可以为我国的相关政策制定提供一定的依据。尽管本文具有一定的创新性, 但还有需要进一步改进的地方。本文仅从单一的运输方式和配送模式出发, 但实际情况下, 很多物流公司都有不同的运输、配送车辆。由于车辆种类的不同, 所产生的二氧化碳排放也有很大差别。利用不同的交通工具进行运输、分配, 会对车辆的总碳排放量造成一定的影响, 从而影响到配送中心的选址以及车辆路线的选择。所以, 今后要针对多型号车辆问题作深入探讨。

参考文献

- [1] Panda, S., Senapati, S. and Basu, M. (2008) Optimal Replenishment Policy for Perishable Seasonal Products in a Season with Ramp-Type Time Dependent Demand. *Computers & Industrial Engineering*, **54**, 301-314. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2007.07.011>
- [2] Montanari, R. (2008) Cold Chain Tracking: A Managerial Perspective. *Trends in Food Science & Technology*, **19**, 425-431. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2008.03.009>
- [3] Uysal, F. and Tosun, Ö. (2014) Selection of Sustainable Warehouse Location in Supply Chain Using the Grey Approach. *International Journal of Information and Decision Sciences*, **6**, 338-353. <https://doi.org/10.1504/ijids.2014.066633>
- [4] �毋庆刚. 我国冷链物流发展现状与对策研究[J]. 中国流通经济, 2011, 25(2): 24-28.
- [5] 孙春华. 我国生鲜农产品冷链物流现状及发展对策分析[J]. 江苏农业科学, 2013, 41(1): 395-399.
- [6] 方凯, 钟涨宝, 王厚俊, 贺岚. 基于绿色供应链的我国冷链物流企业效率分析[J]. 农业技术经济, 2014(6): 45-53.
- [7] 雷国. 我国冷链物流业发展现状及对策[J]. 对外经贸, 2015(4): 59-61.
- [8] Rizet, C., Browne, M., Cornelis, E. and Leonardi, J. (2012) Assessing Carbon Footprint and Energy Efficiency in Competing Supply Chains: Review—Case Studies and Benchmarking. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, **17**, 293-300. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2012.01.002>
- [9] 刘倩晨. 考虑碳排放的冷链物流研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 清华大学, 2010.
- [10] 田丽娜. 考虑碳排放的水果单级冷链效益优化分析[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2012.
- [11] 潘茜茜, 干宏程, 刘勇. 低碳经济下冷链物流配送中心选址设计[J]. 物流科技, 2015, 38(9): 29-31, 35.
- [12] Syam, S.S. (2002) A Model and Methodologies for the Location Problem with Logistical Components. *Computers & Operations Research*, **29**, 1173-1193. [https://doi.org/10.1016/s0305-0548\(01\)00023-5](https://doi.org/10.1016/s0305-0548(01)00023-5)
- [13] 陈红丽, 潘奕搏, 丁丽娟. 冷链物流配送网络选址-路径-库存的优化[J]. 公路交通科技, 2024, 41(10): 47-55.