

中文引用格式:孙启轩,刘阳,贾顺,等.考虑路况与需求紧迫度的震后应急物资配送路径规划[J].中国安全科学学报,2026,36(4):235-243.

英文引用格式:Sun Qixuan, Liu Yang, Jia Shun, et al. Post-earthquake emergency supplies distribution route planning considering road conditions and demand urgency[J]. China Safety Science Journal, 2026, 36(4): 235-243.

考虑路况与需求紧迫度的震后应急物资配送路径规划*

孙启轩¹, 刘阳^{**1,2}副教授, 贾顺¹教授, 陆继锋²教授, 田军³教授

(1 山东科技大学 工业工程系, 山东 青岛 266590; 2 山东科技大学 公共安全与应急管理研究院, 山东 青岛 266590; 3 西安交通大学 管理学院, 陕西 西安 710049)

中图分类号:X913.1

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2026.04.1651

基金项目:教育部人文社会科学研究项目(24YJC630144, 20YJC840021);山东省自然科学基金资助(ZR2023QG073);泰山学者工程专项经费资助(tsqnz20231221, tsqn202306202)。

【摘要】为提升震后应急物资配送效率,在运力受限且需同时配送多类应急物资的条件下,综合考虑灾区道路状况与受灾点需求紧迫度,研究应急物资配送路径规划问题。首先,基于道路损毁率修正配送车辆行驶速度,并结合地震灾害特点建立需求紧迫度评价方法;然后,以总配送时间和总需求紧迫度成本最小为目标,构建包含多个配送中心、受灾点、应急物资类别与配送车辆类型的震后应急物资配送路径规划模型;其次,设计一种融合非支配排序遗传算法(NSGA-II)和变邻域搜索算法(VNS)的混合进化算法(HEA)用于模型求解;最后,以“5·12”汶川地震为背景构造算例,验证模型和算法的有效性和可行性。结果表明:HEA在解集收敛性与求解质量方面均优于对比的3种多目标算法,可在短时间内(平均115.0 s)为应急决策者提供一组多样化的权衡方案。

【关键词】 应急物资; 配送路径; 道路损毁; 需求紧迫度; 混合进化算法(HEA)

Post-earthquake emergency supplies distribution route planning considering road conditions and demand urgency

Sun Qixuan¹, Liu Yang^{1,2}, Jia Shun¹, Lu Jifeng², Tian Jun³

(1 Department of Industrial Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao Shandong 266590, China; 2 Institute of Public Safety and Emergency Management, Shandong University of Science and Technology, Qingdao Shandong 266590, China; 3 School of Management, Xi'an Jiaotong University, Xi'an Shaanxi 710049, China)

Abstract: To enhance the efficiency of emergency supplies distribution after an earthquake, an emergency vehicle routing optimization problem was investigated under limited transportation capacity and the need to simultaneously deliver multiple categories of emergency supplies, while road conditions and demand urgency were jointly considered. Firstly, vehicle travel speeds were corrected based on road damage rates, and a demand urgency evaluation method is established by incorporating key characteristics of earthquake disasters. Then, a post-earthquake emergency supplies distribution optimization model was

* 文章编号:1003-3033(2026)04-0235-09 收稿日期:2025-12-15; 修稿日期:2026-02-27

** 通信作者:刘阳(1991—),男,山东沂水人,博士,副教授,主要从事应急管理、应急系统建模与优化、救灾物资逆向物流等方面的研究。
E-mail:fanxingply@163.com。

formulated to minimize the total delivery time and the total urgency-weighted demand cost, involving multiple depots, multiple affected sites, multiple types of emergency supplies, and heterogeneous vehicle fleets. Next, a HEA integrating the fast non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II) with variable neighborhood search (VNS), is then designed to solve the model. Finally, a case study based on the 2008 Wenchuan (5.12) earthquake was constructed, and simulation experiments were conducted to validate the effectiveness and feasibility of the proposed model and algorithm. The results show that HEA outperforms three benchmark multi-objective optimization algorithms in both solution-set convergence and overall solution quality, and can provide emergency decision-makers with a diverse set of trade-off solutions within a short computation time (average 115.0 s).

Keywords: emergency supplies; delivery route; road damage; demand urgency; hybrid evolutionary algorithm (HEA)

0 引言

地震发生后,灾区对应急物资的需求具有突发性和大规模特征,高效配送是保障救援有序开展、减少人员伤亡和财产损失的关键。与常规物流不同,震后应急物资配送面临复杂决策情境与严苛资源约束:路网层面,地震导致道路损毁,部分路段通行能力下降甚至中断,制约配送效率^[1];运力层面,震后初期可调度的车辆有限,运力稀缺性与高时效性要求矛盾突出;需求层面,不同受灾点需求紧迫度差异显著^[2],若单纯优化配送时间而忽视紧迫度的空间异质性,可能使灾情严峻点无法及时获援,削弱整体应急效能。因此,统筹路网状态和需求紧迫度,科学制定震后应急物资配送路径,对提升应急资源配置效率与救援效果具有重要意义。

针对应急物资配送路径规划问题,国内外学者已开展丰富研究,在需求刻画方面,张莉等^[3]基于熵权法确定受灾点需求紧迫度,构建需求可拆分的多目标应急医疗物资调度模型;Li Wen 等^[4]提出城市暴雨洪涝灾害下的两阶段配送框架,先对需求紧迫度排序分级,再优化配送方案。在路网约束方面, Li Ran 等^[5]引入道路通行能力系数表征损毁影响,研究了多重灾害下的车辆路径优化;曾小青等^[6]建立路面状况指数方程确定受损道路车速,以总成本和人道主义救援评价为目标构建配送模型。在模型求解方面,研究者多将该问题视为特殊车辆路径问题,广泛应用改进型启发式算法。刘艳秋和胡绩辉^[7]设计混合人工鱼群算法求解运输路径优化模型;刘长石等^[8]面向洪涝灾害建立卡车-冲锋艇协同配送模型,采用改进非支配排序遗传算法求解; Liu Haishi 等^[9]提出基于差分进化的混合多宇宙优化算法求解城市应急配送路径。现有研究多基于单一车型或数量充足前提,且忽略多品类物资需

求并存的复杂场景,统筹道路损毁影响与需求紧迫度的震后应急物资配送路径规划研究仍相对有限。

综上,笔者拟在有限运力与多车型约束下,综合考虑路况与需求紧迫度,研究震后多配送中心、多受灾点、多品类应急物资的协同配送路径规划问题。首先,基于道路损毁率修正车辆行驶速度,并综合灾情状况与人口结构评估需求紧迫度,进而构建以总配送时间与总需求紧迫度成本最小化为目标的优化模型,设计一种适配模型特性的混合进化算法 (Hybrid Evolutionary Algorithm, HEA),以期为震后应急物资配送决策提供方法支撑。

1 震后应急物资配送路径规划问题

1.1 问题描述

地震发生后,受灾区域内存在多个亟待救援的受灾点。各配送中心储备多品类应急物资,配备异构车队。需基于受灾点需求、路网状态及需求紧迫度,制定配送路径方案,以有限运力实现总配送时间和总需求紧迫度成本最优。多配送中心-多受灾点构成的二级应急配送网络如图 1 所示。

为便于模型构建,作如下假设:①每个受灾点所需的各类应急物资仅由 1 辆车配送,即不考虑单一品类物资的拆分配送。②所有车辆从配送中心出发,完成配送任务后返回原配送中心。③各配送中心应急物资储备充足,能够完全满足受灾区域内全部物资需求。④任意配送中心和受灾点间均有道路相连,且各路段损毁率在配送时段内已知^[10]。⑤同一受灾点所需的不同品类物资可由不同车辆配送。

1.2 配送车辆行驶速度修正

参照文献[7,11],构建考虑道路损毁的配送车辆实际平均行驶速度计算公式:

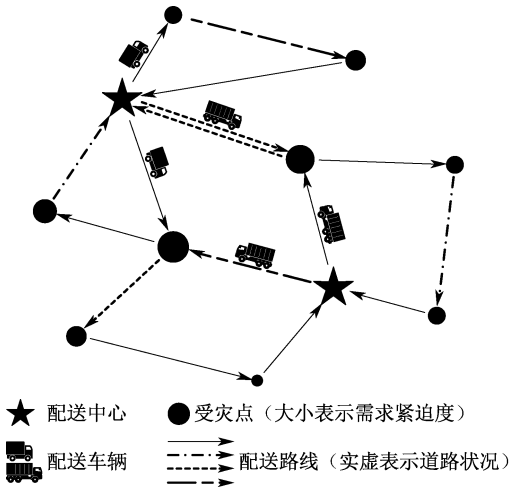


图1 二级应急配送网络图

Fig.1 Two-echelon emergency distribution network

$$v_{l,i,j} = v'_l(1 - \alpha_{i,j}) + v'_l \alpha_{i,j} \left(1 - \frac{\exp(2\alpha_{i,j})}{8.14}\right),$$

$$\forall l \in L, i \in P_l, j \in P_l \quad (1)$$

式中: $v_{l,i,j}$ 为车辆 l 在考虑道路损毁下从节点 i 到节点 j 的平均速度, km/h; v'_l 为车辆 l 在正常情况下的平均行驶速度, km/h; $\alpha_{i,j}$ 为节点 i 与 j 间的道路损毁率(可通过无人机航拍或遥感获取), $\alpha_{i,j} \in [0, 1]$; L 为车辆集合, $L = \{1, 2, \dots, l\}$; P_l 为车辆 l 可达节点集合, $P_l = m_l \cup N$; m_l 为车辆 l 所属配送中心, N 为受灾点集合, $N = \{m+1, m+2, \dots, m+n\}$ 。

1.3 应急物资需求紧迫度评价

为提升灾后整体应急响应效能,需关注受灾点物资需求紧迫度,优先保障高紧迫度物资配送。笔者综合考虑受灾程度、人口因素和物资需求,构建需求紧迫度评价指标体系,具体指标构成为:①受灾程度维度。震中距、建筑物受损数量、受灾面积。②人口因素维度。伤亡人数、老幼人口数量、人口密度。③物资需求维度。总需求数量。

为避免专家主观赋权偏差,采用熵权法确定指标客观权重;针对指标量纲差异,采用最小-最大归一化处理。由此,得到各受灾点 j 对应应急物资 k 的需求紧迫度 $e_{j,k}$ [9]:

$$e_{j,k} = \sum_{\eta \in \Phi} \omega_{\eta} S_{j,k,\eta}, \forall j \in N, k \in K \quad (2)$$

式中: K 为应急物资类型集合, $K = \{1, 2, \dots, k\}$; ω_{η} 为应急物资需求紧迫度评价指标层中每个指标 η 的权重; Φ 为指标权重集合, $\Phi = \{1, 2, \dots, \eta\}$; $S_{j,k,\eta}$ 为受灾点 j 对应应急物资 k 评价指标 η 的归一化值。

1.4 应急物资配送路径规划模型构建

震后灾区对应急物资送达时效具有极高要求。因此,将最小化总配送时间作为首要优化目标:

$$\min f_1 = \min \sum_{l \in L} \sum_{i \in P_l} \sum_{j \in P_l} x_{l,i,j} \left(\frac{r_{i,j}}{v_{l,i,j}} \right) \quad (3)$$

式中: $x_{l,i,j}$ 为 0-1 决策变量,若车辆 l 从节点 i 驶向节点 j , 则 $x_{l,i,j} = 1$, 否则 $x_{l,i,j} = 0$; $r_{i,j}$ 为节点 i 到 j 的距离, km。

震后应急救援的核心是挽救生命、降低损失。区别于以经济成本为优化目标的研究,笔者基于需求紧迫度评估结果,将最小化总需求紧迫度成本作为第二优化目标:

$$\min f_2 = \min \sum_{j \in N} \sum_{k \in K} t_{j,k} e_{j,k} c_k \quad (4)$$

式中: $t_{j,k}$ 为受灾点 j 所需应急物资 k 的送达时间, h; c_k 为应急物资 k 的紧迫度成本转化系数(将无量纲紧迫度转换为可度量的损失或等效成本,刻画应急物资 k 的相对重要程度), 万元/h。 $t_{j,k}$ 越长, 若 $e_{j,k}$ 较高或应急物资 k 较为重要, 则需求紧迫度成本越高, 从而驱动高需求紧迫和重要应急物资优先配送。

对于任何受灾点 $j \in N$, 若车辆 l 访问受灾点 j , 则到达时间 $T_{l,j}$ 取决于车辆 l 到达前一节点 i 的时间 $T_{l,i}$ 与从节点 i 到 j 的行驶时间之和, 其中前一节点 i 满足 $x_{l,i,j} = 1$ (其中, $i \in P_l$)。由此,递归计算车辆 l 到达受灾点 j 的时间:

$$T_{l,j} = \sum_{i \in P_l} x_{l,i,j} \left(T_{l,i} + \frac{r_{i,j}}{v_{l,i,j}} \right), \forall l \in L, \forall j \in N \quad (5)$$

式中 $T_{l,j}$ 、 $T_{l,i}$ 分别为车辆 l 到达受灾点 j 、节点 i 的时间, h。

车辆 l 的时间递归及初始出发时刻约束:

$$T_{l,j} \geq T_{l,i} + \frac{r_{i,j}}{v_{l,i,j}} - O \times (1 - x_{l,i,j}),$$

$$\forall l \in L, j \in N \quad (6)$$

$$T_{l,m_l} = 0, \forall l \in L \quad (7)$$

式中: T_{l,m_l} 为车辆 l 从所属配送中心 m_l 出发的时刻, $m_l \in M$; M 为配送中心集合, $M = \{1, 2, \dots, m\}$; O 为无穷大的正数。若车辆 l 从节点 i 驶向受灾点 j (即 $x_{l,i,j} = 1$), 则 $T_{l,j}$ 至少为车辆 l 到达节点 i 的时间与从节点 i 驶向受灾点 j 的行驶时间之和。

通过车辆 l 是否为受灾点 j 配送应急物资 k 和车辆 l 到达受灾点 j 的时间来计算 $t_{j,k}$:

$$t_{j,k} = \sum_{l \in L} y_{l,j,k} \times T_{l,j}, \forall j \in N, \forall k \in K \quad (8)$$

式中 $y_{l,j,k}$ 为 0-1 决策变量,若车辆 l 配送受灾点 j 所需应急物资 k ,则 $y_{l,j,k} = 1$,否则 $y_{l,j,k} = 0$ 。

应急物资配送车辆载重、容量及数量约束:

$$\sum_{j \in J} \sum_{k \in K} d_{j,k} y_{l,j,k} w_k \leq W_l, \forall l \in L \quad (9)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{k \in K} d_{j,k} y_{l,j,k} h_k \leq H_l, \forall l \in L \quad (10)$$

$$\sum_{l \in L} z_l \leq \varepsilon \quad (11)$$

式中: $d_{j,k}$ 为受灾点 j 对应急物资 k 的需求量,件; w_k 为应急物资 k 的单位重量,kg/件; W_l 为车辆 l 的最大载质量,kg; h_k 为应急物资 k 的单位体积, m^3 /件; H_l 为车辆 l 的最大容积, m^3 ; z_l 为 0-1 决策变量,如果车辆 l 被使用,则 $z_l = 1$,否则 $z_l = 0$; ε 为车辆总数。

所有车辆从配送中心出发,并返回同一配送中心;车辆访问受灾点后必须离开;各受灾点的单一品类物资需求须由同一车辆完成,不可拆分。具体约束如下:

$$\sum_{j \in N} x_{l,m_l,j} \leq z_l, \forall l \in L \quad (12)$$

$$\sum_{i \in N} x_{l,i,m_l} \leq z_l, \forall l \in L \quad (13)$$

$$\sum_{i \in P_l} x_{l,i,j} = \sum_{i \in P_l} x_{l,j,i}, \forall l \in L, \forall j \in N \quad (14)$$

$$\sum_{l \in L} y_{l,j,k} = 1, \forall j \in J, k \in K \quad (15)$$

模型中决策变量的约束如下:

$$x_{l,i,j} \in \{0,1\}, \forall l \in L, i \in P_l, j \in P_l \quad (16)$$

$$y_{l,j,k} \in \{0,1\}, \forall l \in L, j \in N, k \in K \quad (17)$$

$$z_l \in \{0,1\}, \forall l \in L \quad (18)$$

2 HEA 设计

2.1 求解策略

所构模型可归类为多车场异构车辆路径问题的应急场景变体,属非确定性多项式困难问题。震后应急决策具有极强的时效约束,精确算法难以在可接受时间内获得满意解,故采用元启发式算法。第二代非支配排序遗传算法 (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II, NSGA-II) 在多目标离散优化中表现优异,但存在易陷入局部最优、收敛速度较慢等局限。为此,本文在改进 NSGA-II 的基础上,引入局部搜索能力较强的变邻域搜索算法 (Variable Neighborhood Search, VNS),设计一种 HEA 用于模型求解。针对车辆的多重属性 (所属配送中心、速度、载重、容积),采用唯一性编号实现“降维”处理。同时,将各受灾点的物资需求视为独立配送任务并

同步编号,关联受灾点、物资种类和需求量等信息。求解分 3 阶段:①将任务分配至符合约束条件的车辆以确定配车方案;②解码各车辆承担的任务序列得到服务顺序;③关联车辆与任务详情,生成完整配送路径方案。

2.2 解的编码与解码

设计双层编码机制,上层为配送任务编号,下层为对应执行车辆编号,编码总长度等于有效配送任务 ($d_{j,k} > 0$) 总数。假设共有 L 辆车、 N 个受灾点,且每个受灾点均有 K 种应急物资需求,则编码长度为 $N \times K$ 。上层编码为 $[1, N \times K]$ 中所有整数的排列,每个编号映射特定受灾点及物资种类;下层编码为 $[1, L]$ 中满足所有约束条件的车辆编号,每个编号映射相应配送中心和车辆类型。

采用顺序解码策略,流程如下:①从首位起依次遍历,确定每个配送任务的执行车辆及每辆车完成配送任务的顺序。②根据车辆所属配送中心、配送任务对应受灾点与已经确定的服务顺序,构建具体配送路径。③检查车辆是否为同一受灾点配送多种应急物资,以受灾点被同一车辆首次访问为基准,将后续配送任务合并至该次访问,形成最终路径。上述解的编码与解码过程如图 2 所示。



图 2 解的编码与解码

Fig. 2 Encoding and decoding of solution

2.3 构造初始种群

1) 随机策略。随机打乱配送任务编号形成上层编码;自首位起依次为每个任务匹配车辆,作为下层编码。针对当前任务筛选满足载重和容积约束的可行车辆集,随机选取一辆,逐任务处理至完毕。

2) 就近优先策略。上层编码仍为任务编号随机排列,下层分配优先选择距任务对应受灾点最近的配送中心。若该中心存在可行车辆则随机选取,否则按距离递增顺序遍历各配送中心直至匹配成功。

3) 紧迫度优先策略。首先,计算配送任务的紧迫度权重 (需求紧迫度值 $\times$ 紧迫度成本转化系数),

采用加权随机排列生成上层编码中的配送任务顺序,权重越高,出现在靠前位置的概率越大,越有可能被优先处理。针对当前任务,先筛选可行车辆集,再按 4 项指标(越大越优)评分:配送中心到受灾点距离倒数、行驶速度、剩余载重率、剩余容积率。各指标在候选车辆集中归一化处理后取相同权重计算最终评分,轮盘赌选择车辆。

4) 重启与修复机制。顺序分配可能导致后序任务无可行驶车辆,故引入重启与修复机制相结合的双重保障策略。具体而言,构造中若遇任务无法分配,立即终止并重置车辆空载状态重启;超重重启阈值仍未可行时,暂允不可行解并进入修复阶段。修复过程建模为可行性分配问题,以最大化保留原车辆分配方案为目标,满足“每项配送任务仅能分配给一辆车”以及“每辆车符合载重与容积约束”。

通过多种策略构造初始种群,以提升种群质量,个体初始化流程如图 3 所示。

2.4 交叉与变异算子设计

1) 车辆集合交叉算子。从参与配送的车辆中随机选取半数(向下取整)车辆,为子代个体划定一个从特定父代“继承”配送任务的车辆集合。生成子代个体时,子代 1 继承父代 1 的配送任务序列,并保留父代 1 中由所选车辆负责的全部配送任务;剩余任务优先分配给父代 2 中对应的车辆。分配时若不满足约束,则从当前可行的车辆中选择;若无可行

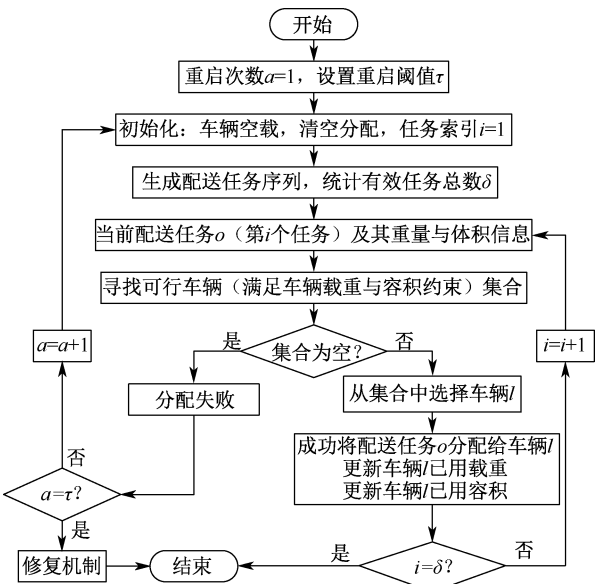


图 3 个体初始化流程

Fig. 3 Individual initialization process

车辆,则暂允不可行解并后续修复。子代 2 同理。集合交叉如图 4a 所示。

2) 均匀交叉算子。子代 1 继承父代 1 的配送任务序列,每个配送任务以相同概率从父代 1 或 2 中继承对应配送车辆。选中继承父代 1 的车辆时先检验约束,若不满足则尝试父代 2 中对应的车辆,仍不可行则从可行车辆集中选择。若无可行车辆,则暂允不可行解并后续修复。子代 2 同理。均匀交叉如图 4b 所示。

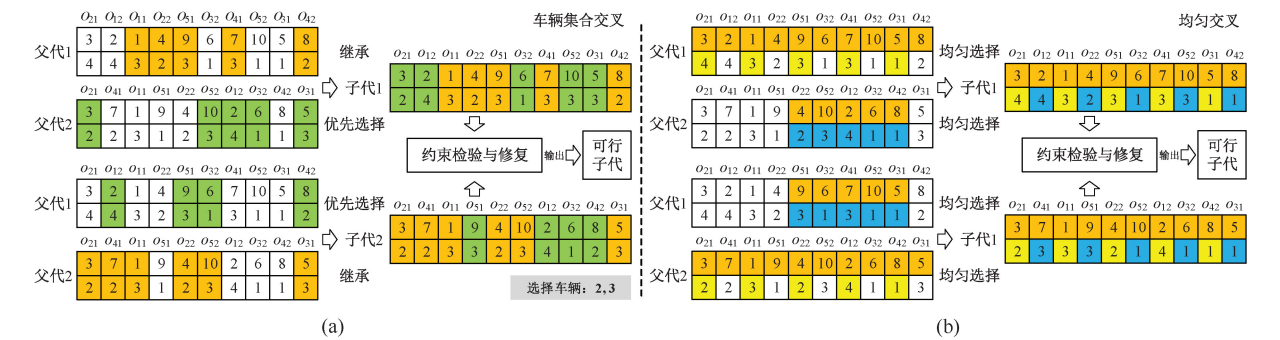


图 4 交叉操作示例

Fig. 4 Example of crossover operation

3) 随机多点变异算子。随机选择 q_1 个配送任务,清空其车辆指派后依次重新筛选异于原车的可行车辆集合。无可行驶车辆时优先采取重启机制,超出最大重启阈值则触发修复机制。

4) 随机多对变异。随机选择 q_2 对配送任务,交换每对配送任务的车辆指派。子代违反约束时直接触发修复机制。

参数 q_1 和 q_2 的值 ($q_1, q_2 \in q$) 随迭代动态变化,计算如下:

$$q = q_a + \left\lfloor (q_b - q_a) \left(1 - \left(\frac{g}{G} \right) \right)^2 \right\rfloor \quad (19)$$

式中: q 为选择的数量; q_a 为设定的最小数量; q_b 为设定的最大数量; g 为当前的迭代次数; G 为最大迭代次数; $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示向下取整。

2.5 局部搜索

局部搜索保持车辆承担的配送任务不变,仅优化各车访问受灾点的顺序。采用3种邻域结构:①交换,随机交换车辆路径中2个受灾点的访问顺序;②插入,随机选取1个受灾点,将其插入车辆路径中的其他位置;③区间反转,随机选择2个受灾点,反转其间的路径。仅当车辆访问受灾点数 ≥ 2 时执行邻域操作,接受准则为 Pareto 改进。局部搜索完成后将结果还原至个体的染色体中。

综上,HEA 通过3种策略生成初始种群,经选择、交叉、变异及局部搜索实现 Pareto 解集迭代更新,整体流程如图5所示。

3 震后应急物资配送算例分析

3.1 基于汶川地震场景的算例构建

为验证模型有效性,以2008年“5·12”汶川地震为背景,基于文献[12]的研究,结合中国地震台网数据与《汶川特大地震四川抗震救灾志》^[13]记载构造算例。选取20个受灾情况较为严重区域作为受灾点(编号为 N_1-N_{20}),3个物资储备点作为配送中心(编号为 M_1-M_3),2种应急物资(饮用水 K_1 和帐篷 K_2)作为配送对象。

车辆配置方面,各配送中心(汶川、都江堰和绵竹)均配备大型卡车(载重16 000 kg、容积70 m³、速度50 km/h)3辆、中型卡车(载重10 000 kg、容积40 m³、速度60 km/h)2辆及小型卡车(载重6 000 kg、容积20 m³、速度70 km/h)1辆。

路网信息方面,配送中心和受灾点位置坐标已知,节点间道路连通。道路损毁率通过无人机航拍或遥感获取,部分路段距离与损毁率见表1。

表1 道路距离及损毁率

Table 1 Road distances and damage rates

灾区道路	距离/km	损毁率	灾区道路	距离/km	损毁率
$M_1 \rightarrow N_1$	19	0.21	$M_2 \rightarrow N_1$	58	0.5
$M_1 \rightarrow N_2$	66	0.21	$M_2 \rightarrow N_7$	69	0.15
$M_1 \rightarrow N_3$	76	0.22	$M_3 \rightarrow N_7$	19	0.18
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$N_5 \rightarrow N_8$	45	0.34	$N_8 \rightarrow N_9$	28	0.16
$N_1 \rightarrow N_2$	50	0.55	$N_3 \rightarrow N_7$	104	0.34
$N_7 \rightarrow N_9$	13	0.17	$N_4 \rightarrow N_9$	124	0.17

应急物资供需方面,各配送中心物资储备充足,能完全覆盖所有受灾点需求,具体需求量见表2。其中,饮用水以“件”计,单件重12.5 kg、体积0.027 864 m³;帐篷以“顶”计,单顶重21 kg、体积0.305 5 m³。需求紧迫度计算方面,基于各受灾点灾情严重程度与人口结构数据,运用熵权法确定评价指标权重,继而通过式(2)计算各类物资的需求紧迫度系数,结果见表3。

参数设定方面,将饮用水 K_1 (生命维持型物资)的紧迫度成本转化系数 c_1 设为较高值($c_1=5$),帐篷 K_2 (安置保障型物资)的紧迫度成本转化系数 c_2 设为相对较低值($c_2=3$),以体现救援过程中不同类别物资的优先级差异。

3.2 算例求解及分析

算法参数设置如下:种群规模为300,最大迭代

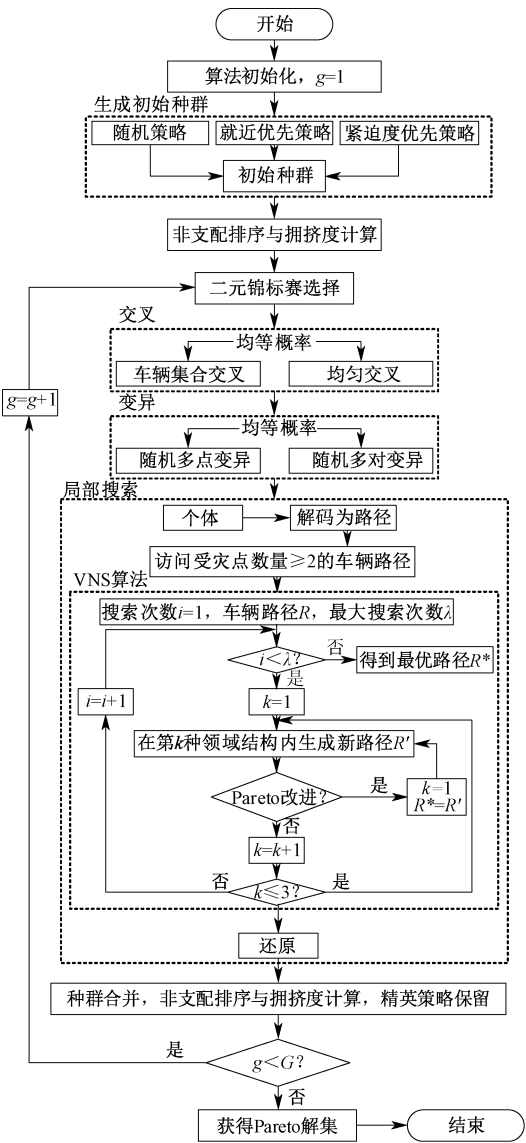


图5 HEA 流程

Fig. 5 Flow of HEA

表 2 受灾点应急物资需求

Table 2 Emergency supplies demand at affected areas

受灾点	绵虬镇	漩口镇	水磨镇	卧龙镇	高川乡	荦华镇	广济镇	九龙镇	马祖镇	师古镇
编号	N_1	N_2	N_3	N_4	N_5	N_6	N_7	N_8	N_9	N_{10}
饮用水/件	960	750	440	170	530	920	1050	560	200	990
帐篷/顶	110	76	42	30	60	91	50	63	4	38

受灾点	洛水镇	南新镇	秀水镇	塔水镇	青城山镇	天马镇	聚源镇	龙门山镇	雁门乡	克枯乡
编号	N_{11}	N_{12}	N_{13}	N_{14}	N_{15}	N_{16}	N_{17}	N_{18}	N_{19}	N_{20}
饮用水/件	770	400	320	160	320	900	770	360	300	380
帐篷/顶	86	37	45	22	30	35	85	40	36	52

表 3 受灾点应急物资需求紧迫度

Table 3 Urgency level of emergency supplies demand at affected areas

受灾点	N_1	N_2	N_3	N_4	N_5	N_6	N_7	N_8	N_9	N_{10}
饮用水/件	0.51	0.39	0.30	0.30	0.20	0.40	0.32	0.21	0.25	0.40
帐篷/顶	0.52	0.39	0.31	0.32	0.21	0.40	0.26	0.22	0.25	0.34

受灾点	N_{11}	N_{12}	N_{13}	N_{14}	N_{15}	N_{16}	N_{17}	N_{18}	N_{19}	N_{20}
饮用水/件	0.38	0.15	0.30	0.22	0.28	0.38	0.44	0.23	0.16	0.10
帐篷/顶	0.39	0.16	0.32	0.24	0.29	0.32	0.45	0.24	0.17	0.12

次数为 200,重启阈值为 20;变异点数和对数上限均为 10,下限分别为 2 和 1。初始种群采用随机、就近优先与需求紧迫度优先 3 种策略按 2 : 1 : 1 构造。设置交叉概率为 0.9,变异概率为 0.05,变邻域搜索循环次数为 15。经计算,总需求紧迫度成本最低下的车辆路径和应急物资配送方案如图 6、表 4 所示。

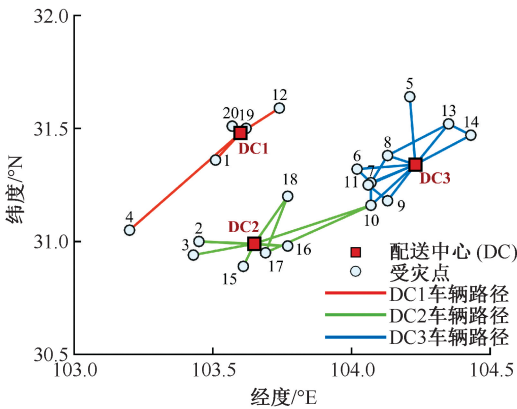


图 6 总需求紧迫度成本最低下的车辆路径
Fig. 6 Vehicle routing with minimum total urgency cost

表 4 总需求紧迫度成本最低下的应急物资配送方案

Table 4 Emergency supplies distribution scheme with minimizing total urgency cost

车辆	配送方案
L_1	$M_1 \rightarrow N_{19}(K_1, K_2) \rightarrow M_1$
L_2	$M_1 \rightarrow N_1(K_1, K_2) \rightarrow M_1$
L_4	$M_1 \rightarrow N_{20}(K_1, K_2) \rightarrow M_1$
L_5	$M_1 \rightarrow N_{12}(K_1, K_2) \rightarrow M_1$
L_6	$M_1 \rightarrow N_4(K_1, K_2) \rightarrow M_1$

续表 4

车辆	配送方案
L_7	$M_2 \rightarrow N_{16}(K_1, K_2) \rightarrow N_2(K_2) \rightarrow M_2$
L_8	$M_2 \rightarrow N_{17}(K_2) \rightarrow N_{10}(K_1) \rightarrow M_2$
L_9	$M_2 \rightarrow N_{17}(K_1) \rightarrow N_{18}(K_1, K_2) \rightarrow M_2$
L_{10}	$M_2 \rightarrow N_2(K_1) \rightarrow M_2$
L_{11}	$M_2 \rightarrow N_3(K_1, K_2) \rightarrow M_2$
L_{12}	$M_2 \rightarrow N_{15}(K_1, K_2) \rightarrow M_2$
L_{13}	$M_3 \rightarrow N_{11}(K_1, K_2) \rightarrow N_9(K_1, K_2) \rightarrow M_3$
L_{14}	$M_3 \rightarrow N_7(K_2) \rightarrow N_6(K_1, K_2) \rightarrow M_3$
L_{15}	$M_3 \rightarrow N_8(K_2) \rightarrow N_7(K_1) \rightarrow N_{10}(K_2) \rightarrow M_3$
L_{16}	$M_3 \rightarrow N_5(K_1, K_2) \rightarrow M_3$
L_{17}	$M_3 \rightarrow N_8(K_1) \rightarrow N_{13}(K_2) \rightarrow N_{14}(K_2) \rightarrow M_3$
L_{18}	$M_3 \rightarrow N_{13}(K_1) \rightarrow N_{14}(K_1) \rightarrow M_3$

该方案共调度 17 辆车,总配送时间 22.19 h,总需求紧迫度成本 27.96 万元。算法运行 10 次的平均求解时间为 115.0 s,表明 HEA 能够在短时间内求得较高质量的解集,满足震后应急决策的时效性要求。

由表 4 可知:对于物资需求量较大或需求紧迫度较高的受灾点,算法倾向于采取直送模式(单车辆满足单受灾点全部需求)。例如:受灾点 N_1 的 2 类物资需求紧迫度很高,则选派距其最近的配送中心(M_1)的可行车辆执行直达配送。该策略虽可能增加车辆使用数量和总配送时间,但能确保高需求、高紧迫度的受灾点优先获救,最大程度降低等待惩罚成本。多受灾点配送路径同样体现需求紧迫度对路径决策的影响,如车辆 L_9 、 L_{13} 等。以车辆 L_9 的

路径($M_2 \rightarrow N_{17} \rightarrow N_{18} \rightarrow M_2$)为例,若调整受灾点 N_{18} 、 N_{17} 的访问顺序,总配送时间不变,但由于受灾点 N_{17} 的需求紧迫度更高,因此算法优先报障该受灾点物资供应。这验证了灾后应急物资配送中统筹考虑需求紧迫度的必要性。值得注意的是,部分路径存在“非最高紧迫度的受灾点被优先访问”现象,反映了模型与算法在局部紧迫度与全局配送效率与效果间的权衡。例如:车辆 L_{15} 未优先访问需求更迫切、物资重要程度更高的受灾点 N_7 ,原因在于受灾点 N_8 位于配送中心 M_3 至受灾点 N_7 的必经路径上(或地理位置非常邻近),若强行优先访问受灾点 N_7 再折返受灾点 N_8 ,将导致路径迂回,增加总配送时间和路径上其他受灾点的等待时间。因此,局部紧迫度成本的微小增加换取了全局路程节约与其他受灾点等待时间缩短,在目标函数中具有更优的综合效益。

3.3 算法对比分析

选取传统 NSGA-II、基于分解的多目标进化算法(Multi-Objective Evolutionary Algorithm based on Decomposition, MOEA/D)、改进强度 Pareto 进化算法(Strength Pareto Evolutionary Algorithm 2, SPEA2)这3种经典多目标优化算法与 HEA 对比。参数设置如下:MOEA/D 采用经典邻域设置(邻域规模为20,更新概率为0.9);SPEA2 外部档案规模为300,其余参数与前文(3.2节)保持一致。为保证公平性,4种算法均采用双层编码与解码方式(2.2节),并使用相同的变异与交叉操作。每种算法独立运行10次,取最优 Pareto 解,结果如图7所示。

由图7可知:HEA 所得的 Pareto 解整体位于坐标轴左下方,明显优于传统 NSGA-II、SPEA2 和 MOEA/D 算法。具体而言,MOEA/D 解集距最优 Pareto 前沿较远,求解质量相对较差;SPEA2 虽在部分解上实现较短配送时间,但对应总需求紧迫度成

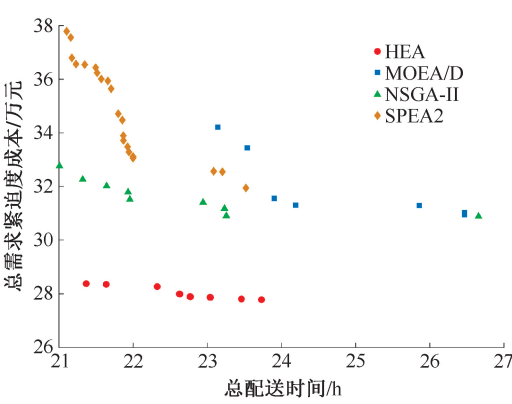


图7 4种算法的 Pareto 解

Fig. 7 Pareto solutions of four algorithms

本极高,表明其搜索过程可能陷入局部最优,未能有效处理目标冲突;NSGA-II 在2目标间的权衡能力有限,所得解集与 HEA 之间存在明显差距。综上所述,HEA 在逼近真实 Pareto 前沿的收敛精度与解集多样性的分布广度2个维度均优于 NSGA-II、MOEA/D 及 SPEA2 算法,验证了其有效性与竞争力。

4 结 论

1) 所提多目标优化模型与 HEA 能够有效解决考虑路况与需求紧迫度的震后应急物资配送路径规划问题,可在短时间内(平均115.0s)求得一组 Pareto 解集,为应急决策者在配送时效(最小化总配送时间)与救援效果(最小化总需求紧迫度成本)之间提供多样化权衡方案。

2) 对比试验表明:HEA 在解集收敛性与求解质量上均优于传统 NSGA-II、SPEA2 和 MOEA/D 算法,验证了该算法的有效性与竞争力。

3) 模型假设道路受损但未完全中断,尚未考虑严重道路损毁导致的“孤岛”效应,未来研究将融合地面车辆和无人机等运输工具,以增强极端灾害场景下的救援覆盖能力。

参 考 文 献

[1] Hu Hui, Chen Chaofeng, Liu Mengyuan, et al. Two-stage emergency material scheduling based on benders decomposition considering traffic congestion after a disaster[J]. Computers & Industrial Engineering, 2022, 174: DOI: 10.1016/j.cie.2022.108751.

[2] Huang Lida, Shi Panpan, Zhu Haichao. An integrated urgency evaluation approach of relief demands for disasters based on social media data[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2022, 80: DOI: 10.1016/j.ijdr.2022.103208.

[3] 张莉,张惠珍,刘冬,等. 考虑紧迫度的应急物资调度及粒子群算法求解[J]. 系统仿真学报, 2022, 34(9):

1 988–1 998.

Zhang Li, Zhang Huizhen, Liu Dong, et al. Particle swarm algorithm for solving emergency material dispatch considering urgency[J]. Journal of System Simulation, 2022, 34(9): 1 988–1 998.

- [4] Li Wen, Jiang Rengui, Wu Hao, et al. A new two-stage emergency material distribution framework for urban rainstorm and flood disasters to promote the SDGs[J]. Sustainable Cities and Society, 2024, 112: DOI: 10.1016/j.scs.2024.105645.

- [5] Li Ran, Ye Xiaofei, Pei Shuyi, et al. Optimization of vehicle routing problems combining the demand urgency and road damage for multiple disasters[J]. Journal of Safety Science and Resilience, 2025, 6(2): 196–211.

- [6] 曾小青, 刘理明, 程泽禹. 考虑灾后模糊需求与道路受损的应急物资配送模型及算法[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(1): 186–193.

Zeng Xiaoqing, Liu Liming, Cheng Zeyu. Emergency supply distribution model and its algorithm considering post-disaster fuzzy demand and road damage[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(1): 186–193.

- [7] 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]. 中国管理科学, 2025, 33(8): 198–208.

Liu Yanqiu, Hu Jihui. Research on emergency logistics path optimization based on hybrid artificial fish swarm algorithm[J]. Chinese Journal of Management Science, 2025, 33(8): 198–208.

- [8] 刘长石, 万城, 王凤, 等. 洪涝灾害下考虑受灾点差异的应急物资分配-配送优化[J]. 交通运输系统工程与信息, 2025, 25(3): 335–345, 357.

Liu Changshi, Wan Cheng, Wang Feng, et al. Emergency supply allocation and delivery optimization considering differences in affected areas during flood disasters[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2025, 25(3): 335–345, 357.

- [9] Liu Haishi, Sun Yuxuan, Pan Nan, et al. Study on the optimization of urban emergency supplies distribution paths for epidemic outbreaks[J]. Computers & Operations Research, 2022, 146: DOI: 10.1016/j.cor.2022.105912.

- [10] Zhou Yawen, Liu Jing, Zhang Yutong, et al. A multi-objective evolutionary algorithm for multi-period dynamic emergency resource scheduling problems[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2017, 99: 77–95.

- [11] 贾贵宾. 路面破损对道路通行能力的影响研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.

Jia Guibin. Research on road capacity resulting from pavement distress[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.

- [12] 郑斌, 马祖军, 李双琳. 基于双层规划的震后初期应急物流系统优化[J]. 系统工程学报, 2014, 29(1): 113–125.

Zheng Bin, Ma Zujun, Li Shuanglin. Integrated optimization of emergency logistics systems for post-earthquake initial stage based on bi-level programming[J]. Journal of Systems Engineering, 2014, 29(1): 113–125.

- [13] 《汶川特大地震四川抗震救灾志》编纂委员会. 汶川特大地震四川抗震救灾志·灾情[M]. 成都: 四川人民出版社, 2018: 166–282.



作者简介: 孙启轩 (2001—),男,山东兰陵人,硕士研究生,主要研究方向为应急物流管理、系统建模与优化。E-mail:supersqx@163.com。