

农村电商物流配送中心选址

李新月¹, 张云川^{1,2}

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29日; 录用日期: 2025年5月16日; 发布日期: 2025年6月17日

摘要

物流配送中心的位置选择在优化物流系统网络中起着关键作用。本文提出了一种利用免疫算法的优化方法来解决这一问题。通过模拟生物免疫系统的自然选择和记忆机制, 构建了一个能够高效处理非线性和多约束条件的优化框架。本文首先定义了配送中心选址问题的目标函数和约束条件, 建立了相应的数学模型。随后, 设计了一种免疫算法, 通过克隆选择、变异及记忆细胞库更新等操作, 提升了算法的全局搜索能力和局部搜索精度。实验结果显示, 该方法在求解配送中心选址问题时能获得更优解, 为该领域提供了一种新的解决思路, 对物流网络优化具有重要意义。

关键词

选址, 免疫算法, 配送中心, 电子商务

Rural E-Commerce Logistics and Distribution Center Site Selection

Xinyue Li¹, Yunchuan Zhang^{1,2}

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

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

Received: Apr. 29th, 2025; accepted: May 16th, 2025; published: Jun. 17th, 2025

Abstract

The choice of location of logistics and distribution centers plays a key role in optimizing the logistics system network. In this paper, an optimization method using immune algorithm is proposed to solve this problem. By simulating the natural selection and memory mechanism of biological immune system, an optimization framework that can efficiently deal with nonlinearity and multiple

constraints is constructed. In this paper, the objective function and constraints of the distribution center location problem are first defined, and the corresponding mathematical model is established. Subsequently, an immune algorithm is designed to enhance the global search capability and local search accuracy of the algorithm through operations such as clone selection, mutation and memory cell library update. The experimental results show that the method can obtain a more optimal solution in solving the distribution center location problem, which provides a new solution idea in this field, and has important value for the optimization of logistics network.

Keywords

Site Selection, Immune Algorithm, Distribution Center, 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

随着互联网技术的飞速发展和电子商务的普及,农村电商已成为推动农村经济转型和促进农民增收的重要途径。国家政策的支持和农村市场的潜力吸引了众多电商企业和物流公司的关注。然而,物流配送作为电商生态系统中的关键环节,其效率和成本直接影响着农村电商的竞争力和可持续发展。农村地区因地理位置偏远、基础设施不完善以及物流需求分散等因素,使得物流配送面临诸多困难。因此,合理规划和选址农村电商物流配送中心,对于提高物流效率、降低运营成本、增强农村电商的市场竞争力具有重要意义。

物流选址问题作为优化问题的一个典型范例,一直以来都有学者对其进行研究。杨波等人[1]提出了一种基于随机模型的物流配送中心选址方案,提供了单中心选址的量化处理方法;吴坚等人[2]构建了数学模型,并将遗传算法应用于模型求解过程,确保能够快速找到最优解;针对电子商务的发展,学者提出了适用于软时间窗的配送中心选址与路径优化模型,并设计了遗传算法与模拟退火相结合的求解方法[3];Li Y 等人[4]进一步研究了 AFS 聚类方法,以有效评价物流中心选址;孟军等人[5]通过非线性惯性权重和交叉变异策略改进了飞蛾算法,并成功应用于农业物流配送中心选址模型优化;甘卫华等人[6]将碳排放和时间成本因素纳入 O2O 模式物流配送中心选址中,确定在最低成本条件下配送中心的建设数量及配送方案;张志霞,李朋璋[7]对于易逝品类物资配送中心的选择以及配送方面加以研究,并进行了有效求解;Cui H 等人[8]研究了优化物流配送中心在物流网络中的位置问题,最大限度地降低物流配送中心的运营成本;Yazdani M 等人[9]提出了一个物流中心位置的两阶段决策模型;Liu Z 等人[10]研究了运输成本不确定和客户需求不确定的供应链网络中的三级最佳位置分配问题;Liao H 等人[11]研究内容是冷链物流配送中心的选址问题;陈红丽等人[12]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;尽管当前已有大量的研究关注物流配送中心选址问题,但仍存在一些不足,特别是在应用于农村电商的背景下。大多数研究仍停留在城市或区域物流层面,忽视了农村市场的特殊性,如基础设施不足、需求波动大等特点。因此,针对农村电商物流配送中心选址的问题,需要在传统优化模型的基础上进行创新。

当前研究中的优化算法主要集中在遗传算法、粒子群算法等经典算法的应用,而免疫算法作为一种新兴的优化方法,在配送中心选址中的应用仍较为有限。免疫算法凭借其全局搜索能力和适应性强的特点,有望为解决复杂约束和非线性问题提供新的思路。

免疫算法的理论研究主要聚焦于其算法机制和数学模型的完善与改进, 在实际应用方面, 免疫算法广泛应用于物流优化、工程设计、模式识别等领域。例如, 在物流配送中心选址中, 免疫算法通过优化成本与效率, 显著提升了物流系统的整体效能[13]。然而, 尽管免疫算法在多个领域表现出良好效果, 其参数敏感性和计算复杂度仍是影响其性能的关键问题, 成为进一步研究的重要方向。

本论文旨在探讨农村电商物流配送中心的选址问题, 分析影响选址的关键因素, 并提出合理的选址策略。

2. 物流配送中心选址模型建立

2.1. 问题描述与模型假设

随着电子商务的蓬勃发展, 农村市场逐渐成为电商行业的重要战场[14]。惠民县, 作为山东省农业大县, 近年来积极推进电商公共服务体系建设, 致力于解决农产品出村进城的首尾一公里问题[15]。然而, 物流配送中心的选址问题成为制约该县电商发展的关键因素之一。本研究旨在通过科学的方法, 为惠民县电商物流配送中心的选址提供最优解, 以降低物流成本、提高配送效率。考虑到惠民县已经建立的县、镇、村三级物流体系[16], 以及通过智能交叉分拣线提高的快递分拣效率, 本研究将评估不同潜在选址对提升物流服务质量和降低成本的影响, 为惠民县电商物流的可持续发展提供决策支持。

物流配送中心选址模型是一种在复杂约束下具有非线性约束的模型[17], 需要满足每个村庄的需求并且将距离成本降到最低。为了便于问题的解决, 提出了以下假设: 1) 配送中心的容量足够大, 能够满足所有村庄的需求; 2) 各配送点与配送中心的距离使用欧几里得距离来计算; 3) 村庄的需求仅由配送中心供应。

2.2. 模型构建

基于以上假设, 为已覆盖的村庄位置选择配送中心, 并将商品分发给各村庄。目标函数是从每个配送中心到村庄的需求和距离乘积的最小值, 目标是最小化总成本:

$$\min F = \sum_{i \in M} \sum_{j \in N} \omega_i d_{ij} c_{ij} \quad (1)$$

s.t.

$$\sum_{j \in N_i} c_{ij} = 1 \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^m \omega_i \leq D_j \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^n h_j = z \quad (4)$$

$$\sum_{j \in N_i} x_j \geq 1 \quad (5)$$

$$c_{ij} \leq h_j, i \in M, j \in N_i \quad (6)$$

$$d_{ij} \leq S \quad (7)$$

$$c_{ij}, h_j, x_j \in \{0, 1\} \quad (8)$$

其中: ω_i 表示每一个村庄的需求量; d_{ij} 表示配送中心到村庄的欧氏距离; c_{ij} 表示村庄与配送中心之间的需求关系, $c_{ij}=1$, 则第 j 个配送中心为村庄 i 服务, 否则 $c_{ij}=0$; h_j 表示配送中心的建设数量; D_j 为配

送中心的容量; x_j 表示配送中心的选址变量, 若 $x_j = 1$, 则表示在 j 处建设配送中心, 否则 $x_j = 0$ 。

在这个模型中, 约束(2)表示每一个村庄只能有一个配送中心服务; 约束(3)表示配送中心可以满足所有村庄的配送需求; 约束(4)表示所建配送中心数为 z ; 约束(5)表示每个村庄都在至少一个配送中心的服务范围内; 约束(6)表示只有配送中心才能为村庄提供服务; 约束(7)表示只有当配送中心与村庄的距离小于等于 S 时, 配送中心才会为该村庄提供服务; 约束(8)为决策变量。

3. 免疫算法

免疫算法[18]是一种通过模拟生物免疫系统的抗原识别、抗体生成、克隆选择等机制来解决优化问题的算法。免疫优化算法具有强大的全局搜索能力, 能有效避免局部最优, 对于物流配送中心选址等多模式问题尤为适用。因此, 本文选用免疫算法解决选址问题, 其流程如图 1 所示。

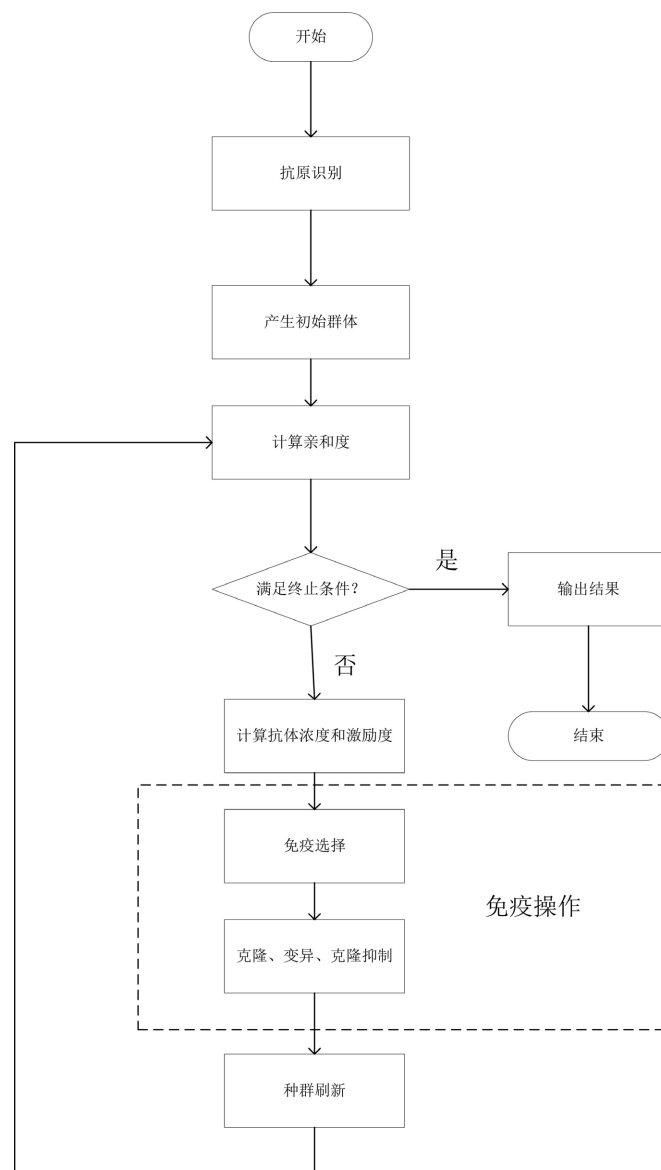


Figure 1. Immunization algorithm flowchart

图 1. 免疫算法流程图

3.1. 产生初始抗体群

产生初始抗体群是免疫算法的第一步, 它涉及随机生成一组潜在解, 若产生 n 个编码长度为 L 的抗体, 即代表选择了 L 个备选点作为物流中心。

3.2. 亲和度计算

亲和度是基于解的质量(目标函数值)和解的多样性(个体间相似度)来计算的。在本文中采用取倒数的方式:

$$A_v = \frac{1}{F} \quad (9)$$

其中 F 是个体对应的目标函数值。这意味着亲和度与目标函数值成反比, 目标函数值越小, 亲和度越高。

3.3. 抗体浓度计算

$$C_v = \frac{\sum_{j=1}^N S_{v,j} / \text{if } S_{v,j} > T}{N} \quad (10)$$

其中, T 是一个预先设定的阈值, 用于确定个体间的相似度是否足够高。

3.4. 期望繁殖率计算

$$P = \alpha \frac{A_v}{\sum A_v} + (1 - \alpha) \frac{C_v}{\sum C_v} \quad (11)$$

其中, α 是激励度系数, 用于平衡抗体 - 抗原亲和度和抗体浓度对期望繁殖率的影响。

3.5. 免疫操作

免疫操作主要包括选择优秀个体进行克隆, 以及通过交叉和变异操作产生新的抗体种群, 以探索解空间并保持种群多样性。这一过程模拟了生物免疫系统中的自然选择和遗传变异, 旨在进化出更适应环境的抗体。

4. 仿真分析

4.1. 数据来源

为了验证本文提出的模型, 使用实际数据验证其有效性。选择 20 个物流节点, 它们被定义为 1~20, 坐标位置是从高德地图拾取的, 为了方便运算, 我们横纵坐标分别取小数点后四位和后三位, 还选取了这些区域节点的商品流通量, 每个区域节点的流通量和坐标位置如表 1 所示。

Table 1. Coordinate location map

表 1. 坐标位置图

序号	X	Y	需求/吨	序号	X	Y	需求/吨
1	6052	269	20	11	4749	341	60
2	4982	231	90	12	7668	302	40
3	5496	190	90	13	5250	494	40
4	5922	365	60	14	5595	533	40
5	4892	417	70	15	5516	472	20

续表

6	3893	451	70	16	4518	239	80
7	6349	433	40	17	5989	268	90
8	7338	514	90	18	7638	345	70
9	6872	307	90	19	6626	276	100
10	7369	339	70	20	5934	245	50

在距离计算方面, 本研究采用欧几里得距离[19]作为配送中心与村庄之间的距离测算方式, 公式为

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (12)$$

本文研究的问题是从 20 个物流节点中选择 3 个物流配送中心, 然后将剩余的 17 个物流节点分配给 3 个物流配送中心。物流中心的选择应满足上述章节中描述的约束条件, 并最大限度地降低方案的总成本。

4.2. 选址优化结果分析

本文进行了数值实验来验证所提模型和免疫算法在农村电商物流配送中心选址问题中的有效性。实验平台采用 Intel Core i7 CPU, 内存为 16GB, 六核处理器, 运行 Windows 11 64 位操作系统。实验使用 2019b 版 Matlab 进行模型和算法的求解。村庄节点之间的距离基于欧几里得公式计算得出, 配送中心的最大服务能力为 10,000 吨。各村庄的物流需求量在 20~100 吨之间随机分布。免疫算法参数设置为: 种群数量 $n = 50$, 记忆库容量为 10, 最大迭代次数为 100 次, 多样性评价参数 0.95, 通过多次实验和迭代优化, 最终得到了配送中心的选址方案和覆盖范围, 选址方案如表 2 和图 2 所示, 适应度的变化趋势如图 3 所示。从图 2 可以看出, 配送中心数量为 3, 分别覆盖惠民县西北、东南和中心区域。各配送中心的服务区域如下:

配送中心 1 (西北): 覆盖节点 5、6、11、16, 总需求量为 280 吨。

配送中心 2 (东南): 覆盖节点 1、2、3、4、7、13、14、15、17、20, 总需求量为 540 吨。

配送中心 3 (中心): 覆盖节点 8、9、10、12、18、19, 总需求量为 460 吨。

Table 2. Site selection program
表 2. 选址方案

配送中心序号	需求点序号
6	5、6、11、16
20	1、2、3、4、7、13、14、15、17、20
9	8、9、10、12、18、19

在实验中, 当迭代到第 45 次时, 平均适应度值保持稳定。由图 3 可以看出, 适应度值在前 30 次迭代中迅速下降, 说明算法在初期具有较强的全局搜索能力。

实验数据进一步验证了该算法的实际效果。以配送中心总服务成本为衡量指标, 实验结果表明, 新建配送中心后, 单吨公里的平均成本由 0.15 元下降到 0.09 元, 总成本节约了约 40%。此外, 配送时间显著缩短, 平均配送时效由 48 小时减少至 24 小时, 大幅提升了物流服务效率。

为了验证免疫算法的有效性, 将其与遗传算法进行对比, 从图 4 中可以看出部分客户点的分配路径较长, 中心布局略显集中, 说明遗传算法在全局搜索和分配均衡性上略逊于免疫算法; 图 5 中最优解在前几代迅速下降后, 后续变化较小, 容易出现早熟收敛, 后期改进空间有限, 说明免疫算法在多样性维护和全局搜索方面更佳。

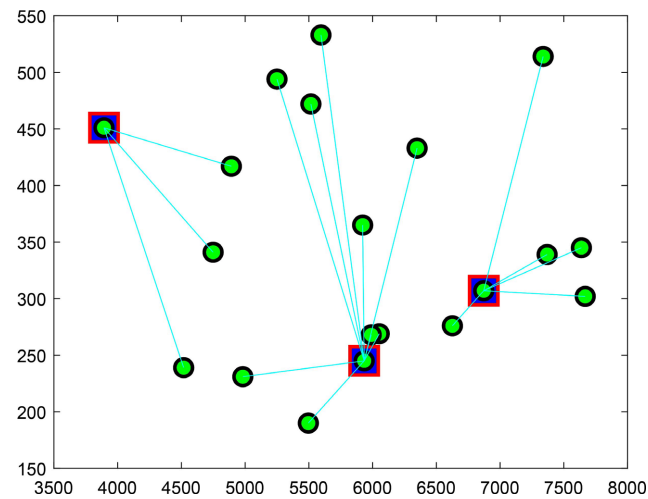


Figure 2. Site map
图 2. 选址图

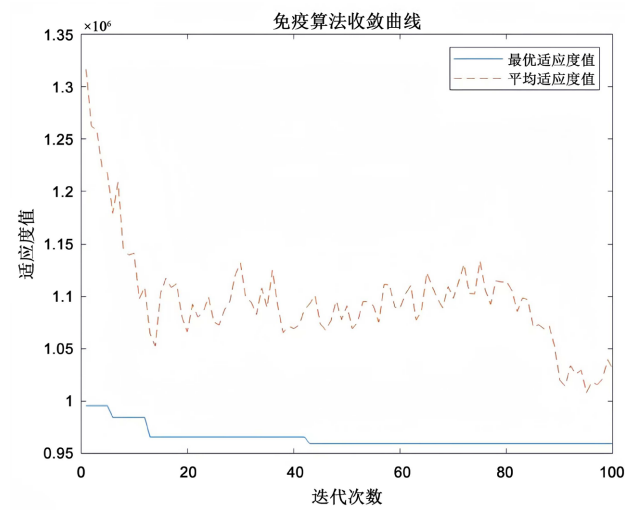


Figure 3. Convergence curve
图 3. 收敛曲线

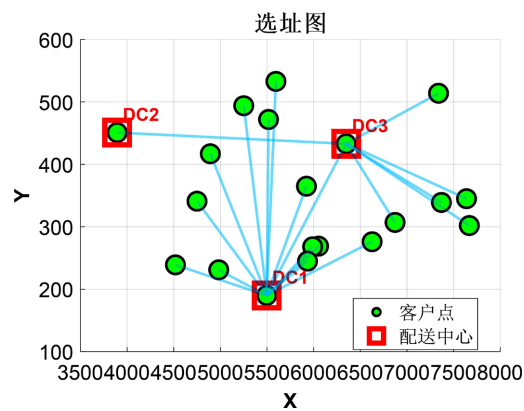


Figure 4. Genetic algorithm location selection map
图 4. 遗传算法选址图

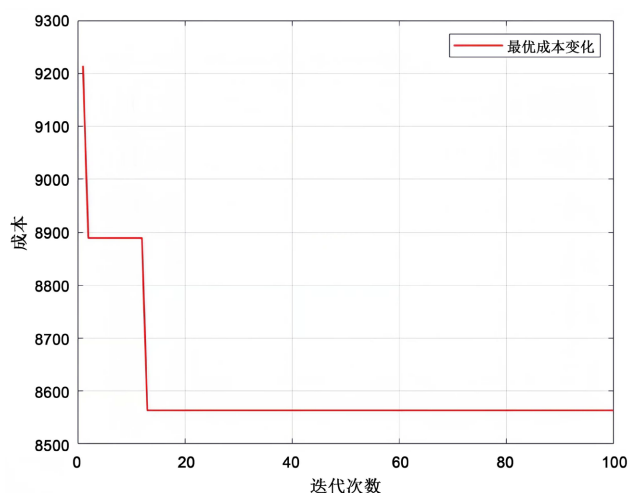


Figure 5. Genetic algorithm iteration diagram

图 5. 遗传算法迭代图

从图像和实验结果可以看出, 免疫算法在配送中心选址问题上表现出更强的全局搜索能力和更快的收敛速度。其收敛曲线下降迅速且最终趋于平稳, 说明算法能够有效跳出局部最优, 获得更优的全局解。选址图显示, 免疫算法分配路径更均衡, 中心布局更合理, 优化效果更佳。相比之下, 遗传算法容易出现早熟收敛, 后期改进空间有限, 最终解的质量和优化幅度略逊于免疫算法。因此, 免疫算法在解决大规模、复杂选址优化问题时具有明显优势, 能够显著提升物流系统的整体效率和服务水平。

5. 结语

综上所述, 本文的研究为解决农村电商物流配送中心选址问题提供了一种有效的理论与实践方法。随着农村电商和物流体系的不断发展, 相关研究将在优化县域物流网络、推动农村经济转型和提升农村电商竞争力方面发挥越来越重要的作用。然而, 免疫算法在此问题上的表现仍需进一步验证和优化。未来的研究可以考虑与其他常用优化算法进行对比分析, 以便深入了解不同算法在解决配送中心选址问题时的性能差异。通过比较不同算法的求解精度、计算效率和适应性, 可以为实际应用提供更加全面的优化建议; 研究未充分考虑动态需求变化和季节性波动的因素, 这也是未来研究的一个重要方向。

参考文献

- [1] 杨波, 梁樑, 唐启鹤. 物流配送中心选址的随机数学模型[J]. 中国管理科学, 2002(5): 58-62.
- [2] 吴坚, 史忠科. 基于遗传算法的配送中心选址问题[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2004(6): 71-74.
- [3] 刘必争, 毛超. 电子商务下的配送中心选址问题及其优化[J]. 系统工程, 2008, 26(10): 17-21.
- [4] Li, Y., Liu, X. and Chen, Y. (2011) Selection of Logistics Center Location Using Axiomatic Fuzzy Set and TOPSIS Methodology in Logistics Management. *Expert Systems with Applications*, **38**, 7901-7908. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.12.161>
- [5] 孟军, 高佳慧. 基于改进飞蛾优化算法的农业物流配送中心选址策略研究[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(4): 207-214.
- [6] 甘卫华, 刘郑, 苏雷. 考虑碳排放和时间约束的 O2O 零售企业配送中心选址优化[J]. 生态经济, 2020, 36(11): 32-37.
- [7] 张志霞, 李朋璋. 改进 HHO 算法在易逝品配送中心选址中的应用[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2024, 21(4): 91-98.
- [8] Cui, H., Chen, X., Guo, M., Jiao, Y., Cao, J. and Qiu, J. (2023) A Distribution Center Location Optimization Model Based on Minimizing Operating Costs under Uncertain Demand with Logistics Node Capacity Scalability. *Physica A*:

-
- Statistical Mechanics and Its Applications*, **610**, Article ID: 128392. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2022.128392>
- [9] Yazdani, M., Chatterjee, P., Pamucar, D. and Chakraborty, S. (2020) Development of an Integrated Decision Making Model for Location Selection of Logistics Centers in the Spanish Autonomous Communities. *Expert Systems with Applications*, **148**, Article ID: 113208. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.113208>
 - [10] Liu, Z., Wu, Z., Ji, Y., Qu, S. and Raza, H. (2021) Two-Stage Distributionally Robust Mixed-Integer Optimization Model for Three-Level Location-Allocation Problems under Uncertain Environment. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, **572**, Article ID: 125872. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2021.125872>
 - [11] Liao, H., Qin, R., Wu, D., Yazdani, M. and Zavadskas, E.K. (2020) Pythagorean Fuzzy Combined Compromise Solution Method Integrating the Cumulative Prospect Theory and Combined Weights for Cold Chain Logistics Distribution Center Selection. *International Journal of Intelligent Systems*, **35**, 2009-2031. <https://doi.org/10.1002/int.22281>
 - [12] 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.
 - [13] Zou, Z., Yang, W., Sheng, S.Y. and Yan, X. (2024) Research on the Location Selection Problem of Electric Bicycle Battery Exchange Cabinets Based on an Improved Immune Algorithm. *Sustainability*, **16**, Article No. 8394. <https://doi.org/10.3390/su16198394>
 - [14] 汤金蕾. 乡村振兴战略背景下农村电子商务创新应用模式[J]. 中国高新科技, 2019(24): 126-128.
 - [15] 方好. 打通农产品“出村进城”路[N]. 工商导报, 2024-07-11(13).
 - [16] 刘利猛. “电子商务进农村”示范县之县、乡、村三级农村物流体系建设探讨[J]. 怀化学院学报, 2015, 34(10): 31-33.
 - [17] 胡立和, 杨安妮, 宾厚. 农村冷链物流配送中心选址研究[J]. 技术与市场, 2024, 31(7): 165-167.
 - [18] 周磊, 李前鹏, 李法朝. 考虑时间满意度的应急物资储备库选址模型与算法[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(3): 188-194.
 - [19] 李川, 刘洲洲, 李美蓉. 基于 K-means 物流配送中心选址模型[J]. 计算机与数字工程, 2024, 52(9): 2810-2813+2830.