

# 基于多维度分析的电商物流包裹运作效率提升策略研究

张晓亮, 叶晴晴

南京信息工程大学数学与统计学院, 江苏 南京

收稿日期: 2023年10月19日; 录用日期: 2023年12月8日; 发布日期: 2023年12月18日

## 摘要

随着互联网技术的迅速发展和电子商务的蓬勃兴起, 新时代的电商物流包裹问题愈发突显其重要性。物流枢纽城市作为物流网络的重要组成部分, 其作为物流网络中的关键节点, 承担着货物流转、配送和集散的重要功能。基于熵权-TOPSIS法构建物流枢纽城市评价体系, 给出4个关键指标, 20个测度指标, 多角度的考虑一个城市作为物流中心枢纽所应具备的一个能力要求。在突发情况下, 制定科学有效的应急策略, 可以减轻突发事件对物流枢纽城市的冲击, 同时降低物流网络中断的风险。基于线性规划的数学模型, 使得所有包裹尽可能正常流转, 并保持各条线路的工作负荷尽可能均衡, 模型求解上, 使用了模拟退火算法这一启发式优化算法, 其在求解复杂的多目标规划问题上具有显著优势。最后本文针对物流枢纽城市、应急货物分流、消费者的快递需求与快递货物量预测四个方面, 探讨了创新之处与不足并分别提出了些许相关建议。

## 关键词

电商物流包裹, 熵权-TOPSIS法, 应急货物分流方案

# Research on Strategies for Improving the Efficiency of E-Commerce Logistics Package Operations Based on Multidimensional Analysis

Xiaoliang Zhang, Qingqing Ye

School of Mathematics and Statistics, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing Jiangsu

Received: Oct. 19<sup>th</sup>, 2023; accepted: Dec. 8<sup>th</sup>, 2023; published: Dec. 18<sup>th</sup>, 2023

文章引用: 张晓亮, 叶晴晴. 基于多维度分析的电商物流包裹运作效率提升策略研究[J]. 运筹与模糊学, 2023, 13(6): 6735-6749. DOI: 10.12677/orf.2023.136664

## Abstract

With the rapid development of Internet technology and the booming rise of e-commerce, the problem of e-commerce logistics parcels in the new era increasingly highlights its importance. As an important part of logistics network, logistics hub city, as a key node in the logistics network, undertakes the important functions of goods flow, distribution and distribution. Based on the entropy weight-TOPSIS method to construct the evaluation system of logistics hub city, it gives 4 key indicators, and 20 measurement indicators, and considers a city as a logistics center hub from multiple perspectives to have a capacity requirement. In the case of emergencies, the development of scientific and effective emergency response strategies can reduce the impact of emergencies on the logistics hub city, while reducing the risk of interruption of the logistics network. Based on the mathematical model of linear planning, all packages are made to flow as normally as possible and the workload of each line is kept as balanced as possible, and the heuristic optimization algorithm of simulated annealing algorithm is used for model solving, which has a significant advantage in solving complex multi-objective planning problems. Finally, this paper for the logistics hub city, emergency cargo diversion, consumer demand for express delivery and express cargo volume forecasting four aspects, explored innovations and shortcomings and provided some relevant suggestions separately.

## Keywords

E-Commerce Logistics Parcels, Entropy Weight-TOPSIS Method, Emergency Cargo Diversion Plan

Copyright © 2023 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

### 1.1. 研究背景与意义

随着互联网技术的迅速发展和电子商务的蓬勃兴起,新时代的电商物流包裹问题愈发突显其重要性。电商物流包裹不仅是电子商务的重要组成部分,更是商品从仓库到消费者手中的关键环节,其运作效率和质量直接关系到电商平台的竞争力和消费者的购物体验。

首先,电商物流包裹的规模和复杂性呈现出爆发式增长。随着互联网技术的普及和电子商务市场的扩大,越来越多的消费者选择在线购物,导致电商物流包裹的数量不断增加。大量的包裹需要快速准确地分拣、配送,给物流系统带来了巨大的压力和挑战。其次,电商物流包裹的时效性要求日益提高。现代消费者对快速的配送服务有着强烈的期待,他们希望能够在最短的时间内收到所购商品。因此,电商物流包裹需要在时间紧迫的情况下实现高效的运输和配送,确保商品及时到达消费者手中。另外,电商物流包裹的运作涉及到多个环节和多个参与方,如供应商、仓储中心、物流公司等,各个环节之间的协同与配合以及选择合适的物流模式和优化配送路径显得尤为重要。物流枢纽城市作为物流网络的重要组成部分,扮演着关键角色,其作为物流网络中的关键节点,承担着货物流转、配送和集散的重要功能。高效的物流枢纽城市能够促进产业链的畅通,提高供应链的效率,为国民经济的发展提供有力支撑。在突发情况下,线路停运、交通中断或设施损坏等问题将阻碍货物的顺利流动,导致物流网络的中断和延误。这对于物流网络的各个环节都会产生严重的影响,包括生产、库存管理、销售和客户满意度等方面。

货物的延误可能导致物流网络断裂、订单取消、客户投诉等问题, 给企业造成重大损失。通过制定科学有效的应急策略, 可以减轻突发事件对物流枢纽城市的冲击, 降低物流网络中断的风险。

## 1.2. 研究现状概述

目前对于电商物流包裹的分析研究收到了许多学者的关注, 王明严[1]等人通过专家打分法进行分配加权, 构建出数字经济下的海南绿色物流评价指标体系, 运用 YAHHP 软件及层次分析法进行构建评价体系模型。最后在评价结果的基础上提出相应的政策建议。王建树[2]等人构建了一套烟草商业系统精益物流评价指标体系, 综合运用层次分析法、熵值法、基于 TOPSIS 的灰色关联分析评价模型, 结合行业分层分类对标管理规范, 对 H 省 17 个地市烟草物流中心进行分类评价。周静[3]从客户满意度、企业效益等五个角度对电子商务企业物流运营效果进行评价, 并建立了综合评价模型, 应用层次分析法确定指标权重, 使用模糊综合评价法对电子商务企业物流运营的效果进行综合评价。李虹[4]以辽宁省的大连、营口港口型物流枢纽承载城市为对象, 通过确立相关指标体系, 运用主因子分析的方法在全国范围内进行总体评价。荣文芋[5]等人首先使用三次指数平滑法预测城市的快递业务总量, 再使用主成分分析法和贸易引力模型确定城市快递业务能力综合得分和城市间快递吸引强度, 最后通过构建组合预测模型, 得到 2025 年各城市间的快递业务量。梁彤玥[6]采用灰色关联分析法确定关联度显著指标, 并提出了一种基于鲸鱼优化后的 BP 神经网络组合模型(WOA-BP), 来预测快递需求量, 并得到了 WOA-BP 模型比传统的 BP 神经网络有更好预测效果的结论。赵桂红[7]等人通过采用灰色 GM (1, 1) 预测、多项式趋势外推预测、指数平滑预测及 Shapley 值分配权重的组合预测模型对快递业务量进行预测, 证实了基于 Shapley 值法的组合预测模型的预测精度要高于三种单一预测模型。曾宁[8]采用多种预测方法对快递市场需求进行预测比选, 并结合因子分析法和贸易引力模型对城市货流吸引强度进行分析, 从而预测城市间 OD 货流量。

谭印[9]等人考虑多影响因素下的应急物流配送路段相对长度, 基于 ANP 理论构建关联反馈结构模型, 计算多影响因素的权重系数, 基于计算结果获取应急物流配送路径当量长度, 以此建立模型, 制定合理的配送方案, 实现多目标应急物流双向配送。滕红军[10]等人基于地震灾害风险评价数据, 通过 ArcGIS 平台形成 Voronoi 图, 在考虑需求权重的情况下, 构建应急物流配送中心优化选址模型, 并通过 LINGO 软件进行求解。马向国[11]等人采用 SLP 方法对各功能区的布局进行规划, 并采用 Flexsim 软件对应急物流配送中心出入库系统进行仿真与优化, 实现应急物资配送中心的运营合理化。

## 1.3. 研究框架

研究框架示意图, 见图 1。

## 2. 数据说明与建模方法

### 2.1. 数据说明

立足于我国网络购物热潮的背景下, 我们可以观察到近期各大建模大赛的赛题都或多或少地涉及到电商物流网络包裹运输问题。建模大赛选择电商物流网络包裹运输问题作为赛题, 是为了推动相关研究和解决方案的发展, 这充分反映了电商物流网络包裹问题在实际中的重要性和热度。因此本文选取了 2023 年第二十届五一数学建模竞赛 B 题与 2023 年第十三届 MathorCup 高校数学建模挑战赛 C 题的数据。

数据集 A 为某快递公司记录的 2018 年 4 月 19 日~2019 年 4 月 17 日的站点城市之间(发货城市-收货城市)的快递运输数据, 其中城市代码用 A~Y 表示, 并剔除了 6 月、11 月、12 月的数据。

数据集 B 为某物流网络在 2021-01-01 至 2022-12-31 期间每天不同物流场地之间流转的货量数据, 该物流网络有 81 个物流场地, 1049 条线路。其中线路是有方向的, 比如线路 DC1 → DC2 和线路 DC2 → DC1

被认为是两条线路。假设每个物流场地的处理能力和每条线路的运输能力上限均为其历史货量最大值。

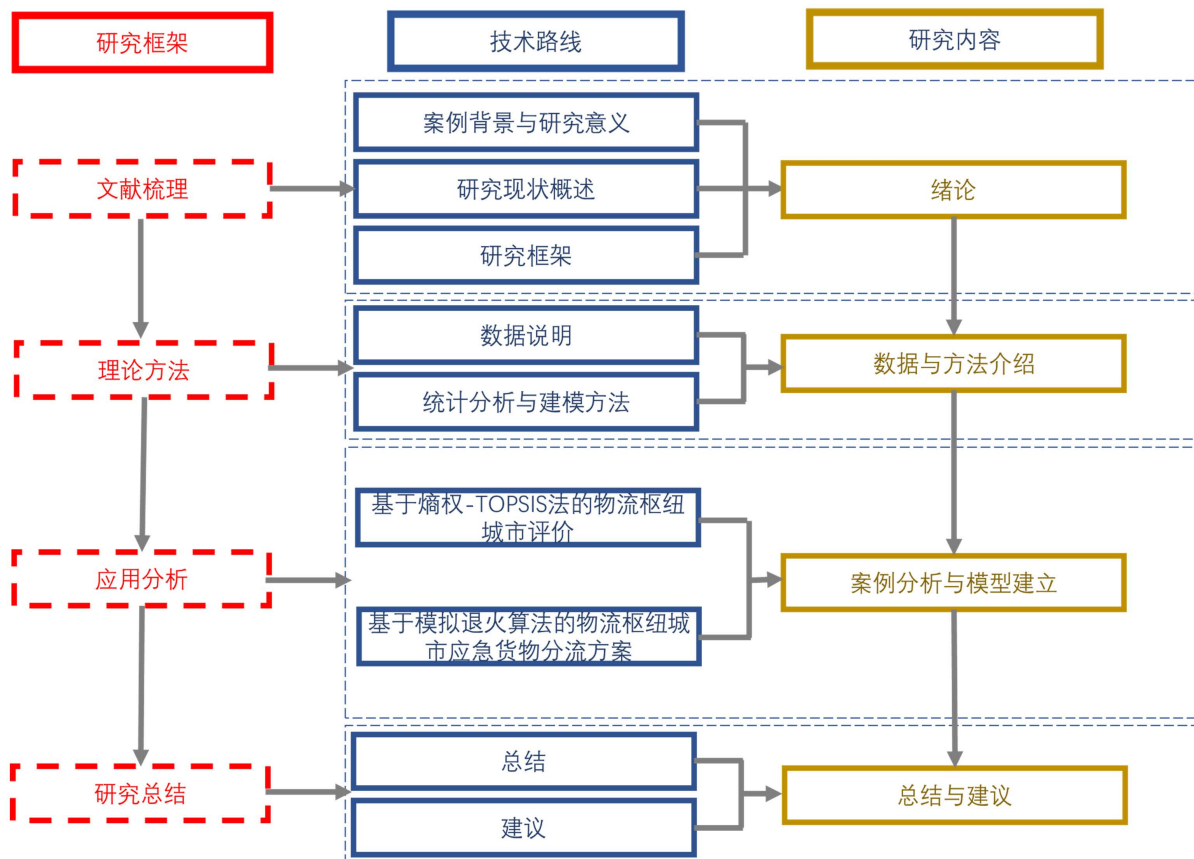


Figure 1. Research framework diagram  
图 1. 研究框架示意图

数据集 C 为上述同一快递公司记录的 2022 年 7 月 1 日~2023 年 4 月 27 日的站点城市之间(发货城市-收货城市)的快递运输数据, 其中城市代码用 A~Y 表示。

## 2.2. 熵权-TOPSIS 法

在 1984 年, 美国著名数学家 C.E. Shannon 提出了信息熵的概念, 这一创新性的概念为信息定量分析提供了有效的解决方案。通过计算每个指标的信息熵, 可以全面且准确地反映原始数据的信息状况, 具备较高的真实性和客观性。一般情况下, 指标所包含的信息量与其信息熵呈反比关系。当指标的信息熵较小时, 其在综合评价中所占的比例较大, 即熵权较高。相反, 当指标的信息熵较大时, 其在综合评价中所占的比例较小, 即熵权较低。TOPSIS 模型是由著名学者 C.L.Hwang 和 K.Yoon 提出的, 经过多年的实践验证, 已在经济、工程、医疗等多个领域展示出良好的应用效果, 并发展得相当成熟。通过应用 TOPSIS 模型, 我们可以评估各个物流枢纽城市相对于正理想解的距离, 从而判断它们的综合评价和相对优劣性。这有助于我们了解不同物流枢纽城市的中转能力和物流负载能力, 为物流网络规划和决策提供参考依据。建模步骤如下:

- ① 建立决策矩阵

$$X = (x_{ij})_{m \times n} \quad (1)$$

其中  $x_{ij}$  表示第  $i$  个样本的第  $j$  个指标值,  $i=1,2,\dots,m, j=1,2,\dots,n$ .

② 初始数据标准化处理。因为不同的评价指标可能有不同的计量单位, 所以需要对原始数据进行标准化处理。为了判断各组数据的类型, 并把各指标统一化进行研究, 我们需要对每组数据进行规范化处理, 规范化处理的公式如下:

$$y_{ij} = \frac{\max x_j - x_{ij}}{\max x_j - \min x_j} \text{ (逆向指标)}, \tag{2}$$

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - \min x_j}{\max x_j - \min x_j} \text{ (正向指标)}. \tag{3}$$

逆向指标表示值越小越好, 正向指标表示值越大越好。

③ 计算第  $i$  个样本的指标值  $P_{ij}$  在第  $j$  项评价指标下所占的特征比值:

$$p_{ij} = \frac{y_{ij}}{\sum_{i=1}^m y_{ij}}. \tag{4}$$

④ 计算各指标熵值及变异系数, 公式分别如下:

$$e_j = -\frac{1}{\ln(m)} \sum_{i=1}^m p_{ij} \cdot \ln(p_{ij}) \text{ (其中 } e_j \geq 0), \tag{5}$$

$$g_j = 1 - e_j.$$

⑤ 计算各指标的权重:

$$w_j = \frac{g_j}{\sum_{j=1}^n g_j} \text{ (其中 } \sum_{j=1}^n w_j = 1). \tag{6}$$

⑥ 构建加权规范矩阵:

$$Z = (z_{ij})_{m \times n} = (w_j)_{1 \times n} \cdot (y_{ij})_{m \times n}. \tag{7}$$

⑦ 计算最优解和最劣解。若第  $j$  项指标为正向指标, 最大值为  $z_j^+$ , 最小值为  $z_j^-$ , 则最优解矩阵为:  $z^+ = (z_1^+, z_2^+, \dots, z_n^+)$ , 最劣解矩阵为:  $z^- = (z_1^-, z_2^-, \dots, z_n^-)$ .

⑧ 计算各样本与最优解、最劣解的距离。一般采用欧式距离计算第  $i$  个评价对象向量到最优解、最劣解的距离, 计算公式为:

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (z_{ij} - z_j^+)^2} \text{ (其中 } i=1,2,\dots,m), \tag{8}$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (z_{ij} - z_j^-)^2} \text{ (其中 } i=1,2,\dots,m).$$

⑨ 计算各样本与最优解及最劣解的相对贴近度  $D_i$ ,

$$D_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \text{ (其中 } i=1,2,\dots,m). \tag{9}$$

按照各样本到相对贴近度数值的大小进行排序。相对贴近度  $D_i \in [0,1]$ , 若  $D_i$  的值越大, 则意味着样本离最劣解的距离就越远, 即越接近最优解, 因此这个样本越优。当  $D_i$  为 0 时, 即样本的各项指标均达到最劣值, 处于负理想状态; 而当  $D_i$  值为 1 时, 即样本的各项指标均达到最优值, 处于正理想状态。



### 3. 案例分析

#### 3.1. 基于熵权-TOPSIS 法的物流枢纽城市评价

网络购物作为一种重要的消费方式, 带着快递服务需求飞速增长, 为我国经济发展做出了重要贡献。准确地预测快递运输需求数量对于快递公司布局仓库站点、节约存储成本、规划运输路线等具有重要的意义。本文想要研究物流站点城市(样本给出的 24 个城市)的重要程度。简而言之, 就是对物流枢纽城市进行重要性评价, 因此, 我们需要借助多维度的测度指标, 建立一个综合评价模型。本文构建了 4 个关键指标, 即收货量、发货量、变化趋势、相关性, 以及 20 个测度指标, 如表 1 所示。

**Table 1.** Logistics evaluation index system

**表 1.** 物流评价指标体系

	关键指标	综合评估	编号
物流枢纽城市评价体系	收货量	收货总量	A1
		日均收货量	A2
		最大收货量	A3
		最小收货量	A4
	发货量	发货总量	B1
		平均发货量	B2
		最大发货量	B3
		最小发货量	B4
	变化趋势	日发货最大变化量	C1
		日发货最小变化量	C2
		日发货平均变化量	C3
		日发货变化量标准差	C4
		日收货最大变化量	C5
		日收货最小变化量	C6
		日收货平均变化量	C7
		日收货变化量标准差	C8
	相关性	日上游发货城市数	D1
		日下游发货城市数	D2
		日最高上游城市数	D3
		日最高下游城市数	D4

为了对物流枢纽城市进行评价, 在表 1 中, 我们列出了 20 个测度指标来做综合评估。令  $x_{ij}$  表示第  $t$  天从第  $i$  个城市到第  $j$  个城市的快递包裹量。接下来, 我们给出部分测度指标的定义以及数学表达式。

(1) 平均收货量: 一个城市的平均收货量表示这个城市在所有日期中, 收取快递数量的平均值。对于城市  $j$ , 我们定义他的平均收货量为

$$\text{shouhuo average}_j = \text{average} \sum_i x_{ij}, \tag{10}$$

(2) 最大收货量: 一个城市的最大收货量表示这个城市在所有日期中, 收取快递数量的最大值。对于城市  $j$ , 我们定义他的最大收货量为

$$\text{shouhuo max}_j = \max_t \sum_i x_{ijt}, \quad (11)$$

(3) 最小收货量: 一个城市的最小收货量表示这个城市在所有日期中, 收取快递数量的最小值。对于城市  $j$ , 我们定义他的最小收货量为

$$\text{shouhuo min}_j = \min_t \sum_i x_{ijt}, \quad (12)$$

(4) 平均发货量: 一个城市的平均发货量表示这个城市在所有日期中, 发出快递数量的平均值。对于城市  $i$ , 我们定义他的平均发货量为

$$\text{fahuo average}_i = \text{average}_t \sum_j x_{ijt}, \quad (13)$$

(5) 最大发货量: 一个城市的最大发货量表示这个城市在所有日期中, 发出快递数量的最大值。对于城市  $i$ , 我们定义他的最大发货量为

$$\text{fahuo max}_i = \max_t \sum_j x_{ijt}, \quad (14)$$

(6) 最小发货量: 一个城市的最小发货量表示这个城市在所有日期中, 发出快递数量的最小值。对于城市  $i$ , 我们定义他的最小发货量为

$$\text{fahuo min}_i = \min_t \sum_j x_{ijt}, \quad (15)$$

(7) 日发货最大变化量: 我们定义在相邻的两天, 快递发货数量的差值为日发货变化量。那么有

$$\text{fahuo chazhi max}_i = \max_t \left| \sum_j x_{ij(t+1)} - \sum_j x_{ijt} \right|, \quad (16)$$

固定一个城市  $i$ , 他第  $t$  天的总发货量为  $\sum_j x_{ijt}$ , 将相邻两天的总发货量作差再取绝对值, 得到任意相邻两天的差值为  $\left| \sum_j x_{ij(t+1)} - \sum_j x_{ijt} \right|$ , 然后再针对所有的天数取  $\max$ , 就得到了日发货最大变化量。

(8) 日发货平均变化量: 我们定义在相邻的两天, 快递发货数量的差值为日发货变化量。那么有

$$\text{fahuo chazhi average}_i = \text{average}_t \left| \sum_j x_{ij(t+1)} - \sum_j x_{ijt} \right|, \quad (17)$$

(9) 日收货最大变化量: 我们定义在相邻的两天, 快递收货数量的差值为日收货变化量。那么有

$$\text{shouhuo chazhi max}_j = \max_t \left| \sum_i x_{ij(t+1)} - \sum_i x_{ijt} \right|, \quad (18)$$

(10) 日收货平均变化量: 我们定义在相邻的两天, 快递收货数量的差值为日收货变化量。那么有

$$\text{shouhuo chazhi average}_j = \text{average}_t \left| \sum_i x_{ij(t+1)} - \sum_i x_{ijt} \right|, \quad (19)$$

(11) 日最大上游城市数: 我们定义城市  $j$  在第  $t$  天的上游数量为: 在该天所有给城市  $j$  发快递的城市的数量。那么有

$$\text{shangyou max}_j = \max_t \sum_i \text{any}(x_{ijt}), \tag{20}$$

其中, 对于固定的城市  $j$ , 固定的日期  $t$ , 我们使用  $\text{any}(x_{ijt})$ , 判断对于第  $i$  个城市是否向第  $j$  个城市运输快递。如果运输, 那么  $\text{any}(x_{ijt})=1$ , 如果不运输, 那么  $\text{any}(x_{ijt})=0$ 。因此,  $\sum_i \text{any}(x_{ijt})$  就表示第  $t$  天对第  $j$  个城市运输的所有城市的数量。之后, 再针对所有的日期取  $\max$ , 得到的就是日最大上游城市数。

(12) 日最大下游城市数: 我们定义城市  $i$  在第  $t$  天的上游数量为: 在该天所有城市  $i$  发出快递的到达城市的数量。那么有

$$\text{xiayou max}_i = \max_t \sum_j \text{any}(x_{ijt}), \tag{21}$$

还有一些指标简单给出如下:

收货总量:  $\sum_t x_{ijt}$ , 发货总量:  $\sum_t x_{jit}$ ,

$$\text{日发货最小变化量: fahuochazhi min}_i = \min_t \left| \sum_j x_{ij(t+1)} - \sum_j x_{ijt} \right|, \tag{22}$$

$$\text{日收货最小变化量: shouhuochazhi min}_j = \min_t \left| \sum_i x_{ij(t+1)} - \sum_i x_{ijt} \right|, \tag{23}$$

根据相关物流数据, 我们总共有 4 个关键指标和 20 个测度指标, 其中, 关键指标包括: 收货量、发货量、收货/发货变化量以及相关性, 测度指标包括: 收货总量、发货总量、日发货最大变化量、日最大上游城市数等等。本文基于 24 个城市所有的物流数据, 我们得到如下结果(表 2):

**Table 2.** City index data system table

**表 2.** 城市指标数据体系表

城市	收货总量	日均收货量	单日最大收货量	收货量平均增幅	...	单日最大上游城市数	单日最大下游城市数
A	51,708	63.21271	191	0.477941	...	4	2
B	15,624	236.7273	455	-0.27206	...	1	1
C	13,228	37.68661	59	-0.01838	...	2	4
D	52,401	62.23397	164	0.470588	...	4	4
...	...	...	...	...	...	...	...
V	192,823	145.198	860	2.330882	...	6	6
W	77,336	161.453	550	1.680147	...	3	3
X	84,303	91.5342	455	0.75	...	5	4
Y	41,811	116.7905	576	-0.36029	...	2	3

考虑到不同测度指标数据的计量单位有差别, 如收货总量、收货量平均增幅以及单日最大上游城市数, 他们之间的单位都是不同的, 所以我们要对筛选后的数据进行标准化处理。另外, 为了对正向指标保持正向的同时量纲化, 我们还需对标准化后的数据进行正向化处理。在进行标准化和正向化的处理后, 利用熵权法计算筛选后的各个指标的权重, 我们得到数据如下(表 3):



**Table 3.** The weight and ranking of urban logistics index data  
**表 3.** 城市物流指标数据的权重及排序

测度指标	权重	权重排序
B1	0.1926	1
A1	0.1498	2
C1	0.1283	3
C5	0.1048	4
B3	0.0742	5
...	...	...
B4	0.0009	18
C8	0.0009	18
C4	0.0008	20

然后, 运用 TOPSIS 法计算出城市物流指标体系得分, 见表 4。

**Table 4.** City logistics index system score and ranking  
**表 4.** 城市物流指标体系得分及排名

城市	TOPSIS 得分	排名
A	0.43377379	18
B	0.43918092	16
C	0.4219376	19
D	0.44263704	14
E	0.41606665	22
G	0.56097612	2
H	0.46831969	9
I	0.4427207	13
J	0.49532015	5
K	0.45667553	11
L	0.58063278	1
M	0.44707585	12
N	0.44166284	15
O	0.47709407	8
P	0.4198034	21
Q	0.47728797	7
R	0.46702948	10
S	0.41554521	23
T	0.42089199	20
U	0.43564626	17

Continued

V	0.55264601	3
W	0.48083038	6
X	0.49613581	4
Y	0.40625489	24

由表 3 可以得出城市物流指标体系中各评价指标的权重。在 20 个测度指标中, 发货总量 B1、收货总量 A1、日发货最大变化量 C1、日收货最大变化量 C5、最大发货量 B3 的权重排在了前五位, 分别为 0.1926、0.1498、0.1283、0.1048、0.0742。最小发货量 B4、日收货变化量标准差 C8 以及日发货变化量标准差 C4 的权重排在了后三位, 分别为 0.0009、0.0009、0.0008。因此, 我们得出结论: 发货总量、收货总量、日发货最大变化量以及日收货最大变化量是影响物流站点城市重要程度的关键因素。一个城市如果能够改善这些方面, 城市物流就会愈发发达, 进而带动城市经济的发展。

对上述构建的城市物流指标体系, 我们在此基础上运用了熵权-TOPSIS 评价模型, 对 24 个样本城市进行综合评价, 根据样本城市数据以及表 4 的结果, 我们得出以下结论: 城市 L、G、V、X、J 的 TOPSIS 得分排在了前五位, 分别为 0.58063278、0.56097612、0.55264601、0.49613581、0.49532015。在全国物流网络中扮演着关键角色, 并且成为了物流网络中的关键节点, 相当力量的承担着货物流转、配送和集散的重要功能。城市 B、U、A、C、T 的 TOPSIS 得分排在了末五位, 分别为 0.43918092、0.43564626、0.43377379、0.4219376、0.42089199。由此可以看出, 物流在城市 L、G、V、X、J 是相对比较重要的, 在城市 B、U、A、C、T 相对比较欠缺一些, 但通过 TOPSIS 得分的比较来看, 第一名的得分为 0.58063278, 最后一名的得分为 0.42089199, 两个城市的得分差距仅为 0.15974079, 可以看出两个城市的物流发展差距并不是很明显, 这也说明了, 在物质生活越来越好的条件下, 无论城市之间的差异性, 物流快递一直在快速地发展, 影响着人们的生活质量。

### 3.2. 基于模拟退火算法的物流枢纽城市应急货物分流方案

物流枢纽城市应急货物分流方案的研究背景源于对应急情况下物流系统的韧性和可持续性的需求。在灾难、突发事件或线路停运等情况下, 物流枢纽城市可能面临货物流通的严重挑战。其中, 重点在于运输规划和优化。这方面的研究旨在确定备用线路和运输方式, 调整运输计划和调度, 以最大程度地减少应急情况下货物流通中断的影响。通过应用运输规划和优化技术, 可以提高运输效率、减少成本, 并确保货物能够有效分流到适当的路径和运输工具上。因此, 研究如何有效应对这些情况, 确保货物能够顺利流转, 对于保障供应链的稳定运行和经济发展至关重要。

#### 3.2.1. 方案设计

针对上述问题, 采用线性规划模型来优化货量分配, 并且通过模拟退火算法进行求解, 使得所有包裹尽可能正常流转, 同时减少货量发生变化的线路数, 并保持各条线路的工作负荷尽可能均衡。具体步骤如下(图 2):



Figure 2. Logistics hub city emergency cargo distribution scheme design flow  
图 2. 物流枢纽城市应急货物分流方案设计流程

在将货物分配到其他线路后, 我们希望最小化总货物数量的变化, 即尽量减少分配前后货物总量的差值。为了实现这一目标, 可以将目标函数设定为最小化货物变化的总量, 即:

$$\min \text{total} = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n |x_{ij}^{\text{before}} - x_{ij}^{\text{last}}|. \quad (24)$$

这意味着我们需要在货物分配过程中, 尽可能地平衡各条线路的负荷, 使得原本停运的线路上的货物尽可能地分散到其他可用线路上, 以降低整体货物运输的不稳定性和成本。通过最小化货物变化总量, 我们可以优化货物分配方案, 确保货物运输的连续性和效率。

因此, 在考虑线路停运对网络负荷的影响时, 除了考虑线路的使用频率和最大最小承载量, 还应该关注如何最小化货物变化总量, 以实现货物的平衡分配和稳定流通。这样可以提高整个物流系统的韧性和可持续性, 确保货物能够按时送达目的地。根据目标函数, 我们分别对决策变量进行如下说明: 线路关停前线路  $i$  到线路  $j$  上的货物数量为  $x_{ij}^{\text{before}}$ , 线路关停后线路  $i$  到线路  $j$  上的货物数量为  $x_{ij}^{\text{last}}$ , 线路周转中线路  $i$  到线路  $j$  上的最大包裹量  $c_{ij}$ 。

此外, 目标函数仍有许多的约束条件, 约束条件如下给出:

- 1、所有线路上的货物数量必须满足物流容量限制, 即

$$0 \leq \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n x_{ij}^{\text{last}} \leq c_{ij}, \quad (25)$$

- 2、设关停后 DC5 线路上的货量平均分配到其他线路的比例为  $p$  (分流比例), 则其他线路上的实际包裹量为  $(1-p)x_{DC5} + x_{ij}$ ,

$$(1-p)x_{DC5} + x_{ij} \leq c_{ij}, \quad (26)$$

- 3、每个线路每  $m$  个时间段的货物数量不超过其容量

$$\sum_{t=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n x_{ij}^{\text{last}}(t) \leq \sum_{t=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n c_{ij}(t), \quad t = 1, 2, \dots, m, \quad (27)$$

- 4、DC5 相关线路上的货物数量分配到其他线路上的总量等于 DC5 相关线路上的货物数量:

$$\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n x_{ij}^{\text{before}}(t) = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n x_{ij}^{\text{last}}(t), \quad (28)$$

- 5、所有线路上的货物数量尽可能均衡:

$$\max_{i=1,2,\dots,n} \left( x_{ij}^{\text{last}} - \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n x_{ij}^{\text{last}} / n \right) - \min_{i=1,2,\dots,n} \left( x_{ij}^{\text{last}} - \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n x_{ij}^{\text{last}} / n \right) \leq \sigma, \quad (29)$$

其中,  $\sigma$  表示在允许范围内的最大偏差量。

- 6、每个时间段每个线路的货物数量为非负整数

$$x_{ij}^{\text{last}} \in \mathbb{Z}. \quad (30)$$

### 3.2.2. 问题求解

模拟退火算法(Simulated Annealing)是一种元启发式优化算法, 用于求解复杂的多目标规划问题。它在求解上述模型中具有以下优势:

- 1) 全局搜索能力: 模拟退火算法通过随机搜索的方式, 能够跳出局部最优解, 朝向全局最优解进行探索。它不会过早陷入局部最优解, 而是通过接受一定概率上的劣解, 增加搜索空间, 从而提高找到更优解的概率。

2) 灵活的搜索策略: 模拟退火算法通过设置初始温度和退火速度等参数, 可以在搜索过程中灵活地调整搜索策略。初始温度高和退火速度慢可以增大搜索空间, 有助于跳出局部最优解; 而随着搜索的进行, 温度逐渐降低, 搜索策略逐渐收敛, 使得算法趋向于在最优解附近进行更精细的搜索。

3) 适用于大规模问题: 模拟退火算法对问题的规模没有过多的限制, 适用于处理大规模的多目标规划问题。通过合理的设计和参数调节, 可以在相对较短的时间内找到较好的近似解。

4) 可解释性: 模拟退火算法的搜索过程是可追溯的, 可以记录每次迭代的解决方案和目标函数值。这使得算法的运行过程具有可解释性, 可以分析和理解搜索过程中的变化和优化方向。

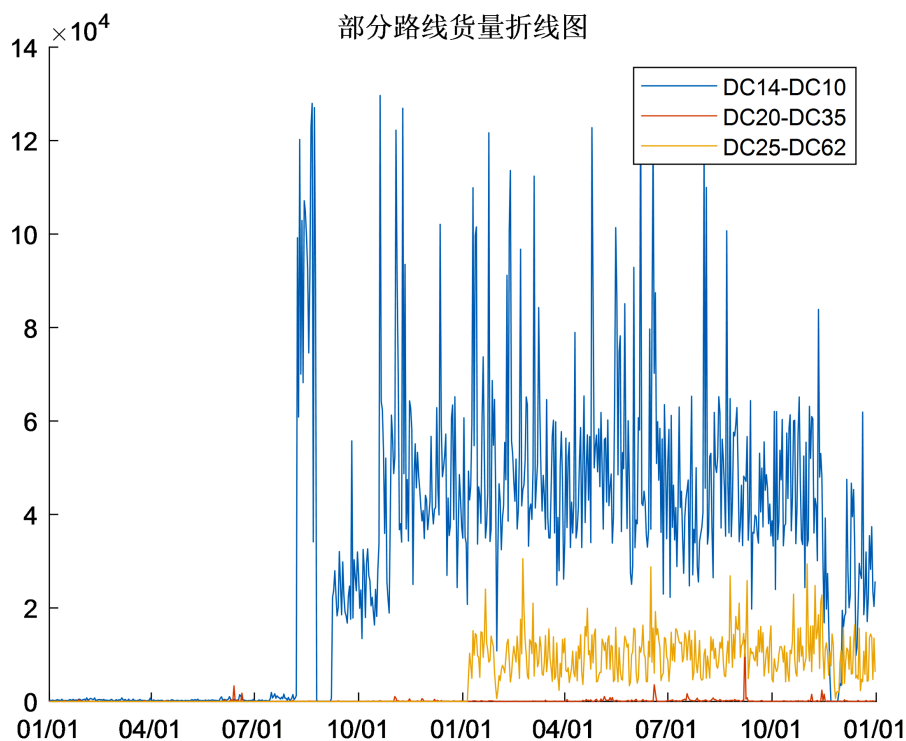
我们给出模拟退火算法求解过程中的参数设置如下表(表 5):

**Table 5.** Simulated annealing algorithm parameter table

**表 5.** 模拟退火算法参数表

参数	参数初始温度	数值冷却系数	稳定误差范围	结束温度	Markov 链的长度
数值	50,000	0.98	0.005	1	500

通过 MATLAB 进行编程求解, 首先得到部分路线货量的变化情况如图 3 所示。



**Figure 3.** Changes in the volume of some routes

**图 3.** 部分路线货量的变化情况

接着, 将两年里的最大值作为容量, 然后一个月的平均是流量, 相除之后是一个月平均利用率, 最后计算出每日每条路线上的货量以及工作负荷:

$$\text{工作负荷}(\%) = \frac{\text{删除DC5后的月平均承载量}}{\text{最大承载量}}. \tag{31}$$

以 2023 年 1 月 1 日为例, 对删除 DC5 节点后, 剩余节点的有向图进行可视化分析, 如图 4 所示。

2023/01/01各节点流量有向图(删去DC5)

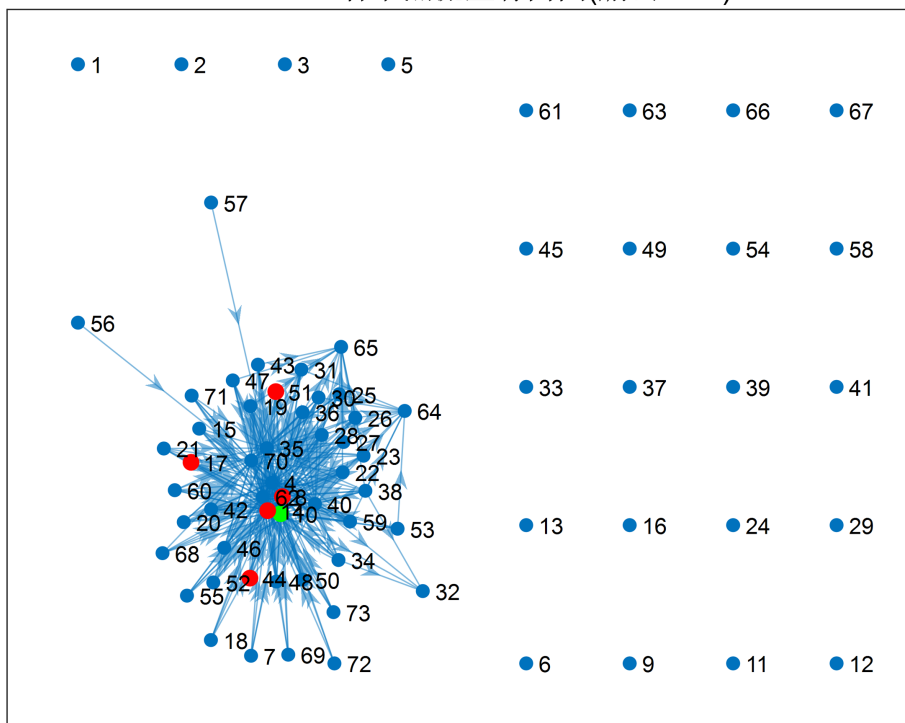


Figure 4. A directed graph of each node on January 1, 2023  
 图 4. 2023 年 1 月 1 日各个节点的有向图

由图 3 可以得出 1 月 1 日各个节点的流向情况：在删除 DC5 节点后，有 24 个节点与其他节点没有连接，也就是会影响这 24 个节点的流向；同时，有 5 个节点已经满负荷了，超出的货量需要另寻连接方式，有节点负荷不足容量的一半。同理分析，我们计算出了 1 月 31 天全部的流转情况，并计算出了剩余或超出的包裹数量以及工作负荷率，正常流转时各条线路的货量和工作负荷情况如下表 6 所示：

Table 6. The amount of goods in normal circulation and the workload  
 表 6. 正常流转的货物数量以及工作负荷

路线	超出/剩余货量(件)	工作负荷(%)
69~8	28,132	100.00%
69~14	4479	100.00%
69~62	5174	100.00%
69~10	10,561	94.86%
23~32	604	57.90%
64~8	1696	54.24%
60~8	21,799	53.17%
60~10	7433	52.20%
27~10	16,133	51.47%
8~14	32,291	51.38%
52~8	3998	50.48%

Continued

26~64	11,493	49.19%
4~23	3519	48.67%
70~4	385	48.46%
38~64	14,273	47.00%
27~8	57,062	46.25%
27~14	15,669	44.31%
59~62	4037	43.62%
30~14	7599	43.62%
10~4	129,442	42.91%

在所有的调整路线中, 均未出现超负荷的情况, 共有 3 条路线的负荷率达到 100%, 分别为: 69 → 8、69 → 14、69 → 62, 其余路线的负荷率小于 100 或为 0, 其中负荷率为 0 的路线占比 66.49%, 平均负荷率为 5.29%。

自此, 我们完成了基于模拟退火算法的物流枢纽城市应急货物分流方案。这个方案通过数学建模和多目标规划方法, 为物流中转城市面临突发情况下的快递运输路线变化提供了解决方案。在处理大规模数据求解的过程中, 我们引入了模拟退火算法这一启发式算法来辅助优化求解, 以获得更为合理的结果。

从数学的角度出发, 考虑线路的使用频率、最大最小承载量及货物量分配的平衡性。通过模拟退火算法的全局搜索和灵活搜索策略, 我们能够有效地找到在应急情况下的最优货物分流方案。我们希望这个方案能够得到进一步的完善和推广, 以实现物流枢纽城市的应急货物分流。通过这样的方案, 我们可以提高物流系统的韧性和可持续性, 确保在突发情况下货物的及时交付, 从而保障供应链的稳定运行。

## 4. 总结分析与展望

### 4.1. 总结分析

熵权-TOPSIS 法在构建物流枢纽城市评价体系方面的创新点在于, 这种客观性决策方式能够消除主观判断的干扰, 从而提供一种全新的、多维度的决策框架, 综合考虑交通、成本、环境等多重关键因素, 使得城市选择的过程更为全面和准确。此外, 该方法还具有一定的灵活性, 即在不同情境下灵活调整权重, 以满足市场的快速变化和应急情况的需要, 这对电商物流包裹领域的实时决策尤为重要。然而, 需要注意的是, 这一方法仍存在不足之处, 其中包括对数据可用性和质量的依赖, 测度指标选择的主观性问题。其解决方式可以通过提升数据可用性和质量, 改进数据收集方法、考虑数据标准化和清洗, 以减少数据的不准确性。为了减少主观性, 可以引入多因子一致性检验或专家咨询来确定权重和选择评价指标。

模拟退火算法在应急货物分流方案中的应用具有深远的创新之处。这一算法的革新性在于它能够模拟金属退火过程的启发式搜索策略, 通过温度逐渐下降的方式, 逐步探索解空间, 从而寻找到全局最优解。在应急情况下, 模拟退火算法的灵活性使得可以在不确定的、紧急的情境中, 快速适应变化, 调整货物的分配, 以确保货物流动的连续性和安全性。然而, 不足之处也值得关注。模拟退火算法的性能高度依赖于参数的选择, 不当的参数可能导致算法陷入局部最优解或过早收敛。此外, 它可能需要大量的计算资源, 尤其在复杂的分流方案中。解决这些问题的方式包括改进参数调整方法, 优化计算流程以减少资源消耗, 以及研究更有效的冷却计划和启动策略, 以提高算法的鲁棒性和效率。这一系列改进措施



将有助于提高模拟退火算法在应急货物分流方案中的实际可行性和性能表现。

## 4.2. 相关建议与展望

在新时代电商物流包裹的研究中,除了本文研究的物流枢纽城市与应急货物分流情形,还有消费者的快递需求与快递货物量预测等方面值得探讨。首先需要加强物流枢纽城市的规划和建设,优化物流网络布局,提高物流运输效率和覆盖范围。其次是引入智能化技术和设备,提升物流枢纽的自动化程度,减少人工操作和提高运作效率。最后需要加强物流信息化建设,提供实时的货物跟踪和供应链可视化,提高物流可靠性和透明度。在开展物流枢纽城市的应急预案研究中,考虑引入智能调度和路线优化算法,最大限度地减少货物延误和损失,提高面对突发事件或自然灾害等紧急情况时的应急响应能力。

未来的研究方向在快递货物量预测与快递需求分析领域具有广泛前景。这包括应用大数据和前沿人工智能技术,更深入地分析历史数据,结合市场趋势和深度洞察消费者行为,以提高快递货物量的准确性和特定时间段的需求预测。实时数据采集和监测将被引入,以允许动态调整物流策略,以更好地满足市场需求。此外,深度学习、自然语言处理和图像识别技术的发展将进一步提高多样化数据源中的需求信号的捕捉精度。这些研究方向有望提高快递物流的效率,减少成本,降低资源浪费,以应对不断变化的市场需求。

## 参考文献

- [1] 王明严,王文铃. 数字经济下海南绿色物流评价指标体系构建研究[J]. 全国流通经济, 2022(30): 120-124.
- [2] 王建树,蔡玉凤,田浩,等. 烟草商业系统精益物流评价指标体系及分类评价——以 H 省为例[J]. 科技和产业, 2022, 22(6): 248-256.
- [3] 周静. 电子商务企业物流运营效果评价指标体系的研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2013.
- [4] 李虹. 辽宁港口型国家物流枢纽承载城市综合实力的评价分析[J]. 全国流通经济, 2022(31): 101-104.
- [5] 荣文竽,申晨. 城市间快递业务量组合预测与分析[J]. 大连交通大学学报, 2023, 44(2): 1-7.
- [6] 梁彤玥. 基于 WOA-BP 的快递需求预测研究[J]. 中国储运, 2023(2): 96-97.
- [7] 赵桂红,孙曜. 基于 Shapley 值组合模型的我国快递业务量预测[J]. 物流技术, 2022, 41(11): 27-31.
- [8] 曾宁. 考虑货运时限需求的高铁快递运输方案研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2022.
- [9] 谭印,朱芸芸,苏雯洁,等. 多目标应急物流双向配送的关联反馈模型仿真[J]. 计算机仿真, 2023, 40(4): 134-138.
- [10] 滕红军,舒志乐,张鑫,等. 地震灾害应急物流配送系统模型优化方法研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2023, 19(4): 160-167.
- [11] 马向国,王世锋,许峰彬. 应急物流配送中心规划与仿真[J]. 物流技术, 2023, 42(3): 72-77.