

刘艳, 贾林颖, 邵舒羽, 等. 考虑心理成本的灾民转运与物资分配问题研究[J]. 灾害学, 2023, 38(4): 150–155, 178.
[LIU Yan, JIA Linying, SHAO Shuyu, et al. The Research on the Casualty Transport and Material Allocation Considering Psychological Costs[J]. Journal of Catastrophology, 2023, 38(4): 150–155, 178. doi: 10.3969/j.issn.1000–811X.2023.04.025.]

考虑心理成本的灾民转运与物资分配问题研究^{*}

刘 艳, 贾林颖, 邵舒羽, 高 晗, 王佩爽

(北京物资学院 物流学院, 北京 101149)

摘 要: 紧急救援过程中, 灾民转运和物资分配等救援活动的时效性会影响灾民的心理状况及救援效率, 而灾民的负面心理又会影响救援活动的顺利开展。针对该问题, 以救援效率最大和灾民心理成本最小为目标, 构建同时考虑灾民转运和物资分配的集成优化模型, 以芦山 7.0 级地震为案例背景, 采用遗传算法对模型求解和参数分析, 得到帕累托最优选择方案。结果表明, 灾害初期灾民心理成本对救援效率影响较大, 但随着时间的推移影响逐渐减弱; 灾民等待物资分配的心理成本远大于等待转运的心理成本; 灾情严重时, 为减少心理成本, 物资分配应优先选择按比例分配方式。

关键词: 心理成本; 灾民转运; 物资分配; 救援效率; 芦山 7.0 级地震

中图分类号: C93; X915.5; X43; P315 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000–811X(2023)04–0150–07

doi: 10.3969/j.issn.1000–811X.2023.04.025

近年来, 世界各地灾害频发, 不断威胁着人类生存和社会发展。为了在灾害发生时更有效地减少人员伤亡和财产损失, 提高救援效率已成为应急管理的工作核心^[1]。救援工作中不同的救援活动相互影响^[2], 如转运的灾民人数影响物资分配数量, 同时物资分配时效性又会影响灾民的存活率。此外, 灾民在等待搜救、转运以及物资分配过程中容易产生焦虑、绝望、恐慌等情绪, 一定程度上会影响救援工作顺利进行^[3]。因此, 在应急管理中考虑心理因素, 对提高救援效率具有重要意义。

为提高救援效率, 更加合理地安排救援方案, 国内外学者围绕不同的救援活动展开研究, 主要涉及设施选址、灾民转运、资源分配以及路径优化等。如王妍妍等^[4]以应急物资分配的总延迟时间最小为目标构建了多需求点、多配送中心的应急物资动态分配优化模型, 降低了物资短缺的延迟损失。马运佳等^[5]以最小化总疏散距离和避难所总面积为目标, 对避难所选址做了优化。GUO^[6]和 WU 等^[7]考虑到紧急救援网络可能会中断, 通过救援设施位置的选择, 提高网络在最坏情况下抵御破坏的能力。以上文献是单独研究某项救援活动, 而现实中救援过程复杂多变, 各救援活动之间相互依赖, 共同影响救援效率^[2]。因此, 需从整体救援流程出发, 考虑不同救援活动的集成问题。JIN^[8]和 REZAPOUR 等^[9]将灾民转运与资源分配相结合, 前者考虑灾民伤情随时间变化, 建立最大化生存概率的医疗资源分配–灾民转运规划模型; 后者专注于灾民到达率, 制定了大规模伤亡现场动态医疗资源分配和伤员治疗顺

序策略。于冬梅等^[10]制定了应急设施的选址决策和应急物资分配预案。朱莉等^[11]解决了考虑区域异质性的应急物资选址–分配问题。在选址–路径问题中学者们目前大多关注对不确定信息的处理。孙华丽等^[12]采用鲁棒优化方法处理应急需求量和车辆运输时间不确定; 汤兆平等^[13–14]提出路径的非概率可靠性度量及最优时间可靠度路径选择方法。以上文献考虑了灾民伤情、受灾区域、需求等方面的异质性, 对不同救援活动进行集成分析, 但没有考虑救援对象的异质性心理。如心理压力是灾害发生时普遍存在的一种心理因素。严重的心理压力可能会影响受灾人员的行为和生存概率, 有效干预其心理在节约成本、提高救援效率等层面起着积极的作用^[15–16]。

关于异质性心理, 一些学者在研究应急管理活动时考虑到灾民对痛苦的不同心理感知以及决策者的决策偏好或有限理性。如 SHEU 等^[17]将灾民心理痛苦感知抽象为心理成本函数, 建立了多目标混合整数规划模型解决选址和灾民转运问题。SAFEER 等^[18]将心理成本函数引入灾民运输和资源分配模型。王旭坪^[19]和宋英华等^[20]通过把灾民的心理感知量化为对物资到达时间和数量的满意度函数, 以保障选址的合理性以及物资分配的公平性。王熹徽等^[21]运用非线性回归方法拟合出不同类型物资对灾民心理痛苦影响的心理成本函数, 并将此函数引入选址–分配优化模型。朱莉等^[22–23]发现加入心理成本和决策者偏好都能够使

^{*} 收稿日期: 2023–02–11 修回日期: 2023–05–23

基金项目: 国家社会科学基金资助项目(22BGL030); 北京市社会科学基金青年项目(21GLC040); 北京市长城学者培养计划项目(CIT&TCD20190320)

第一作者简介: 刘艳(1980–), 女, 汉族, 河南信阳人, 博士, 教授, 主要从事区域物流、供应链管理、应急管理研究。

E-mail: liuyan2@bwu.edu.cn

物资配达的满意度更佳。孙华丽等^[24]分析了资源限制对选址和灾民转运送方案的影响。以上研究将心理因素量化加入到救援活动的模型中,虽然讨论了各种限制对单一救援活动及灾民心理的影响,但并没有就不同救援活动及模式对灾民心理影响展开具体分析。而该类问题的研究有助于决策者根据灾情与救援实际科学考虑心理因素的作用,进而更加合理安排救援行动。

综上所述,在救援过程中除考虑客观环境带来的异质性外,还需关注受灾对象的负面心理,避免其衍生重大社会问题。基于此,本文集成灾民转运与物资分配救援活动,建立心理成本最小、生存人数最大的双目标整数规划模型以优化物资分配及灾民转运方案。进而以芦山地震案例为背景验证模型的有效性,并分析心理成本、救援活动以及救援效率之间的关系,为紧急情况下决策者开展不同救援活动时提供一定管理建议。

1 建模准备

1.1 问题描述及假设

地震发生后存在多个受灾点,需要尽快转移灾民至临时救助站,进行分类并送往后方医院。同时应急物资的需求情况随时间的变化而不断变动,存在持续不确定性,而各地配送中心已有的物资库存量常常难以一次性满足所有受灾点需求。因此,需在整个救援周期内设计一个合理的灾民转运与物资分配计划,对各受灾区域实施分阶段多批次救援,以保证救援工作高效进行。

在医学救援中,震后 72 h 被称为黄金救援期,救援的主要目标是搜索并抢救生命^[25]。由于不同时段和类型灾民的生存概率不同^[3,24],本文将黄金救援期分为 6 个阶段,每个阶段为 12 h。救援过程(图 1)中,搜救队从受灾点搜索灾民,通过简明检伤分类法(Simple Triage and Rapid Treatment, START)对其分类并运往临时救助站;救援物资统一由配送中心发出,每个时段根据各地灾民的人数配送至受灾点和临时救助站。临时救助站物资分配的数量由运到的灾民数量决定,受灾点的物资分配量由剩余及新搜救出的灾民数量决定。

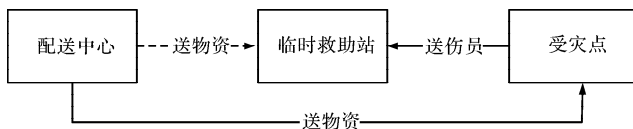


图 1 救援行动示意图

地震救援中,灾民对饮用水与食物等持续消耗性物资需求极大,一般要求在灾害发生 24 h 内提供基本救助^[26]。相较于可重复或多人使用的累积性物资(如帐篷等),黄金救援期消耗性物资的分配对灾民生存具有重要影响。故本文仅研究饮用水及食物的分配情况,合理安排灾民和物资运输计划使灾民总生存人数最大,同时心理成本最小。模型相关假设如下:

(1)地震发生后,受灾地区原有的社会系统被破坏,造成物资及服务的短缺,给灾民带来巨大的心理压力。世界卫生组织的调查显示,30%~50%的人在灾难之后会出现中—重度的心理失调。国务院在 2008 年汶川地震后发布的《汶川地震灾后恢复重建条例》中也明确指出要做好受灾群众的心理援助工作^[27]。本文对心理压力的衡量建立在可用经济损失量化的基础上,采用心理成本函数刻画^[21]。

(2)由于地震灾区大多是集中连片的区域,物资到达各灾区的时间不会相差太大,本文暂不讨论各受灾点间救援物资的相互协调及转运。

(3)震后各地区交通往往有一定程度受损,但对救援过程中灾民转运与物资配送的时间影响一致,本文采用相同的运输时间进行描述。

(4)采用就近原则将灾民送往各救助点且救援设备能够满足救援需求。

1.2 模型相关符号说明

模型中相关符号的说明见表 1。

1.3 各阶段物资分配策略选择

灾害的发生具有突发性和不确定性等特点。由于灾害发生初期灾民数量的激增及应急响应的延迟,往往出现资源供不应求的情况,各地支援的增加使资源供给逐渐实现供需平衡。因此,整个救援期分为供不应求和供大于等于求两种情况^[25]。当物资需求量大且供应不足时,更应注重各受灾点和临时救助站获取物资的公平性,可选择按比例分配的策略;随着支援的到来,物资逐渐充足,可选择随机到达分配策略以保证配送时长最少。由于按比例分配策略需要强大的统计和计算能力为前提,传统应急响应时期无法快速实现,只能优先选择随机到达分配策略。随着城市智慧应急管理体系的进一步构建,大数据等技术的时效性,使按比例分配策略更加容易实施。因此,本文将按比例分配策略考虑在物资分配策略选择范围内,以根据不同的供需情况选择更加合理的物资分配方式。相关数学表达式如下:

表 1 相关变量符号及说明

	符号	符号含义	符号	符号含义
目标	z	救援人数目标	U_j	j 救助站的最大容量
	f	心理成本目标	P^t	t 时段灾民的存活率
	I	受灾点集合	X_i	i 点最大受灾人数
集合	J	救助站集合	d_i^t	t 时段受灾点 i 的物资需求
	K	物资种类集合	s_j^t	t 时段 j 地物资供给量
	T	时间段	s_i^t	t 时段 i 地物资供给量
决策变量	x_{ij}^t	t 时段从受灾点 i 运至救助站 j 的灾民数量	α_i	灾民在 i 点的单位心理成本
	s_{mj}^t	t 时段配送中心 m 运往受灾点 j 的物资量	β_{ij}	灾民从 i 点到 j 点的单位心理成本
	Y_j	$Y_j = 0$ 表示不选择 j 救助站	v_k^t	灾民 t 时段 k 类物资的单位需求
		$Y_j = 1$ 表示选择 j 救助站	d_j^t	t 时段救助站 j 的物资需求
	s_{mi}^t	t 时段配送中心 m 运往受灾点 i 的物资量	θ_k^t	t 时段等待 k 类物资的单位心理成本
相关参数	S^t	t 时段物资最大供给量		

(1) 随机到达分配策略。该分配策略下, 救援车辆先到达的受灾点需求被优先满足。现实中自然灾害可能会不同程度地损坏交通, 导致同批次救援物资到达不同受灾点的先后顺序不同。此时, 物资需求满足的优先级取决于救援车辆抵达各受灾点的顺序。如 2022 年 9 月 5 日四川甘孜州泸定县 6.8 级地震使道路受损, 得妥镇紫雅场村成为“孤岛”, 无法迅速获得救助^[28]。在此策略下, t 阶段给受灾点 i 和临时救助站 j 分配的物资数量表达为:

$$s_{mi}^t = \min\{d_i^t, \max(0, S_i^t - \sum_{i=0}^{t-1} d_i^t)\}, t \in T, i \in I; \quad (1)$$

$$s_{mj}^t = \min\{d_j^t, \max(0, S_j^t - \sum_{j=0}^{t-1} d_j^t)\}, t \in T, j \in J; \quad (2)$$

$$S_i^t = \frac{\sum_{i \in I} d_i^t}{\sum_{i \in I} d_i^t \sum_{j \in J} d_j^t} s^t, t \in T; \quad (3)$$

$$S_j^t = \frac{\sum_{j \in J} d_j^t}{\sum_{i \in I} d_i^t \sum_{j \in J} d_j^t} s^t, t \in T. \quad (4)$$

(2) 按比例分配策略。该分配策略下, 基于大数据 + 云计算等技术的支撑, 决策者可以快速根据单个受灾点物资需求占所有受灾点总需求的比例向各受灾点分配救援物资。《“十四五”应急物资保障规划》^[29]中也明确指出使用人工智能、大数据分析等手段, 提升应急物资需求分析精确性, 提高供需匹配度。在此策略下, t 阶段给受灾点 i 和临时救助站 j 分配的物资数量表达为:

$$s_{mi}^t = \frac{d_i^t}{\sum_{i \in I} d_i^t \sum_{j \in J} d_j^t} s^t, t \in T; \quad (5)$$

$$s_{mj}^t = \frac{d_j^t}{\sum_{i \in I} d_i^t \sum_{j \in J} d_j^t} s^t, t \in T. \quad (6)$$

2 模型构建及求解方法选择

2.1 灾民心理成本量化

由于在救援过程中灾民产生的心理压力不仅影响其存活率, 而且在一定程度上影响救援工作的稳定推行, 近几年逐渐受到重视。结合心理压力的定义及以往文献量化灾民心理状况的方法, 本文用心理成本表示灾民的心理压力, 主要研究灾民转运与物资分配两种救援活动。因此, 心理成本主要由以下三种情况产生: 受灾现场灾民等待救援, 从受灾点运往临时救助站以及不同类型物资需求未及时得到满足。

救援过程中灾民的心理成本受自身伤情影响, 孙丽华等^[24]调查发现, 轻、重两类灾民产生的心理成本具有明显差异性且对其存活率影响较大。基于此, 本文只考虑这两类灾民, 建立心理成本函数如下, 其中 r 表示重伤灾民, y 表示轻伤灾民。

受灾现场灾民等待搜救的心理成本:

$$f_1 = \alpha_r^t x_{ir}^t + \alpha_y^t x_{iy}^t, i \in I, t \in T. \quad (7)$$

式中: r 和 y 类灾民单位等待心理成本分别为 $\alpha_r = 6\Delta t$, $\alpha_y = 2.5\Delta t$, Δt 为等待救援的时间^[17,24]。

灾民被运往救助站途中的心理成本:

$$f_2 = \beta_{yr}^t x_{jr}^t + \beta_{yy}^t x_{jy}^t, j \in J, i \in I, t \in T. \quad (8)$$

式中: r 和 y 类灾民单位心理成本分别为 $\beta_r = 3.5t_{ij}$, $\beta_y = 1.5t_{ij}$, t_{ij} 为受灾点到救助站的运送时间^[17,24]。

灾民等待不同类型物资分配的心理成本:

$$f_3 = a_k t^{bk} (s_{mi}^t + s_{mj}^t), j \in J, i \in I, t \in T, \forall k \in K. \quad (9)$$

食物和饮用水作为救灾时必不可少的物资, 是本文主要研究对象。 $k=1$ 代表食物, 此时 $a=5.912$, $b=1.814$; $k=2$ 代表饮用水, 此时 $a=8.588$, $b=1.832$ ^[21]。

综上, 灾民心理成本的表达函数如下:

$$f = f_1 + f_2 + f_3. \quad (10)$$

2.2 模型构建

以提高救援效率和减轻灾民心理压力为目的, 在符合各出救点供给量约束和救助站容量约束的前提下, 探讨如何同时调度灾民和救援物资, 以确保在一定程度上满足各受灾点的需求。本文构建多目标整数规划模型如下:

$$\max z = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} (p_{ir}^t x_{jr}^t + p_{iy}^t x_{jy}^t) Y_j; \quad (11)$$

$$\min f = \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} (\alpha_{ir}^t x_{ir}^t + \alpha_{iy}^t x_{iy}^t) + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} (\beta_{yr}^t x_{jr}^t + \beta_{yy}^t x_{jy}^t) + \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} a_k t^{bk} (s_{mi}^t + s_{mj}^t); \quad (12)$$

$$s. t. \quad \sum_{i \in I} x_{ij} \leq U_j, j \in J; \quad (13)$$

$$\sum_{j \in J} x_{ij} \leq X_i, i \in I; \quad (14)$$

$$\sum_{i \in I} s_{mi}^t + \sum_{j \in J} s_{mj}^t \leq s^t, t \in T; \quad (15)$$

$$s_{mi}^t = \frac{d_i^t}{\sum_{i \in I} d_i^t \sum_{j \in J} d_j^t} s^t, \sum_{i \in I} d_i^t + \sum_{j \in J} d_j^t > s^t, t \in T; \quad (16)$$

$$s_{mj}^t = \frac{d_j^t}{\sum_{i \in I} d_i^t \sum_{j \in J} d_j^t} s^t, \sum_{i \in I} d_i^t + \sum_{j \in J} d_j^t > s^t, t \in T; \quad (17)$$

$$s_{mi}^t = \min\{d_i^t, \max(0, S_i^t - \sum_{i=0}^{t-1} d_i^t)\}, \sum_{i \in I} d_i^t + \sum_{j \in J} d_j^t \leq s^t, t \in T; \quad (18)$$

$$s_{mj}^t = \min\{d_j^t, \max(0, S_j^t - \sum_{j=0}^{t-1} d_j^t)\}, \sum_{i \in I} d_i^t + \sum_{j \in J} d_j^t \leq s^t, t \in T; \quad (19)$$

$$d_j^t = v_k^t x_{ij}^t, d_i^t = v_k^t (x_{ir}^t - x_{jr}^t), j \in J, i \in I, t \in T, k \in K; \quad (20)$$

$$x_{ij}, s_{mi}, s_{mj} \geq 0, \text{且为整数}; Y_j = 0 \text{ 或 } 1. \quad (21)$$

式(11)和式(12)分别为救援效率和心理成本目标, 式(11)为救援生存人数最大, 由不同阶段不同类型灾民生存概率与救援人数的乘积表示; 式(12)表示救援过程中灾民的心理成本最小, 包括灾民等待救援的心理成本, 转运过程中的心理成本以及等待物资分配时的心理成本; 式(13)表示运往临时救助点的灾民数量不大于其所在救助点最大容量, 且各阶段灾民完成临时救助后均被运往避难所或后方医院, 不影响下一阶段的最大容量; 式(14)为受灾点运出的灾民不大于各受灾点总受灾人数。受灾点剩余人数为此阶段搜救的人数减去转运至救助站的人数; 式(15)为 t 时间段运往救助站和受灾点的物资不大于此阶段救援物资总量, 当供大于等于求时不再考虑此约束; 式(16)和式(17)为供不应求时运往受灾点 i 和救助站 j 的物资数量; 式(18)和式(19)为供大于等于求时运往受灾点 i 和救助站 j 的物资数量; 式(20)为 t 时段不同地点的物资需求量; 式(21)为决策变量特征。

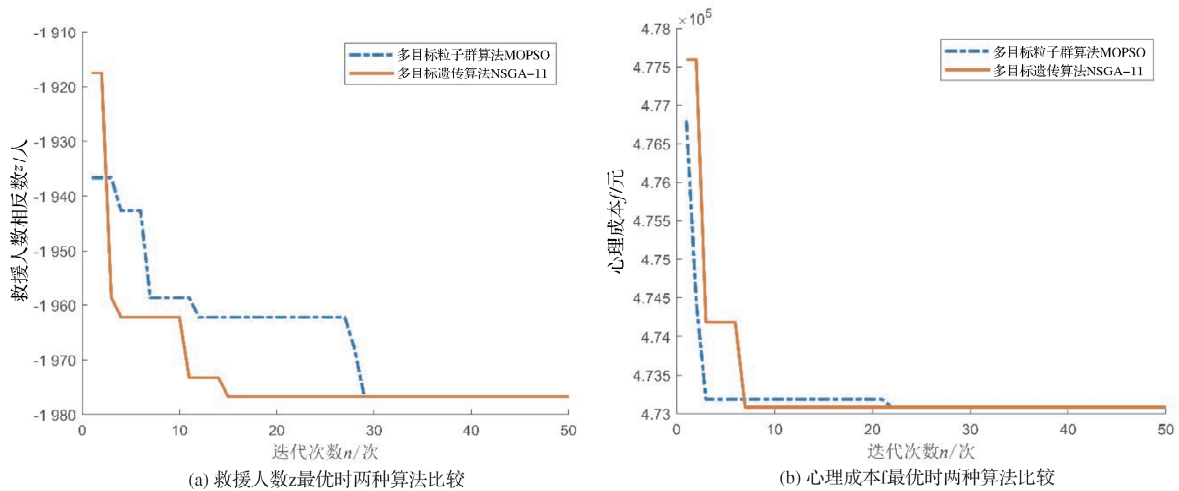


图2 遗传算法与粒子群算法优化比较

2.3 求解方法选择及要素设置

鉴于如何处理多目标模型不是本文研究重点,且应急物资救援调配活动具有强时效性等要求,本文首先选择运算速度较快且鲁棒性较强的多目标遗传算法(NSGA-Ⅱ)和多目标粒子群算法(MOPSO)进行求解。图2是两种算法的迭代曲线图,通过对比其收敛情况发现,无论是目标1还是目标2遗传算法都能够更快地达到最优值。因此,在以下算例分析中本文主要采用遗传算法的求解结果。遗传算法基本要素设置如下:

染色体编码。运用浮点法对决策变量进行编码,既能够满足较大的数值范围,又能保证数值的精度。

初始种群。将种群规模设置为100,随机生成初始种群。

适应度函数。 z 需要求最大值,在计算时改为求最小值,随后将修改的两个目标函数作为适应度函数。

选择。由于目标函数中 z 需要取最大值,编码时为其取相反数改为求最小值。本研究采用锦标赛选择法:每次从种群中取出一定数量个体(放回抽样),选择其中最好的样本进入子代种群。重复该操作,直至新种群规模达到原有种群规模。

交叉与变异。采取自适应交叉算子,运用两点顺序交叉法进行交叉操作,经过对比运算结果,将交叉概率设置为0.8,变异概率设置为0.1。

3 算例分析

2013年4月20日,四川省雅安市芦山县发生7.0级地震,造成196人死亡,21人失踪,11470人受伤,累计受灾人数38.3万人。其中雅安市8个县970879人受灾、173人死亡、23人失踪、10874人受伤(重伤995人),重灾区有芦山县、宝兴县、天全县。本文以雅安市8个县(芦山县、宝兴县、天全县、荣经县、汉源县、石棉县、雨城区、名山区)作为受灾点进行分析。结合地震影响范围及各区域发展状况,以雅安市作为主要配送中心为灾区进行物资集散和配送活动。根据人口密度和受灾情况,在雨城区、名山区、天全县、荣经县设置四个临时救助站。各受灾点各时间段轻重灾民数量如表2所示;表3为各点间运输灾民与应急物资的行驶时间;参考以往文献^[3,24],本文将各类灾民不同阶段的生存概率设置为表4;表5为临时救助站最大容量限制。假设每人每时段需要饮用水2瓶,食物2份。

表2 各受灾点各阶段轻、重灾民数量

受灾点	阶段						人
	1	2	3	4	5	6	
芦山县	927, 98	1 373, 162	2 714, 356	1 928, 334	2 652, 167	150, 65	
宝兴县	673, 78	1 542, 115	2 459, 234	1 212, 450	986, 335	145, 78	
天全县	874, 90	1 454, 147	1 652, 211	980, 231	567, 110	342, 90	
荣经县	432, 32	550, 21	631, 22	245, 32	310, 25	189, 19	
汉源县	98, 12	113, 15	134, 8	78, 6	56, 2	54, 0	
石棉县	34, 14	52, 19	47, 25	26, 10	22, 7	15, 2	
名山区	25, 8	98, 19	78, 27	56, 14	13, 7	21, 9	
雨城区	56, 23	78, 17	121, 46	75, 19	47, 11	20, 12	

表 3 各受灾点灾民及物资运输时间 h

	j_1	j_2	j_3	j_4	配送中心
芦山县	0.5	0.5	0.5	1	1
宝兴县	1	1	1	1.5	1.5
天全县	0.5	1	0	1	1
荣经县	1	1	1	0	1
汉源县	2	2	2	1.5	2
石棉县	2.5	2.5	1	1.5	2.5
名山区	0.5	0	1	1	0.5
雨城区	0	0.5	0.5	1	0.5

表 4 各类灾民不同阶段的生存概率 %

灾民类型	阶段					
	1	2	3	4	5	6
重伤灾民 r	63.0	43.2	23.0	11.8	5.2	0.5
轻伤灾民 y	90.0	81.2	70.3	49.0	28.7	19.6

表 5 救助站最大容量

	雨城区 j_1	名山区 j_2	天全县 j_3	荣经县 j_4
人数/人	3 655	559	1 031	661

为了求解模型并验证其有效性,分析灾民心理成本与救援效率的关系,本文选择遗传算法,利用 Matlab R2021a 进行求解。求得相应结果如表 6 所示。由表 6 可以看出,虽然救援的人数随时间推移呈现先增后减的趋势,但灾民的心理成本始终较高,救助生存率降低。因此,在救援过程中有必要考虑灾民的心理成本。为了进一步说明心理成本与救援效率之间的关系,区分不同救援活动中灾民所产生的心理成本对救援效率影响的强度,便于救援人员更精准地决策,本文进行如下分析。

(1)心理成本与救援效率的关系。由图 3 可知,灾民的心理成本与应达到的救援效率成正比。一方面,随着灾民心理成本的增加,考虑灾民的负面心理更有利于提高救援效率。另一方面,应达到的救援效率越高,说明等待救援的人数越多,即灾情越严重,灾民的心理成本越大。此时考虑灾民的心理成本对合理安排救援工作更有意义。图 4 分别为目标 z 和 f 达到最优时救援效率的变化趋势。由图可知,两者的差值随时间推移越来越小。即以心理成本为主要目标,模型达到最优时的存活人数逐渐接近以救援效率为主要目标时的存活人数。由此可知,随时间的推移,灾民心理成本对救援效率的影响越来越小。应急救援过程中,决策者在初期考虑灾民负面心理对救援效率的影响,有助于达到更优的救援效果。

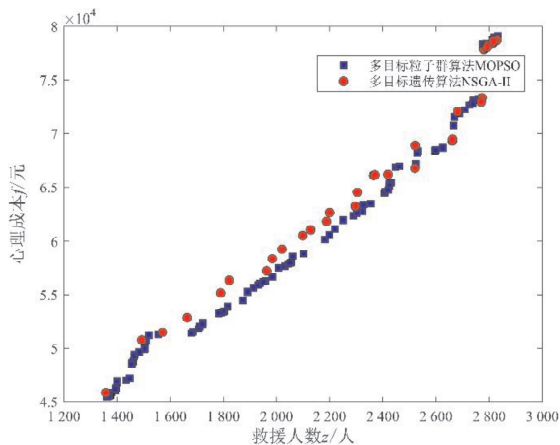


图 3 帕累托解集分布图

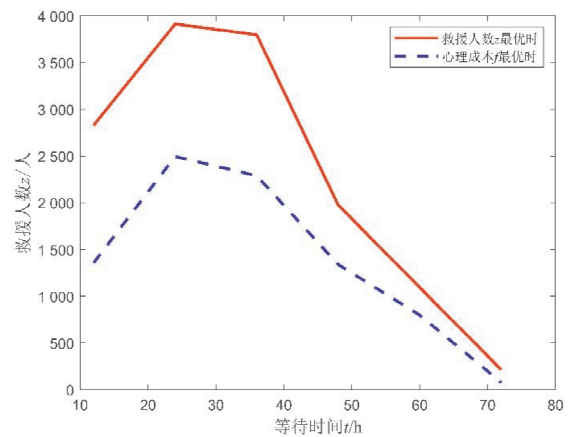


图 4 最大救援人数趋势图

(2)不同救援活动对心理成本的影响。图 5 中上部分为等待应急物资分配过程中灾民产生的心理成本,下部分为灾民转运过程中的心理成本。对比两个图形可以看出:随着受灾人数和等待时间的增加,由于物资分配不及时产生的心理成本远大于灾民转运过程中产生的心理成本,且前者增长迅速。因此,在救灾初期应更多关注救援物资分配的及时性,避免灾民因物资发放延迟产生的心理成本影响其行为,防止进一步爆发次生社会问题^[30]。

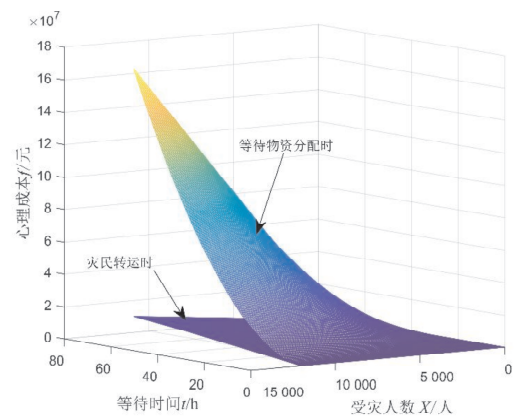


图 5 救援活动-心理成本关系图

(3)两种物资分配方式对灾民心理成本的影响。假设配送中心物资充足,此时灾民等待物资分配所产生的心理成本与两种分配方式之间的关系如表 7 所示。由表 7 可以看出,1~3 阶段受灾人数不断增加,按比例分配策略下的心理成本逐渐接近并优于随机到达分配策略;4~6 阶段受灾人数逐渐减少,随机到达分配策略又优于按比例分配策略。此结果表明,当受灾人数较多时,依托于大数据等技术的按比例分配策略会优于随机到达分配策略。这是因为与随机到达分配策略相比,按比例分配是根据各地受灾程度的不同进行物资分配,更加保障了物资分配的公平性。因此,当受灾人数较多时,更应该采取按比例分配策略,尽可能降低灾民的心理成本;当受灾人数较少时,可以采用随机到达分配策略,以节约配送时间。

表 6 求解结果

阶段	心理成本/元	总生存数量/人	分配物资量/份	重灾民救援数/人	轻灾民救援数/人	救助生存率/%
1	78 595.974	2 815	6 948	355	3 119	81.0
2	233 902.814	3 837	11 550	515	5 260	66.0
3	702 625.667	3 797	11 812	316	5 590	64.0
4	499 733.435	1 976	11 392	1 096	4 600	35.0
5	544 953.106	1 095	10 634	664	4 653	21.0
6	176 268.286	212	2 422	275	936	8.0

表 7 两种分配方式产生的心理成本

	阶段					
	1	2	3	4	5	6
受灾人数/人	3 474	5 775	8 765	5 696	5 317	1 211
按比例分配的心理成本/元	23 564.01	61 981.51	151 922.82	63 353.53	44 526.79	10 692.47
随机到达分配的心理成本/元	20 835.24	57 827.53	180 772.92	59 199.56	41 799.03	9 078.67

4 结论

近年来在众多救援活动研究中,灾民的心理因素作用愈发受到学者们关注。本文基于灾民心理压力,构建以心理成本最小、生存人数最多的多目标整数规划模型,探究心理成本与救援效率及救援活动之间的关系,以及不同物资分配策略对灾民心理成本的影响,并以 2013 年芦山 7.0 级地震为背景进行算例分析,利用遗传算法对其进行求解与验证,得到以下主要结论:

(1)救灾初期,灾民的心理成本对救援效率影响较大,随着时间的推移影响逐渐减弱。这意味着救援早期有必要考虑灾民的负面心理,提高最大生存人数,减少灾民不良心理诱发的次生社会问题。

(2)随着时间的推移,物资分配不及时产生的心理成本远大于灾民转运不及时引发的心理成本。救援过程中决策者需重视救援物资分配的时效性,避免因物资发放不及时导致灾民心理压力激增,影响整体救援效率。

(3)受灾人数较多时,采取按比例的物资分配策略,能有效降低灾民心理成本;受灾人数较少时,为缩短救援时间,可采取随机到达的物资分配策略。

本研究集成了灾后救援中的灾民转运与物资分配问题,未考虑灾前避难所选址以及物资需求预测等准备活动,未来可从整个应急管理系统出发,综合灾前准备与灾后响应两个时期,进一步探究不同救援阶段的集成问题。此外,本文主要考虑了受灾人员心理压力对救援行动的影响,并未涉及救援人员的心理状况,未来可以考虑加入其异质性心理及行为,使模型更加完善,从而提升救援效率。

参考文献:

- [1] FARAHANI R Z, LOTFI M M, BAGHAIAN A, et al. Mass casualty management in disaster scene: a systematic review of OR&MS research in humanitarian operations[J]. *European Journal of Operational Research*, 2020, 287(3): 787-819.
- [2] GUPTA S, STARR M K, FARAHANI R Z, et al. Disaster management from a POM perspective: mapping a new domain[J]. *Production and Operations Management*, 2016, 25(10): 1611-1637.
- [3] 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.
- [4] 王妍妍,孙佰清.模糊信息下多种类应急物资多周期分配优化模型[J]. *中国管理科学*, 2020, 28(3): 40-51.
- [5] 马运佳,赵秀娟,秦连杰,等.多约束多目标的灾害避难所选址优化研究:以海南省文昌市为例[J]. *灾害学*, 2018, 33(1): 218-224.
- [6] GUO J, DU Q, HE Z. A method to improve the resilience of multimodal transport network: location selection strategy of emergency rescue facilities[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2021, 161: 107678.
- [7] YU W. Reachability guarantee based model for pre-positioning of emergency facilities under uncertain disaster damages[J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2020, 42: 101335.
- [8] JIN S, JEONG S, KIM J, et al. A logistics model for the transport of disaster victims with various injuries and survival probabilities[J]. *Annals of Operations Research*, 2015, 230(1): 17-33.
- [9] REZAPOUR S, BAGHAIAN A, NADERI N, et al. Dynamic on-site treatment strategy for large-scale mass casualty incidents with rescue operation[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2022, 163: 107796.
- [10] 于冬梅,高雷阜,赵世杰.考虑凸形障碍的应急设施选址与资源分配决策研究[J]. *系统工程理论与实践*, 2019, 39(5): 1178-1188.
- [11] 朱莉,丁家兰,计梦婷.考虑区域异质性的应急物资选址-分配优化[J]. *系统管理学报*, 2018, 27(6): 1142-1149.
- [12] 孙华丽,项美康,薛耀峰.不确定信息下应急设施选址-路径鲁棒优化[J]. *系统管理学报*, 2019, 28(6): 1126-1133.
- [13] 汤兆平,孙剑萍.铁路应急设施非概率可靠性选址优化研究[J]. *运筹与管理*, 2022, 31(7): 100-108.
- [14] 汤兆平,秦进,孙剑萍.基于非概率可靠性的铁路应急设施选址-路径鲁棒优化[J]. *中国管理科学*, 2022, 30(9): 206-216.
- [15] HOU Y, HOU W, ZHANG Y, et al. Relationship between working stress and anxiety of medical workers in the COVID-19 situation: A moderated mediation model[J]. *Journal of Affective Disorders*, 2022, 297: 314-320.
- [16] 李洋,李佳泽,王志红,等.肺炎疫情期间医护人员心理危机干预效果分析[J]. *灾害学*, 2021, 36(2): 166-170.
- [17] SHEU J-B, PAN C. A method for designing centralized emergency supply network to respond to large-scale natural disasters[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2014, 67: 284-305.
- [18] SAFEER M, ANBUUDAYASANKAR S P, BALKUMAR K, et al. Analyzing transportation and distribution in emergency humanitarian logistics[J]. *Procedia Engineering*, 2014, 97: 2248-2258.
- [19] 王旭坪,张娜娜,詹红鑫.考虑灾民非理性攀比心理的应急物资分配研究[J]. *管理学报*, 2016, 13(7): 1075-1080.
- [20] 宋英华,葛艳,杜丽敬,等.考虑灾民心理的应急设施选址配送问题研究[J]. *灾害学*, 2019, 34(1): 187-193.
- [21] 王熹徽,张文鑫,余玉刚,等.考虑灾民痛苦感知的应急避难所选址与物资分配优化[J]. *中国管理科学*, 2020, 28(12): 162-172.
- [22] 朱莉,曹杰,顾珺,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): 2427-2437.
- [23] 朱莉,曹杰,顾珺,等.考虑异质性行为的灾后应急物资动态调度优化[J]. *中国管理科学*, 2020, 28(12): 151-161.
- [24] 孙华丽,柴丽萍,张玲,等.震后多目标动态应急医疗设施选址-伤员转运问题研究[J]. *中国管理科学*, 2020, 28(3): 103-112.
- [25] 方嘉奇.震后医药应急物流供需动态适配决策问题研究[D]. 北京:北京交通大学,2021.
- [26] 中国应急信息网. 应急物资保障[EB/OL]. (2019-10-10) [2023-05-29]. https://www.emerinfo.cn/2019-10/10/c_1210306683.htm.
- [27] 张侃,王日出.灾后心理援助与心理重建[EB/OL]. (2008-07-21) [2023-05-29]. https://www.cas.cn/zl/jzt/wx-cbzt/zgkxyyk2008nd4q/kjzz/200807/i20080721_2668402.shtml.
- [28] 应急管理部. 全力救援受灾群众 最大限度减少人员伤亡 四川泸定地震救援现场直击[EB/OL]. (2022-09-10) [2023-05-29]. https://www.mem.gov.cn/xw/gdyj/202209/20220910_422148.shtml.
- [29] 中国政府网. 应急管理部 国家发展改革委 财政部 国家粮食和储备局关于印发《“十四五”应急物资保障规划》的通知[EB/OL]. (2022-10-11) [2023-05-29]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2023-02/03/content_5739875.htm.
- [30] 顾安民. 关于“绵竹哄抢救灾物资”真相调查[EB/OL]. (2008-05-26) [2023-05-29]. <http://www.wyzxwk.com/Article/shidai/2009/09/35956.html>.

(下转第 178 页)