

中文引用格式:刘长石,刘涛,祝勇军,等.考虑救援效用的洪灾医疗物资多方式配送路径规划[J].中国安全科学学报,2026,36(1):216-226.

英文引用格式:LIU Changshi, LIU Tao, ZHU Yongjun, et al. Multi-modal delivery routing planning of medical supplies for flood disasters considering rescue utility[J]. China Safety Science Journal, 2026, 36(1): 216-226.

考虑救援效用的洪灾医疗物资多方式 配送路径规划*

刘长石¹教授,刘涛²,祝勇军^{3**}副教授,岳俊羽⁴,万城²,李君宇⁵

(1 湖南工商大学 工商管理学院,湖南 长沙 410205;2 湖南工商大学 智能工程与智能制造学院,湖南 长沙 410205;3 湖南工商大学 会计学院,湖南 长沙 410205;4 湖南工商大学 人工智能与先进计算学院,湖南 长沙 410205;5 西南财经大学 工商管理学院,四川 成都 611130)

中图分类号: X915.5

文献标志码: A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2026.01.0753

基金项目:国家社会科学基金资助(23BGL011);湖南省社会科学基金资助(23JD037);教育厅一般项目(25C0404)。

【摘要】为量化医疗物资在不同时间送达需求点产生的救援效果,引入救援效用概念,根据医疗物资运达需求点的时间差异构建救援效用量化函数;在此基础上,以总救援效用最大、总配送时间最短为目标,构建洪灾医疗物资多方式配送的路径规划模型,并根据模型特性,设计一种混合非支配排序遗传算法-II(HNSGA-II)求解;采用多类型算例开展试验。结果表明:HNSGA-II的总救援效用比传统非支配排序遗传算法-II(NSGA-II)和多目标蜂群算法(MOABCA)分别提升62%和29%,物资送达时间的平均满意度分别提升13%和6.1%。HNSGA-II能够提升应急救援效果,体现出更强的多目标优化能力,确保灾民在紧急情况下能得到及时有效的治疗。

【关键词】救援效用; 洪灾; 医疗物资; 多方式配送; 路径规划; 混合非支配排序遗传算法-II(HNSGA-II)

Multi-modal delivery routing planning of medical supplies for flood disasters considering rescue utility

LIU Changshi¹, LIU Tao², ZHU Yongjun³, YUE Junyu⁴, WAN Cheng², LI Junyu⁵

(1 School of Business Administration, Hunan University of Technology and Business, Changsha Hunan 410205, China; 2 School of Intelligent Engineering and Intelligent Manufacturing, Hunan University of Technology and Business, Changsha Hunan 410205, China; 3 School of Accounting, Hunan University of Technology and Business, Changsha Hunan 410205, China; 4 School of Artificial Intelligence and Advanced Computing, Hunan University of Technology and Business, Changsha Hunan 410205, China; 5 School of Business Administration, Southwest University of Finance and Economics, Chengdu Sichuan 611130, China)

Abstract: To quantify the rescue effect of medical supplies delivered to demand points at different times, the concept of rescue utility is introduced, and a rescue utility quantification function was

* 文章编号:1003-3033(2026)01-0216-11; 收稿日期:2025-08-12; 修稿日期:2025-11-21

** 通信作者:祝勇军(1978—),男,湖南永州人,博士,副教授,主要从事物流与供应链研究。E-mail:hnzyj@qq.com。

constructed based on the time difference of medical supplies arriving at demand points. On this basis, a path planning model for multi-modal distribution of medical supplies in flood disasters was established with the objective of maximizing total rescue utility and minimizing total distribution time. According to the characteristics of the model, a HNSGA-II was designed for solution. Experiments were conducted using multiple types of examples. The results demonstrate that HNSGA-II achieves a 62% and 29% improvement in total rescue utility compared to the traditional Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II (NSGA-II) and the Multi-Objective Artificial Bee Colony Algorithm (MOABCA), respectively. Additionally, the average satisfaction level of material delivery time is enhanced by 13% and 6.1%, respectively. These findings indicate that HNSGA-II significantly improves emergency rescue outcomes, exhibits superior multi-objective optimization capability, and ensures that disaster victims receive timely and effective treatment under emergency conditions.

Keywords: rescue utility; flood disaster; medical supplies; multi-mode delivery; routing planning; hybrid non-dominated sorting genetic algorithm-II (HNSGA-II)

0 引言

近年来,洪涝灾害频发。洪灾破坏力极强,极易在地势低洼区形成水淹区,造成交通中断,使得大量灾民受困,并可能诱发次生伤害,如灾民被毒蛇毒虫咬伤、被倒塌建筑物压伤,甚至爆发痢疾等传染病。洪灾发生后,如何及时配送药品与疫苗等医疗物资,保障灾区群众医疗需要,提升洪灾救援效果,是值得深入研究的问题。

医疗用品等应急物资越早送达灾区需求点,救援效果越好,越有利于保障灾民生命与财产安全。学者们通常以配送时间为目标优化应急物资配送路径。龚英等^[1]考虑洪灾中部分灾民被困“孤岛”的情况,以总配送时间最短为目标构建应急物流选址-路径鲁棒优化模型,提出改进禁忌搜索算法求解。刘长石等^[2]考虑到受灾群众非理性攀比心理,以总配送时间最短、攀比效应最小为目标,构建应急物资配送双层规划模型,设计混合遗传算法求解。GHARIB 等^[3]以应急物资运输时间最短为目标,构建异构多仓库多模式车辆路径优化模型。HAGHI 等^[4]考虑救援物资配送和伤员转运问题,以配送时间最短、伤员满意度最大为目标构建多目标鲁棒优化模型。洪灾或地震等灾情发生后,容易造成道路淹没与桥梁损毁等情况,单独采用陆路运输方式难以完成所有应急物流任务。部分学者根据灾害特性设计多类型运输工具协同配送应急物资模式,并在此基础上优化配送路径。WENG 等^[5]综合考虑心理痛苦成本和应急点需求优先级等因素,研究应急物资多式联运优化问题,设计改进遗传算法求解。张艳萍等^[6]基于多式联运的应急物资配送路径规

划的多目标优化问题,采用 Epsilon 约束算法求解。刘长石等^[7]考虑震后道路损毁、运载工具容量限制等因素,构建多方式供应应急物资的多周期模糊定位-路径问题优化模型。MAGHFIROH 等^[8]为提高应急物资配送效率,构建基于多载具配送的路径规划模型,采用混合整数线性规划方法求解。刘松等^[9]考虑运输时间时变性、铁路发班时间限制等因素,构建时变网络下的应急救援物资多式联运路径优化模型,设计蚁群算法求解。宋英华等^[10]考虑受灾点物资需求紧迫程度的差异性,构建应急物资配送选址和多模式运输路径优化模型。研究应急物资送达时效性和灾民满意度,有助于减轻灾民负面情绪,提升应急救援效果。高鹏飞等^[11]以灾民平均痛苦成本表征应急物资配送公平性,构建兼顾公平与效率的选址-配送模型。吕伟等^[12]以最大化时间满意度和需求满意度为目标构建应急物资调配模型,设计遗传算法求解。曲冲冲等^[13]考虑应急物资配送的时效性和公平性,构建震后应急物资配送路径的动态优化模型。王慧丽等^[14]考虑突发公共事件的不确定性和突发性,构建考虑优先级和时间窗约束的应急物资调配模型,设计混合遗传算法求解。

综上所述,已有文献为研究洪灾应急物资配送路径规划奠定了良好基础。但是,还存在以下可扩展的研究缺口:①已有研究通常采用时间满意度或需求满意度评估应急物流配送效果,能从整体上评估配送方案的可行性,但忽略了医疗物资送达时间差异产生的不同救援效果。如被毒蛇咬伤的灾民急需抗毒蛇血清治疗,血清越早送达,治疗效果越好^[15]。②已有文献通常仅采用配送时间最短作为优化目标,具有一定合理性。若在制定应急物流路

径规划方案时,同时考虑时效性与医疗物资送达需求点产生的实际救援效用,就可从多个维度客观评估配送方案的科学性、合理性与有效性,从而制定更优的医疗物资配送方案。

因此,笔者拟在洪灾背景下以总救援效用最大、总配送时间最小为目标,构建考虑救援效用的医疗物资多方式配送路径规划模型,设计一种混合非支配排序遗传算法 (Hybrid Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II, HNSGA-II), 以为应急物流部门制定医疗物资配送方案提供决策参考。

1 洪灾医疗物资多方式配送问题描述

某地突发洪涝灾害,部分区域被淹,群众受困,并出现一些群众被毒蛇咬伤,或者发生重型感冒与痢疾等病情。为保障灾区群众医治需要,医疗物资应及时配送至各需求点。根据水淹情况将受灾区域分为重灾区和轻灾区。重灾区道路被水淹没,车辆无法通行。轻灾区积水较浅,车辆可正常通行。拟采用卡车-冲锋艇协同配送模式,在每个重灾区附近设立一个医疗物资临时配送点,通过调拨方式先将冲锋艇从储备库运达临时配送点。重灾区与轻灾区范围、各需求点与临时配送点坐标、医疗物资需求量、各种载具载货量与行驶速度已知。卡车从物流中心出发,可配送设立于各重灾区附近的临时配送点,也可配送轻灾区各需求点,完成配送任务后,返回物流中心。在卡车将医疗物资运达各临时配送点之后,冲锋艇搭载医疗物资从所在临时配送点出发,配送所属重灾区的各需求点,完成任务后返回原临时配送点,如图 1 所示。

提出如下假设:①物流中心的卡车数量充足,每辆卡车最多只启用一次。临时配送点的冲锋艇数量有限,可启用多次。②各临时配送点的医疗物资需求量为其重灾区内所有需求点的医疗需求量总和。由于需求量较大,采用需求分割策略^[7]将临时配送点分割成坐标相同的若干个大需求点和一个小需求点。大需求点采用卡车满载直配方式,小需求点采用巡回配送方式。③各重灾区需求点能且仅能由冲锋艇配送一次,各轻灾区需求点能且仅能由卡车配送一次。④根据医疗物资运达各需求点的时间,评估医疗物资运达后产生的救援效用。决策问题为:如何合理规划卡车-冲锋艇协同配送路线,满足各需求点的医疗物资需求,并使得总救援效用最大、总配送时间最短?

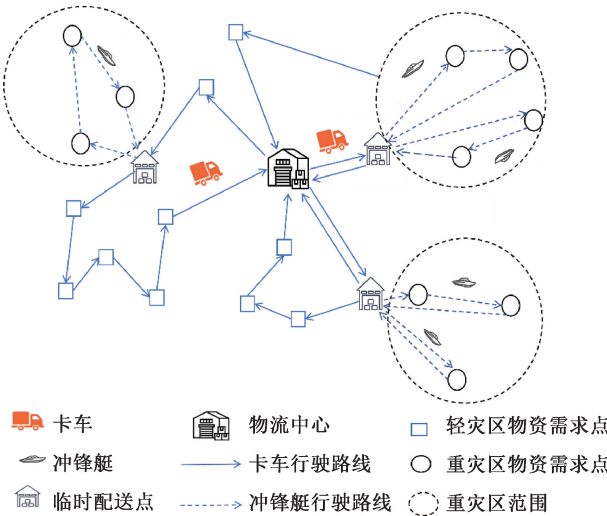


图 1 洪灾医疗物资多方式配送路径规划
Fig. 1 Multi-modal delivery routing planning of medical supplies for flood disasters

2 医疗物资多方式配送数学模型

2.1 医疗物资运达需求点的救援效用计算

洪灾发生后,可能会出现群众被毒蛇咬伤、被倒塌的建筑物压伤等意外伤害,也可能爆发霍乱等传染病,急需药品、疫苗等医疗物资进行救援。医疗物资在不同时间内运达需求点,将产生不同的救援效用。例如:受灾群众被银环蛇咬伤后,在 40 ~ 120 min 内会出现呼吸麻痹、呼吸衰竭等并发症,最快 3 ~ 5 h 内死亡。因此,抗毒蛇血清越早运达,救援效用越好;错过最佳治疗时间,可能会产生严重后遗症;长时间不进行救治,可能失去生命^[15-16]。

参照文献[17]的性能累计效用概念,引入救援效用概念量化医疗物资在不同时间段送达对救援工作的影响。令 $\bar{\omega}_1, \bar{\omega}_2, \bar{\omega}_3$ 分别为最佳救援时间点、较优救援时间点、较晚救援时间点,即医疗物资在 $\bar{\omega}_1$ 时刻前送达可取得最佳救援效用,而医疗物资在 $\bar{\omega}_1$ 时刻和 $\bar{\omega}_3$ 时刻之间送达,仍可产生部分救援效用,若医疗物资在 $\bar{\omega}_3$ 时刻之后送达,可能会延误救援时机,无法产生救援效用。运用文献^[18]方法,运载工具 v 在 τ_{iv} 时刻将医疗物资送达需求点 i 产生的救援效用函数定义为

$$\lambda_{iv}(\tau_{iv}) = \begin{cases} \delta_{iv}^{\max} \exp(-\alpha_1 \tau_{iv}), & 0 < \tau_{iv} \leq \bar{\omega}_1 \\ \delta_{iv}^2 \exp(-\alpha_2(\tau_{iv} - \bar{\omega}_1)), & \bar{\omega}_1 < \tau_{iv} \leq \bar{\omega}_2 \\ \delta_{iv}^1 \exp(-\alpha_3(\tau_{iv} - \bar{\omega}_2)), & \bar{\omega}_2 < \tau_{iv} \leq \bar{\omega}_3 \\ 0, & \tau_{iv} > \bar{\omega}_3 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\delta_{iv}^{\max}$ 为运载工具 v 在 ω_1 时刻之前将医疗物资送达需求点 i 产生的救援效用; δ_{iv}^1 和 δ_{iv}^2 分别为运载工具 v 在 ω_2 与 ω_1 时刻后将医疗物资运达抵达需求点 i 产生的救援效用值, 且 $\delta_{iv}^{\max} > \delta_{iv}^2 > \delta_{iv}^1$; α_1, α_2 和 α_3 分别为救援效用的衰减系数, 且 $\alpha_3 \geq \alpha_2 \geq \alpha_1$ 。

2.2 灾民对医疗物资运达时间的满意度函数

医疗物资及时运达能增强灾民对救援工作的信心, 缓解不安和恐惧的负面情绪。由于医疗物资配送由相关部门根据实际情况规划, 受灾群众因不知晓医疗物资送达具体时间而产生一定的心理预期时间。采用三角模糊数 $\eta_{iv}^* = (\eta_{iv}^b, \eta_{iv}^n, \eta_{iv}^a)$ 量化灾民对医疗物资运达的心理预期时间, η_{iv}^b 为灾民预期的载具 v 将医疗物资送达需求点 i 的最早时间, η_{iv}^n 为灾民预期的载具 v 将医疗物资送达需求点 i 的最可能时间, η_{iv}^a 为灾民预期的载具 v 将医疗物资送达需求点 i 的最晚时间。采用满意度函数量化灾民对医疗物资运达时间的满意程度, 参考文献[19], 需求点 i 对于医疗物资送达时间 τ_{iv} 的满意度 $\Omega_i(\tau_{iv})$ 定义为:

$$\Omega_i(\tau_{iv}) = \begin{cases} 0, & \tau_{iv} > \eta_{iv}^a \\ \eta_{iv}^a - \tau_{iv} / \eta_{iv}^a - \eta_{iv}^n, & \eta_{iv}^n < \tau_{iv} \leq \eta_{iv}^a \\ \tau_{iv} - \eta_{iv}^b / \eta_{iv}^n - \eta_{iv}^b, & \eta_{iv}^b < \tau_{iv} \leq \eta_{iv}^n \\ 1, & 0 < \tau_{iv} \leq \eta_{iv}^b \end{cases} \quad (2)$$

式中 V 为所有载具的集合, $v \in V$ 。

所有需求点关于医疗物资送达时间的平均满意度计算公式如下:

$$\Omega^* = \sum_{i \in E} \Omega_i / \Delta \quad (3)$$

式中: Δ 为需求点的总数量; E 为所有需求点的集合, $E = E_1 \cup E_2$, E_1 为位于轻灾区的需求点集合; E_2 为位于重灾区的需求点集合。

2.3 医疗物资多方式配送模型构建

1) 救援效用分析。下式为医疗物资送达所有需求点的总救援效用计算式:

$$\gamma_1 = \sum_{i \in E} \sum_{v \in V} \lambda_{iv} \quad (4)$$

2) 配送时间分析。卡车配送时间包括满载直配临时配送点的行驶时间和服务时间, 也包括巡回配送轻灾区需求点与临时配送点的行驶时间与服务时间。下式为卡车 k 满载直配临时配送点 j 的次数的计算式:

$$z_{jk} = \lfloor \sum_{i \in R_j} U_i / C_1 \rfloor, \forall j \in J, k \in K \quad (5)$$

式中: U_i 为需求点 i 的医疗物资需求量, kg; K 为所有卡车的集合, $k \in K$; J 为所有临时配送点的集合; R_j 为第 j 个临时配送点负责配送的重灾区需求点集合; C_1 为卡车的载质量, kg。

下式为满载直配临时配送点的所有卡车的行驶时间和服务时间的计算公式:

$$\gamma_2^y = 2 \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} z_{jk} T_{0jk} + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} z_{jk} \psi_j \quad (6)$$

式中: T_{ijk} 为卡车 k 从节点 i 行驶到节点 j 的时间, min; ψ_i 为需求点 i 所需的服务时间, min。

下式为巡回配送轻灾区需求点与临时配送点的所有卡车的行驶时间与服务时间的计算式:

$$\gamma_2^x = \sum_{i \in E_1 \cup 0 \cup J} \sum_{j \in E_1 \cup 0 \cup J, i \neq j} \sum_{k \in K} X_{ijk} T_{ijk} + \sum_{i \in E_1 \cup J} \sum_{k \in K} \psi_i x_{ik} \quad (7)$$

式中 X_{ijk} 为 0-1 变量, 如果卡车 k 从节点 i 行驶到节点 j 时为 1, 否则为 0; x_{ik} 为 0-1 变量, 需求点 i 由卡车 k 配送时为 1, 否则为 0。

下式表示所有卡车的配送时间:

$$\gamma_2 = \gamma_2^x + \gamma_2^y \quad (8)$$

下式为冲锋艇配送时间计算式, 包括配送重灾区需求点的行驶时间与服务时间:

$$\gamma_3 = \sum_{i \in J \cup E_2} \sum_{j \in E_2 \cup J, i \neq j} \sum_{b \in B} Y_{ijb} t_{ijb} + \sum_{i \in E_2} \sum_{b \in B} \psi_i y_{ib} \quad (9)$$

式中: B 为所有冲锋艇的集合, $b \in B$; t_{ijb} 为冲锋艇 b 从节点 i 行驶到节点 j 的时间, min; t_{ijb} 为 0-1 变量, 冲锋艇 b 从节点 i 到节点 j 时为 1, 否则为 0; y_{ib} 为 0-1 变量, 节点 i 由冲锋艇 b 配送时为 1, 否则为 0。

3) 卡车与冲锋艇协同配送的路径规划模型。以总救援效用最大、总配送时间最短为目标, 构建卡车-冲锋艇协同配送医疗物资路径规划模型。下式为目标函数 1, 表示最大化救援效用:

$$\max \sum_{i \in E} \sum_{v \in V} \lambda_{iv} \quad (10)$$

下式为目标函数 2, 表示最小化总配送时间:

$$\min (\gamma_2 + \gamma_3) \quad (11)$$

下式表示轻灾区内的各需求点能且仅能被卡车配送一次:

$$\sum_{k \in K} x_{ik} = 1, \forall i \in E_1 \quad (12)$$

下式表示重灾区每个需求点能且只能被冲锋艇配送一次:

$$\sum_{b \in B} y_{ib} = 1, \forall i \in E_2 \quad (13)$$

下式表示轻灾区各卡车巡回配送路线上需求点

和临时配送点的需求量之和不超过卡车的载质量:

$$\sum_{i \in E_1} U_i x_{ik} + \sum_{j \in J} \sum_{i \in R_j} U_i x_{jk} \leq C_1, \forall k \in K \quad (14)$$

下式表示重灾区各冲锋艇配送路线上的需求点的需求量之和不超过冲锋艇的载质量:

$$\sum_{i \in E_2} U_i y_{ib} \leq C_2, \forall b \in B \quad (15)$$

式中 C_2 为冲锋艇的载质量, kg。

下式表示每辆卡车从物流中心出发, 完成任务后必须返回物流中心:

$$\sum_{j \in E_1 \cup J} X_{0jk} = \sum_{i \in E_1 \cup J} X_{i0k}, \forall k \in K \quad (16)$$

下式表示每辆冲锋艇从各自的临时配送点出发, 完成任务后必须返回原临时配送点:

$$\sum_{j \in E_2} Y_{ijb} = \sum_{j \in E_2} Y_{jib}, \forall b \in B, i \in J \quad (17)$$

下式表示卡车进入节点流量守恒, 即卡车进入某节点, 必须从某节点离开:

$$\sum_{i \in E_1 \cup 0 \cup J} X_{ijk} = \sum_{l \in E_1 \cup 0 \cup J} X_{jlk}, \forall k \in K, j \in E_1 \cup J \quad (18)$$

下式表示冲锋艇进入节点流量守恒, 即冲锋艇进入某节点, 必须从某节点离开:

$$\sum_{i \in E_2 \cup J} Y_{ijb} = \sum_{l \in E_2 \cup J} Y_{jlb}, \forall b \in B, j \in E_2 \quad (19)$$

下式表示卡车离开某节点的时间计算方法:

$$O_{ik} = (o_{ik} + \psi_i) X_{ijk}, \forall i \in E_1 \cup J, k \in K \quad (20)$$

式中: o_{ik} 为卡车 k 到达节点 i 的时间, min; O_{ik} 为卡车 k 离开节点 i 的时间, min。

下式表示冲锋艇离开某节点的时间计算方法:

$$P_{ib} = (p_{ib} + \psi_i) Y_{ijb}, \forall i \in E_2, b \in B \quad (21)$$

式中: p_{ib} 为冲锋艇 b 到达节点 i 的时间, min; P_{ib} 为冲锋艇 b 离开节点 i 的时间, min。

下式表示卡车从上一个节点行驶到下一个节点的时间计算方式:

$$o_{jk} = (O_{ik} + d_{ij}/S_1) X_{ijk}, \quad \forall i, j \in E_1 \cup 0 \cup J, i \neq j, k \in K \quad (22)$$

式中: S_1 为卡车行驶速度, km/h; d_{ij} 为节点 i 与节点 j 之间的距离, km。

下式表示冲锋艇从上一个节点行驶到下一个节点的时间计算方式:

$$p_{jb} = (P_{ib} + d_{ij}/S_2) Y_{ijb}, \quad \forall i, j \in E_2 \cup J, i \neq j, b \in B \quad (23)$$

式中 S_2 为冲锋艇行驶速度, km/h。

下式表示卡车离开某节点时的载重与卡车到达该节点时的载质量、该节点需求量之间的计算方式:

$$W_{ik} = \begin{cases} w_{ik} - U_i x_{ik}, & \forall k \in K, i \in E_1 \\ w_{ik} - \sum_{i \in R_j} U_i x_{ik}, & \forall k \in K, i \in J \end{cases} \quad (24)$$

式中 w_{ik} 为卡车 k 到达节点 i 时的载质量, kg; W_{ik} 卡车 k 离开节点 i 时的载质量, kg。

下式表示冲锋艇离开某节点时的载质量与冲锋艇到达该节点时的载质量、该节点的需求量之间的计算方式:

$$H_{ib} = h_{ib} - U_i y_{ib}, \forall i \in E_2, b \in B \quad (25)$$

式中: h_{ib} 为冲锋艇 b 到达节点 i 时的载质量, kg; H_{ib} 为冲锋艇 b 离开节点 i 时的载质量, kg。

下式表示决策变量之间的约束, 即一个需求点能且只能由卡车或冲锋艇配送一次:

$$X_{ijk} + Y_{ijb} = 1, \forall i, j \in E \cup J \cup 0, \quad i \neq j, k \in K, b \in B \quad (26)$$

$$x_{ik} + y_{ib} = 1, \forall i \in E, k \in K, b \in B \quad (27)$$

下式表示卡车配送的需求点对医疗物资运达的时间满意度计算公式:

$$\Omega_i(o_{ik}) = \begin{cases} 0, & o_{ik} > \eta_{iv}^a \\ \eta_{iv}^a - o_{ik}/\eta_{iv}^a - \eta_{iv}^n, & \eta_{iv}^n < o_{ik} \leq \eta_{iv}^a \\ o_{ik} - \eta_{iv}^b/\eta_{iv}^n - \eta_{iv}^b, & \eta_{iv}^b < o_{ik} \leq \eta_{iv}^n \\ 1, & 0 < o_{ik} \leq \eta_{iv}^b \end{cases}, \quad \forall i \in E_1, k \in K \quad (28)$$

下式表示冲锋艇配送的需求点对医疗物资运达的时间满意度计算公式:

$$\Omega_i(p_{ib}) = \begin{cases} 0, & p_{ib} > \eta_{iv}^a \\ \eta_{iv}^a - p_{ib}/\eta_{iv}^a - \eta_{iv}^n, & \eta_{iv}^n < p_{ib} \leq \eta_{iv}^a \\ p_{ib} - \eta_{iv}^b/\eta_{iv}^n - \eta_{iv}^b, & \eta_{iv}^b < p_{ib} \leq \eta_{iv}^n \\ 1, & 0 < p_{ib} \leq \eta_{iv}^b \end{cases}, \quad \forall i \in E_2, b \in B \quad (29)$$

下式表示各变量的取值限制:

$$x_{ik} \in \{0, 1\}, y_{ib} \in \{0, 1\}, \quad X_{ijk} \in \{0, 1\}, Y_{ijb} \in \{0, 1\} \quad (30)$$

3 HNSGA-II 设计

3.1 HNSGA-II 设计思路

洪灾医疗物资多方式配送的路径规划属于非确定性多项式 (Non-deterministic Polynomial Hard, NP-hard) 问题, 需要采用启发式算法求得满意解。非支配排序遗传算法 (Non-dominated Sorting Genetic

Algorithm II, NSGA-II) 通过引入非支配排序和拥挤度比较的方法, 能够得到 Pareto 前沿解集, 适用于求解多目标优化问题, 但同时也存在陷入局部最优解和收敛速度过慢等不足^[19]。因此, 根据本文模型特性设计一种 HNSGA-II 求解, 设计思路如下: ①针对 NSGA-II 容易陷入局部最优解的缺点, 引入大邻域搜索算法, 利用其破坏和修复操作进一步扩大满意解的搜索范围。②采用随机生成初始种群的方法, 减少初始种群质量的好坏对求解的影响。③本文多目标模型涉及 2 个互相冲突的目标, 先通过对种群进行非支配排序、拥挤度计算等操作, 得到 Pareto 前沿, 然后决策者根据实际情况和优先级从中选择最合适的求解方案。

3.2 HNSGA-II 步骤

步骤 1: 初始化。输入重灾区、轻灾区、临时配送点与需求点坐标等相关参数。设定算法最大运行次数为 φ , 当前迭代次数为 e , 且 $e=1$ 。

步骤 2: 个体编码。初始化种群 ϕ , 采用随机排列方法生成个体 ω , 以整数编码的方法计算轻灾区需求点个数 χ^1 、重灾区需求点个数 χ^2 、临时配送点数量 χ^3 。令数字 $1-\chi^1$ 表示轻灾区需求点的编码, 数字 $\chi^1+1-\chi^1+\chi^2$ 表示重灾区需求点的编码, 数字 $\chi^1+\chi^2+1-\chi^1+\chi^2+\chi^3$ 表示临时配送点的编码。

步骤 3: 解码、构建卡车初始行驶路线 ε_k 及冲锋艇初始行驶路线 ε_b 。

步骤 4: 非支配排序。根据解码结果并结合式(10)和式(11)计算各个体 ω_i 的目标函数值, 比较个体 ω_i 与种群中全部个体的目标函数值大小, 统计种群中支配个体 ω_i 的个体数量 n_1 和被个体 ω_i 支配的个体集合 ξ_1 , 将种群中所有 $n_1=1$ 的个体存入非支配集合 θ_1 中, 让其非支配序等级为 1。对 θ_1 中的全部个体 ω_2 。遍历其支配的个体集合 ξ_2 中个体 ω_3 , 令 $n_3=n_3+1$, 若 $n_3=0$, 将个体 ω_3 存入集合 θ_2 中, 非支配序等级加 1。重复上述步骤, 直到种群中全部个体都进行分级与赋予相应的等级。

步骤 5: 计算拥挤度。计算各等级中的个体数量的同时提取出每一级中个体的目标函数值。在各目标维度上, 将位于前沿的个体排序, 将边界个体的拥挤度值设为无穷大, 非边界个体 ϑ , 其拥挤度 $\rho(\vartheta)$ 为所有目标维度上的拥挤度的累加, 各目标维度上的拥挤度由相邻个体目标之间的差距来表示, 计算式如下:

$$\rho(\vartheta) = \sum_{q=1}^v \frac{M_q(\vartheta+1) - M_q(\vartheta-1)}{M_q^{\max} - M_q^{\min}} \quad (31)$$

式中: v 为目标函数的个数; q 为目标函数的索引; $M_q(\vartheta+1)$ 和 $M_q(\vartheta-1)$ 为个体 ϑ 在目标函数 M_q 下相邻个体的目标值; $M_q^{\max}$ 和 $M_q^{\min}$ 为目标函数 M_q 的最大值和最小值。

步骤 6: 遗传操作, 参照文献[19]进行选择、交叉、变异等操作, 并作迭代计算, 选出最优配送路线。

1) 选择。对初始种群 ϕ 进行二元锦标赛操作, 得到 ϕ_1 , 直到种群数量达到 m 个时才停止。

2) 交叉。从 ϕ_1 中依次选择 ω_4 和 ω_5 个体, 生成随机数 ν_1 , 若小于交叉概率 P_c 即选择一个编码层进行交叉操作, 重复 m 次, 得到新个体组成种群 ϕ_2 。

3) 变异。从 ϕ_2 中选择个体 ω_6 , 生成随机数 ν_2 , 若小于变异概率 P_m 则在个体 ω_6 随机选择编码层采用“破坏”和“修复”操作得到新个体, 重复 m 次, 得到新个体组成种群 ϕ_3 。

步骤 7: 重组, 将初始种群 ϕ_1 和 ϕ_3 组合后得到 ϕ_4 , 将 ϕ_4 进行非支配排序和拥挤度计算后, 保留前 m 个种群个体得到种群 ϕ_5 。

步骤 8: 算法终止判定, $e=e+1$, 若 $e \leq \varphi$, 则转入步骤 3; 否则算法终止, 保留 ϕ_5 中等级为 1 的集合, 遍历集合中个体, 综合评估各目标函数值, 保留最优个体作为结果展示。

4 多方式配送路径规划

4.1 多方式配送路径规划试验设计

当前缺乏关于洪灾医疗物资配送路径规划的标准算例库。许多文献基于标准 Solomon 算例^[20]构建算例, 开展路径规划问题试验。因此, 在 Solomon 算例中命名为 C、R、RC 类型算例的基础上构建试验算例。各算例拥有 1 个物流中心与 100 个需求点, 以原始算例中的左右时间窗作为 η_{iw}^b 和 η_{iw}^a , 利用模糊函数计算式得到 η_{iw}^n , 各需求点的服务时间与原始算例一致。

为满足试验要求, 补充以下数据: ①各算例设置 3 个重灾区, 以坐标 (12, 45)、(40, 15)、(60, 60) 作为重灾区中心, 区域半径分别为 15、15、19 km。②各重灾区临时配送点设置在离物流中心距离最近的重灾区边缘, 坐标分别为 (26, 47)、(40, 30)、(44, 52)。③为更贴合实际灾情, 算例中需求量变成原数值的 10 倍。④参照文献[21]中冲锋艇的参数, 设定 $C_2=600$ kg, $S_2=40$ km/h; 参考东风小康 K07 的数据, 设定 $C_2=3\ 000$ kg, $S_1=80$ km/h。⑤所有卡车于北京时间 8:00 从物流中心出发, 各临时配送点配

备2艘冲锋艇。

参照文献[22]的参数设置,将HNSGA-II算法参数设置为: $m=120, \varphi=400, P_c=0.9, p_m=0.8$ 。参照抗蛇毒血清治疗效果^[15-16],将救援效用参数设置为: $\bar{\omega}_1=0.5h, \bar{\omega}_2=3h, \bar{\omega}_3=5h, \delta_{iv}^{\max}=200, \delta_{iv}^2=50, \delta_{iv}^1=10, \alpha_1=0.04, \alpha_2=0.12, \alpha_3=0.24$ 。

HNSGA-II采用Matlab R2019b编程。

4.2 洪灾医疗物资多式配送的算例分析

4.2.1 不同算例的可行性分析

采用多类型算例验证HNSGA-II的有效性及其可行性,选取Pareto前沿中最优个体作为计算结果,最优个体选取准则为:首先,在各目标维度上计算所有Pareto前沿点的均值向量,接着计算每个Pareto前沿点与均值向量的欧氏距离,最后,将与均值向量距离最小的点确定为最优Pareto前沿点,见表1。

由表1可知:①由OT、ORU值得出OT在

1 289.87~1 889.16 min内波动,ORU分布在1 468.91~2 242.71之间,说明不同算例的总配送时间差异显著,且医疗物资送达后产生的救援效果差异较大,这与算例对应的灾区分布、需求点密度及配送路径复杂度直接相关,需要根据不同灾区类型制定差异化策略已达到最佳救援效果。②由DT与NT值可知:所有算例的冲锋艇总航行时间大于卡车总行驶时间,说明重灾区的配送任务较重,应考虑增加冲锋艇的数量来提高医疗物资配送效率,进而提高救援效用。③由AS值可知:在大部分算例中AS的值接近于1,说明HNSGA-II求得的配送方案在追求配送时间最小化的同时,兼顾各需求点的医疗物资预计送达时间,在缓解灾民焦虑、非理性攀比情绪及减少伤亡等方面具有积极作用。④由RT值可知:HNSGA-II的平均运行时间为352.76 s,能较快求解多目标协同配送路径问题,具有可行性和有效性。

表1 不同类型算例计算结果

Table 1 Results of different types of instances

算例	OT/min	ORU	DT/min	NT/min	AS/%	RT/s
R103	1 317.96	1 598.13	589.72	728.25	83.38	376.66
RC103	1 634.30	1 795.59	795.33	838.98	86.99	380.11
R203	1 289.87	2 124.55	547.56	742.31	97.98	371.90
RC203	1 710.98	1 468.91	902.88	808.10	98.79	348.38
C103	1 529.10	2 242.71	583.21	945.89	99.00	326.01
C203	1 889.16	1 534.41	811.52	1 077.64	98.81	313.49

注:OT(Overall Time)为总配送时间,ORU(Overall Rescue Unity)为总救援效用,DT(Driving Time)为卡车总行驶时间,NT(Navigation Time)为冲锋艇总航行时间,AS(Average Satisfaction)为医疗物资送达时间的平均满意度,RT(Running Time)为程序运行时间。

以算例RC103为例的协同配送路径规划如图2所示。图中圆圈内表示重灾区范围,卡车路线经过重灾区时会沿着重灾区边缘行驶。

算例RC103关于重灾区1的配送路径规划见表2,由表2可知:①根据路径序号得出,由于临时配送点1只配备2条冲锋艇,配送任务分为第1批次配送的路径1和路径2、第2批次配送的路径3和路径4。②根据BT与FT值可知:在卡车将医疗物资送达临时配送点1后,路径1和路径2都在08:10时刻开始采用冲锋艇1与冲锋艇2配送需求点。当路径1的冲锋艇1完成任务在09:50时刻返回临时配送点1之后,路径4开始采用冲锋艇1配送;当路径2的冲锋艇2完成任务在09:47时刻返回临时配送点1之后,路径3开始采用冲锋艇2配送。③由TR值可知:重灾区1第1批配送物资的路径(路径1和2)与第2批配送的路径(路径3和4)相比可知:越早完成医疗物资配送,得到的救援效用越显

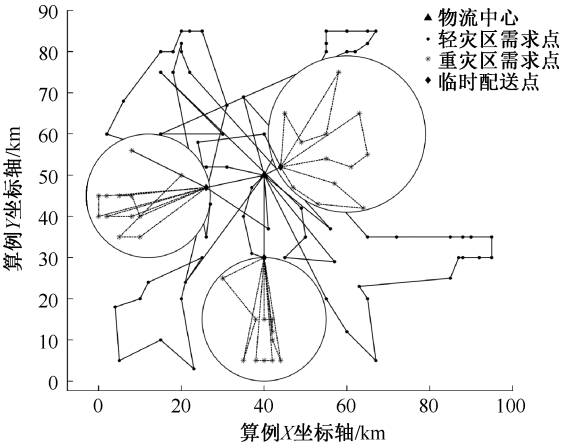


图2 算例RC103协同配送路径规划

Fig. 2 Collaborative delivery routing planning of instance RC103

著。假设路径1—4的第1个需求点都急需银环蛇抗蛇毒血清治疗。路径1中11号需求点的医疗物资送达时间仅需要20 min,能产生最佳救援效用;路

径 2 中 8 号需求点的医疗物资送达时间需要 55 min,产生一定的救援效用;而路径 3 中 4 号需求点、路径 4 中 1 号需求点的医疗物资送达时间分别需要 3.5、2.3 h,只能产生非常小的救援效用。值得注意的是,由于医疗物资产生救援效用的影响因素包括物资需求量、送达时间、衰减系数等多个因素,虽然路径 3 中 4 号需求点的医疗物资运达时间比路径 4 中 11 号需求点晚 1.2 h,但是路径 3 需求点的总需求量大于路径 4 的总需求量,因此路径 3 的总救援

效用要略大于路径 4。说明将救援效用作为医疗物资配送方案的评价指标,能够有效反映医疗物资送达需求点产生的实际救援效果。同时也说明应根据临时配送点的配送任务,合理增加冲锋艇数量,有效减少需求点等待医疗物资运达的时间,提升总救援效用。④采用救援效用评估医疗物资在不同时刻送达需求点产生的实际效果,可更客观合理地衡量配送方案的合理性与有效性,为科学开展洪灾医疗物资配送工作提供理论支撑与方法参考。

表 2 算例 RC103 重灾区 1 的配送路径规划

Table 2 Emergency delivery routing planning for severely affected area 1 of instance RC103

灾区	路径序号	冲锋艇配送路径及各需求点送达时间	BT	FT	TR
重灾区 1	1	101 →11 →12 →9 →101 (8:10)(8:20)(8:34)(9:11)(9:50)	8:10	9:50	101.67
	2	101 →8 →7 →10 →6 →101 (8:10)(8:55)(9:14)(9:25)(9:35)(9:47)	8:10	9:47	8.50
	3	101 →4 →3 →101 (9:47)(11:30)(11:59)(12:28)	9:47	12:28	0.000 7
	4	101 →1 →5 →2 →101 (9:50)(10:18)(10:56)(11:46)(12:18)	9:50	12:18	0.000 4

注:BT(Base Time)为各冲锋艇出发配送时间。FT(Finished Time)为各冲锋艇回到临时配送点时间,TR(Total Rescue)为各路径的总救援效用,101 表示位于重灾区 1 的临时配送点。

4.2.2 不同算法对比试验

为验证 HNSGA-II 的有效性,设计多目标人工蜂群算法^[23](Multi-Objective Artificial Bee Colony Algorithm, MOABCA)与传统 NSGA-II 算法程序,MOABCA 参数与文献[23]保持一致,NSGA-II 算法的参数与 HNSGA-II 保持一致。以 C203 算例为例开展对比试验,选取 pareto 前沿中的优秀个体作为运行结果,见表 3。

表 3 不同算法的运行结果

Table 3 Results of different algorithms

算法	OT/min	ORU	AS/%	RT/s
NSGA-II	1 865.57	1 106.58	76	432.88
MOABCA	1 755.39	1 383.89	81	442.76
HNSGA-II	1 634.30	1 795.59	86	380.11

由表 3 数据可知:①从 OT 值得到,在总配送时间上,HNSGA-II 比 NSGA-II 和 MOABCA 分别节约 12.3%和 6.8%。说明 HNSGA-II 能设计更科学的协同配送路线,缩短医疗物资配送时间。②从 TU 和 AS 值得到,关于总救援效用,HNSGA-II 比 NSGA-II 和 MOABCA 分别提升 62%和 29%,关于医疗物资送达时间的平均满意度分别提升 13%和 6.1%,说明 HNSGA-II 体现出更强的多目标优化能力,满足尽可能多的灾区需求点预期送达时间的同

时最大化救援效用。③从 RT 值得到,HNSGA-II 运行时间较 NSGA-II 节省 52 s,较 MOABCA 节省 62 s,说明 HNSGA-II 的改进策略可优化 NSGA-II 的求解效率,快速求解复杂多目标模型。综上所述,HNSGA-II 在多目标优化和算法求解时间上展示出更优性能,科学性和时效性都得到验证。

图 3 为 3 种算法求解算例 RC103 的 pareto 前沿分布图。根据图 3 可知:①关于总配送时间,HNSGA-II 求得的解的值分布在 1 600~1 700 min,MOABCA 求得的解的值分布在 1700~1850 之间,NSGA-II 求得的解的值分布在 1 800~1 960 之间。②关于总救援效用,HNSGA-II 求得的解的值分布在 1 790~2 200 之间,MOABCA 求得的解的值分布在 700~1 700 之间,NSGA-II 求得的解的值分布在 700~1 400 之间。③HNSGA-II 既能实现最大化医疗物资总救援效用目标,同时也实现了最小化医疗物资的总配送时间目标。说明 HNSGA-II 求得的 Pareto 解集整体上更优于其他 2 种算法。

4.2.3 不同优化目标对比试验

为体现多目标优化策略与其他单目标优化策略对应急物流工作产生的不同影响,在保证其他参数不变前提下,以目标 A₁(总救援效用最高)、目标 A₂(总配送时间最短)、目标 A₃(兼顾总救援效用最大

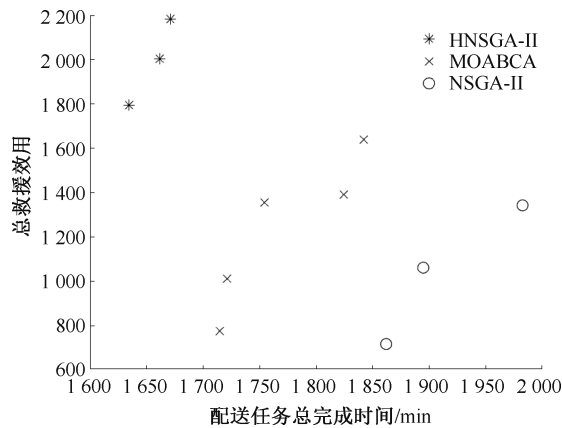


图3 3种算法求解的 Pareto 前沿

Fig.3 Pareto front solved by three algorithms

与总配送时间最短的双目标优化)开展对比试验。在算例 RC103 上运行 10 次,各运行结果取平均值,试验结果见表 4。由表 4 可知:①将目标 A_3 与目标 A_1 相比较,总配送时间下降 49.03%,总救援效用减少 0.8%,时间满意度提升 56.3%。目标 A_3 只牺牲极少的救援效用就节约大量配送时间。说明如果仅考虑总救援效用最大目标,为使医疗物资尽早送达需求点,必须启用更多的卡车配送位于轻灾区的需求点、增加冲锋艇使用次数配送位于重灾区的需求点,使得医疗物资配送时间显著增加。②将目标 A_2 与目标 A_3 相比较,总配送时间降低 6.9%,满意度提高 5.8%,但总救援效用却减少 58.6%。说明目标 A_2 仅考虑总配送时间最短目标,只要在大部分灾民预期的最晚送达时间前送达医疗物资,就可以获得较高的满意度。但是目标 A_2 没有考虑将医疗物资在产生最佳救援效用的时间内运达需求点,难以保障灾民的医疗需要与生命安全。说明仅采用时间满意度指标衡量应急物流方案不够科学,必须引入救援效用等指标进行综合评价。③综上所述,兼顾总救援效用最大与总配送时间最短的多目标优化策略不但可以及时配送医疗物资,获得更高救援效用,还能节省大量配送时间,提升灾民对洪灾救援工作的满意度。

表 4 不同优化目标的运行结果

Table 4 Operation results of different optimization objectives

策略	OT/min	ORU	AS/%	TU	AU
目标 A_1	3 206.31	1 810.87	55	10	2.1
目标 A_2	1 521.97	742.07	91	9	1.8
目标 A_3	1 634.30	1 795.59	86	9	2

注:TU(Truck Used)为卡车平均使用辆数,AU(Assault boat Used)为重灾区冲锋艇平均使用次数。

4.2.4 应急物资配送模型参数灵敏性分析

1) 冲锋艇载货量灵敏性分析。为探究冲锋艇载货量对于医疗物资配送时间和救援效用的影响,保持其他参数不变,将各临时配送点的冲锋艇载货量,以 100 为步长在[500–800]范围内变化,采用算例 RC103 开展试验,计算结果见表 5。

表 5 冲锋艇载货量的灵敏性分析

Table 5 Sensitivity analysis of assault boat capacity

载货量	NT/min	ORU	AS/%	LT/min	AU	Z
500	917.30	1 356.83	79	312.54	2.3	14
600	838.98	1 795.59	86	268.12	2	12
700	777.22	1 843.98	88	225.28	1.8	11
800	652.84	1 948.38	91	180.20	1.5	9

注:LT(Longest time)为重灾区各配送路径中冲锋艇单次完成配送任务最长时间,Z 为各重灾区冲锋艇路径数总和。

根据表 5 可知:①由 NT、ORU、AS 的值得到,随着冲锋艇载货量从 500 kg 增加到 800 kg,冲锋艇航行时间减少 28.8%,救援效用提升 43.6%,医疗物资送达时间的平均满意度提升 15%。②由 ML、AU 和 Z 值可知:随着冲锋艇载货量不断增加,冲锋艇单次完成配送任务的最长时间缩短 132 min,极大地提升了配送速度和效率。重灾区冲锋艇路径总数从 14 降低到 9,冲锋艇平均使用次数减少 0.8 次。综上所述,冲锋艇载货量变大,单次配送能够覆盖更多需求点,节省往返临时配送点的航行时间,使得医疗物资能在更短的时间内运达需求点,产生更高的救援效用,提高医疗物资送达时间的平均满意度,还可缩减冲锋艇配送路径数量。有关部门应根据受灾情况调拨合适载货量的冲锋艇前往重灾区救援。

2) 冲锋艇数量灵敏性分析。保持其他参数不变,将各临时配送点调拨的冲锋艇艘数,以 1 为步长在[1,6]范围内增加,探讨冲锋艇数量对医疗物资配送的影响,试验结果见表 6。

表 6 不同数量冲锋艇灵敏性分析

Table 6 Sensitivity analysis of assault boats quantities

BN	MI/min	AU	Z_1	Z_2	Z_3	ORU	AS/%
1	310	4.3	5	5	3	1 603.45	69
2	146	2	5	4	3	1 795.59	86
3	64	1.2	4	4	3	1 842.59	87
4	58	1.08	5	5	3	1 906.87	89
5	0	0.8	5	4	3	1 987.96	91
6	0	0.6	4	5	3	1 993.89	91

注:BN(Boat Number)为各临时配送点冲锋艇艘数,MI(Maximum Interval)为各路径冲锋艇出发时间最大间隔, Z_1 、 Z_2 、 Z_3 为重灾区 1、2、3 的冲锋艇路径数量。

根据表 6 值可知:①由 NT、MI 和 AU 值得到,当冲锋艇数量为 1 时,各重灾区一次只能派出一艘冲锋艇执行配送任务,导致各路径冲锋艇出发时间间隔最长,为 5.16 h。随着冲锋艇数量从 1 增加到 5,各重灾区可以同时派出多艘冲锋艇执行配送任务,冲锋艇出发时间间隔逐渐缩短为 0,冲锋艇的平均使用次数从 4.3 次减少到 0.6 次,说明投入救援的冲锋艇数量越多,各路径的救援行动可以越早开展,获得更大的救援效用。但是,冲锋艇总航行时间相差不大。②由 TU 和 AS 值得到,当冲锋艇数量在由 1 艘增加至 6 艘时,救援效用依次提升 11.9%、2.6%、3.4%、4.2%、0.03%,医疗物资送达时间的平均满意度依次提升 24.6%、1.1%、2.2%、2.2%、0。当冲锋艇数量从 1 艘增加到 2 艘时,救援效用和医疗物资送达时间的平均满意度提升最为显著,数量由 5 艘增加至 6 艘时,救援效用和医疗物资送达时间的平均满意度提升幅度最小。由 Z_1 、 Z_2 、 Z_3 值得到,由于各重灾区规划的冲锋艇配送路径最大值为 5,因此当各临时配送点配备的冲锋艇数量在 5 条及以上时会导致其使用率不高,甚至闲置。由此可知:在医疗物资配送任务中,向临时配送点调拨合适数量的冲锋艇到对于提升救援效用具有积极影响,但

当冲锋艇数量超过重灾区医疗物资配送实际需要时可能造成资源浪费。应综合考虑各重灾区受灾情况与配送路线实际需要合理调拨冲锋艇数量,确保救援资源的合理分配和高效利用。

5 结 论

1) 通过算法对比试验,得知 HNSGA-II 在总配送时间上比 NSGA-II 与 MOABCA 分别节约 12.3% 和 6.8%,在救援效用方面分别提升 62% 和 29%,在医疗物资送达时间的平均满意度方面分别提高 13% 和 6.1%,证明 HNSGA-II 在求解复杂多目标优化问题时的优越性及路径规划方案的有效性。

2) 通过灵敏性分析试验可知:调拨合适数量和载重量的冲锋艇到临时配送点对医疗物资配送路径规划具有显著影响,不但能缩短冲锋艇航行时间、减少各路径冲锋艇出发间隔,而且可以降低冲锋艇平均使用次数,尽快配送医疗物资至需求点以获得更大的救援效用,确保规划的医疗物资配送方案科学有效。

3) 未来研究将进一步引入洪灾灾情动态变化及路况修复等因素,进行深入探讨,为洪灾应急物流工作提供更完善的理论支持和决策指导。

参 考 文 献

- [1] 龚英,涂煜煜,周愉峰. 卡车-无人机协同的洪灾应急选址-路径鲁棒优化问题[J]. 计算机工程与应用, 2025, 61(14):307-321.
GONG Ying, TU Manman, ZHOU Yufeng. Truck-drone collaborated location-routing robust optimization problem for flood emergency response[J]. Computer Engineering and Applications, 2025, 61(14):307-321.
- [2] 刘长石, 罗亮, 周鲜成, 等. 震后初期应急物资分配-运输的协同决策:公平与效率兼顾[J]. 控制与决策, 2018, 33(11):2 057-2 063.
LIU Changshi, LUO Liang, ZHOU Xiancheng, et al. Collaborative decision-making of relief allocation-transportation in early post-earthquake: considering both fairness and efficiency[J]. Control and Decision, 2018, 33(11):2 057-2 063.
- [3] GHARIB Z, BOZORGI-AMIRI A, TAVAKKOLI-MOGHADDAM R, et al. A cluster-based emergency vehicle routing problem in disaster with reliability[J]. Scientia Iranica, 2018, 25(4):2 312-2 330.
- [4] HAGHI M, GHOMI S M T F, JOLAI F. Developing a robust multi-objective model for pre/post disaster times under uncertainty in demand and resource[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 154:188-202.
- [5] WENG Xun, DUAN Shuyao, ZHANG Jingtian, et al. A material allocation model for public health emergency under a multimodal transportation network by considering the demand priority and psychological pain[J]. Mathematics, 2024, 12(3):DOI: 10.3390/math12030489.
- [6] 张艳萍, 崔娜, 张波. 基于多式联运的应急物资供应多目标优化研究[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(7): 230-238.
ZHANG Yanping, CUI Na, ZHANG Bo. Multi-objective optimization strategy of emergency material supply based on multi-mode transportation[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(7):230-238.
- [7] 刘长石, 寇纲, 刘导波. 震后应急物资多方式供应的模糊动态 LRP[J]. 管理科学学报, 2016, 19(10):61-72.
LIU Changshi, KOU Gang, LIU Daobo. Fuzzy dynamic LRP for post-earthquake multimodal relief delivery[J]. Journal of Management Sciences in China, 2016, 19(10):61-72.
- [8] MAGHFIROH M F N, HANAOKA S. Multi-modal relief distribution model for disaster response operations[J]. Progress in Disaster Science, 2020, 6:DOI: 10.1016/j.pdisas. 2020. 100095.
- [9] 刘松, 邵毅明, 彭勇, 等. 应急救援物资多式联运路径优化[J]. 中国安全科学学报, 2019, 29(12):152-157.
LIU Song, SHAO Yiming, PENG Yong, et al. Multi-modal transport route optimization of emergency relief materials[J]. China Safety Science Journal, 2019, 29(12): 152-157.

[10] 宋英华, 王莉芳, 杜丽敬, 等. 模糊条件下应急物资配送选址-多模式运输问题[J]. 中国安全科学学报, 2017, 27(7):169-174.
SONG Yinghua, WANG Lifang, DU Lijing, et al. Location-multimodal transportation problem for relief distribution in emergency logistics under fuzzy conditions[J]. China Safety Science Journal, 2017, 27(7):169-174.

[11] 高鹏飞, 刘方翔, 黄建华, 等. 考虑灾民心理痛苦的震后应急物资调配问题研究[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(11):200-207.
GAO Pengfei, LIU Fangxiang, HUANG Jianhua, et al. Research on post-earthquake emergency material allocation considering psychological pain of victims[J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(11):200-207.

[12] 吕伟, 李志红, 冯满满, 等. 考虑资源和时间窗约束的应急物资调配模型[J]. 中国安全科学学报, 2019, 29(12):137-143.
LYU Wei, LI Zhihong, FENG Manman, et al. Emergency material allocation in consideration of resource and time window constraints[J]. China Safety Science Journal, 2019, 29(12):137-143.

[13] 曲冲冲, 王晶, 黄钧, 等. 考虑时效与公平性的震后应急物资动态配送优化研究[J]. 中国管理科学, 2018, 26(6):178-187.
QU Chongchong, WANG Jing, HUANG Jun, et al. Dynamic emergency materials distribution optimization with timeliness and fairness objective for post-earthquake emergency rescue[J]. Chinese Journal of Management Science, 2018, 26(6):178-187.

[14] 王慧丽, 乔咏艺. 考虑优先级和时间窗约束的应急物资调配模型[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(12):5 069-5 075.
WANG Huili, QIAO Yongyi. Emergency material deployment model considering priority and time window constraints[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(12):5 069-5 075.

[15] 曾昭, 罗威, 梁明贤, 等. 银环蛇咬伤致急性呼吸衰竭的治疗及临床观察[J]. 蛇志, 2024, 36(1):34-35, 54.
ZENG Zhao, LUO Wei, LIANG Mingxian, et al. Treatment and clinical observation of acute respiratory failure caused by snake-bite of Bungarus multicinctus[J]. Journal of Snake, 2024, 36(1):34-35, 54.

[16] 王威, 陈泉芳, 巫艳彬, 等. 广西境内两种常见神经毒类毒蛇咬伤中毒的临床特点与院前急救策略分析[J]. 中国全科医学, 2014, 17(14):1 671-1 673.
WANG Wei, CHEN Quanfang, WU Yanbin, et al. Clinical features of poisoning from common nerve poison snake bites and its pre-hospital care strategy in Guangxi province[J]. Chinese General Practice, 2014, 17(14):1 671-1 673.

[17] 谭晓燕, 毛新华, 周继彪, 等. 考虑多维修队合作策略的灾后路网修复调度与路由联合优化[J]. 控制与决策, 2024, 39(12):4 151-4 159.
TAN Xiaoyang, MAO Xinhua, ZHOU Jibiao, et al. Joint optimization of scheduling and routing in post-disaster road network repair considering multi-crew cooperation [J]. Control and Decision, 2024, 39(12):4 151-4 159.

[18] 张玲, 高鹏飞, 张琳. 基于剥夺成本的应急疏散与物资调配问题研究[J]. 中国管理科学, 2024, 32(5):187-195.
ZHANG Ling, GAO Pengfei, ZHANG Lin. Research on emergency evacuation and material allocation based on deprivation cost [J]. Chinese Journal of Management Science, 2024, 32(5):187-195.

[19] 周鲜成, 余玮瑛, 李松明, 等. 考虑时间依赖和同时取送货的双目标绿色车辆路径问题研究[J]. 系统科学与数学, 2024, 44(9):2 798-2 815.
ZHOU Xiancheng, YU Weiying, LI Songming, et al. Research on time dependent dual objective green vehicle routing problem with simultaneous pick-up and delivery[J]. Journal of Systems Science and Mathematical, 2024, 44(9):2 798-2 815.

[20] SOLOMON M. Algorithms for the vehicle routing problem with time windows constraints[J]. Operations Research, 1987, 35(2):254-265.

[21] FRAGSSA C. Engineering design driven by models and measures: the case of a rigid inflatable boat[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2019, 7(1):DOI: 10.3390/jmse7010006.

[22] 刘长石, 李君宇, 易鲲鹏, 等. 分时电价背景下电动车配送-充电/放电路径规划[J]. 控制与决策, 2025, 40(3):794-802.
LIU Changshi, LI Junyu, YI Kunxiang, et al. Electric vehicle routing with charging/discharging under time-of-use electricity prices [J]. Control and Decision, 2025, 40(3):794-802.

[23] AKBARI R, HEDAYATZADEH R, ZIARATI K, et al. A multi-objective artificial bee colony algorithm[J]. Swarm and Evolutionary Computation, 2012, 2:39-52.

作者简介： 刘长石（1975—）,男,湖南邵阳人,博士,教授,主要从事物流与供应链管理、数字经济等方面的研究。E-mail: liuchangshi964@126.com。

