

中文引用格式:吴琪,刘勇,马良,等. 考虑洪灾伤员心理剥夺的救护车多目标调度模型与算法[J]. 中国安全科学学报,2025,35(7): 31-39.

英文引用格式:WU Qi, LIU Yong, MA Liang, et al. Multi-objective ambulance scheduling model and algorithm considering psychological deprivation of flood victims[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(7): 31-39.

考虑洪灾伤员心理剥夺的救护车多目标调度模型与算法*

吴琪¹, 刘勇^{**1,2}副教授, 马良^{1,2}教授, 武嘉伟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)

中图分类号: X913.1

文献标志码: A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.07.1289

基金项目: 教育部人文社会科学研究青年基金资助(No. 21YJC630087); 广东省基础与应用基础研究基金资助(2019A151110850); 上海理工大学科技发展项目(24KJF2034)。

【摘要】 为减轻灾害导致的人员伤亡和经济损失,最小化伤员救助最大时间、救护车最迟服务时间标准差和伤员心理总剥夺成本,综合考虑伤员心理剥夺因素,构建多目标救护车应急救援调度优化模型,结合模型非确定性多项式(NP)难的特性,设计改进的第三代非支配排序遗传算法(INSGA-III),采用多染色体分层编码策略及动态交叉变异方法,以2019年江西省赣州市兴国县洪灾为例,对比INSGA-III与第三代非支配排序遗传算法(NSGA-III)、第二代非支配排序遗传算法(NSGA-II),开展救护车数量和相对剥夺成本系数的灵敏度分析,并验证模型和算法的有效性。结果表明:最小化伤员救助的最大时间为9.234 h,最小化救护车的最迟服务时间标准差为13.156 min,最小化伤员心理总剥夺成本为1 729.001。伤员的心理相对剥夺成本系数控制在0.3,配置500辆救护车,能有效提高救援的时效性和公平性。

【关键词】 洪涝灾害; 伤员心理; 救护车; 多目标优化; 应急救援; 改进的第三代非支配排序遗传算法(INSGA-III)

Multi-objective ambulance scheduling model and algorithm considering psychological deprivation of flood victims

WU Qi¹, LIU Yong^{1,2}, MA Liang^{1,2}, WU Jiawei¹

(1 School of Management, 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: To reduce casualties and economic losses caused by disasters, a multi-objective ambulance dispatch optimization model that minimizes the maximum rescue time, the standard deviation of ambulance service times, and the total psychological deprivation cost of casualties was developed, while accounting for psychological deprivation factors. Given the non-deterministic polynomial (NP)-hard nature of model, the

* 文章编号:1003-3033(2025)07-0031-09; 收稿日期:2025-03-01; 修稿日期:2025-05-10

** 通信作者:刘勇(1982—),男,江苏淮安人,博士,副教授,主要从事智慧应急管理、人工智能算法方面的研究。E-mail:liuyong_seu@163.com。

INSGA-III was proposed, incorporating a multi-chromosome hierarchical encoding strategy and dynamic crossover and mutation methods. Using the 2019 flood in Xingguo County, Ganzhou City, Jiangxi Province as a case study, the proposed INSGA-III was compared with NSGA-III and NSGA-II. Sensitivity analyses on ambulance quantity and relative deprivation cost coefficients demonstrated the effectiveness of model and algorithm. The results show that the maximum rescue time for casualties is minimized to 9.234 hours, the standard deviation of the latest ambulance service times is reduced to 13.156 minutes, and the total psychological deprivation cost of casualties is minimized to 1729.001. With the relative psychological deprivation cost coefficient set at 0.3 and 500 ambulances deployed, the timeliness and fairness of the rescue operations are significantly improved.

Keywords: flood disaster; psychology of injured; ambulance; multi-objective optimization; emergency rescue; improved third-generation non-dominated sorting genetic algorithm (INSGA-III)

0 引言

洪涝灾害(简称洪灾)是极具破坏力的自然灾害之一,对人类社会造成严重威胁^[1],在全球气候变化背景下,其发生频率和强度不断上升,对我国的负面影响日益显著^[2]。《“十四五”国家应急体系规划》^[3]强调要最大程度减少灾害损失,保障人民生命和社会稳定。而传统伤员救助调度多以救援时效性为核心,较少关注伤员心理需求,这会降低救援效率和公平性。因此,如何在伤员救助调度中综合考虑救援时效性与伤员心理需求,构建公平高效的救援调度方案,是当前灾后应急领域亟待解决的重要问题。

CHRISTIE 等^[4]提出伤员医疗救助的主要问题是救护车路径调度问题,而这类问题具有非确定性多项式(Non-deterministic Polynomial, NP)难性质。在此基础上,学者们围绕伤员分类、救护车配置及求解方法等关键问题展开深入研究。杨文国等^[5]通过伤员分簇建立双目标模型,TALARICO 等^[6]以最小化伤员最晚服务完成时间为目标优化灾难的动态性和不确定性,卢福强等^[7]构建异构车辆协同优化模型,通过自适应遗传算法优化救援总成本。灾后救援不仅考虑救援的时效性,还需基于人道主义考虑灾民的心理。HOLGUÍN-VERAS 等^[8]首次提出剥夺成本概念,此后,GUTJAHR 等^[9]引入基尼系数分析公平性问题,朱莉^[10]、张玲^[11]和陈鑫^[12]等进一步从心理剥夺成本和救援调配效率出发,构建多目标优化模型并验证其有效性。相较于灾民,伤员所感知的心理痛苦更为强烈,迟缓的救援会间接影响灾后应急救援的有效开展。针对伤员心理情绪问题,张晨晓等^[13]建立双目标规划模型,提升救助效果。然而,现有研究多聚焦于单目标或双目标优化,

尚未出现综合考虑时效性、公平性和伤员心理的多目标优化模型。此外,现有求解算法在处理大规模算例时,存在计算精度低、求解时间长等问题,难以满足实际救援高效率的要求。

鉴于此,笔者拟提出多目标救护车应急救援调度问题(Multi-Objective Ambulance Emergency Rescue Scheduling Problem, MAESP),通过构造剥夺成本函数,量化灾后伤员负面心理情绪,同时兼顾应急救援行动的时效性和公平性,构建多目标优化模型,提出改进的第三代非支配排序遗传算法(Improved Non-dominated Sorting Genetic Algorithm, INSGA-III)求解 MAESP,并进行算法验证,以期减轻伤员的负面心理痛苦,推动灾后应急救援行动高效开展。

1 MAESP 与调度模型

1.1 MAESP 描述

救护车从应急救援中心出发,依次将不同受灾点的伤员转运至具备完善医疗设施的临时救助点,途中为伤员提供临时医疗救助,随后再去往下一个受灾点继续转运伤员,具体路径方案如图1所示。MAESP旨在合理规划救护车路径,制定伤员转运方案,以实现最小化伤员最大救助时间、伤员心理总剥夺成本的目标,同时引入救护车最迟服务时间标准差这一目标,确保应急救援行动的公平性。

1.2 MAESP 假设

- 1) 已知各受灾点需救助伤员的数量及各临时救助点的最大容量。
- 2) 已知各受灾点、临时救助点的数量及位置。
- 3) 每个伤员仅被救援一次。
- 4) 伤员等待救援产生的负面心理剥夺成本可

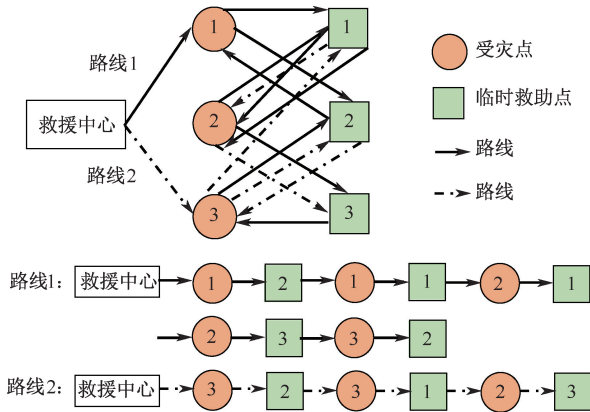


图1 救护车路径具体方案

Fig. 1 Specific route plan for ambulance

通过剥夺成本函数量化。

5) 同一车辆可重复经过受灾点或临时救助点。

6) 面对洪灾,重点考虑转运时间,忽略救护车在受灾点和临时救助点救助伤员时的等待时间。

1.3 伤员心理剥夺成本函数

为量化伤员因等待救助服务而产生的负面心理情绪^[8,14],构建以 e 为底的指数函数作为绝对剥夺成本函数。对各受灾点 i 的伤员,因救助服务时间不同产生的负面心理情绪,通过经济成本进行衡量,以时间为自变量的剥夺成本函数 $g_i(t)$ 如下式:

$$g_i(t) = \alpha \exp(\beta t_i) \quad (1)$$

式中: α 为剥夺成本系数; β 为剥夺时间系数; t_i 为等待救助的时间, h 。

各受灾点 i 伤员的绝对剥夺成本(Absolute Deprivation Cost, ADC)与等待救助的时长有关,计算如下式:

$$ADC_i = t_i g_i(t), \forall i \in I \quad (2)$$

式中 I 为受灾点集合, $i, i' \in I$ 。

构造相对剥夺成本(Relative Deprivation Cost, RDC)函数量化不同受灾点伤员产生的负面心理情绪的差异化程度,以提高应急救援行动的公平性,计算如下式:

$$RDC_{i,i'} = |ADC_i - ADC_{i'}|, \forall i, i' \in I \quad (3)$$

1.4 MAESP模型的构建

1.4.1 目标函数

目标1:最小化伤员救助的最大时间,如下式:

$$\min f_1 = \min[\max\{A_b, \forall b \in B\}] \quad (4)$$

$$A_b = \sum_{i \in I} t_{oi} \cdot y_{oi}^b +$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} (t_{ij} \cdot x_{ij}^b \cdot s_{ij}^b + t_{ji} \cdot z_{ji}^b \cdot m_{ji}^b), \forall b \in B \quad (5)$$

$$t_{oi} = \frac{d_{oi}}{\gamma_{oi} \cdot v_{oi}}, t_{ij} = \frac{d_{ij}}{\gamma_{ij} \cdot v_{ij}}, t_{ji} = \frac{d_{ji}}{\gamma_{ji} \cdot v_{ji}} \quad (6)$$

式中: B 为救护车集合, $b \in B$; A_b 为救护车 b 救助最后一位伤员的时间(最迟服务时间),是间接决策变量; h ; o 为救援中心编号; t_{oi} 为救护车从中心 o 到受灾点 i 的时间, h ; y_{oi}^b 为决策变量,当救护车 b 从中心 o 开往受灾点 i 时,取值为1,否则取值为0; J 为临时救助点集合, $j \in J$; t_{ij} 为救护车从受灾点 i 到临时救助点 j 的时间, h ; x_{ij}^b 为决策变量,当救护车 b 将伤员从受灾点 i 运往临时救助点 j 时,取值为1,否则取值为0; s_{ij}^b 为救护车 b 将伤员从受灾点 i 运往临时救助点 j 的次数,是间接决策变量; t_{ji} 为救护车从临时救助点 j 到下一个受灾点 i 的时间, h ; z_{ji}^b 为决策变量,当救护车 b 从临时救助点 j 开往下一个受灾点 i 时,取值为1,否则取值为0; m_{ji}^b 为救护车 b 从临时救助点 j 开往下一个受灾点 i 的次数,是间接决策变量; d_{oi} 为救护车从中心 o 到受灾点 i 的距离, km ; γ_{oi} 为灾后,中心 o 到受灾点 i 的道路损毁系数; v_{oi} 为未发生灾害时,正常路况下救护车从中心 o 到受灾点 i 的速度, km/h ; d_{ij} 为救护车从受灾点 i 到临时救助点 j 的距离, km ; γ_{ij} 为灾后受灾点 i 到临时救助点 j 的道路损毁系数; v_{ij} 为未发生灾害时,正常路况下救护车从受灾点 i 到临时救助点 j 的速度, km/h ; d_{ji} 为救护车从临时救助点 j 到下一个受灾点 i 的距离, km ; γ_{ji} 为灾后,临时救助点 j 到下一个受灾点 i 的道路损毁系数; v_{ji} 为未发生灾害时,正常路况下救护车从临时救助点 j 到下一个受灾点 i 的速度, km/h 。

目标2:最小化救护车的最迟服务时间标准差,如下式:

$$\min f_2 = \min \sqrt{\frac{\sum_{b=1}^n (A_b - \bar{A}_b)^2}{n}} \quad (7)$$

式中: n 为救护车数量; $\bar{A}_b$ 为救护车 b 最迟服务时间

平均值,即 $\bar{A}_b = \frac{\sum_{b=1}^n A_b}{n}$, h 。

目标3:最小化伤员心理总剥夺成本,如下式:

$$\min f_3 = \min \sum_{i,j \in I} (ADC_i + \theta RDC_{ij}) \quad (8)$$

式中 θ 为相对剥夺成本系数。

1.4.2 约束条件

各临时救助点 j 服务的伤员总数:

$$U_j = \sum_{i \in I} \sum_{b \in B} x_{ij}^b \cdot s_{ij}^b \cdot R_{ij}^b, \forall j \in J \quad (9)$$

式中: U_j 为各临时救助点 j 服务伤员的总数量, 是间接决策变量; R_{ij}^b 为救护车 b 从受灾点 i 到临时救助点 j 转移伤员的数量, 是间接决策变量。

各临时救助点 j 服务的伤员最大容量:

$$U_j \leq U_j^m, \forall j \in J \quad (10)$$

式中 U_j^m 为各临时救助点 j 服务伤员的最大容量。

对伤员可接受的最大救助时间限制:

$$A_b \leq T, \forall b \in B \quad (11)$$

式中 T 为伤员心理可接受的最长救助时间, h, 不考虑超过该时间限制的救援方案。

各受灾点 i 的伤员得到完全的救助:

$$L_i \leq \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} s_{ij}^b \cdot R_{ij}^b \cdot x_{ij}^b, \forall i \in I \quad (12)$$

式中 L_i 为每个受灾点 i 需救助的伤员数量。

每辆救护车将伤员从受灾点转移至临时救助点的数量:

$$R_{ij}^b \in \{0, 1\}, \forall i \in I, j \in J, b \in B \quad (13)$$

决策变量类型及定义:

$$x_{ij}^b, y_{oi}^b, z_{ji}^b \in \{0, 1\}, \forall i \in I, j \in J \quad (14)$$

$$s_{ij}^b, m_{ji}^b \geq 0 \quad (15)$$

各系数范围:

$$\gamma_{oi}, \gamma_{ij}, \gamma_{ji}, \theta \in [0, 1], \forall i \in I, j \in J \quad (16)$$

2 求解 MAESP 的 INSGA-III

非支配排序遗传算法 (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm, NSGA)-III 通过精英策略和参考点分布, 能有效解决多目标优化问题中的收敛困难和前沿解集分布不均匀的问题。

为高效求解多目标混合整数规划的 MAESP, 提出一种 INSGA-III 算法。该算法相较于 NSGA-III, 在 2 方面进行了优化: ① 采用多染色体分层编码策略, 提升非劣解分布的均匀性; ② 引入动态交叉变异方法, 平衡解的收敛性和多样性。

2.1 多染色体分层编码策略

通过多层编码完整表示 MAESP 的解, 每层编码具有不同含义, 个体实例编码如图 2 所示。其中, 受灾点伤员染色体为 S_1 , 其基因数值表示伤员所属受灾点。临时救助点染色体为 S_2 , 其基因数值表示伤员所属临时救助点。救护车染色体为 S_3 , 其基因数值表示每辆救护车救助的伤员数量。 S_1 和 S_2 的长度均为需救助伤员的总数, 二者关系为一对一, 采用实整数编码; S_3 长度为救护车数量, 采用排列编码。由图 2 可知: S_1 位置 1 的“3”对应到 S_2 的位置 1 的“2”, 表示救护车 1 将受灾点 3 的一名伤员转运

至临时救助点 2; S_3 的位置 1 的“3”表示救护车 1 救助了 S_1 和 S_2 中前 3 个位置所代表的 3 个伤员。虚线表示不同救护车的分配。

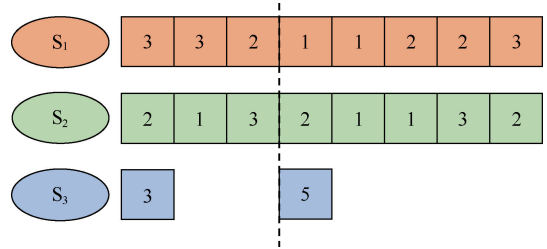


图 2 个体实例编码

Fig. 2 Individual instance encoding

2.2 多染色体交叉操作

1) S_1 和 S_2 采用实整数编码。模拟二进制交叉 (Simulated binary crossover, SBX) 算子通过模拟单点二进制交叉, 确保交叉前后平均解码实数值不变, 适用于局部搜索。

$$\begin{cases} c_i^1 = 0.5 \times [(1 + \varepsilon) \cdot x_i^1 + (1 - \varepsilon) \cdot x_i^2] \\ c_i^2 = 0.5 \times [(1 + \varepsilon) \cdot x_i^1 + (1 - \varepsilon) \cdot x_i^2] \end{cases} \quad (17)$$

$$\varepsilon = \begin{cases} (r \times 2)^{\frac{1}{1+\mu}} & r \leq 0.5 \\ (1/(2 - r \times 2))^{\frac{1}{1+\mu}} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (18)$$

式中: x_i^1 和 x_i^2 为父代个体; ε 为子代解在父代解附近变化的参数; μ 为分布因子, ε 由 μ 决定, μ 值越大, 子代解逼近父代解的概率越大; r 为随机概率。

2) S_3 采用排列编码。部分匹配交叉 (Partially matched crossover, PMX): 若交叉点在基因上, 则交换该基因位上的基因, 并交换 2 个父代交叉点间的基因片段; 否则, 只交换交叉点间的基因片段。

2.3 多染色体变异操作

1) S_1 和 S_2 采用实整数编码。多项式变异 (Polynomial Mutation, PM) 具体操作如图 3 所示。以 S_1 为例, 设置随机数, 根据公式计算得出变异后的种群染色体, 由于生成子代为非法解, 将子代染色体基因数值按从小到大顺序排列, 根据编码规则, 用父代所拥有的受灾点编号对其赋值, 得到修正后的正常解。

$$v'_k = v_k + \delta \times (u_k - l_k) \quad (19)$$

$$\delta =$$

$$\begin{cases} [2u + (1 - 2u)(1 - \delta_1)^{\varphi+1}]^{\frac{1}{\varphi+1}} - 1, u \leq 0.5 \\ 1 - [2(1 - u) + 2(u - 0.5)(1 - \delta_2)^{\varphi+1}]^{\frac{1}{\varphi+1}}, u > 0.5 \end{cases} \quad (20)$$

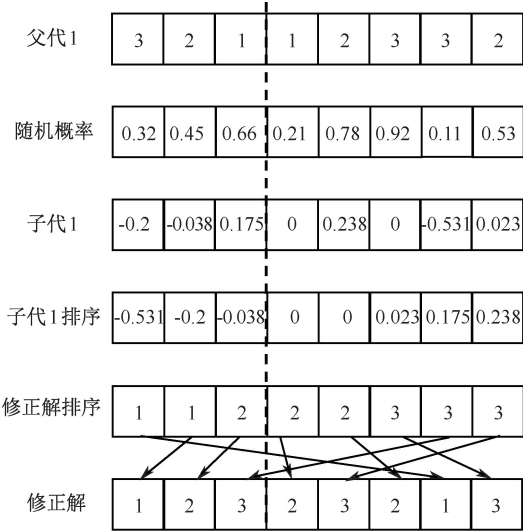


图 3 多项式变异操作

Fig. 3 Polynomial variation operations

$$\delta_1 = \frac{v_k - l_k}{u_k - l_k}, \delta_2 = \frac{u_k - v_k}{u_k - l_k} \quad (21)$$

式中: v'_k 为变异后种群; v_k 为上一代种群; k 为染色体维度; φ 为分布指数; u_k 和 l_k 分别为个体编码的最大、最小值; δ 为变异强度因子; u 为 $[0, 1]$ 内随机数。

2) S_3 采用排列编码。逆转变异是在个体序列中随机选择 2 个点(逆转点),然后将中间的基因值以逆向排序插入到原位置中。

2.4 动态交叉和变异概率方法

为有效反映算法迭代过程中的动态变化, INSGA-III 针对 MAESP 模型的多目标优化需求,设计了一种自适应动态交叉和变异方法。通过自适应调整参数,有效提升非劣解集的收敛精度和分布多样性,从而增强算法求解 MAESP 的能力。前沿非支配个体的覆盖率 F_d 是描述种群质量的重要指标,如下式:

$$F_d = \frac{W_d}{W} \quad (22)$$

式中: W 为种群大小; W_d 为前沿非支配个体。

1) 动态交叉概率方法。根据 F_d , 动态调整当前代 d 的交叉概率 p_c^d , 如下式:

$$p_c^d = \begin{cases} (p_c^{d-1} + \Delta p_c) \cdot \exp\left(-k_1 \cdot \frac{d}{D}\right), & F_d < F_{d-1} \\ p_c^{d-1}, & F_d = F_{d-1} \\ (p_c^{d-1} - \Delta p_c) \cdot \exp\left(-k_1 \cdot \frac{d}{D}\right), & F_d > F_{d-1} \end{cases} \quad (23)$$

式中: k_1 为交叉概率动态变化系数; Δp_c 为交叉概率的变化步长; d 为当前迭代代数; D 为总迭代代数。

2) 动态变异概率方法。根据 F_d , 动态调整当前代 d 的变异概率 p_m^d , 如下式:

$$p_m^d = \begin{cases} (p_m^{d-1} + \Delta p_m) \cdot \exp\left(-k_2 \cdot \frac{d}{D}\right), & F_d < F_{d-1} \\ p_m^{d-1}, & F_d = F_{d-1} \\ (p_m^{d-1} - \Delta p_m) \cdot \exp\left(-k_2 \cdot \frac{d}{D}\right), & F_d > F_{d-1} \end{cases} \quad (24)$$

式中: k_2 为变异概率动态变化系数; Δp_m 为交叉概率的变化步长; Δp_m 为变异概率的变化步长。

2.5 INSGA-III 步骤

1) 初始化。设置 INSGA-III 参数, 确定种群规模, 采用多层编码策略随机生成初始种群, 并解码评估目标函数值。

2) 非支配排序。将个体分级, 第一级包含 Pareto 前沿非支配解, 后续级别依次包含前一级支配解。

3) 选择、交叉和变异。基于分阶段编码和动态交叉变异概率方法, 如式(17)一式(24), 执行选择、交叉和变异操作, 生成子代种群, 以增强解的收敛性和均匀性。

4) 精英保留。合并父代和子代得到 $2N$ 个个体, 运用参考点法和小生境保留操作分层, 再经非支配排序, 选出本轮最优的 N 个解作为下一代初始解。

5) 迭代。检查终止条件, 若满足, 输出第一层 Pateto 解; 否则, 返回步骤 3 继续迭代。

3 洪灾下应急救援仿真与优化算法

3.1 洪灾应急救援仿真案例设计

以 2019 年 6 月江西省赣州市兴国县大规模洪灾为背景, 设计仿真案例。根据该地区的灾害情况和人口密度, 估算各城镇伤员数量。基本数据如下: 兴国县受灾人数为 41.26 万, 总伤员数为 6.6 万, 分布在 22 个村庄(受灾点编号为 I1—I22), 设置临时救助点 25 个(编号为 J1—J25), 救援中心 1 个, 救护车 500 辆。鉴于洪灾后道路损毁和堵塞情况复杂, 设计道路损毁因子, 使路网中车辆行驶速度不对称, 即救护车往返两地的速度及救助时间可能不同。各受灾点的伤员数量和各临时救助点的容量上限分别见表 1 和表 2。

表 1 各受灾点的伤员分布

Table 1 Distribution of injured by disaster site			
受灾点	伤员数量	受灾点	伤员数量
I1	1 437	I12	493
I2	2 685	I13	8 160
I3	813	I14	1 582
I4	491	I15	1 392
I5	6 462	I16	13 394
I6	2 949	I17	231
I7	3 921	I18	5 255
I8	654	I19	785
I9	492	I20	1 766
I10	4 093	I21	2 110
I11	6 756	I22	756

表 2 各临时救助点的容量上限

Table 2 Maximum capacity of temporary assistance points			
临时救助点	最大容量	临时救助点	最大容量
J1	6 500	J14	3 000
J2	2 500	J15	5 100
J3	2 000	J16	11 350
J4	10 760	J17	1 500
J5	4 494	J18	9 800
J6	7 000	J19	23 345
J7	4 500	J20	35 684
J8	7 700	J21	4 000
J9	5 000	J22	7 500
J10	46 200	J23	26 000
J11	4 000	J24	5 000
J12	124 666	J25	500
J13	50 000		

3.2 多目标优化算法性能验证分析

根据预研,使用 Python 测试 INSGA-Ⅲ,参数设置如下: α 为 1.2, β 为 0.2, θ 为 0.3,初始交叉概率为 0.9,初始变异概率为 0.5, Δp_c 为 0.01, k_1 为 0.5, $p_c^g \in [0.5, 1]$, Δp_m 为 0.005, k_2 为 0.2, $p_m^g \in [0.01, 0.5]$ 。

3.2.1 算法性能分析

为验证 INSGA-Ⅲ 有效性,将其与 NSGA-Ⅲ 和 NSGA-Ⅱ 进行比较分析。各算法种群大小均为 150,迭代次数均为 300。各算法的 Pareto 前沿情况如图 4 所示,由图 4 可知:INSGA-Ⅲ 在解的质量方面优于其他算法,其 Pareto 前沿更为领先且分布更均衡。

为进一步量化比较,求各算法的所有解的平均值,并进行标准化求和,如下式:

$$Q_i^k = \frac{q_i^k}{\sum_i^n q_i^k} \tag{25}$$

式中: Q_i^k 为第 k 个解第 i 个目标的标准化值; q_i^k 为第 k 个解第 i 个目标的目标值, $i=1, 2, \dots, n$ 。

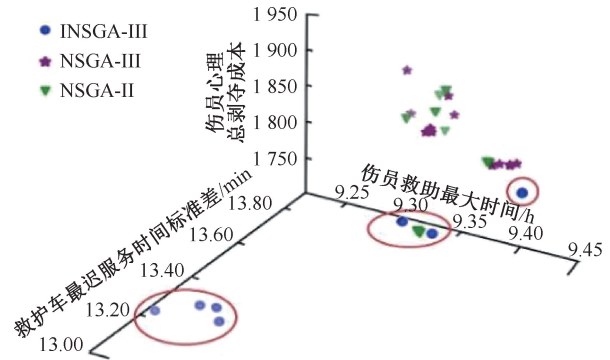


图 4 各算法 Pareto 前沿

Fig. 4 Pareto frontiers of various algorithms

各算法的平均目标值比较结果见表 3,由表 3 可知:改进的 INSGA-Ⅲ 的所有目标平均值和标准化和均为最小,表明其调度质量优于其他算法。

表 3 各算法的平均目标值比较

Table 3 Average objective values for all algorithms				
算法名称	目标 1	目标 2	目标 3	标准化和
NSGA-Ⅱ	9.426	13.396	1 969.301	1.009
NSGA-Ⅲ	9.446	13.359	2 002.642	1.015
INSGA-Ⅲ	9.355	13.134	1 831.393	0.976

采用 3 个通用的多目标优化评价指标:世代距离 (Generational Distance, GD)、逆世代距离 (Inverted Generational Distance, IGD)、超体积指标 (Hypervolume, HV) 评估各算法性能。GD 衡量算法的收敛性,值越小,收敛性越好;IGD 和 HV 则综合评估算法的收敛性和多样性,IGD 值越小、HV 值越大,收敛性和多样性越好,综合性能也越好。鉴于 3 个目标的数量级不同,采用 Min-Max 归一化处理解的目标值。3 个评价指标对各算法的评估结果见表 4,由表 4 可知:INSGA-Ⅲ 的 GD、IGD 值最小, HV 值最大,表明其在收敛性、多样性和综合性能方面均表现优异,进一步验证了该算法的有效性。

表 4 各算法评价指标对比

Table 4 Comparison of evaluation indicators for algorithms			
算法名称	GD	IGD	HV
NSGA-Ⅱ	0.162 066	0.202 228	0.102 772
NSGA-Ⅲ	0.114 339	0.212 075	0.085 335
INSGA-Ⅲ	0.030 679	0.043 701	0.732 086

3.2.2 案例结果分析

根据式(25)标准化处理解,取最小值确定为相对最优解,结果见表 5,由表 5 可知:伤员在 9 h 内得到救助,远低于黄金救援时间,充分保障了生命安全。在此基础上,为确保公平性,将救护车最迟服务时间标准差作为次要目标,得到约 13 min 的调度解,表明 INSGA-Ⅲ 调度解具有较好的公平性。此外,基于人道主义,通过心理总剥夺成本量化伤员的负面心理情绪,并得到较好的结果。

表 5 标准化处理结果

Table 5 Standardize the results			
解	目标 1/h	目标 2/min	目标 3/h
1	9.234	13.156	1729.001
2	9.273	13.155	1753.781
3	9.289	13.146	1760.089
4	9.289	13.155	1740.942
5	9.289	13.155	1739.015
6	9.448	13.110	1950.602
7	9.469	13.122	1941.320
8	9.546	13.073	2036.394

3.3 灵敏度分析

3.3.1 相对剥夺成本系数的影响

在应急救援中,应同时考虑时效性和伤员的心理总剥夺成本。在确定救护车数量的前提下,通过改变相对剥夺成本系数,观察不同系数下 3 个目标的变化。从以下 3 个角度对比观察:①最小化伤员救助最大时间;②最小化救护车最迟服务时间标准差;③最小化伤员心理总剥夺成本。相对剥夺成本系数下的结果分别如图 5—图 7 所示。

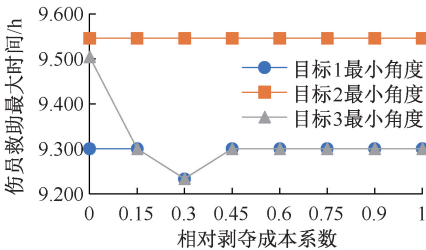


图 5 相对剥夺成本系数下伤员救助最大时间
Fig. 5 Maximum time trend of casualty rescue under relative deprivation cost coefficient

由图 5 和图 6 可知:当相对剥夺成本系数为 0.3 时,目标 1、2 大多达到最优值,且在不同角度下,均存在拐点为 0.3。在目标 2 的角度下,趋势图中存在拐点 0.45 和 0.6。随着系数的增大,伤员心理总剥夺成本呈上升趋势,但在系数小于 0.3 时,增长较为平缓。根据上述结论,实际应急救援中可采

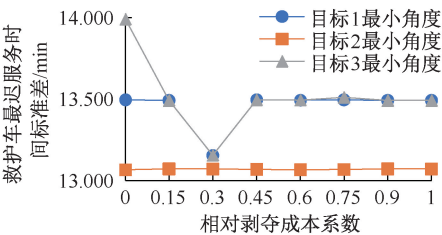


图 6 相对剥夺成本系数下救护车最迟服务时间标准差

Fig. 6 Latest ambulance service time standard deviation trend under relative deprivation cost coefficient

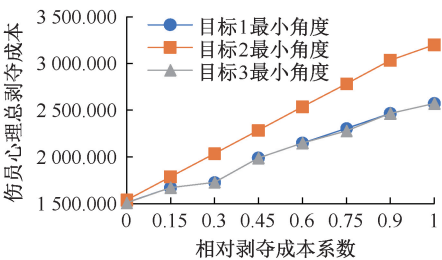


图 7 相对剥夺成本系数下伤员心理总剥夺成本

Fig. 7 Psychological total deprivation cost trend of wounded under relative deprivation cost coefficient

取以下措施:①加派心理医生、投放简易医疗救助物资或传达救援消息等方式,将伤员的心理相对剥夺成本系数控制在 0.3,有效提高救援的时效性和公平性,并控制伤员的心理总剥夺成本处于较低水平。②若救援行动受限,可将相对剥夺成本系数放宽至 0.45 或 0.6,以平衡救援效率和心理成本。

3.3.2 救护车数量的影响

在确定相对剥夺成本系数的情况下,通过改变救护车数量,从 3 个目标角度对比观察,结果如图 8—图 10 所示。

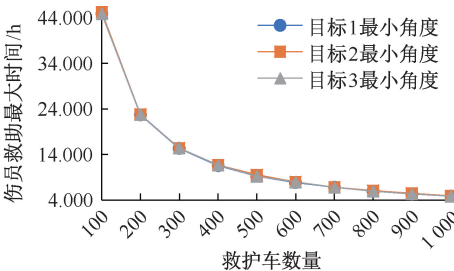


图 8 救护车数量变化下伤员救助最大时间

Fig. 8 Maximum time trend of casualty rescue under variations in ambulance availability

随着救护车数量的增加,目标 1 不断减少,救护车数量达到 500 辆后,趋势逐渐平缓。目标 2 随救

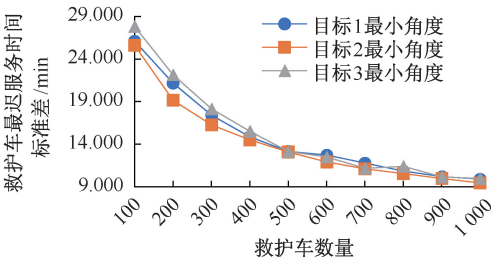


图 9 救护车数量变化下救护车最迟服务时间标准差
Fig. 9 Latest ambulance service time standard deviation trend under variations in ambulance availability

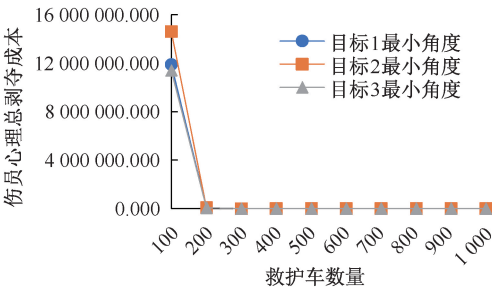


图 10 救护车数量变化下伤员心理总剥夺成本
Fig. 10 Psychological total deprivation cost trend of wounded under variations in ambulance availability

护车数量的增加而下降,在救护车数量为 500 和 700 辆时出现拐点,进一步增加救护车数量对标准差的影响不显著。目标 3 随救护车数量的增加大幅度下降,但在救护车数量达到 500 后,下降趋势放缓。在目标 2 角度下,拐点出现在 800 辆。根据以上分析,在资源有限的实际应急救援中,建议先配置 500 辆救护车,以提供高效且公平的救援路径方案,减少伤员的负面心理情绪。若资源充足,可将救护车数量增加至 700 或 800 辆以进一步提高救援效率。

4 结 论

- 1) 洪灾下多目标优化算法结果表明:最小化伤员救助的最大时间为 9.234 h,最小化救护车的最迟服务时间标准差为 13.156 min,最小化伤员心理总剥夺成本为 1 729.001。
- 2) 伤员的心理相对剥夺成本系数控制在 0.3,能有效提高救援的时效性和公平性。此外,在资源有限的实际应急救援中,需配置 500 辆救护车,以提供高效且公平的救援路径方案。
- 3) 文中研究多聚焦于伤员救助环节,缺乏深入探讨多类型应急资源的协同调度及物资分配对救援效率的系统性影响。后续研究将引入物资品类、运输时效、补给优先级等关键参数,构建具备更强协同性的综合调度模型。

参 考 文 献

[1] 曹建廷,赵钟楠,邢子强. 加强洪涝灾害风险管理的途径研究[J]. 中国工程科学,2024,26(6):120-130.
CAO Jianting, ZHAO Zhongnan, XING Ziqiang. Approaches to strengthening flood risk management[J]. Strategic Study of CAE,2024,26(6):120-130.

[2] 宋英华,韩保帅,郭晨. 考虑洪涝灾害风险的县域应急避难场所选址模型[J]. 中国安全科学学报,2024,34(4):191-198.
SONG Yinghua, HAN Baoshuai, GUO Chen. Location selection model of emergency shelter considering risk of flood disaster in county[J]. China Safety Science Journal,2024,34(4):191-198.

[3] 国务院. “十四五”国家应急体系规划[Z]. 2022-02-14.

[4] CHRISTIE P M J, LEVARY R R. The use of simulation in planning the transportation of patients to hospitals following a disaster[J]. Journal of Medical Systems, 1998, 22: 289-300.

[5] 杨文国,黄钧,郭田德. 大规模突发事件中伤员救助的救护车分配优化模型[J]. 系统工程理论与实践,2010,30(7):1 218-1 224.
YANG Wenguo, HUANG Jun, GUO Tiande. Optimization models of allocation ambulances for large-scale emergency[J]. Systems Engineering-Theory & Practice,2010,30(7):1 218-1 224.

[6] TALARICO L, MEISEL F, SÖRENSEN K. Ambulance routing for disaster response with patient groups[J]. Computers & Operations Research, 2015, 56: 120–133.

[7] 卢福强,张一博,毕华玲. 基于需求紧迫度排序的震后伤员转运问题的协同优化研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2024,20(1):37–42.

LU Fuqiang, ZHANG Yibo, BI Hualing. Research on collaborative optimization of post-earthquake casualty transfer problem based on demand urgency ranking[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2024,20(1):37–42.

[8] HOLGUÍN-VERAS J, PÉREZ N, JALLER M, et al. On the appropriate objective function for post-disaster humanitarian logistics models[J]. Journal of Operations Management, 2013, 31(5): 262–280.

[9] GUTJAHN W J, FISCHER S. Equity and deprivation costs in humanitarian logistics[J]. European Journal of Operational Research, 2018, 270(1): 185–197.

[10] 朱莉,曹杰,顾琚,等. 公平缓解灾民创伤下的应急物资动态调配研究[J]. 系统工程理论与实践, 2020,40(9): 2 427–2 437.

ZHU Li, CAO Jie, GU Jun, et al. Dynamic emergency supply distribution considering fair mitigation of victim suffering[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2020,40(9):2 427–2 437.

[11] 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.

[12] 陈鑫,胡志华,王耀宗. 考虑剥夺代价的灾后应急医疗服务站配置模型[J]. 运筹与管理, 2024,33(5):55–61.

CHEN Xin, HU Zhihua, WANG Yaozong. Configuration model for post-disaster emergency medical service stations considering deprivation cost[J]. Operations Research and Management Science, 2024,33(5):55–61.

[13] 张晨晓,祝蕊,刘海月,等. 考虑伤员心理状况的应急医疗救护问题研究[J]. 中国管理科学, 2017, 25(10): 187–196.

ZHANG Chenxiao, ZHU Rui, LIU Haiyue, et al. The emergency victims rescue problem considering psychological condition[J]. Chinese Journal of Management Science, 2017,25(10):187–196.

[14] PÉREZ-RODRÍGUEZ N, HOLGUÍN-VERAS J. Inventory-allocation distribution models for postdisaster humanitarian logistics with explicit consideration of deprivation costs[J]. Transportation Science, 2016, 50(4): 1 261–1 285.

作者简介： 吴 琪 （2001—）,女,福建莆田人,硕士研究生,主要研究方向为灾后应急调度
度和智能优化。Email: wuqiusst@163.com。

