

考虑现有门店改造的生鲜电商企业前置仓选址问题研究

董帅杰¹, 杨中华^{1,2}, 朱 铃¹

¹武汉科技大学管理学院, 湖北 武汉

²武汉科技大学服务科学与工程研究中心, 湖北 武汉

收稿日期: 2025年4月24日; 录用日期: 2025年5月16日; 发布日期: 2025年6月19日

摘 要

随着生鲜电商行业规模的快速扩张, 前置仓作为“最后一公里”的核心节点, 在提升配送时效的同时, 其选址决策的影响日益凸显。本文将考虑现有门店改造的生鲜电商前置仓选址作为研究的主题, 从前置仓的特点出发, 构建以总成本最小为目标的数学模型, 并设计相应的遗传算法来实现该模型的求解。选用Z集团在武汉市江夏区的前置仓选址问题进行实例分析, 针对已经存在的店铺网点, 进行前置仓的改造; 同时根据实际距离对比分析考虑碳排放和不考虑碳排放的各项成本。研究发现: 从社会发展的长期角度来看, 考虑碳排放所产生的社会总成本低于不考虑碳排放的情况, 证明了碳排放因素引入模型的合理性, 为丰富生鲜电商物流模式和促进低碳冷链物流发展提供了决策参考。

关键词

前置仓选址, 门店改造, 低碳物流, 遗传算法, 生鲜电商

Study on Location Selection of Pre-Warehouses for Fresh Food E-Commerce Enterprises Considering the Renovation of Existing Stores

Shuaijie Dong¹, Zhonghua Yang^{1,2}, Ling Zhu¹

¹School of Management, Wuhan University of Science & Technology, Wuhan Hubei

²Center for Service Science and Engineering, Wuhan University of Science & Technology, Wuhan Hubei

Received: Apr. 24th, 2025; accepted: May 16th, 2025; published: Jun. 19th, 2025

文章引用: 董帅杰, 杨中华, 朱铃. 考虑现有门店改造的生鲜电商企业前置仓选址问题研究[J]. 电子商务评论, 2025, 14(6): 1804-1817. DOI: 10.12677/ec.2025.1461928

Abstract

With the rapid expansion of the fresh food e-commerce industry, pre-warehouses, as core nodes in the “last mile” distribution, have increasingly highlighted the importance of their location decisions while improving delivery efficiency. This study focuses on the location selection problem of transforming existing stores into fresh food e-commerce pre-warehouses. Starting from the characteristics of pre-warehouses, a mathematical model aiming to minimize total costs is constructed, and a corresponding genetic algorithm is designed to solve the model. A case study is conducted using the pre-warehouses’ location selection problem of Z Group in Jiangxia District, Wuhan City, where existing store locations are transformed into pre-warehouses. At the same time, the various costs with and without considering carbon emissions are compared and analyzed based on actual distances. The research finds that from the long-term perspective of social development, the total social cost resulting from considering carbon emissions is lower than that without considering carbon emissions, which proves the rationality of introducing carbon emission factors into the model and provides a decision-making reference for enriching the logistics model of fresh food e-commerce and promoting the development of low-carbon cold chain logistics.

Keywords

Pre-Warehouse Location Selection, Low-Carbon Logistics, Genetic Algorithm, Fresh Food E-Commerce

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

根据中商产业研究院发布的《2024 年中国生鲜电商行业市场规模及行业发展前景预测分析》显示,我国生鲜市场规模由 2018 年的 1950 亿元增长至 2023 年的 6427.6 亿元,预计在 2024 年将达到 7367.9 亿元,生鲜电商行业呈现出良好的发展前景[1]。为有效降低商品损耗、快速响应客户需求,生鲜电商企业不断创新企业运作模式,前置仓模式应运而生,其运用人工智能和大数据智能技术精准预测消费者需求,提前备货以确保配送服务的及时性[2]。

物流作为第三产业的利润源,是促进我国经济发展的驱动器。不同于一般的常温物流,冷链物流会在冷藏、冷冻的过程中产生大量的能源消耗和碳排放,这无疑是与当今低碳经济发展目标相违背的,相关的生鲜企业将面临规模扩张和碳排放控制的突出矛盾,迫切需要优化结构,实现健康可持续发展。目前,学者们已有一些对前置仓选址的研究。廖璇等根据前置仓的独特属性以及现实生活的实际需要,提出了基于 Vague 集的多目标群决策方法模型,应用基于 Vague 集的多目标群决策方法模型取得相应的最优解,达到科学选址的目的[3]。Yang 等提出了一种改进的 Benders 分解算法,研究考虑横向转运策略和公平性因素的三级应急物流网络选址分配策略的优化设计问题[4]。宋宝祥等以青岛市为例,通过集合覆盖模型初步筛选前置仓选址方案,引入层次分析法对初步筛选出的前置仓选址方案进行最终确定,旨在为生鲜前置仓选址提供参考[5]。卢汉松等基于前置仓的配送范围和订单处理量,以生鲜电商企业的利润最大化为目标函数,建立了正常需求与激增需求下的前置仓选址模型,运用基于遗传算法的 K-means 聚类算法进行求解,刻画了需求变化情况下的两阶段选址的动态过程[6]。庄峻等考虑了生鲜商品需求的不

确定性 & 保质期特点，构建了以选址成本和订单履约成本最小化为目标的两阶段随机规划模型，通过 Benders 分解算法对该模型进行求解[7]。

在前置仓模式的相关文献中，前置仓模式的探讨往往与供应链和选址挂钩，选址是前置仓模式的核心问题，已有的前置仓选址研究中通常考虑新建前置仓选址问题，对利用现有门店改造成为前置仓的情况较少考虑；此外，还欠缺对碳排放成本的考量。本文考虑将现有门店改造成为前置仓，使其既承担前置仓职责，还承担门店职责，同时把碳排放的理念引入前置仓的选址问题中来，具体表现为把碳排放成本纳入目标总成本，更符合当前碳交易背景下物流企业的实际需求，丰富了前置仓选址的理论。

2. 选址模型的建立

2.1. 问题描述

本文研究的是包含配送中心 - 前置仓 - 客户需求点的轴辐式物流网络，着眼于某城市的生鲜电商前置仓的选址布局，针对已经存在的店铺网点，进行前置仓的改造。考虑从中心大仓至最终消费群体两段配送距离，第一段的配送过程用冷藏车将商品运至网点，因此会考虑冷链物流的制冷成本，此外把碳排放因素作为经济成本引入目标函数中；第二段是将前置仓的各个备选点送至客户群体。综上，前置仓选址问题需要处理从配送中心到前置仓，再到需求点的过程中会产生各项成本，使得整个目标函数总成本最小。

2.2. 模型假设

为了更好地构建前置仓模型，本研究基于以下假设开展分析：1) 本研究的研究对象限定为单一品类的生鲜商品；2) 在物流网络架构设定中，假设系统内仅配置唯一的区域级配送中心，各前置仓的货品补给均由该中心统一负责调度；3) 配送中心配备一定数量的同规格冷藏运输车辆，且每辆车的货物装载量严格控制在额定载重范围之内。此外，考虑到前置仓与终端消费者间的空间距离较短，在构建模型时，对该环节产生的冷链物流成本予以忽略处理。4) 物流路径规划中，仅考虑从中央配送中心至前置仓备选点，以及从前置仓至终端需求节点的运输链路；5) 设定运输过程中环境温度保持恒定，且无外部因素干扰，因此货物损耗成本仅与运输时长呈正相关；6) 前置仓配备的运输车辆具备满足对应服务区域需求量的运载能力；7) 碳排放计量范围限定于配送中心至前置仓的运输阶段；8) 模型采用年度运营周期，按 365 个自然日进行测算。

2.3. 设定参数

参数设定如表 1 所示。

Table 1. Parameter settings

表 1. 参数设定

参数	含义	参数	含义
A	生鲜加工配送中心	θ_2	前置仓备选点到普通门店的生鲜品损耗系数
I	前置仓备选点的集合, $i \in I$, $I = \{i i = 1, 2, \dots, n\}$	d_i	配送中心到前置仓备选点 i 的距离
J	普通门店的集合, $j \in J$, $J = \{j j = 1, 2, \dots, m\}$	d_{ij}	候选前置仓 i 到普通门店 j 的距离
K	前置仓的类型集合, $k \in K$, $K = \{k k = 1, 2, \dots, \delta\}$	V_i	配送中心到前置仓备选点 i 的速度

续表

S_i	备选点的面积	V_{ij}	候选前置仓 i 到普通门店 j 的速度
Z_k	K 类型的前置仓的最大周转量	W_i	配送中心到前置仓备选点 i 的配送量
G_k	K 类型前置仓的改造成本	W_{ij}	候选前置仓 i 到普通门店 j 的配送量
H_k	K 类型前置仓的最小面积	F_k	K 类型的前置仓的年平均单位运营成本
U_k	服务半径	γ	单位重量里程的能耗成本
Q_j	需求点 j 的需求量	β	配送过程燃油消耗的碳排放系数
P_1	生鲜产品的单位价格	ρ^*	满载时单位距离燃料消耗量
P_2	配送中心到前置仓备选点的单位运输费用	ρ^0	空载时单位距离燃料消耗量
P_3	前置仓备选点到普通门店的单位运输费用	Q^*	冷藏车的最大载重量
P_4	碳交易规则下的成交价格	C_0	初始碳配额
R	一个充分大的实数	X_{ijk}	当 $X_{ijk} = 1$ 的时候表示 k 类型的前置仓备选点 j 服务需求点 j , 否则为 0
ε	单位货损成本	Y_{ik}	当 $Y_{ik} = 1$ 的时候表示在备选点 i 建设 k 类型的前置仓, 否则为 0
θ_1	配送中心到前置仓备选点的生鲜品损耗系数		

2.4. 目标函数

1) 运输成本

从位于偏远城郊的配送中心, 到位于中心城区的前置仓, 会产生运输成本, 由两方面组成, 即从配送中心到备选前置仓以及从备选前置仓到用户需求点:

$$\eta_1 = \left(\sum_{i=1}^n d_i W_i P_2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m d_{ij} W_{ij} P_3 \right) * 365 \quad (1)$$

2) 损耗成本

即使在运输途中采取冷链运输的方式, 但由于生鲜产品易腐特性, 仍然会受温度和时间的影响产生损耗成本:

$$\eta_2 = \left(\sum_{i \in I} \varepsilon W_i \left(1 - e^{-\theta \frac{d_i}{v_i}} \right) + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \varepsilon W_{ij} \left(1 - e^{-\theta \frac{d_{ij}}{v_{ij}}} \right) \right) * 365 \quad (2)$$

3) 改造成本

当门店被选中成为待改造的前置仓, 其会产生改造成本:

$$\eta_3 = \sum_{k=1}^{\delta} \sum_{i=1}^n G_k * y_{ik} \quad (3)$$

4) 运营成本

当选定改造前置仓时, 运营成本不可避免, 以自然年为周期收取费用:

$$\eta_4 = \sum_{k=1}^{\delta} \sum_{i=1}^n F_k * y_{ik} \quad (4)$$

5) 制冷成本

本文采用通用的制冷成本表达式来构建相关成本模型:

$$\eta_5 = \gamma \sum_{i \in I} d_i * W_i \quad (5)$$

6) 处理碳排放成本

本文聚焦于配送中心至各前置仓备选点运输过程中,因石油燃料消耗导致的二氧化碳排放所引发的经济成本研究。Xiao 等[8]在探讨燃料消耗与车载货物量中作出了回归分析,其中单位距离的燃料消耗量表示为:

$$\rho(x) = \rho^0 + \frac{\rho^* - \rho^0}{Q^*} x \quad (6)$$

其中, ρ^0 为冷藏车空载时的单位距离燃料消耗量, ρ^* 为冷藏车满载时的单位距离燃料消耗量, Q^* 为冷藏车的核定载重量。在碳交易规则下的碳排放成本不仅跟碳交易价格有关,还跟初始碳配额 C_0 的有关,表示为:

$$\eta_6 = P_4 \left\{ \sum_{i \in I} \beta \left[\rho^0 + \frac{w_i (\rho^* - \rho^0)}{Q^*} \right] d_i - C_0 \right\} \quad (7)$$

根据上述问题,建立选址模型,具体公式如下:

$$\begin{aligned} \min F_1 &= \eta_1 + \eta_2 + \eta_3 + \eta_4 + \eta_5 + \eta_6 \\ &= \left\{ \sum_{i=1}^n d_i W_i P_2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m d_{ij} W_{ij} P_3 + \sum_{i \in I} \varepsilon W_i \left(1 - e^{-\theta \frac{d_i}{v_i}} \right) + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \varepsilon W_{ij} \left(1 - e^{-\theta \frac{d_{ij}}{v_{ij}}} \right) \right\} * 365 \\ &\quad + \sum_{k=1}^{\delta} \sum_{i=1}^n G_k * y_{ik} + \sum_{k=1}^{\delta} \sum_{i=1}^n F_k * y_{ik} + \gamma \sum_{i \in I} d_i * W_i + P_4 \left\{ \sum_{i \in I} \beta \left[\rho^0 + \frac{w_i (\rho^* - \rho^0)}{Q^*} \right] d_i - C_0 \right\} \end{aligned} \quad (8)$$

2.5. 约束条件

约束条件如下:

$$x_{ijk} \leq \frac{U_k * y_{ik}}{d_{ij}}, \forall i \in I, j \in J, k \in K \quad (9)$$

$$\sum_{k \in K} y_{ik} \leq 1, \forall i \in I \quad (10)$$

$$x_{ijk} \leq y_{ik}, \forall i \in I, j \in J, k \in K \quad (11)$$

$$\sum_{k \in K} x_{ijk} R \geq W_{ij}, \forall i \in I, j \in J \quad (12)$$

$$y_{ik} \leq \frac{S_i}{H_k}, i \in I, k \in K \quad (13)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} W_{ij} = \sum_{i \in I} W_i \quad (14)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} W_{ij} = \sum_{j \in J} Q_j \quad (15)$$

$$\sum_{k \in K} y_{ik} R \geq W_i, \forall i \in I \quad (16)$$

$$\sum_{j \in J} W_{ij} \leq \sum_{k \in K} Z_k y_{ik}, \forall i \in I \quad (17)$$

$$W_i, W_{ij} \geq 0, \forall i \in I, j \in J \quad (18)$$

其中, 公式(9)表明前置仓与所服务的普通门店之间的距离需处于其服务半径内; 公式(10)说明每个备选点只能被改造成一种类型的前置仓; 公式(11)和公式(12)指出, 只有当 k 类型的前置仓备选点 i 被选中时, 才能为普通门店 j 提供服务; 公式(13)强调, 若选中 k 类型的前置仓备选点, 其面积需符合该类型前置仓的建设标准; 公式(14)与(15)是供应链中货物流动的流量平衡约束; 公式(16)表明, 当且仅当前置仓备选点被选定为服务节点时, 配送中心才会向其分配货流; 公式(17)界定了前置仓的货物转运量不得超过其服务能力阈值; 公式(18)则对配送量施加了非负性约束。

3. 算法设计

3.1. 编码的确定

针对设施选址问题的特征, 本研究提出基于二元编码与整型编码的混合表征方法。采用二元编码符号集 $\{0, 1\}$ 构建染色体序列, 其中各基因位点与候选前置仓形成严格映射关系: 当某基因位取值为 1 时, 表示选中; 若取值为 0, 则予以排除。在服务关系分配层面, 引入整型编码机制表征多设施协同服务关系。每个需求节点对应的基因位数值表示其服务隶属设施编号, 如编码序列(2, 1, 2, 1, 2, 2, 1, 2, 2, 1, 2, 1, 2, 3, 2, 1)中: 前置仓 1 负责服务第 2、4、7、10、12、16 号需求节点; 前置仓 2 覆盖第 1、3、5、6、8、9、11、13、15 号节点; 设施 3 则专门服务第 14 号节点。该混合编码方案通过离散空间的双重映射, 实现了设施选址与服务分配决策的同步优化。

3.2. 种群初始化

本文选取初始种群规模 NP 为 80, 然后生成相应的初始解。

3.3. 适应度函数

针对成本最小化问题, 通常将目标函数的倒数定义为适应度函数, 使得成本值越小, 对应的适应度值越大, 从而体现解的质量随适应度提升而优化的特性。

$$\text{fit} = \frac{1}{F_1} \quad (19)$$

3.4. 选择算子

选择操作承担着优良基因传播载体的核心职能, 其数学本质是通过概率筛选实现适应度导向的种群迭代。本研究采用经典的比例选择法(轮盘赌机制), 具体实施步骤如下:

步骤一: 将种群中每个个体代入适应度函数, 计算个体适应度值 fit 和种群中所有个体之和的值 $\text{sum}(\text{fit})$ 。

步骤二: 对选择概率进行归一化处理, 得到选择概率如下所示:

$$p_x = \frac{\text{fit}}{\text{sum}(\text{fit})} \quad (20)$$

步骤三: 计算累加概率, 计算公式如下所示:

$$P_x = \sum p_x \quad (21)$$

3.5. 交叉算子

交叉运算是将两个彼此配对的染色体根据交叉概率 P_c , 交换其部分基因, 然后产生两个新的个体。交叉的方式有多点交叉、单点交叉、循环交叉等。本文使用的是单点交叉, 选取 P_c 的值为 0.8。如图 1 所示。

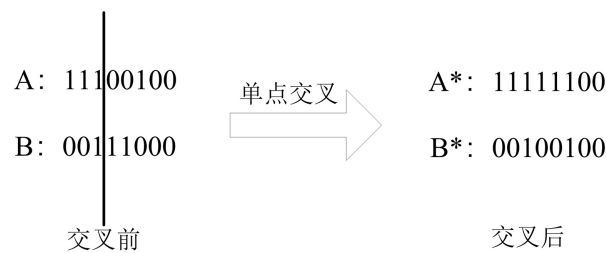


Figure 1. Schematic diagram of crossover operation
图 1. 交叉运算示意图

3.6. 变异操作

变异算子的核心功能是维持种群的多样性。单点变异作为遗传算法的基础操作，具体过程为：在染色体编码序列中随机选取某一基因位点，基于该位点的有效取值区间，采用均匀分布随机采样方式重置其数值。为调控算法收敛性与探索能力的平衡，本研究将变异概率参数 P_m 定义为 0.2，该参数表征个体基因组发生突变的期望频率。

3.7. 精英选择策略

精英保留策略的核心目的在于保障进化过程中优质遗传信息的纵向传递。设种群规模为 NP ，精英容量参数为 E ，其具体实施规程包含两个关键环节：首先从当代种群中遴选适应度前 E 位的优势个体直接保留至子代种群；其次通过交叉、变异等遗传操作生成 $(NP-E)$ 个新个体。最终将两类个体集合构成完整的新一代种群。经实验验证，本研究采用的精英比例参数 P_e 取值为 0.1 时可有效平衡算法开发与探索需求。

3.8. 终止条件

由于遗传算法无法自动停止迭代，因此有必要确定终止判断的方法。一般可以分为固定迭代次数和最优准则。本文设定当运行达到最大迭代次数 300 时，算法终止，输出最优解。

4. 实例研究

4.1. 备选点初筛

Table 2. Branch name, type, and location
表 2. 网点名称、类型、位置

序号	名称	类型	经度	纬度
I1	新华联青年城店	超市	114.3595	30.37247
I2	杨桥湖大道店	超市	114.4344	30.42331
I3	江夏大道店	超市	114.343	30.37174
I4	庙山店	超市	114.3784	30.40314
I5	阳光 100 店	便利店	114.4169	30.4063
I6	中央大街店	便利店	114.3361	30.36029
I7	金融港店	便利店	114.429	30.4603
I8	藏龙岛店	仓储卖场	114.4366	30.42586
I9	庙山广信店	仓储卖场	114.3797	30.42429
I10	紫微星广场店	仓储卖场	114.43	30.4421
I11	南车花店	仓储卖场	114.3209	30.4158
I12	江夏购物广场店	仓储卖场	114.3202	30.35393

Z 公司是一家扎根于湖北的连锁超市及零售型集团企业，其在武汉市内的配送中心分别为常温物流中心和生鲜冷链物流中心，其中江夏生鲜园主要是冷链物流中心。

本文选取武汉市江夏区的 12 个门店作为参照，具体的网点名称、类型及地址如表 2 所示。

根据生鲜电商前置仓选址的指标体系，整理得到 Z 集团的前置仓选址指标，经过定性研究以及专家的具体打分，求出备选点的综合权重，分别标识为 I1~I12，最终结果按照值的大小排序，如表 3 所示。

Table 3. Comprehensive weight ranking of alternative sites

表 3. 备选点综合权重排序

序号	评分值	序号	评分值
I1	0.878111	I12	0.866899
I3	0.877706	I9	0.860066
I11	0.877281	I10	0.847036
I4	0.876125	I5	0.846146
I7	0.869614	I2	0.843996
I6	0.867751	I8	0.836184

综合所得，选取 8 个店为备选方案，按照分数高的原则，得到 I1、I3、I11、I4、I7、I6、I12、I9。

4.2. 生鲜电商前置仓选址模型的求解

4.2.1. 参数设定及数据的准备

本文以 Z 集团在武汉市江夏区城市配送网络为例，将前面已经筛选出的 8 个门店作为拟改造成前置仓的参考，改造后的前置仓不仅需要满足需求端的客户，还需要满足落选的普通门店的配送需求。

1) 参数的设定

Z 集团在武汉总共有两个配送中心，根据本文的特点，选择江夏区的生鲜物流园为配送中心。从配送中心出发，运输至各个前置仓时采用福田时代 H 冷藏车，车辆额定载重 1.5 t，平均行驶速度为 50 km/h，单位运输成本为 3 元/(t·km)；前置仓至需求点的末端配送采用小面包车，运行速度为 15 km/h，单位运输费用为 2 元/(t·km)。截至 2021 年底，根据生态环境部发布的关于全国碳交易市场第一个履约周期均价为 42.85 元/t。设置各项参数如表 4~6 所示。

Table 4. Parameters for carbon emission cost calculation

表 4. 碳排放成本计算时的参数指标

参数	定义	数值	数据来源
P_4	碳交易价格	42.85 元/t	生态环境部网站
β	燃油消耗下的碳排放系数	2.63	BP 中国碳排放计算
C_0	初始碳配额	550 kg/天	考虑碳交易的生鲜农产品冷链配送选址 - 路径研究[9]

Table 5. Other parameter settings

表 5. 其他参数设定值

参数	定义	数值	参数	定义	数值
P_1	生鲜产品的单位价格	4000 元/t	γ	单位重量里程的能耗成本	0.15 元/km·t
ε	单位货损成本	10000 元/吨	ρ^*	满载时单位距离燃料消耗量	8 升/百吨公里
θ_1	配送中心到前置仓备选点的生鲜品损耗系数	0.003	ρ^0	空载时单位距离燃料消耗量	2 升/百吨公里
θ_2	前置仓备选点到需求点的生鲜品损耗系数	0.005	Q^*	冷藏车的最大载重量	1.5 t

Table 6. Store renovation plan of the pre-warehouse
表 6. 前置仓的门店改造方案

序号(K)	种类	面积界定范围	年最大周转量 Z_k /(t/年)	改造成本 G_k (万)	服务半径 U_k (km)	运营成本 F_k (万元/年)
1	大	大于 150	3000	3	5	70
2	中	大于 100	2500	2.5	2.5	50
3	小	大于 50	2000	2	1.5	30

2) 数据准备

本文前提是 Z 集团想要扩大 B 端市场，同时继续发挥在 C 端市场的影响，因此，需求点的来源为 B 端和 C 端。B 端客户群体面向大学，而 C 端客户群体则是面向社区。社区的选择为常驻居民人口最多的纸坊街道郭岭社区，选择人口较多的具有代表性的小区作为需求点，分别标识为 J1~J14。将需求点的货物量以历史数据为参考，得到如表 7 所示的需求点。

Table 7. Location and quantity of demand points
表 7. 需求点位置及需求量

序号	名称	经度	纬度	需求量 Q_j (t/天)
J1	保利海上五月花	114.382222	30.41241	0.66
J2	南车花园	114.321029	30.41442	0.67
J3	长江一号	114.318151	30.40988	0.88
J4	郭岭社区	114.326291	30.35846	0.97
J5	大花岭小区	114.319916	30.41884	0.86
J6	武汉纺织大学阳光	114.339399	30.38027	1.02
J7	武汉工程科技学院	114.34516	30.35485	1.01
J8	武昌理工学院	114.373741	30.4233	1.03
J9	湖北经济学院	114.442721	30.42425	0.98
J10	湖北美术学院(藏龙岛校区)	114.425605	30.39753	0.99
J11	武汉传媒学院	114.426333	30.44445	1.03
J12	长江工程职业技术学院	114.322349	30.40854	0.98
J13	武汉工程大学(流芳校区)	114.439425	30.46657	0.99
J14	武汉铁路职业技术学院(新校区)	114.416312	30.43716	1.02

Table 8. Demand volume for alternative stores
表 8. 备选门店需求量

序号	需求量 Q_j (t/天)	序号	需求量 Q_j (t/天)
I1	1.12	I7	1.13
I2	1.16	I8	1.15
I3	1.02	I9	1.18
I4	1.03	I10	1.02
I5	1.09	I11	1.01
I6	1.16	I12	1.02

由于在备选门店中，也会产生未被改造的普通门店，因此还需要考虑所有落选的门店(拟改造备选门店、落选门店)的需求量，如表 8 所示。

确定需求点后，需要计算拟改造备选点至配送中心和所有备选门店(拟改造备选门店、落选门店)的距离，用百度地图收集实际车辆最短行驶距离，如表 9、表 10 所示。

Table 9. Actual minimum driving distance of vehicles from the proposed renovation site to distribution centers and stores (Unit: km)

表 9. 拟改造备选点至配送中心及门店的实际车辆最短行驶距离(单位：公里)

	A	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7	I8	I9	I10	I11	I12
A	0	7.1	18.4	5.2	10.9	14.1	5.7	19.3	18.1	12.2	19.6	6.5	5.3
I1	7.1	0	12.6	2.1	5.4	8	4.1	14.7	12.4	7.5	13.8	7.9	5.7
I3	5.2	2.1	15.3	0	8	10.6	1.9	10.9	15	9.2	16.5	7.6	3.6
I4	10.9	5.4	11.5	8	0	7	8.3	10.6	11.4	3	11.4	11.3	10
I6	5.7	4.1	14	1.9	8.3	12.3	0	16.6	15.2	8.9	17.2	7.7	2
I7	19.3	14.7	5.9	10.9	10.6	8.1	16.6	0	6.2	8.4	2.4	16.9	18.5
I9	12.2	7.5	9.6	9.2	3	9.5	8.9	8.4	10.6	0	9.3	12.2	11.3
I11	6.5	7.9	18.8	7.6	11.3	14	7.7	16.9	18.5	12.2	19	0	8.3
I12	5.3	5.7	15.6	3.6	10	12.7	2	18.5	17	11.3	18.5	8.3	0

Table 10. Actual minimum driving distance of vehicles from the proposed alternative site to the demand site (Unit: km)

表 10. 拟改造备选点至需求点的实际车辆最短行驶距离(单位：公里)

	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J9	J10	J11	J12	J13	J14
I1	7.8	8.1	7.5	4.6	8.5	2.1	3.1	7.1	14.4	10.4	14.5	6.9	17	13.3
I3	7.6	7.3	6.8	3.3	7.7	1.2	2.6	6.8	15.1	11.1	15.2	6.1	17	13.2
I4	2.3	11.2	10.6	9.2	11.5	5.5	8.5	2.3	13.1	9.1	11	9.9	13.2	8.7
I6	9.9	7.9	7.4	1.2	8.3	3.1	1.1	8.7	17	13	17.1	6.7	17.2	15
I7	9.8	17	17.7	17.6	17.1	13.9	16.9	8.2	5.9	8.6	1.7	17.9	2.8	3.8
I9	2.6	12.4	11.9	10.5	12.8	6.7	9.8	1.1	12.2	11.6	8.6	11.2	10.9	6.4
I11	12.5	0.2	0.9	7.8	1	7	9	11.6	20	16	19.7	2.6	19.3	18.1
I12	11.3	8.5	7.6	1.1	8.8	4.7	2.9	10.3	18.7	14.7	18.8	7.3	21.3	16.8

4.2.2. 结果分析

根据上文内容，借助 MATLAB 2016，可以实现基于遗传算法的前置仓选址。其中，设种群规模为 80，交叉算子为 0.8，变异算子为 0.2，精英比例为 0.1，终止条件为 300。

1) 前置仓选址与配送方案

考虑实际地理环境与交通条件的影响(如湖泊、建筑物等障碍物)，研究基于百度地图获取的实际道路网络最短行驶距离数据，构建了更贴合现实场景的目标函数，并优化确定了前置仓选址及配送路径方案。如图 2、图 3、表 11 所示。

以前置仓 I1 为例，它除了服务客户需求点以及未被选中的门店，还要考虑自身作为门店的需求。经多目标优化模型求解，最终确定 I1、I4、I11、I9、I6 为应选择的前置仓。系统综合成本为 347.997 万元，

运输成本 40.769 万元, 损耗成本 21.517 万元, 固定资产投资成本包含设施改造 11.00 万元, 基础运营成本 190 万元, 制冷成本 61.435 万元及处理碳排放成本 23.276 万元。该成本分布验证了选址方案在经济性与可持续性维度的均衡性, 其中固定资产投资占比 54.60%, 环境成本占比 24.40%, 表明模型有效协调了基础设施投入与绿色运营约束的博弈关系。

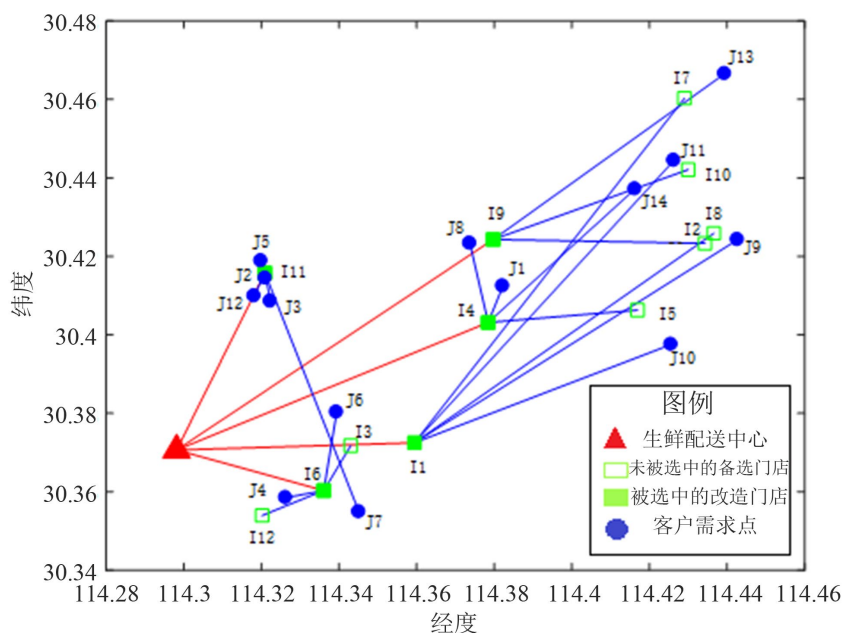


Figure 2. Site selection-path of the pre-warehouse under the actual driving distance of vehicles

图 2. 实际车辆行驶距离下的前置仓选址 - 路径

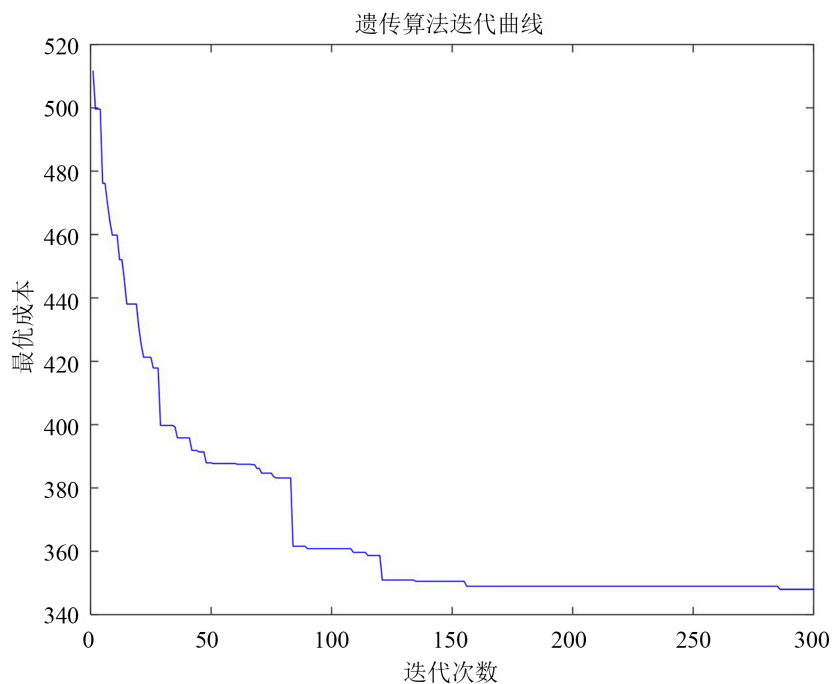


Figure 3. Number of iterations and objective function under actual driving distance of vehicles

图 3. 实际车辆行驶距离下的迭代次数和目标函数

Table 11. Site selection scheme for the pre-warehouse under the actual driving distance of vehicles
表 11. 实际车辆行驶距离下的前置仓选址方案

前置仓名称	改造类型	服务对象
I1	K2	I1、I8、I7、J9、J10、J11
I4	K3	I4、I5、J1、J8、J14
I11	K3	I11、J2、J3、J5、J7、J12
I9	K2	I9、I2、I10、J13
I6	K3	I6、I3、I12、J4、J6

2) 不考虑碳排放的前置仓选址与配送方案

根据上面的对比结果，选择实际车辆行驶距离作为依据，比较考虑碳排放和不考虑碳排放下的前置仓选址方案，由于上述内容已得出实际车辆行驶距离下考虑碳排放的选址结果，故只分析该情况下不考虑碳排放的结果，当不考虑碳排放时，被选的前置仓为 I1、I2、I3、I9、I12，前置仓选址 - 路径和选址方案如图 4、表 12 所示。

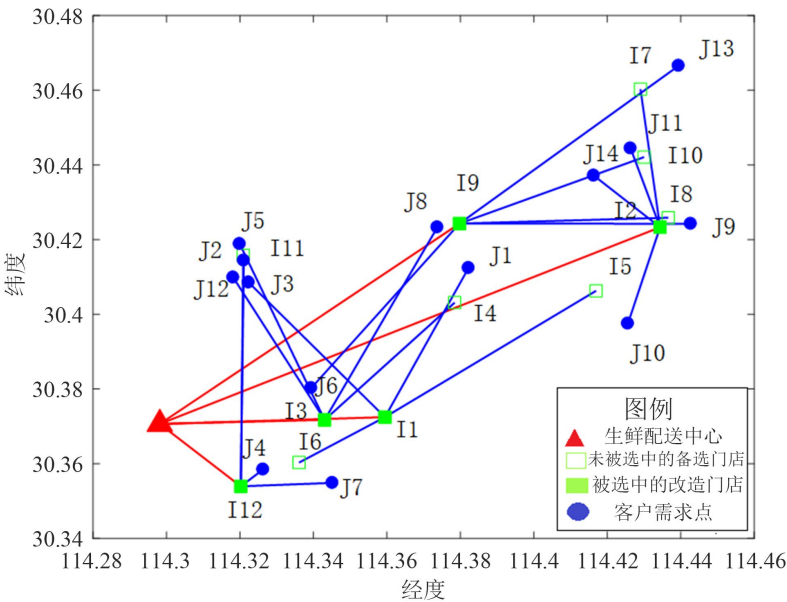


Figure 4. Site selection-path of the pre-warehouse without considering carbon emissions under the actual driving distance of vehicles
图 4. 实际车辆行驶距离下不考虑碳排放情况的前置仓选址 - 路径

Table 12. Site selection schemes without consideration of carbon emissions under actual driving distance of vehicles
表 12. 实际车辆行驶距离下不考虑碳排放情况的选址方案

前置仓名称	改造类型	服务对象
I1	K3	I1、I5、I6、J3、J1
I2	K3	I2、I7、J11、J14、J10
I3	K3	I3、I4、J5、J8、J12
I9	K2	I9、I8、I10、J6、J9、J13
I12	K3	I12、I11、J2、J4、J7

当不考虑碳排放情况时,企业的总成本为 320.344 万元,其中运输成本为 43.743 万元,损耗成本为 22.380 万元,改造成本为 10.5 万元,运营成本为 170 万元,制冷成本为 73.721 万元。但实际上,企业以不考虑碳排放成本为前提进行选址时,仍会产生由车辆运输和商品周转导致的二氧化碳排放,只不过这一部分的费用以一定形式由政府买单。

整理对比以实际距离为依据下的不考虑碳排放和考虑碳排放的企业总成本、处理碳排放成本、社会总成本,如表 13 所示。

Table 13. Comparison of total costs under different scenarios based on actual distances
表 13. 以实际距离为依据下不同情况的总成本对比

	企业总成本(万元)	处理碳排放成本(万元)	社会总成本(万元)
不考虑碳排放的前置仓选址	320.344	32.772 (政府承担)	353.116
考虑碳排放的前置仓选址	347.997	23.276 (企业承担)	347.997

由上表可知,在不考虑碳排放情况下进行前置仓选址,所产生的社会成本为 353.116 万元,其中 Z 企业负责 320.344 万元,政府负责 32.772 万元;而考虑碳排放前置仓选址情况下,所产生的社会总成本为 347.997 万元,其中 23.276 万元的碳排放成本则由企业承担。

对比两种情况,可以发现:从企业短期的经济利益角度看,不考虑碳排放比考虑碳排放的情况下,企业总成本少了 27.653 万元,但从社会发展的长期角度看,考虑碳排放所产生的社会总成本相比不考虑碳排放少了 5.119 万元。

5. 研究结论与展望

本文在基于前置仓的概念、模式及功能的基础上,结合一般的冷链物流设施选址模型,在考虑选取现有门店,将其改造成为前置仓的情况下,构建了一个以最小总成本为目标的前置仓选址模型,不仅考虑了一系列成本问题,同时还引入了碳排放成本,更符合当前碳交易背景下物流企业的实际需求。

根据实际车辆行驶距离的数据,综合对比考虑碳排放和不考虑碳排放情况下的各项成本,即从企业短期的经济利益角度看,不考虑碳排放比考虑碳排放的情况下,企业总成本少了 27.653 万元,但从社会发展的长期角度看,考虑碳排放所产生的社会总成本相比不考虑碳排放少了 5.119 万元,由此得出考虑碳排放成本更符合社会需求,证明了考虑碳排放的选址模型具有合理性。

但是由于研究水平和时间的限制,仍有一些部分需要进一步改进:首先,现实的配送网络中,会存在实时路况对于路径规划的影响,未来可以进一步探讨时变路网因素对于低碳前置仓配送系统的影响;此外,本文只研究了选址的问题,而物流配送网络中,更需要考虑到路径规划和库存水平的影响,前置仓配送网络是一个系统性的问题,可以进一步深入探讨。

参考文献

- [1] 中商产业研究院. 2024 年中国生鲜电商行业市场规模及行业发展前景预测分析[EB/OL]. <https://www.askci.com/news/chanyec/20240124/173537270608893745683740.shtml>, 2024-01-24.
- [2] 程琦, 王宏勋. 前置仓发展背景下我国生鲜农产品应急储备仓建设的思考[J]. 农村经济与科技, 2021, 32(3): 127-129.
- [3] 廖璇, 陈麓伊, 余丽莎, 等. 电子商务背景下城市前置仓选址研究——基于 Vague 集的多目标群决策方法[J]. 物流工程与管理, 2024, 46(12): 73-77+132.
- [4] Yang, R., Li, Y., Zhang, B. and Yang, R. (2024) Location-Allocation Problem in the Emergency Logistics System Considering Lateral Transshipment Strategy. *Computers & Industrial Engineering*, **187**, Article ID: 109771. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109771>

-
- [5] 宋宝祥, 苟昱琛. 基于集合覆盖模型的生鲜前置仓选址研究[J]. 中国储运, 2024(10): 142-143.
 - [6] 卢汉松, 魏海蕊. 考虑激增需求下前置仓两阶段选址研究[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2023, 40(1): 73-81.
 - [7] 庄峻, 杨东. 面向生鲜电商的前置仓选址及订单履约决策优化研究[J]. 中国管理科学, 2024, 32(2): 188-198.
 - [8] Xiao, Y., Zhao, Q., Kaku, I. and Xu, Y. (2012) Development of a Fuel Consumption Optimization Model for the Capacitated Vehicle Routing Problem. *Computers & Operations Research*, **39**, 1419-1431. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2011.08.013>
 - [9] 段诗远. 考虑碳交易的生鲜农产品冷链配送选址-路径研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2019.