

考虑满意度的轴辐式网络应急物资配送 多目标模糊优化模型

霍良安^{1,2}, 钱天晟¹

(1. 上海理工大学 管理学院, 上海 200093; 2. 上海理工大学 智慧应急管理学院, 上海 200093)

摘要: 针对灾后应急物资配送中如何衡量灾民内心满意度的问题, 综合考虑时间满意度和物资满意度, 采用一般性模糊数与梯形模糊数表示应急救援物资到达量及物资到达时间的不确定性, 以满意度最大、成本最小、覆盖率最大作为突发事件应急救援目标, 在轴辐式网络框架下, 构建灾后应急物资配送的多目标模糊优化模型, 通过改进贪心算法对模型进行求解。研究表明, 构建的轴辐式网络应急物资配送多目标模糊优化模型, 在满足灾后应急救援物资量 and 时间需求的基本前提下, 能够实现满意度最大和应急救援成本最小的目标。最后, 以 2023 年福建省洪涝灾害为案例背景, 为确保各个受灾点需求得到最大程度的满足, 应用改进模型与算法, 对福建省 9 个地级市的应急物资配送问题进行模拟仿真, 从而验证模型的可行性。

关键词: 应急物资配送; 满意度; 轴辐式网络; 改进贪心算法; 突发事件
中图分类号: TP 18; F 252 **文献标志码:** A

A multi-objective fuzzy optimization model for emergency supplies distribution in hub-and-spoke network considering satisfaction

HUO Liang'an^{1,2}, QIAN Tiansheng¹

(1. Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. School of Intelligent Emergency Management, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: In response to the problem of how to measure the satisfaction of disaster victims in the emergency supplies distribution after disasters, this study comprehensively considered both time and supplies satisfaction. By leveraging general fuzzy numbers and trapezoidal fuzzy numbers to represent the uncertainties in emergency relief supplies arrival quantities and delivery times, a multi-objective fuzzy optimization model under the hub-and-spoke network framework was constructed. The model

收稿日期: 2024-10-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(72174121); 上海高校特聘教授(东方学者)岗位计划资助; 上海市自然科学基金资助项目(21ZR1444100)

通信作者: 霍良安(1981—), 男, 教授。研究方向: 应急管理。E-mail: sjtuhuo@163.com

引文格式: 霍良安, 钱天晟. 考虑满意度的轴辐式网络应急物资配送多目标模糊优化模型[J]. 上海理工大学学报, 2025, 47(2): 129-138.

Citation: HUO Liang'an, QIAN Tiansheng. A multi-objective fuzzy optimization model for emergency supplies distribution in hub-and-spoke network considering satisfaction[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2025, 47(2): 129-138.

simultaneously pursues three objectives: maximizing satisfaction, minimizing costs and maximizing coverage. An improved greedy algorithm was developed to solve the proposed model. The results demonstrate that the hub-and-spoke network-based multi-objective fuzzy optimization model can maximize comprehensive satisfaction while minimizing emergency costs, and meeting basic requirements for emergency supplies quantities and timeliness. Finally, taking the flood disasters in Fujian Province in 2023 as the case background, the improved model and algorithm were applied to simulate the emergency supplies distribution problem in 9 prefecture-level cities, so as to ensure that the needs of each disaster-stricken site were met to the greatest extent, thus verifying the feasibility of the model.

Keywords: *emergency supplies distribution; satisfaction; hub-and-spoke network; improved greedy algorithm; emergency*

随着灾害与公共卫生事件频发，应急物资的配送问题因涉及灾民满意度、交通便利性和供应链效率等多重因素，需要科学规划以实现运输效率与响应时效的双重提升。相较于传统点对点单线配送模式，轴辐式网络通过集群方式显著提升配送效能，在应对突发事件时，显示出较强的优势。

近年来，轴辐式网络在应急物资分配中的应用，引起了学者们的关注。Demir 等^[1]构建了一种带有时间窗的轴辐式混合车辆模型，以确定出入中心点的配送路线。Huang 等^[2]考虑枢纽点端口故障和堵塞的可能性，引入故障概率和拥堵代价，设计了一个扩展的集装箱航运枢纽轴辐式网络。谭钰琳^[3]在枢纽局部失效的情况下，构建不同区域混合的轴辐式零担物流网络，以提高零担网络的可靠性。张剑鹏^[4]将多式联运应用于轴辐式物流网络，基于运输服务时间满意度和实际运输过程中的不确定性，构建了一个改进的轴辐式多式联运物流网络优化模型。然而，现有研究对应急场景适应性不足，多数研究仅将轴辐式网络单一地应用于物流模型中，未充分考虑受灾环境下的各种不确定因素以及灾民的心理特征，难以为灾后应急救援工作提供合理的决策方案。

洪水灾害是最为常见的自然灾害类突发事件，发生频率较高。洪水灾害情景下的应急物资分配问题，应考虑在不确定情况下物资的配送时间和配送量等多种因素。李亚琴等^[5]以上海市奉贤区为例，研究了洪灾情况下食品类物资的配送以及路径优化问题。张夏等^[6]在突发的洪涝灾害情景下，优先考虑灾民的需求，并采用时空网络约束配送车辆。徐超毅等^[7]加入了灾区对应急物

资的需求程度约束和软时间窗约束，构建路径优化模型，并考虑了车辆行驶速度受天气差异影响而发生的变化。郭冰等^[8]运用分段函数构建软时间窗约束模型，用时间满意度指标来衡量灾民的心理状况。已有研究大多主要考虑应急物资配送情景中的单一要素，在实际的应急救援物资配送决策中，由于灾后各种情况的不确定性，物资在需求量、到达时间满意度等方面也具有差异。

针对上述问题，本研究在轴辐式网络的框架下，通过选择枢纽点和中心点，自动匹配合适的受灾点，保证服务的可靠性和稳定性，避免突发事件造成的影响。同时，采用覆盖率最大的函数目标，将所有受灾点纳入分配范围，以确保受灾点能够及时得到救援物资，满足灾民的实际需求。对于应急物资到达量及时间的不确定性问题，本文采用一般性模糊数及梯形模糊数进行描述，提高决策的合理性和准确性。最后，根据模型特点，采用改进贪心算法进行求解。

1 问题分析与建模

1.1 问题描述

突发事件的不可预测性导致无法预先准备好充足的应急物资来应对突如其来的灾害。同时，灾后道路损毁、节点拥堵、二次灾害等情况都会延误救援时间。因此，如何在有限的时间里选择最为合适的配送中心，并在各种限制条件下，及时地将应急物资配送至受灾点以减少损失是决策的关键。

传统物资配送网络采用分散化的点对点模

式, 存在以下显著缺陷: 其一, 各节点独立运营导致运输路线重叠、空载现象频发, 难以产生规模经济; 其二, 仓储与运输能力分散造成资源利用率低下; 其三, 复杂路径规划降低响应速度; 其四, 信息孤岛现象增加协调成本, 削弱抗风险能力。为此, 本文构建以轴辐式网络为核心的应急物资配送模型, 提出引入集约化运营模式降低物流成本, 并以满意度优先为出发点提升配送效率, 确保突发事件中的物资需求得到有效保障。

轴辐式网络是一种优化的物流分发网络, 其中一个中心节点(轴)与多个外围节点(辐)相连, 辐节点负责向周边地区提供物资。在轴辐式应急网络构建中, 可以通过现实情况构建多层网络结构。枢纽网络系统由两层网络构成: 第一层是枢纽点组成的枢纽网络, 在电信、通讯领域称之为主干网络; 第二层是非枢纽点与枢纽点之间的辐网络。轴辐式网络的规模经济优势主要发生在第一层网络。轴辐式网络的优化分析主要集中在第一层的枢纽点选址和第二层的网络连接设计两方面。轴辐式网络优化设计的第一步是将已知的枢纽点布置在可选的枢纽候选点上; 第二步是将网络中的非枢纽点分配给第一步中确定的各枢纽点进行服务。两者结合实现网络服务总成本最小或网络覆盖范围最大的目标。轴辐式网络设计一般涉及网络出发地、目的地、潜在的枢纽候选节点、连接这些节点的网络连接, 以及网络流量、节点间距离、单位服务成本等模型参数。

如图1所示, 图中有枢纽点、中心点和一般的应急网络节点(需求点), 通过各个主干线和支路干线构成轴辐式应急物资配送网络(简称轴辐式网络)。

a. 枢纽点的构建

在轴辐式网络中, 一级枢纽点负责连接中心点, 成为整个网络的中心, 保证大批量的应急物资及时配送至连接各个物资需求点的中心点, 从而避免了时间的浪费以及因重大灾害造成的人员和财产损失。

b. 中心点的构建

在轴辐式网络中, 需要建立基本的中心点, 将各个应急物资的储备点、需求点连接起来。如果该中心点处于灾区, 则将此中心点改造成应急物资集散中心, 负责将物资配送至受灾区域内各

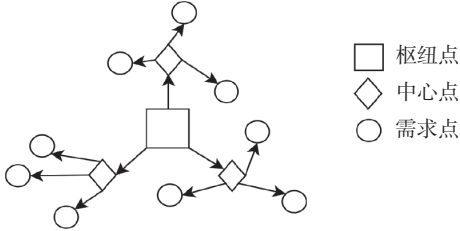


图1 轴辐式网络示意图

Fig.1 Schematic diagram of a hub-and-spoke network

个需求点(本文也称为受灾点)。

1.2 物资配送覆盖率

应急物资配送必须考虑所有受灾点的需求, 为了避免遗漏任何孤立的受灾点, 应当明确划分每个应急中心点负责的区域, 保证所有潜在受灾区域均被纳入中心点的覆盖范围内, 从而能够获得必要的应急物资支持。因此, 考虑网络的覆盖率是应急物资配送的重要目标。

在不考虑社会环境因素、需求特征的前提下, 本文构建应急物资储备优化的基础覆盖模型。该模型根据文献[9]中的最大覆盖模型进行拓展, 添加变量和相关约束, 对各物资储备量进行确定。另外, 相应地将关于物资配送的0-1决策变量松弛为数量决策变量。

1.3 灾民满意度设计

1.3.1 灾民对物资到达量的满意度

由于天气、路况等不可控因素, 受灾点的物资实际到达量具有不确定性。针对这种不确定性, 本文利用一般性模糊数限定物资到达量的边界阈值, 以保证决策的合理性。在此基础上, 进一步运用区间模糊数划分物资到达量的不同区间, 从而准确衡量灾民对不同物资到达量的满意度(简称物资满意度), 保证决策的合理性。

图2为物资到达量与灾民满意度之间的关系函数曲线, 函数表达式如式(1)所示。由图可以看出, 应急物资配送初期, 物资到达量的增加显著提升了灾民的满意度(临界值前呈单调递增), 达到饱和阈值后边际效益归零, 灾民满意度达到最高, 并维持此水平。

$$\varphi_{\tilde{A}_{ij}}(A) = \begin{cases} 0, & A < A_{ij}^1 \\ \frac{A - A_{ij}^1}{A_{ij}^2 - A_{ij}^1}, & A_{ij}^1 \leq A \leq A_{ij}^2 \\ 1, & A_{ij}^2 < A \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\varphi(\cdot)$ 表示满意度函数, $\varphi_{\tilde{A}_{ij}}(A)$ 为受灾点物资满意度; A 表示物资实际到达量; A_{ij}^1 、 A_{ij}^2 、 A_{ij}^3

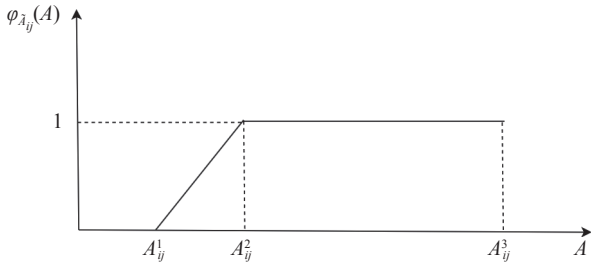


图2 一般性模糊数隶属度函数曲线

Fig.2 Membership function curve of general fuzzy numbers

分别表示从中心点*i*配送到受灾点*j*的物资到达量的保守估计值、可能估计值、乐观估计值,且满足 $0 < A_{ij}^1 < A_{ij}^2 < A_{ij}^3$, $i = 1, 2, \dots, I$, $j = 1, 2, \dots, J$ 。

采用一般性模糊数来表示从中心点*i*配送至受灾点*j*的预期物资到达量 $\tilde{A}_{ij} = (A_{ij}^1, A_{ij}^2, A_{ij}^3)$ 。因此,对受灾点*j*来说,灾民的感知物资到达量偏离度为

$$\Delta A_{ij} = \tilde{A}_{ij} - \text{avg} \left(\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J y_{ij} A_{ij} \right) \quad (2)$$

式中: A_{ij} 为中心点*i*到受灾点*j*的实际到达量; y_{ij} 为0-1决策变量,将物资从中心点*i*送往受灾点*j*为1,否则为0。

所有受灾点*j*的物资满意度为

$$F_1 = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \varphi(\Delta A_{ij}) \quad (3)$$

1.3.2 灾民对物资到达时间的满意度

灾害的不可预见性及其产生的连带效应(如配送路线损毁、中心点拥堵、二次灾害引发新灾情等),导致决策者无法准确估计灾后救援时间的长短。针对时间的不确定性,本文采用梯形模糊数与区间模糊数相结合的方式评估灾民对物资到达时间的满意度(简称时间满意度)。

理论上,灾害发生后,物资到达时间越早灾民满意度越高,但实际情况并非如此。有些消耗类物资譬如食物、帐篷等在灾民有需求之前到达,并不会显著提高满意度。而在有需求的时间区间内到达,因为及时满足了灾民的需求,满意度会在此阶段持续上升,直至达到最高。但如果因为物资到达不及时而导致更严重的人员伤害或经济损失,灾民的时间满意度会急剧下降。

在应急救援场景中,时间满意度具有显著的“核心满意区间+弹性边界”特征:完全满意区

$[D_j^2, D_j^3]$ 表示物资到达的最优时间窗;可接受区 $[D_j^1, D_j^4]$ 表示可容忍的最早/最晚到达时间;线性过渡区 $D_j^1 \rightarrow D_j^2$ 的满意度线性递增, $D_j^3 \rightarrow D_j^4$ 的满意度线性递减。采用梯形模糊数的四元组结构能够恰好完整刻画物资到达时间的4个关键时间节点,其隶属度函数曲线如图3所示,函数表达式为

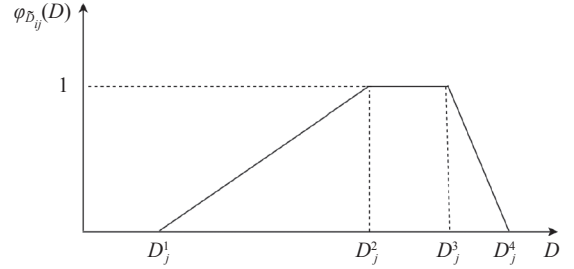


图3 梯形模糊数隶属度函数曲线

Fig.3 Membership function curve of trapezoidal fuzzy numbers

$$\varphi_{\tilde{D}_j}(D) = \begin{cases} 0, & D < D_j^1 \\ \frac{D - D_j^1}{D_j^2 - D_j^1}, & D_j^1 \leq D \leq D_j^2 \\ 1, & D_j^2 < D < D_j^3 \\ \frac{D_j^3 - D}{D_j^3 - D_j^4}, & D_j^3 \leq D \leq D_j^4 \\ 0, & D > D_j^4 \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\varphi_{\tilde{D}_j}(D)$ 表示时间满意度; D 表示实际到达时间; D_j^1 、 D_j^2 、 D_j^3 、 D_j^4 分别表示物资到达受灾点*j*的时间保守估计值、两个可能估计值、乐观估计值,且满足 $D_j^1 < D_j^2 \leq D_j^3 < D_j^4$ 。

定义受灾点*j*的物资到达时间偏离度为

$$\Delta D_j = \tilde{D}_j - \text{avg} \left(\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J X_{ij} y_{ij} \right) \quad (5)$$

式中, X_{ij} 为受灾点*j*接收到来自中心点*i*的应急物资的时间。

灾害发生后,配送道路受损、中心点拥堵等各种不可预见的情况,导致所有受灾点的物资到达时间无法精确定义。为提高物资到达时间预估的准确性,本文采用梯形模糊数来表示受灾点*j*的预期物资到达时间,即 $\tilde{D}_j = (D_j^1, D_j^2, D_j^3, D_j^4)$ 。

由于物资到达时间具有不确定性,式(5)无法计算出时间满意度,故使用前景理论来描述个体对损失与收益的心理感知,合理表征灾民的时间满意度。本文以前景理论中的价值函数来衡量受

灾点 j 对物资到达时间的综合满意度,即

$$\varphi(\Delta D_j) = \begin{cases} (\Delta D_j)^\alpha, & \Delta D_j \geq 0 \\ -\lambda(-\Delta D_j)^\beta, & \Delta D_j < 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\alpha \in (0, 1)$ 为收益区域的风险规避系数,表示灾民对物资到达时间感知收益的偏好程度; $\beta \in (0, 1)$ 为损失区域的风险寻求系数,表示灾民对物资到达时间感知损失风险的偏好程度; $\lambda \geq 1$ 为损失厌恶系数,表示灾民因物资到达时间而感知损失的厌恶程度。

当 $\Delta D_j > 0$ 时, $\varphi(\Delta D_j)$ 为正值,越大越好;当 $\Delta D_j < 0$ 时, $\varphi(\Delta D_j)$ 为负值,代表物资到达时间引起的灾民满意度损失, $\varphi(\Delta D_j)$ 绝对值越小越好。受灾点应急物资预期到达时间满意度为

$$F_2 = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \varphi(\Delta D_j) \quad (7)$$

1.4 节点拥堵成本

以洪涝灾害为例,中心点在服务多个受灾点时,由于受到道路中断、物资损毁、运力受限等不可抗力因素的影响,应急物资无法及时配送至各受灾点,从而导致配送效率低下。采用传统优化方法进行决策需要完整的信息和稳定的环境条件,但这在突发事件中往往难以得到满足。相比之下,成本导向方法因其适应多变环境决策、无需完全信息、避免过度优化等特点,在突发事件的决策中更具优势。为此,本文提出考虑节点拥堵成本的方法,以量化物资集散压力。

当物资配送量接近节点的承载极限时,新增单位资源投入引发的成本将呈现非线性增长,主要分为3个阶段:自由流阶段,配送量 $A_{ij}y_{ij} < Q_{\text{crit}}$ (临界容量)时,道路资源充足,成本近似为线性增长;饱和阶段, $A_{ij}y_{ij} \geq Q_{\text{crit}}$ 时,由于配送物资增多导致节点工作负载加重,处理速度下降,从而产生“速度-配送量负反馈”;拥堵阶段,物资配送出现走走停停现象,拥堵成本急剧上升。

因此,拥堵成本函数可以描述为拥堵成本与物资到达量之间的关系,具体公式如下:

$$C_{j,ij} = \kappa (A_{ij}y_{ij})^\omega \quad (8)$$

式中: $C_{j,ij}$ 表示从中心点 i 配送至受灾点 j 的拥堵成本; κ 为拥堵成本系数; ω 为常数,且满足 $\omega \geq 1$ 。

拥堵函数的改进可以进一步优化堵塞的评价

准确度。例如,对于超过节点运输能力的物资量,计算其拥堵成本为

$$C_{j,ij} = \kappa \left((1-R) A_{ij} y_{ij} \right)^\omega \quad (9)$$

式中, R 代表节点的运输容量比。

1.5 目标函数

灾害发生后,灾后的应急物资配送时间紧、任务重、限制条件多等因素将会影响救援行动的有效开展。因此,本文在已有研究的基础上考虑物资满意度和时间满意度,以满意度最大、成本最小、覆盖率最大为目标,构建两级轴辐式应急物资配送优化模型,以应对各种灾害情况下的应急物资配送需求。目标函数如下:

$$F_{1,\max} = \max \left\{ \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \varphi(\Delta A_{ij}) \right\} \quad (10)$$

$$F_{2,\max} = \max \left\{ \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \varphi(\Delta D_j) \right\} \quad (11)$$

$$F_{3,\min} = \min \left\{ \sum_{k=1}^K (C_k V_k) + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J [C_{ij} A_{ij} + C_d \max(0, D_j - \gamma_j)] + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J C_{j,ij} + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \left[C'_k \max\left(0, V_k - \frac{A_{ij}}{Q_k}\right) \right] \right\} \quad (12)$$

$$Z_{\max} = \max \left\{ \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K X_{ij} x_j / \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J A_{ij} \right\} \quad (13)$$

式中: k 表示配送工具, $k=1,2,\dots,K$; V_k 表示配送工具 k 的可用数量; C_{ij} 表示从中心点 i 配送至受灾点 j 的单位物资运输成本; C_d 表示时间窗违约的固定单位成本; D_j 表示受灾点 j 的物资到达时间; γ_j 表示受灾点 j 的时间窗,包括开始时间 $\gamma_{s,j}$ 和结束时间 $\gamma_{e,j}$; C_k 表示配送工具的单位时间成本; C'_k 表示配送工具的单位时间空驶成本; Q_k 表示配送工具 k 的容量; x_j 表示受灾点 j 是否被覆盖,若覆盖,则为1,否则为0。式(10)表示物资满意度最大;式(11)表示时间满意度最大;式(12)表示总配送成本最小,总配送成本包括车辆固定成本、车辆运输成本、时间窗违约成本、节点拥堵成本和车辆空驶成本;式(13)表示物流网络的覆盖率最大。

在一定数量的车辆从不同配送中心出发为多个受灾点进行配送服务时,受灾点的地理位置、

需求量、访问时间窗、车辆的容量，以及最大行驶里程已知的条件下，本文以灾民时间与物资满意度最大、网络覆盖率最大、配送成本最小为目标，给出以下假设：

假设 1 受灾区域有若干个受灾点，数量及位置已知，每个受灾点都仅由一个配送中心服务；

假设 2 所有应急物资均采用公路运输，运输所需时间为随机变量且服从正态分布，对于短时间内无法恢复通行的路段不予考虑；

假设 3 运输车辆总数量已知，且每种车辆均有载重限制；

假设 4 所有运输车辆到达每个受灾点的时间具有软时间窗约束；

假设 5 所有中心点配送不考虑物资装卸时间和车辆载荷对运输速度的影响。

约束条件：

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J A_{ij} \geq \sum_{j=1}^J A_j \tag{14}$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J A_{ij} \leq \sum_{k=1}^K Q_k \tag{15}$$

$$\gamma_{s,j} \leq D_j \leq \gamma_{e,j} \tag{16}$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J C_{j,ij} \leq \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J A_{ij} C_{ij} \tag{17}$$

$$\sum A_{ij} - \sum A_{ji} = 0 \tag{18}$$

$$0 < \kappa < 1 \tag{19}$$

$$y_{ij} = \begin{cases} 0, & A_{ij} = 0 \\ 1, & A_{ij} > 0 \end{cases} \tag{20}$$

式中， A_j 表示受灾点 j 的物资需求量。式(14)表示配送物资量满足受灾点需求；式(15)表示配送数量不超过配送工具容量；式(16)表示配送点的到达时间在时间窗内；式(17)表示拥堵成本不能超过运输成本；式(18)表示配送量和到达量一致；式(19)表示拥堵系数应在0~1之间；式(20)表示 y_{ij} 为0-1决策变量，若供应物资则为1，否则为0。

2 模型求解

2.1 去模糊化处理

模糊数的求解通常可以采用以下几种方法：

一是给定目标置信水平，根据决策者偏好与一般性模糊数特征函数值，采用加权平均与最可能值法将模糊值转化为确定型数值^[10-11]；二是根据模糊数理论，通过随机模拟算法将模糊数转化为确定性参数^[12]；三是根据 Liu 等^[13]的研究，运用可信性理论将模糊数转换为等价形式。本文采用第一种方法并对其加以改进，将主观权重值去除，运用最大-最小值法得出客观权重值，使结果更符合实际。

步骤 1 根据一般性模糊数 $\tilde{A}_{ij} = (A_{ij}^1, A_{ij}^2, A_{ij}^3)$ ，得出其特征函数式。

步骤 2 决策者给定置信水平 δ 后，依加权平均法，将受灾点模糊预期物资到达量转化为确定型数值。

$$\tilde{A}_{ij} = \rho_1 A_{ij\delta}^1 + \rho_2 A_{ij\delta}^2 + \rho_3 A_{ij\delta}^3 \tag{21}$$

式中， ρ_1 、 ρ_2 、 ρ_3 为决策者根据知识和经验确定的各模糊预期物资到达量权重，三者之和为1。

步骤 3 采用最大-最小值法确定权重时，需先对模糊到达量进行归一化处理，由此可得到，受灾点物资模糊预期到达量为

$$\tilde{A}_{ij} = \frac{A_{ij}^3 - A_{ij}^2}{A_{ij}^3 - A_{ij}^1} [(A_{ij}^2 - A_{ij}^1)\delta + A_{ij}^1 + A_{ij}^3 - (A_{ij}^3 - A_{ij}^2)\delta] + \frac{A_{ij}^2 - A_{ij}^1}{A_{ij}^3 - A_{ij}^1} A_{ij}^2 \tag{22}$$

而对于梯形模糊数，可将其看成特殊的三角模糊数，在此也采用相同的去模糊化方法。由此可以得到，受灾点物资模糊预期到达时间为

$$\tilde{D}_j = \frac{D_j^4 - D_j^3}{D_j^4 - D_j^1} [(D_j^2 - D_j^1)\delta + D_j^1 + D_j^4 - (D_j^4 - D_j^3)\delta] + 2 \frac{D_j^2 - D_j^1}{D_j^4 - D_j^1} D_j^2 \tag{23}$$

2.2 改进贪心算法

在已有的贪心算法中，当前选择的节点可能会导致后续解决方案无法达到最优。为避免陷入局部最优，本研究在求解过程中加入回溯步骤，提高整体解决方案的质量。算法流程如图 4 所示，具体算法步骤如下：

a. 初始解选择。从候选选址集合中选择一个初始解作为起点。初始解的选择根据决策者的主观判断，从配送路线集合中进行选择。

b. 贪心选择。在当前解的邻域中选择一个最

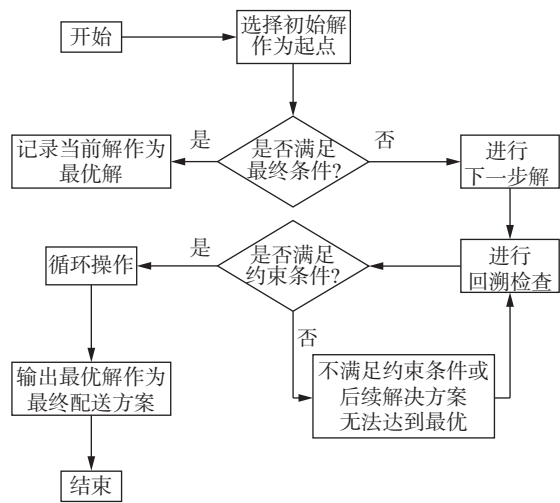


图 4 改进贪心算法流程图

Fig.4 Flowchart of the improved greedy algorithm

优的下一步解。根据配送问题的评估准则，例如覆盖范围、交通便利性等，选择当前最佳的配送路径。贪心选择可以基于一些启发式规则或先验知识来进行，以期望快速找到局部最优解。

c. 回溯检查。在选择下一步解之前，对当前解进行回溯检查。检查当前解的合法性和可行性，即是否满足约束条件，并评估当前解对后续解决方案的影响。如果发现当前解无法满足约束条件，或导致后续解决方案无法达到最优，需要回溯到上一步选择另一个备选解。

d. 递归搜索。对每个选择的下一步解，递归地进行贪心选择和回溯检查。重复进行贪心选择和回溯检查，直到满足终止条件。终止条件可以是达到目标覆盖范围、完成配送路径选择等。

e. 解空间剪枝。在搜索过程中，根据问题的特点和约束条件，进行解空间的剪枝，排除明显不合适的解，减少搜索空间。剪枝可以基于启发式规则、约束条件的违反程度等进行，以减少不必要的计算，从而提高搜索效率。

f. 解的记录与更新。记录当前最优解及其评价指标，以及其他有用的信息。在搜索过程中，根据需要更新当前最优解。这样可以随着搜索的进行，不断跟踪和更新当前最优解，以确保获得更好的配送方案。

g. 最终结果选择。当搜索过程结束后，根据记录的最优解及其评价指标，选择其作为最终的配送方案。根据具体的配送问题，可以根据评估准则、约束条件等进行综合考虑，选择最适合的配送方案作为最终结果。

3 数值与算例分析

3.1 算例数据

本文采用 2022 年我国新设立的区域应急救援中心的真实数据作为算例分析的数据来源。区域应急救援中心共设有 6 个，分别是东北中心(大庆)、西南中心(成都)、西北中心(兰州)、东南中心(潮州)、华北中心(张家口)、华中中心(武汉)。

本文以 2023 年超强台风“杜苏芮”引起的福建特大水灾为例，针对福州市、厦门市、莆田市、三明市、泉州市、漳州市、南平市、龙岩市、宁德市共 9 个地级市，以东南中心(潮州)为应急物资配送枢纽点，运用本文提出的模型与算法进行模拟仿真研究。表 1 为各个受灾点的坐标位置，表 2 为各个受灾点的模糊物资需求量、模糊预期到达时间。

表 1 受灾点坐标信息

Tab.1 Coordinate information of disaster-stricken sites

城市	经度/(°)	纬度/(°)
福州市	119.28	26.08
厦门市	118.04	24.26
莆田市	119.00	25.45
三明市	117.36	26.13
泉州市	118.50	25.00
漳州市	117.65	24.51
南平市	118.18	26.64
龙岩市	117.02	25.08
宁德市	119.55	26.67

本研究仿真试验中的配送车辆共分为 A、B 和 C 3 种车型，对应的车辆数分别为 2、2 和 3，共 7 辆车。3 种车型配送车辆的载重量分别为 700、800 和 1000 kg；车辆固定成本分别为 600、800 和 1000 元；单位里程运输成本分别为 10、12 和 15 元/km；单位里程的油耗分别为 0.16、0.18 和 0.22 L/km；油价为 8.52 元/L；配送车辆匀速行驶的速度为 40 km/h；超出时间窗的惩罚成本为 300 元/h。

3.2 结果分析

采用上述提出的算法对模型进行求解，初始种群大小为 100，最大迭代次数为 500 次，得到结果如图 5 所示。由图可见，迭代结束后，所有的

表 2 受灾点模糊物资需求量和模糊预期到达时间

Tab.2 Fuzzy supplies requirements and fuzzy expected arrival time at disaster-stricken sites

城市	模糊物资 需求量/kg	模糊预期到达 时间/h	开始时间	结束时间
福州市	236	9	8:30	17:30
厦门市	60	5	8:50	13:50
莆田市	260	8	8:00	16:00
三明市	446	9	9:30	18:30
泉州市	260	7	8:00	15:00
漳州市	260	6	9:00	15:00
南平市	530	13	8:30	21:30
龙岩市	238	6	9:10	15:10
宁德市	260	12	8:30	20:30

解收敛到帕累托前沿面上。解集的横坐标和纵坐标分别表示配送总成本和满意度两个目标。在帕累托解集中的每个解均表示经过迭代后所得的满足帕累托最优的一种物资配送方案。图 6 为应急物资配送路线图，可以看到 3 个中心点分别为三明市、漳州市、宁德市。先由潮州市(枢纽点)分别向中心点配送物资，再由中心点向各个区域内的受灾点分配物资。

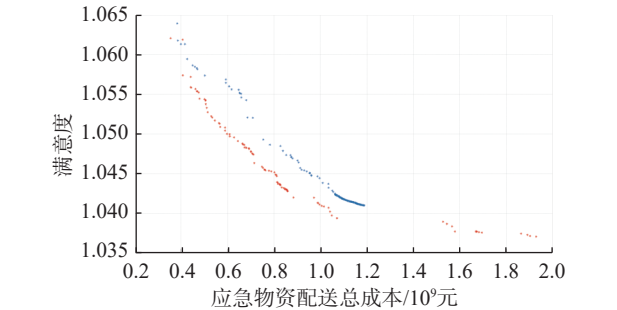


图 5 覆盖率帕累托前沿解

Fig.5 Pareto front solution of coverage rates

如图 7 所示，时间满意度在迭代最开始时由于洪涝灾害导致的道路受损等因素，难以及时将物资运送到各个受灾点，从而出现了曲线震荡的情况。在经过不断回溯检查操作之后，迭代曲线渐渐趋于平稳，全局结果逐渐接近最优。

如图 8 所示，物资满意度迭代曲线同样在迭代最开始时出现震荡。这是由于目标模型过大，需求点和需求量过多，无法及时找到满足所有受灾点的最优路线。但是，在经过回溯检查操作之后，及时地得到了最优解，在迭代 150 次左右曲线趋于平缓。

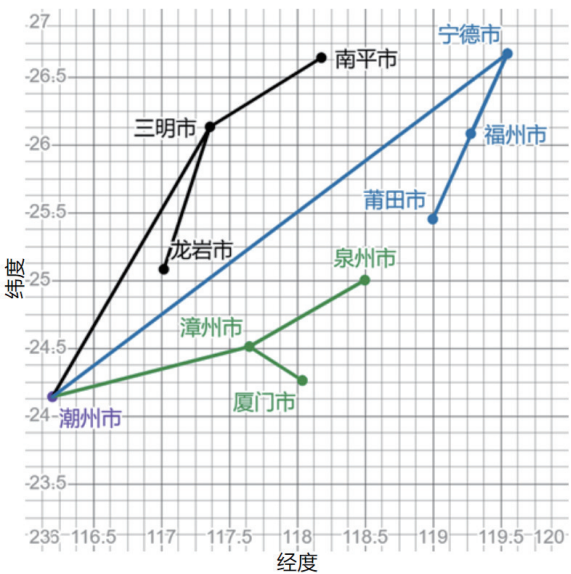


图 6 应急物资配送路线图

Fig.6 Roadmap for the distribution of emergency supplies

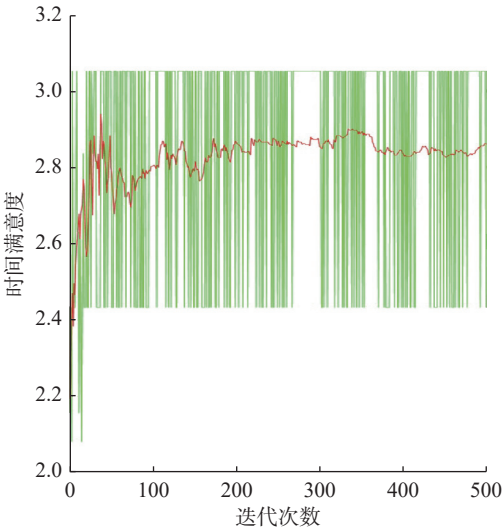


图 7 时间满意度迭代示意图

Fig.7 Schematic diagram of time satisfaction iteration

如图 9 所示，成本迭代曲线在迭代 200 次左右后趋于平缓，验证了算法的可行性。

典型最优解显示：应急物资配送总时间为 3.0527 h，较传统现有配送模式大幅缩短；需求满意度指标为 0.001 9，反映出在极端时间约束下配送物资仅能满足核心避难场所生存必需品的需求；总成本达 0.8×10^9 元，包含车辆运输、油量损耗和时间窗惩罚等多种配送成本。

相较于已有研究，本文在考虑时间与成本的基础上，增加了满意度指标，能更好地体现实际情况并满足灾区的现实需求。从表 3 中可以看出，各受灾点对于应急物资的需求基本得到满足，物资满足率均在 70% 左右，整体上保障了受

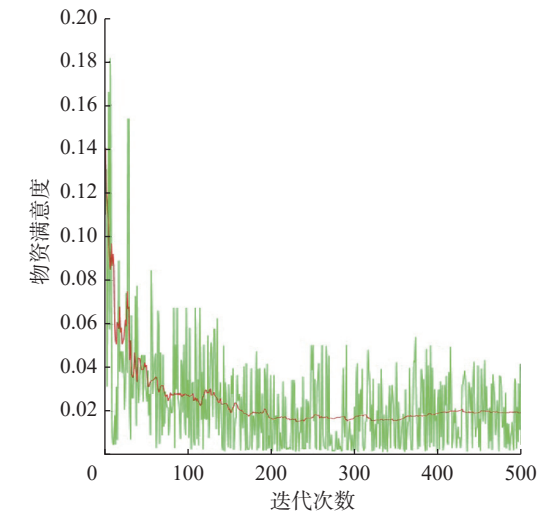


图 8 物资满意度迭代示意图

Fig.8 Schematic diagram of supplies satisfaction iteration

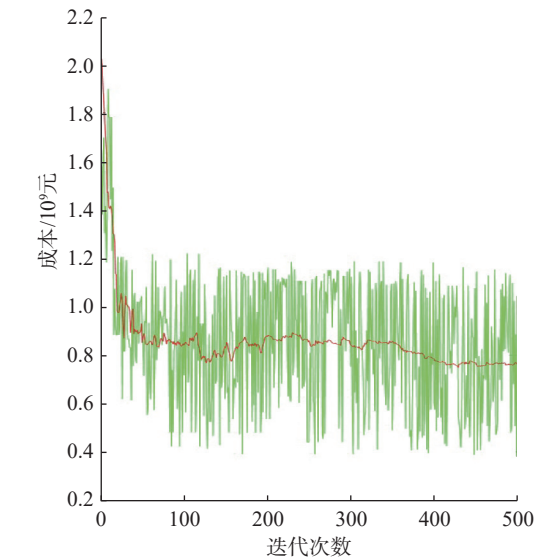


图 9 成本迭代示意图

Fig.9 Schematic diagram of cost iteration

灾点的应急需求,同时减轻了灾民在应急物资配送中所遭受的负面刺激,最大限度地避免了灾民心理感知进一步恶化,也验证了本文模型与算法的有效性。对于灾情较为严重、物资需求量较大的南平市和三明市来说,物资满足率也在 70% 左右浮动,该结果进一步说明了模型的可行性。

3.3 灵敏度与性能分析

以本文分析案例为基础,控制其他参数和目标函数不变,在不考虑成本约束的情况下,进行成本灵敏度分析,利用本文改进贪心算法进行求解,得到的结果如图 10 所示。随着成本上升,时间满意度和物资满意度均有所增长,但是增长幅度并不明显,验证了本文结论的经济适用性。

表 3 各受灾点配送满足率

Tab.3 Delivery satisfaction rates of each disaster-stricken site

城市	物资到达量/物资需求量	物资满足率/%
福州	163/236	69.06
厦门	50/60	83.33
莆田	186/260	71.53
三明	308/446	69.05
泉州	181/260	69.61
漳州	186/260	71.53
南平	372/530	70.18
龙岩	168/238	70.58
宁德	186/260	71.53

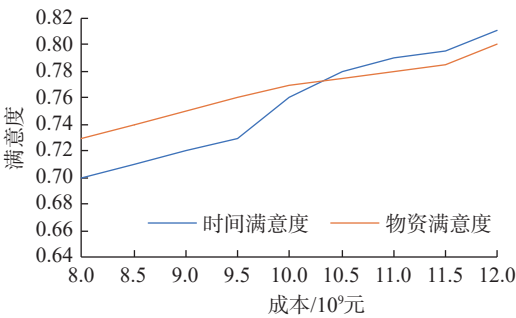


图 10 成本灵敏度分析

Fig.10 Cost sensitivity analysis

为了验证本文所提改进算法的优越性,将其与主流算法进行对比。在相同的计算环境和条件下,分别对算法的计算时间、目标结果进行比较,具体数据如表 4 所示。由表可以发现,本文提出的改进算法在这些结果上均优于其他算法,整体性能更具优势。进一步计算这些算法结果的差值,可以得出平均性能能提高约 14%。

表 4 算法性能比较

Tab.4 Comparison of algorithms' performance

算法	计算时间/h	物资满意度	时间满意度	成本/万元
改进贪心算法	1.6	0.71	2.83	80000
贪心算法	1.8	0.65	2.69	82632
回溯算法	2.1	0.63	2.58	83832
NSGA-II	1.9	0.70	2.77	81475

4 结 论

本文考虑灾后道路受损、中心点拥挤等因素导致的无法精确计算物资配送量和配送时间的问题,以满意度最大、成本最小、覆盖率最大为目

标，构建了一个适用于大多数灾后物资配送决策的轴辐式应急物资配送优化模型，并应用具有回溯机制的改进贪心算法对模型进行求解。最后，以 2023 年福建省洪涝灾害为背景，对灾后应急物资配送问题进行模拟仿真，并与其他主流算法进行仿真结果对比，验证了本文模型与算法的可行性。

未来，针对突发事件和应急物资配送领域的研究将面临更加复杂且多维的挑战，同时，这些挑战也孕育着巨大的创新潜力。随着全球气候变化的加剧、城市化进程的快速推进以及社会复杂性因素的增加，突发事件的发生频率和规模有可能上升，这对应急物资配送系统的建立和有效运行提出了更为严格的标准要求。因此，未来的研究需要采取多学科交叉的方法，结合先进技术、管理理论和实践经验，构建一个更加智能化、动态化和协同化的应急物资配送网络。

参考文献：

[1] DEMIR I, KIRAZ B, ERGIN F C. Experimental evaluation of meta-heuristics for multi-objective capacitated multiple allocation hub location problem[J]. *Engineering Science and Technology*, 2022, 29: 101032.

[2] HUANG L L, TAN Y, GUAN X. Hub-and-spoke network design for container shipping considering disruption and congestion in the post COVID-19 era[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2022, 225: 106230.

[3] 谭钰琳. 枢纽局部失效下区域混合轴辐式零担物流网络优化研究 [D]. 西安: 长安大学, 2023.

[4] 张剑鹏. 考虑需求不确定的轴辐式多式联运物流网络优化研究 [D]. 兰州: 兰州交通大学, 2024.

[5] 李亚琴, 於家, 周泱, 等. 洪灾情景下食品类物资供需分配及配送路径优化——以上海市奉贤区为例 [J]. *地理科学*, 2024, 44(4): 573–585.

[6] 张夏, 王慧超, 李泳瞰, 等. 突发洪涝灾害下考虑需求的应急资源调度研究 [J]. *中国安全生产科学技术*, 2023, 19(12): 187–192.

[7] 徐超毅, 刘晓絮. 洪涝灾害下考虑需求紧迫度的应急物资配送研究——以安徽省为例 [J]. *南阳理工学院学报*, 2023, 15(6): 12–21.

[8] 郭冰, 靖可, 龚逢能. 灾后初期考虑需求及时间不确定的应急物资配送中心选址—分配优化 [J]. *大连海事大学学报*, 2023, 49(2): 121–130.

[9] LI C, HAN P X, 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.

[10] LIANH T F. Distribution planning decisions using interactive fuzzy multi-objective linear programming[J]. *Fuzzy Sets Systems*, 2006, 157(10): 1303–1316.

[11] LI L, LAI K K. A fuzzy approach to the multiobjective transportation problem[J]. *Computers & Operations Research*, 2000, 27(1): 43–57.

[12] 陈则辉, 刘诚, 吕品, 等. 不确定环境下应急物资配送问题研究 [J]. *铁道科学与工程学报*, 2014, 11(5): 82–89.

[13] LIU B, IWAMURA K. Chance constrained programming with fuzzy parameters[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1998, 94(2): 227–237.

(编辑：丁红艺)