

文章编号: 2095-2163(2023)06-0057-10

中图分类号: TP391

文献标志码: A

# 考虑紧迫度的应急物资轴辐供需网络优化研究

仲舒琳, 倪静

(上海理工大学 管理学院, 上海 200093)

**摘要:** 本文针对突发公共卫生事件下的应急物资调度问题,在资源供应有限的情况下,考虑需求点间差异性,建立以需求缺口最小、时间延误最少和系统总成本最小为目标的应急物资轴辐供需网络优化模型。首先,使用熵值-TOPSIS法衡量需求紧迫度,优先对紧迫度高的点进行调度;其次,根据轴辐式网络的特点构建多式联运的应急物资供需网络多目标优化模型;最后,基于模型设计改进的NSGA-II算法,对拥挤度距离进行改进,增加外部存档对全局非支配解进行存储,并在外部存档的基础上使用K-means算法聚类。以传染病疫情湖北省为案例,进行实例分析,结果表明:该模型可有效对不同紧迫度的地区进行合理物资调度,并在保障公平性的同时兼顾时间和成本的优化。

**关键词:** 需求紧迫度; 应急物资调度; 轴辐式网络; 多目标优化; NSGA-II算法

## Research on the optimization of emergency material hub-and-spoke supply network based on urgency

ZHONG Shulin, NI Jing

(Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**[Abstract]** To address the problem of dispatching emergency supplies under public health emergencies, an optimization model for the supply and demand network of emergency supplies with the objectives of minimizing demand gap, minimizing time delay and minimizing total system cost is established by considering the variability among demand points under the condition of limited resource supply. Firstly, the entropy-TOPSIS method is used to measure the urgency of demand points, and the points with high urgency are dispatched in priority. Secondly, a multi-objective optimization model for the supply and demand network of multimodal emergency supplies is constructed based on the characteristics of the hub-and-spoke network structure. Finally, an improved NSGA-II algorithm is designed based on the model to improve the congestion distance, and an external storage is added to store the global non-dominated solution set. K-means algorithm based on the external storage is incorporated. We take the COVID-19 in Hubei province as a case study. The results show that the model can effectively perform reasonable material dispatching for areas of different urgency and take into account the optimization of time and cost while guaranteeing fairness.

**[Key words]** demand urgency; emergency material dispatch; hub and spoke network; Multi-objective optimization; NSGA-II algorithm

## 0 引言

近年来,世界各地突发性公共卫生事件频发,给人类带来了难以估量的灾难,如SARS、甲型H1N1、非洲猪瘟以及COVID-19<sup>[1]</sup>。由于该类事件通常具有突发性,受灾地的应急物资在爆发初期往往是不够的,需要从外部进行应急物资调度,高效的应急物资调度网络设计在事件中发挥着重要的作用。

应急物资调度问题是近年来的研究热点之一, Ding<sup>[2]</sup>构建了基于灰色区间的多个需求点到多个供应点间的应急物资调度,采用NSGA-II算法,有效减少了包括应急响应系统的时间成本损失在内的总成本;张琳<sup>[3]</sup>在考虑不确定条件下,构建调度时间最短和调度成本最低的两目标应急物资调度模型,通过LINGO对其求解,结果表明该模型可以有效合理的进行应急物资调度;王付宇<sup>[4]</sup>考虑灾害初期道

**基金项目:** 教育部人文社会科学基金(19YJAZH064)。

**作者简介:** 仲舒琳(1998-),女,硕士研究生,主要研究方向:应急物流、智能优化算法;倪静(1972-),女,博士,副教授,硕士生导师,主要研究方向:企业信息化、在线社会网络、优化算法。

**通讯作者:** 倪静 Email: nijing501@126.com

**收稿日期:** 2023-04-03

路通行和运输能力的限制,构建灾区平均等待时间最短和物资调度成本最小的双目标优化模型,并通过改进的 NSGA-II 算法验证了模型的有效性。

上述研究主要聚焦在物资调度的时效性和经济性,没有考虑到需求点间存在的差异性。胡晓伟<sup>[5]</sup>以需求满足率最大为主要目标,兼顾车辆行驶距离,构建应急医疗物资动态分配模型,并通过算例验证了模型的有效性和可行性;单子丹<sup>[6]</sup>考虑物资需求的紧迫性,构建集散-中心-需求点三级调度网络,有效的缓解资源短缺情况、提高医用物资利用率;赵建有<sup>[7]</sup>引入受灾点紧迫度量化及分级,构建多目标车辆路径优化模型,满足应急物资配送的时效性、经济性与公平性;刘艳秋<sup>[8]</sup>在考虑物资分配公平性的情况下,同时考虑道路受损情况,构建应急物流路径优化的两阶段模型,并通过一种混合人工鱼群算法求解证明了模型的可行性。

在供需网络中有些研究考虑三级供应链,供应点-中心-需求点,却忽略了中心之间的物资运输功能,轴辐式网络通过中心轴点间进行连接,形成规模运输,因此轴辐式网络通过在轴点间进行资源整合,从而有效提高资源调度效率。Zhou<sup>[9]</sup>考虑客户差异化服务需求,构建了多式联运的轴辐式网络模型,获得了总成本最小的最优枢纽位置和分配方案;黄星<sup>[10]</sup>在模糊筹集时间下构建出具有直达结构和 Hub 结构的混合协同筹集的轴辐式应急物资筹集网络,有效的运用于震灾应急物资筹集决策中;Li<sup>[11]</sup>在 COVID-19 背景下基于轴辐式网络考虑多类型紧急救援,建立了以运输时间消耗和运输成本最小化为目标的双目标优化模型,有效的兼顾了时间和成本。

目前,国内外对于应急物资调度的研究已有一定的基础,对公平性的实现主要集中在对物资数量公平性研究上,较少考虑物资分配和时间调度的双重公平。因此,在突发公共卫生事件下,本文考虑需求点紧迫度,兼顾时间公平和分配公平,构建应急物资供需网络模型。另外,在应急物资调度网络中,为了提高物资调度效率,采用轴辐式网络可以通过轴点间的铁路进行快速运输,并通过多式联运灵活高效地进行物资调度,因此本文构建考虑紧迫度的应急物资轴辐供需网络模型。

## 1 问题描述

本文主要研究应急物资调度网络问题,并以最小化物资缺口,最小化时间延误,最小化系统总成本

为目标构建网络。在物资调度过程中,由于突发公共卫生事件初期供应有限,无法满足所有需求点的物资需求,通过衡量需求点间存在差异性评价需求点紧迫度,将物资进行合理分配以满足物资分配的公平。在此基础上依据轴辐式网络结构特点构建应急物资供需网络,该应急物资轴辐供需网络中有 3 类节点:供应点、中转枢纽、需求点,轴辐式网络拓扑结构如图 1 所示。供应点和需求点作为轴辐网络中的辐点,中转枢纽作为网络中的轴点,轴点与辐点之间通过灵活性高的公路运输,轴点间则采用速度更快经济性更高的铁路运输,并且允许辐点直接运输,构建多式联运的混合轴辐应急物资供需网络,旨在快速高效地对需求点进行大规模的物资输送。

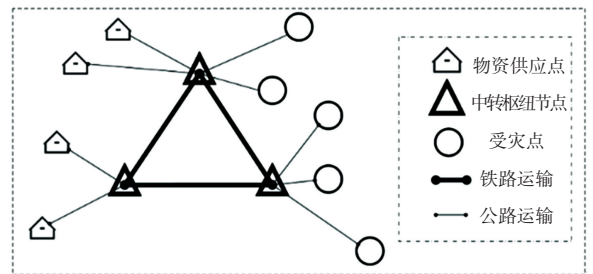


图 1 轴辐式网络拓扑结构

Fig. 1 Hub-and-spoke network topology

## 2 物资调度模型

基于问题及分析,本文构建的考虑紧迫度的应急物资轴辐供需网络模型。

### 2.1 模型构建

假设突发公共卫生事件发生时,供应点  $i (i \in I)$  为需求点  $j (j \in J)$  提供物资供应,运输方式为通过枢纽点  $k, m (k, m \in K)$  中转运输或者直达运输。

首先,在考虑需求紧迫度的情况下构建公平性函数  $F1$ , 式(1):

$$F1 = \min \sum_{j \in J} \lambda_j (q_j - \sum_{i \in I} q_{ij}) \quad (1)$$

其中,  $\lambda_j$  为需求点  $j$  的需求紧迫度;  $q_j$  为需求点  $j$  需求的物资量;  $q_{ij}$  为供应点  $i$  向需求点  $j$  实际分配的物资量。

其次,在考虑需求紧迫度的情况下构建时效性函数  $F2$ , 式(2):

$$F2 = \min \sum_{j \in J} \lambda_j \max \left( \sum_{i \in I} T_{ijkm} X_{ijkm} - RT_j, 0 \right) \quad (2)$$

其中,  $T_{ijkm}$  为供应点  $i$  经过枢纽点  $k, m$  到达需求点  $j$  的时间;  $X_{ijkm}$  为 0-1 变量,判断是否存在路径将物资通过枢纽  $k, m$  送至受灾点,存在则为 1, 否则为 0;  $RT_j$  为需求点  $j$  可接受的最晚物资到达时限;

然后, 构建系统经济性函数  $F3$ , 式(3):

$$F3 = \min \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{m \in K} X_{ijkm} q_{ij} (X_{ik} d_{ik} C_{ik} + X_{kj} d_{kj} C_{kj} + \alpha_{km} d_{km} C_{km}) + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{m \in K} 2X_{ijkm} q_{ij} u_k + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{m \in K} X_{ijkm} q_{ij} (X_{ik} d_{ik} C_{ik} + X_{kj} d_{kj} C_{kj}) + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{m \in K} X_{ijkm} q_{ij} u_k + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} Y_{ij} q_{ij} d_{ij} C_{ij} \quad (3)$$

其中,  $X_{ik}$  为 0-1 变量, 判断供应点  $i$  是否隶属于枢纽  $k$ , 是则为 1, 否则为 0;  $X_{kj}$  为 0-1 变量, 判断需求点  $j$  是否隶属于枢纽  $k$ , 是则为 1, 否则为 0;  $X_{ijkm}$  为 0-1 变量, 判断是否存在路径将物资通过枢纽  $k, m$  送至受灾点, 是则为 1, 否则为 0;  $Y_{ij}$  为 0-1 变量, 判断供应点  $i$  是否直接向需求点  $j$  运输物资, 是则为 1, 否则为 0;  $d_{ij}$  为从供应点  $i$  到需求点  $j$  之间的距离;  $d_{ik}$  为从供应点  $i$  到枢纽点  $k$  之间的距离;  $d_{km}$  为从枢纽点  $k$  到枢纽点  $m$  之间的距离;  $d_{mj}$  为枢纽点  $m$  到需求点  $j$  之间的距离;  $C_{ij}$  为供应点  $i$  与需求点  $j$  两地之间的单位运输成本;  $C_{ik}$  为供应点  $i$  与枢纽点  $k$  两地之间的单位运输成本;  $C_{km}$  为枢纽点  $k, m$  两地之间的单位运输成本;  $C_{mj}$  为枢纽点  $m$  与需求点  $j$  两地之间的单位运输成本;  $\alpha_{km}$  为经过枢纽点  $k, m$  运输的干线折扣率;  $u_k$  为枢纽点的单位装卸费用;

最后, 进行约束条件设置:

判定是否存在物资运输从供应点  $i$  经过枢纽点  $k, m$  最终到达需求点  $j$ , 式(4):

$$Y_{ij} = \begin{cases} 1, & T_{ijkm} > \frac{d_{ij}}{v_1} > RT_j \\ 0, & \frac{d_{ij}}{v_1} \leq T_{ijkm} \leq RT_j; T_{ijkm} \leq \frac{d_{ij}}{v_1} \leq RT_j; RT_j \leq T_{ijkm} \leq \frac{d_{ij}}{v_1}; \end{cases}, \forall i \in I, j \in J, k \in K, m \in K \quad (11)$$

其中,  $v$  为运输工具的运输速度;  $v_1$  为公路运输;  $v_2$  为铁路运输。

物资从供应点  $i$  最终到达需求点  $j$  的时间, 分为

$$T_{ijkm} = \begin{cases} X_{ijkm} \left( \frac{d_{ik} + d_{mj}}{v_1} + \frac{d_{km}}{v_2} + 2q_{ij} r_k \right), \forall i \in I, j \in J, k, m \in K, k \neq m \\ X_{ijkm} \frac{d_{ik} + d_{kj}}{v_1} + q_{ij} r_k, \forall i \in I, j \in J, k, m \in K, k = m \\ Y_{ij} \frac{d_{ij}}{v_1}, \forall i \in I, j \in J \end{cases} \quad (12)$$

其中,  $r_k$  为在枢纽  $k$  的单位货物进行中转的时间。

供应点  $i$  给需求点  $j$  的物资供应量满足需求点  $j$

$$X_{ijkm} = \begin{cases} 1, X_{ik}, X_{kj}, q_{ij} \neq 0 \\ 0, X_{ik}, X_{kj}, q_{ij} = 0 \end{cases}, \forall i \in I, j \in J, k \in K, m \in K \quad (4)$$

在备选枢纽中选取  $p$  个枢纽点, 式(5):

$$\sum X_{kk} = p, \forall k \in K \quad (5)$$

其中,  $X_{kk}$  为 0-1 变量, 判定枢纽点  $k$  是否被选中为枢纽, 是则为 1, 否则为 0。

运输方式只有转运和直达两种运输方式, 式(6):

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{m \in M} (X_{ijkm} + Y_{ij}) = 1 \quad (6)$$

一个供应点  $i$  只能被分配给一个枢纽点, 式(7):

$$\sum_{k \in K} X_{ik} = 1, \forall i \in I \quad (7)$$

一个需求点  $j$  只能被分配给一个枢纽点, 式(8):

$$\sum_{k \in K} X_{kj} = 1, \forall j \in J \quad (8)$$

只有枢纽  $k$  被选作枢纽点才能为供应点  $i$  服务, 式(9):

$$X_{ik} \leq X_{kk}, \forall i \in I, k \in K \quad (9)$$

只有枢纽  $k$  被选作枢纽点才能为需求点  $j$  服务, 式(10):

$$X_{kj} \leq X_{kk}, \forall j \in J, k \in K \quad (10)$$

表示运输决策直达的判定方式, 式(11):

3种: 经过两个不同枢纽点  $k, m$  到达需求点  $j$ , 经过一个枢纽点  $k$  到达需求点  $j$ , 直接到达需求点  $j$ , 式(12):

的最低物资满足量,  $e$  为紧迫度分级后的最低满足率, 式(13):

$$\sum_{i \in I} q_{ij} \geq e_j q_j, \forall j \in J \quad (13)$$

式中:  $e$  为需求点的最低满足率, I 类需求点的最低满足率  $e_1 = 0.7$ , II 类需求点的最低满足率  $e_2 = 0.6$ , III 类需求点的最低满足率  $e_3 = 0.5$ 。

需求点  $j$  的物资满足量不超过其需求量, 式(14):

$$\sum_{j \in J} q_{ij} \leq \sum_{j \in J} q_j, \forall i \in I \quad (14)$$

供应点  $i$  的供给量不超过其可供量, 式(15):

$$\sum_{i \in I} q_{ij} \leq \sum_{i \in I} q_i, \forall j \in J \quad (15)$$

其中,  $q_i$  为供应点  $i$  可供应物资量。

## 2.2 需求紧迫度评价指标体系构建

由于重大传染病疫情的突发性和扩散性, 需要快速进行疫区救援。而在疫情初期, 医疗应急物资、应急救援人员及运输工具等资源往往无法满足所有需求点的需求, 加之需求点之间存在感染情况和医疗水平的差异性, 需求点对于物资需求量和时间也有区别。为了保障疫区的各需求点的公平性, 需要考虑各需求点之间的差异, 综合评价需求点的应急物资需求紧迫度, 在资源供应不足的情况下最大化有限的应急物资的效用, 更好地控制疫区疫情扩散。

需求紧迫度评价指标一般包括受灾人员的数量、基础设施的损坏程度及物资储备等情况, 本文结合传染病疫情选取潜在扩散风险、疫情感染情况、城市自救能力这 3 个关键因素作为的一级指标, 并在每个一级指标下选取多个二级指标, 构建需求点紧迫度评价指标体系见表 1。

表 1 需求点紧迫度评价指标体系

Tab. 1 Evaluation index system for the urgency of demand points

一级指标	二级指标	指标说明
潜在扩散风险	人口密度	人口密度越大, 感染概率越大
	总人口数	人口总数越大, 感染风险越大
疫情感染情况	确诊人数	反映疫情的感染情况
	死亡人数	反映疫情的致死情况
城市自救能力	床位数	反映能容纳患者水平
	医疗机构密度	反映城市医疗水平
	GDP	经济水平, 反映城市对疫情的综合防控能力

## 2.3 基于熵值-TOPSIS 确定需求紧迫度

熵值法是一种客观评价方法, 根据数据本身的信息来确定客观权重, 可以避免人为主观因素导致的偏差<sup>[12]</sup>。TOPSIS 法是对方案进行多目标决策的常用方法, 通过比较目标方案与正负理想解的距离

进行方案排序<sup>[13]</sup>。本文通过熵值法确定各评价指标的权重, 并通过 TOPSIS 法对需求紧迫度系数进行计算, 熵值-TOPSIS 法的计算步骤如下:

### 2.3.1 熵值法

#### 步骤 1 建立指标矩阵

将  $m$  个需求点的  $n$  个影响因素指标数据处理成

$$\text{矩阵 } A = \begin{pmatrix} X_{11} & \cdots & X_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{m1} & \cdots & X_{mn} \end{pmatrix}, \text{ 其中 } m = 12, n = 7, X_{ij} \text{ 代}$$

表第  $i$  个需求点的第  $j$  个影响因素指标数据的值 ( $i \leq 12, j \leq 7$ );

#### 步骤 2 数据标准化

为了消除数据的量纲影响, 需要对数据进行标准化处理, 本文涉及两种类型的数据: 效益型指标和成本型指标。效益型指标代表其指标与评价结果正相关, 式(16):

$$X_{ij}^* = \frac{X_{ij} - \min(X_{1j}, X_{2j}, \dots, X_{nj})}{\max(X_{1j}, X_{2j}, \dots, X_{nj}) - \min(X_{1j}, X_{2j}, \dots, X_{nj})} \quad (16)$$

成本型指标代表其指标与评价结果负相关, 式(17):

$$X_{ij}^* = \frac{\max(X_{1j}, X_{2j}, \dots, X_{nj}) - X_{ij}}{\max(X_{1j}, X_{2j}, \dots, X_{nj}) - \min(X_{1j}, X_{2j}, \dots, X_{nj})} \quad (17)$$

步骤 3 计算第  $j$  项指标下第  $i$  个需求点占该指标的比重  $P_{ij}$ , 式(18):

$$P_{ij} = \frac{X_{ij}^*}{\sum_{i=1}^n X_{ij}^*} \quad (18)$$

步骤 4 计算第  $j$  个指标的熵值  $E_j$ , 式(19):

$$E_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^n P_{ij} \ln(P_{ij}) \quad (19)$$

步骤 5 计算差异系数  $G_j$ , 式(20):

$$G_j = 1 - E_j \quad (20)$$

步骤 6 确定各项评价指标的权重  $W_j$ , 式(21):

$$W_j = \frac{G_j}{\sum_{j=1}^m G_j} \quad (21)$$

### 2.3.2 TOPSIS 法

步骤 1 对评价指标矩阵进行归一化处理,  $r_{ij}$  为归一化后各指标的值, 式(22):

$$r_{ij} = \frac{X_{ij}}{\sqrt{\sum_{k=1}^{12} x_{ik}^2}} \quad (22)$$

**步骤 2** 将  $r_{ij}$  与熵值法得到的权重  $W_j$  进行加权操作得到  $v_{ij}$ , 式(23):

$$v_{ij} = W_j * r_{ij} \quad (23)$$

**步骤 3** 计算正理想解  $A^+$ , 负理想解  $A^-$ , 式(24)和式(25):

$$A^+ = \{v_1^+, \dots, v_n^+\} \quad (24)$$

$$A^- = \{v_1^-, \dots, v_n^-\} \quad (25)$$

**步骤 4** 计算各需求点  $j$  到正理想解的距离  $D_i^+$ , 到负理想解的距离  $D_i^-$ , 式(26)和式(27):

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2} \quad (26)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2} \quad (27)$$

**步骤 5** 计算各需求点  $i$  的相对贴近度  $C_i$ , 该结果作为需求点的紧迫度值, 式(28):

$$C_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (28)$$

### 3 改进 NSGA-II 算法

本文考虑的需求紧迫度的应急物资供需网络模型是一个高复杂度、多约束、多目标的优化问题,属于 NP-Hard 难题,对于此类问题传统的精确算法难以获得理想的结果。NSGA-II 算法是在遗传算法(GA)的基础上通过增加快速非支配排序、拥挤度距离比较和精英保留策略,是经典的已被广泛应用于解决多目标问题的方法<sup>[14]</sup>。但是传统的 NSGA-II 算法在种群分布性和多样性有所缺陷,因此本文采用改进的 NSGA-II 算法(Improved Non-dominated Sorting Genetic Algorithms, INSGA-II)求解该模型。修改拥挤度距离计算,增加种群分布性,增加外部存档对全局非支配解进行存储,保留解的多样性,并通过 K-means 聚类方法对外部存档进行聚类操作,从而有效地提高了算法的性能。INSGA-II 算法流程图如图 2 所示。

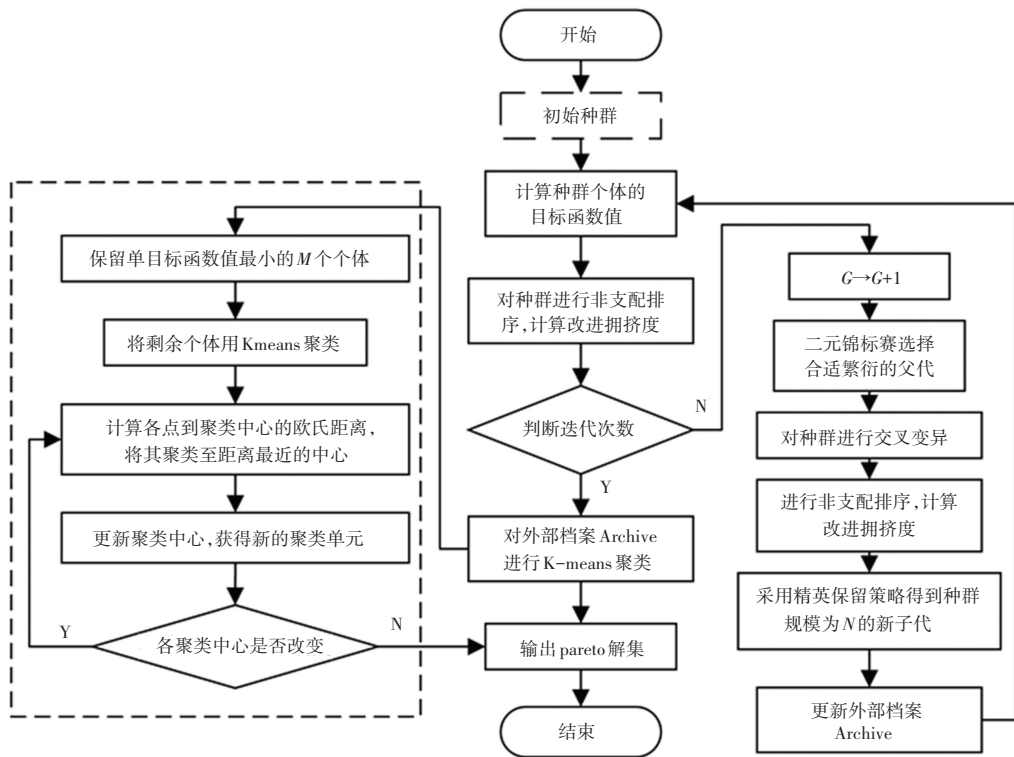


图 2 INSGA-II 算法流程图

Fig. 2 INSGA-II algorithms flow chart

#### 3.1 染色体编码

根据轴辐式应急物资供需网络模型的特点, 对其进行编码设计。一条染色体由 3 个子串组成, 每条染色体表示一个可行解。子串 1 采用实数编码, 长度为  $i * j$ , 表示供需网络中供应点  $i$  向需求点  $j$  的实际物

资供给情况; 子串 2 采用 0-1 整数编码, 长度为  $i * j$ , 代表供需网络各路径的转运 / 直达判别, 1 代表转运, 0 代表直达; 子串 3 采用实数编码, 长度为  $i + j$ , 表示供应点  $i$  和需求点  $j$  被分配给枢纽点  $k$  的情况; 染色体的总长度为  $2 * i * j + i + j$ , 示意如图 3 所示。

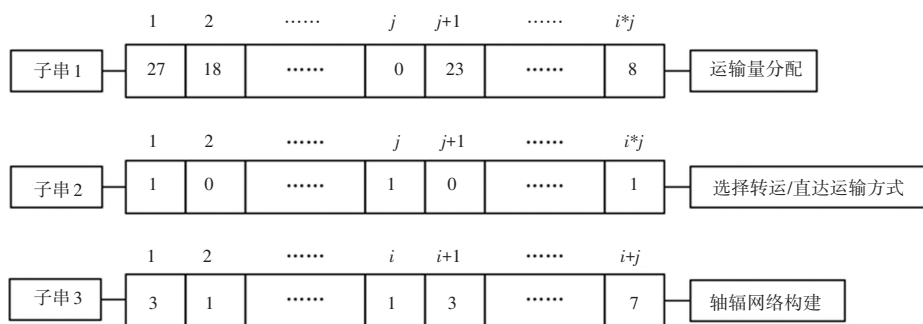


图3 染色体编码示意图

Fig. 3 Schematic diagram of chromosome coding

### 3.2 改进拥挤度距离

传统拥挤度距离计算方法可以使得种群呈现均匀性,但是对于目标函数差异性较大的个体不易获得遗传下去的机会,从而不利于种群的分布性。因此,构建拥挤度距离方差公式,如式(29)所示:

$$S = \frac{\sum_{m=1}^M |f_m^{i+1} - f_m^{i-1}|}{\left[ \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M (|f_m^{i+1} - f_m^{i-1}| - \frac{\sum_{m=1}^M |f_m^{i+1} - f_m^{i-1}|}{M})^2 \right]^{-1}} + 1 \quad (29)$$

其中,  $f_m^{i+1}$  代表第  $i+1$  个个体在第  $m$  个目标函数的值,  $f_m^{i-1}$  代表与第  $i+1$  个个体相邻的第  $i-1$  个个体在第  $m$  个目标函数的值。

### 3.3 添加外部存档

在每一次迭代结束后都会产生一组新的非支配解,因此,添加外部存档将当前种群中所有标记为非支配的个体进行存储,从而将全局的非支配解进行保存,使得其更逼近真实的帕累托前沿。对于外部存档的更新规则如下:

(1) 将当前种群中所有标记为非支配的个体添加到外部存档中进行存储,这些个体是当前种群中的非支配解;

(2) 对外部存档进行去重操作,确保其中不包含重复的个体;

(3) 对外部存档中的所有个体进行非支配排序,将其分为不同的层次;

(4) 从所有非支配层中选出最好的一层,作为新的非支配解集。这个过程中,只有标记为非支配的个体才会被保留,其他个体都将被删除。

### 3.4 K-means 聚类全局非支配解集

外部存档存储了全局的非支配解,其存储的非支配解过于庞大,K-means 是经典的数据聚类算法<sup>[15]</sup>。本文使用 K-means 聚类对外部存档进行选

择,该操作的步骤如下:

(1) 从外部存档中提取出所有个体的目标函数值,并将其归一化到  $[0, 1]$  的范围内,在保留 3 个目标函数分别最大的 3 个解以外,随机从剩下的解集中选择 97 个解,每个解代表一个聚类中心  $C_i$ ;

(2) 对于剩下的每个解,根据解  $x_j$  与聚类中心  $C_i$  的欧氏距离,将每个解分配到与其最相似的聚类中,该距离计算公式如式(30)所示:

$$d(x, C_i) = \sqrt{\sum_{j=1}^m (x_j - C_{ij})^2} \quad (30)$$

其中,  $m$  为空间维度,本文每个解有 3 个目标函数,因此  $m = 3$ 。

(3) 计算每个聚类的新中心;

(4) 迭代步骤 2 和步骤 3,直到目标收敛;

(5) 在每个聚类中找到最靠近质心的解,并使其成为该聚类的代表解,并将解集输出。

## 4 算例分析

### 4.1 案例背景与参数设置

传染病疫情爆发初期,各市应急医疗物资严重短缺,全国各地的物资在政府的统筹调度下前往湖北省各疫区。本文以湖北省 12 个市级作为需求点,选取北京南站、上海虹桥站、成都东站、西安北站、郑州火车站、南京火车站、重庆北站、杭州东站这 8 个国内规模较大设施完善的火车站作为备选枢纽点,并将其编号为 1~8。根据疫区范围及地理位置,选取 9 个国家应急物资储备库作为应急物资供应点。各两地之间的行驶距离通过百度地图进行查询。评价指标体系中各数据通过湖北省统计局 2020 统计年鉴 (<http://tjj.hubei.gov.cn/>) 和湖北省卫生健康委员会 (<http://wjw.hubei.gov.cn/>) 获得,评价指标体系中各级指标数据见表 2;物资需求点的防疫物资口罩的需求量依据易感人群 2 个/人/天,感染患者依据专家建议 4 小时需更换一次口罩,设定为 6 个/

人/天的配比预估需求量,湖北省各市需求量见表 3;依据各物资储备库规模预估现阶段应急物资库存量见表 4;按照需求点应急物资紧迫度评价指标计算得出各需求点的需求紧迫度见表 5,并根据紧迫度评价结果对物资最低满足量进行分级, I、II、III 级的物资最低满足量分别为 0.7、0.6、0.5。根据中华人民共和国国家发展改革委(<https://www.ndrc.gov.cn/>)中的国家铁路货物统一运价,将本文铁路运输

成本定为 0.115 元/tkm;根据公路运输价格相关规定及各公路运输公司定价数据,本文将公路运输成本设定为 0.45 元/tkm。定义公路运输速度 60 km/h,铁路运输速度 100 km/h,枢纽点选择数量为 5 个,需求点能接受的最晚到达时间  $RT_j$  为 24 h,干线折扣率  $\alpha_{km}$  为 0.6。

表 2 评价指标体系各级指标数据

Tab. 2 Data of indicators at all levels of the evaluation index system

城市	人口密度 (人/km <sup>2</sup> )	总人口数/ 万人	确诊人数/人	死亡人数/人	医疗卫生机构 床位数/万张	医疗卫生 机构数/个	GDP
武汉	1 308.44	1 121.2	18 454	748	9.64	6 497	16 223.21
黄石	540.13	247.17	835	5	1.78	1 443	1 767.193
鄂州	663.97	105.97	790	26	0.57	490	1 140.065
荆门	233.59	289.75	656	21	1.89	1 923	2 033.773
十堰	143.58	339.8	505	1	3.06	2 772	2 012.722
宜昌	194.91	413.79	772	8	2.91	2 664	4 460.824
襄阳	287.92	568	1 063	12	3.06	2 772	4 812.84
孝感	552.67	492.1	2 642	41	2.56	2 311	2 301.398
荆州	391.1	557.01	1 075	17	3.27	3 155	2 516.482
黄冈	362.78	633.3	2 332	52	3.82	3 854	2 322.734
咸宁	261.32	254.84	515	5	1.58	1 345	1 594.981
随州	231.02	222.1	1 095	12	1.23	1 330	1 162.229

表 3 需求点物资需求量

Tab. 3 Material requirements of different regions

城市	武汉	黄石	十堰	宜昌	襄阳	鄂州	荆门	孝感	荆州	黄冈	咸宁	随州
需求量/t	225	50	68	83	114	21	58	99	111	127	51	44

表 4 供应点物资库存量

Tab. 4 Material storage of different regions

城市	北京	天津	西安	南宁	重庆	沈阳	昆明	哈尔滨	福州
库存量/t	180	80	65	32	102	50	63	78	52

表 5 需求点的需求紧迫度

Tab. 5 Urgency of different regions

城市	武汉	鄂州	孝感	黄冈	黄石	荆州	随州	咸宁	襄阳	荆门	宜昌	十堰
紧迫度	0.758 9	0.289 3	0.283	0.259	0.258 7	0.244 6	0.238 1	0.234 2	0.232	0.226 4	0.208 6	0.207
等级	I	II	II	II	II	III	III	III	III	III	III	III

INSGA-II 算法的参数设置:种群规模  $popsiz$  = 100, 最大迭代次数  $maxgen$  = 2 000, 交叉概率  $p_c$  = 0.8, 变异概率  $p_m$  = 0.1。

### 4.2 算法对比

通过将 NSGA-II 算法与 INSGA-II 算法各自独立运行 10 次,结果均能得到帕累托前沿解集,为了进一步评价算法的性能,引入评价指标 Spacing ,

Spacing 是衡量算法解集分布性的指标,其值越小,表明算法越好,两个算法各自独立运行 10 次,算法性能 Spacing 指标箱型图结果如图 4 所示。INSGA-II 算法的平均值低于 NSGA-II 算法,表明 INSGA-II 算法在求解本文模型的帕累托前沿解集在解空间内具有更好的分布性和延展性;其次 INSGA-II 算法的箱体比 NSGA-II 算法要窄,这表明 INSGA-II 算法

具有更好的稳定性。

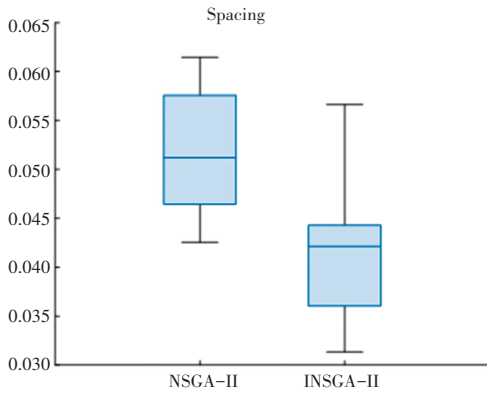


图 4 算法性能 Spacing 指标箱型图

Fig. 4 Box plot of Spacing metrics algorithm perform

### 4.3 结果分析

本模型的运算结果如图 5 INSGA-II 的帕累托前沿解集所示。其中,3 个维度的坐标分别表示物资分配公平性 F1、物资运输有效性 F2、系统总成本 F3。由于目标之间存在一定的冲突性,最终方案的抉择取决于决策者的偏好。例如:在突发事件初期,更低的物资缺口是主要考虑的因素,可以选择目标函数 1 在帕累托前沿上表现最好的方案;在突发事件中后期,相关单位对疫情防控有了一定的把控时,期望在经济性上有更好的体现,可以选择目标函数 3 在帕累托前沿上表现最好的方案。图 5 中的点需求缺口最小、点时间延误最小、点系统总成本最小这 3 个点分别为 3 个目标各自最优时的方案。决策者也可以为目标函数赋权,从而得到一个综合性的解,由于前期低缺口的重要程度较高,可以接受一定的时间延误,以及弱经济性原则,从而将权重设定为 1/2、3/10、2/10,得到综合性赋权方案,并将这 4 个

方案标注在图 5 上。这 4 个方案的 3 个目标函数值见表 6。

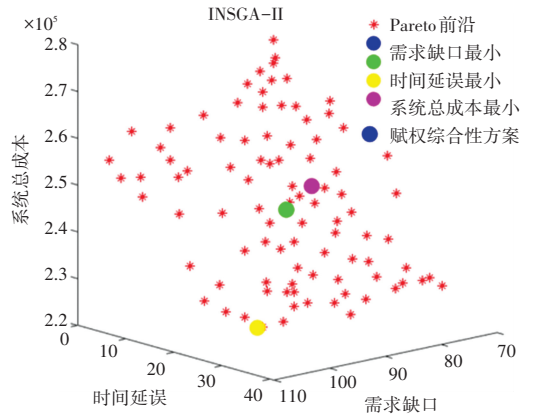


图 5 INSGA-II 的帕累托前沿解集

Fig. 5 INSGA-II Pareto frontier solution set

表 6 4 个方案的目标函数值

Tab. 6 Objective functions of the four programs

	需求缺口	时间延误	系统总成本
需求缺口最小	79.614 6	25.570 2	260 434.464 1
时间延误最小	82.028 5	5.585 8	268 754.024 7
系统总成本最小	107.368 4	34.298 1	228 631.794 7
赋权综合性方案	80.840 4	14.893 1	246 572.669 3

这 4 种方案代表不同的决策偏好,一个目标函数的提升,会牺牲其他目标函数,因此在实际决策过程中,可以根据现实情况对这 3 个目标函数的偏好从帕累托解中选择合适的方案。赋权综合性方案的调度,需求点的物资实际分配数量见表 7,运输方式见表 8。通过表 7,表 8 可以直观看到所有物资的运输路径,如北京供应点向武汉需求点从枢纽点 1 北京南站和枢纽点 5 通过高铁联运向郑州站运输物资 38 t,南宁供应点向武汉需求点通过公路直达运输物资 11 t。

表 7 需求点的物资实际分配数量(t)

Tab. 7 Actual quantity of materials allocated at the point of demand ( tons)

	武汉	黄石	十堰	宜昌	襄阳	鄂州	荆门	孝感	荆州	黄冈	咸宁	随州
北京	38	31	39	0	0	11	35	0	0	31	10	15
天津	44	0	22	0	0	0	2	7	0	13	0	7
西安	55	0	0	6	18	0	0	2	2	1	4	0
南宁	11	0	0	3	0	0	0	2	2	2	0	0
重庆	77	0	0	34	0	0	0	7	7	9	12	0
沈阳	0	0	0	0	13	0	0	15	11	0	0	0
昆明	0	0	0	0	2	0	0	12	36	0	0	0
哈尔滨	0	0	0	0	19	0	0	18	0	0	0	0
福州	0	0	0	0	5	0	0	5	0	22	0	0



表 8 应急物资调度方案的运输方式

Tab. 8 Transportation mode of material dispatch program

	武汉	黄石	十堰	宜昌	襄阳	鄂州	荆门	孝感	荆州	黄冈	咸宁	随州
北京	[1,5]	[1,6]	[1,4]			[1,6]	[1,5]			[1,6]	[1,5]	[1,5]
天津	[1,5]		[1,4]				[1,5]	[1,5]		[1,6]		[1,5]
西安	[4,5]			[4,7]	[4,5]			[4,5]	[4,5]	[4,6]		直达
南宁	直达			直达				直达	直达	直达		
重庆	直达			直达				[7,5]	直达	[7,6]	[7,5]	
沈阳					[1,5]			[1,5]	[1,5]			
昆明					直达			直达	直达			
哈尔滨					[1,5]			[1,5]				
福州					直达			直达		直达		

为进一步验证模型对公平性的有效性,模拟不考虑紧迫度和不考虑轴辐网络的模型,使用 INSGA-II 算法对两个模型求解,本文选取两个模型中的相同权重下的综合赋权方案进行对比,方案 A 表示本文考虑紧迫度和采用轴辐网络模型的方案,方案 B 表示不考虑紧迫度和不考虑轴辐网络模型的方案。方案 A 的物资满足率如图 6 所示,方案 B 的物资满足率如图 7 所示,方案间的时间延误对比如图 8 所示,方案间的成本对比如图 9 所示。

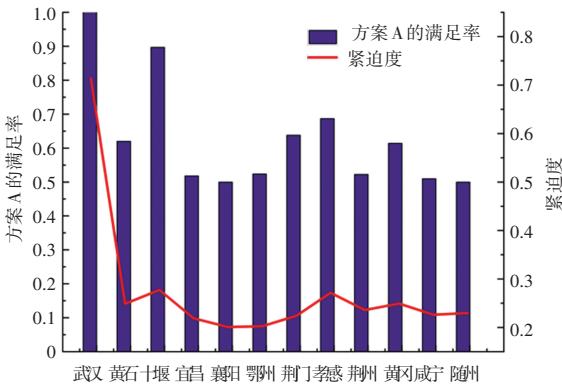


图 6 方案 A 的物资满足率

Fig. 6 Material satisfaction rate for program A

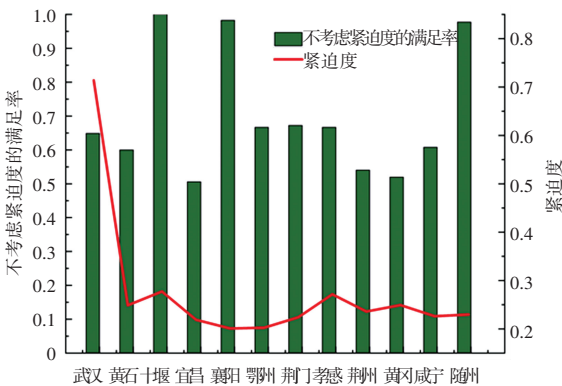


图 7 方案 B 的物资满足率

Fig. 7 Material satisfaction rate of program B

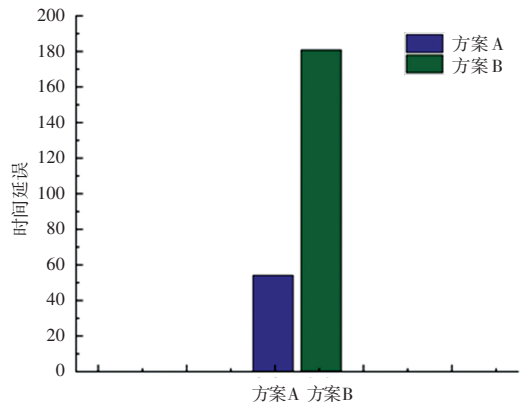


图 8 方案间的时间延误对比

Fig. 8 Comparison of time delays between programs

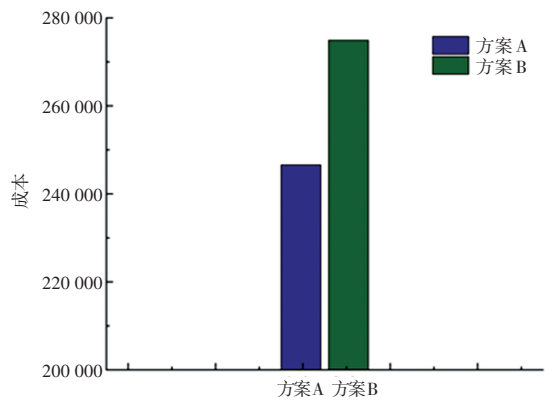


图 9 方案间的成本对比

Fig. 9 Comparison of time cost between programs

由图 6-图 9 可知:本文得出的方案(方案 A)考虑紧迫度,其对物资分配的公平性大于不考虑的方案(方案 B),其时间延误和成本也小于方案 B,这表明本文构建的考虑紧迫度的轴辐应急物资供需网络是可行的。在方案 B 中,物资满足率最高的城市是十堰、襄阳和随州,这 3 个城市的物资满足率在

98%~100%,基本完全满足需求,而疫情最严重的武汉物资满足率仅有65%,对于突发公共卫生事件的应急物资分配而言是不合理的。而在方案A中,作为紧迫度最高的城市武汉,获得了所有需求点中最高的物资满足率100%,这是因为本模型通过衡量需求点间的差异性,使得优先对最紧迫的城市进行物资分配,从而保障了紧迫度高的城市的物资充足供给。其次,从时间延误和成本的角度来看,方案A的表现均比方案B好,是因为轴辐网络通过选择时间更短成本更低的轴点间铁路运输,有效地提升了调度效率。

## 5 结束语

本文针对突发公共卫生事件下的应急物资调度问题,构建了考虑需求紧迫度的以需求缺口最小、时间延误最少和系统总成本最小为目标的应急物资轴辐供需网络优化模型。首先,结合应急物资调度的特点,构建需求紧迫度评价指标体系,并使用熵值-TOPSIS法对需求点紧迫度进行求解;其次,基于轴辐结构在轴点间的规模运输能力,对传统调度供需网络进行改进,提出基于轴辐结构多式联运的应急物资供需网络模型;最后,基于模型设计改进的NSGA-II算法,INSGA-II算法对拥挤度进行改进,添加外部存档对全局非支配解进行存储,并对外部存档进行K-means算法聚类。通过对实例的结果分析,发现模型可以求解出有效的帕累托前沿解集,并相比于不考虑紧迫度和不考虑轴辐结构的模型,本模型的物资调度具有更好的公平性,并在时间延误和成本上更优。为了更贴近实际应急物资调度情况,后续研究将进一步考虑轴点的容量限制,同时考虑多品类应急物资、多阶段的动态调度。

## 参考文献

[1] 刘明,李颖祖,曹杰,等. 突发疫情环境下基于服务水平的应急

物流网络优化设计[J]. 中国管理科学,2020,28(3):11-20.

- [2] DING Z, XU X, JIANG S, et al. Emergency logistics scheduling with multiple supply-demand points based on grey interval[J]. Journal of Safety Science and Resilience, 2022, 3(2): 179-188.
- [3] 张琳,王金玉,王鑫,等. 重大自然灾害下多灾害点应急物资智能调度优化[J/OL]. 清华大学学报(自然科学版):1-10[2023-04-02].
- [4] 王付宇,张康. 考虑道路约束的应急物资调度优化模型与算法[J]. 复杂系统与复杂性科学,2022,19(2):53-62.
- [5] 胡晓伟,宋浪,杨滨毓,等. 重大突发公共卫生事件下城市应急医疗物资优化调度研究[J]. 中国公路学报,2020,33(11):55-64.
- [6] 单子丹,盛晨辉,王晓燕,等. 突发事件下应急物资多目标优化调度模型与算法研究:以新冠肺炎疫情为例[J]. 运筹与管理,2023,32(1):34-40.
- [7] 赵建有,肖宇,朱欣媛,等. 考虑需求紧迫度的应急车辆路径优化方法[J]. 哈尔滨工业大学学报,2022,54(9):27-34.
- [8] 刘艳秋,胡绩辉. 基于混合人工鱼群算法的应急物流路径优化研究[J/OL]. 中国管理科学:1-15[2023-04-01].
- [9] ZHOU J, JIANG Y, SHEN Y, et al. Intermodal hub-and-spoke logistic network design with differentiated services: The case of China Railway Express[J]. Information Sciences, 2022, 612: 796-815.
- [10] 黄星,王绍玉. 震后初期 Single-Hub 应急物资筹集模型[J]. 系统管理学报,2017,26(3):438-447.
- [11] LI C, HAN P, ZHOU M, et al. Design of multimodal hub-and-spoke transportation network for emergency relief under COVID-19 pandemic: A meta-heuristic approach[J]. Applied Soft Computing, 2023, 133: 109925.
- [12] SHANNON C E. A mathematical theory of communication[J]. The Bell system technical journal, 1948, 27(3): 379-423.
- [13] BEHZADIAN M, OTAGHSARA S K, YAZDANI M, et al. A state-of-the-art survey of TOPSIS applications[J]. Expert Systems with applications, 2012, 39(17): 13051-13069.
- [14] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multi objective genetic algorithm: NSGA-II[J]. IEEE transactions on evolutionary computation, 2002, 6(2): 182-197.
- [15] LLOYD S. Least squares quantization in PCM[J]. IEEE transactions on information theory, 1982, 28(2): 129-137.

(上接第56页)

[9] ABUALIGAH L, YOUSRI D, ELAZIZ M A, et al. Matlab Code of Aquila Optimizer: A novel meta-heuristic optimization algorithm[J]. Computers & Industrial Engineering, 2021, 157:107250.

[10] 张娜,滕赛娜,吴彪,等. 基于 Tent 混沌的测试用例优先级排序[J]. 计算机测量与控制,2019,27(6):4.