

公平缓解灾民创伤下的应急物资动态调配研究

朱 莉 曹 杰 顾 珺 郑 翼

【摘 要】及时有效地调配物资对灾害应急救援至关重要。考虑两种典型的物资分配策略,构建一个多目标动态调配模型来实现灾后应急物资的有效分配和路径优化选择。其中,多目标不仅强调对救援效率的追求,也重视对救援有效性和缓解灾民心理创伤公平程度的考量。提出相对剥夺成本来刻画救援公平性,且构造包含初救和补救两阶段的需求函数以反映灾害变化、救援调配与需求之间的相互影响。应用设计的遗传算法在2008年汶川地震案例背景下对所构模型进行仿真求解,并通过实施对比分析和关键参数敏感性分析得出一些管理启示。

【关键词】应急救援;公平性;动态调配;剥夺成本;遗传算法

【作者简介】朱莉(1983-),女,汉,江西上饶人,南京信息工程大学管理工程学院,副教授,博士,研究方向:应急物流,E-mail:lzhu@nuist.edu.cn,(南京210044);曹杰(通信作者)(1973-),男,汉,安徽六安人,徐州工程学院管理工程学院,教授,博士,研究方向:应急决策,E-mail:cj@amss.ac.cn,(徐州221018);顾珺(1992-),女,汉,江苏南京人,南京信息工程大学管理工程学院,硕士,研究方向:应急物流,E-mail:jungu@nuist.edu.cn,(南京210044);郑翼(1981-),女,汉,江苏泰州人,南京信息工程大学管理工程学院,助理研究员,硕士,研究方向:应急决策,E-mail:zhengyi@nuist.edu.cn,(南京210044)。

【原文出处】《系统工程理论与实践》(京),2020.9.2427~2437

【基金项目】国家社会科学基金重大项目(16ZDA054)。

1 引言

应急物资调配是灾后救援响应的关键环节,除快速有效等要求之外,对救援公平性的考量在人道主义场景中尤为重要^[1]。目前文献大多从需求量满足或救援投入金额等客观绩效指标出发来衡量公平,比如最小化最大未满足需求量^[2]、最小化各地救援投入差异^[3]等,较少有研究从缓解灾民心理创伤等视角来思考救援公平性问题。事实上,救援过程中灾民面对灾害产生的应激障碍等心理症状不容忽视^[4],在强调舒缓负面情绪的同时更需重视公平有效地缓解灾民心理创伤^[5]。这在灾后应急救援中应被考虑为一项重要的决策目标。

鉴于灾后救援物资稀缺、交通受阻或车辆运力有限,应急救援调配通常是面向灾害变化下动态需求的一个多阶段决策过程^[6-8],如郑斌等^[8]构建了一个震后应急物流动态选址—联运的多阶段决策模型。也有研究将整个应急救援广义划分为初始和补充救援两阶段动态过程^[9-11],如Barbarosoglu等^[9]用一个两阶段随机规划框架来刻画灾后响应的应急物资运输问题,包括灾情不明时的初救阶段以及灾害信息较为清晰的补救阶段。不论多阶段还是两阶段的相关研究大多都是根据灾情变化对应急救援物资进行实时调控,即关注的都是变化灾害下动态需求如何影响应急物资的调配,很少探讨救援调配活动对物资需求甚至灾害变化的反向影响。而在实际救援决策中,灾害变化、动态需求以及救援物资调配三者之间呈现复杂的相互关联关系^[12]:不仅灾情和物资需求会影响应急救援方案,救援物资的调配对灾情控制和需求缓解也存在反作用。

基于此。本文研究在灾害变化场景下面临不同救援分配策略时,如何实施一个有效的应急动态调配方案,使尽快收到救援物资的同时也保障灾民心理创伤能以公平的方式得到缓解。首先,构造一个多目标应急物资动态调配模型,决策目标包括最短化调配时长、最小化绝对和相对剥夺成本,其中绝对剥夺成本是对灾民们因未被满足物资需求而遭遇心理创伤的经济衡量^[4,13,14]、而相对剥夺成本是通过度量各灾民心理创伤的差异化程度来表征救援公平性的一个指标^[15]。基于初救和补救间的关联关系,构造两阶段动态需求函数来刻画灾情和救援物资调配之间的相互影响。然后,在两种典型的救援分配策略下——按比例分配和随机到达分配,设计遗传算法对所构模型以2008年汶川地震为案例背景实施仿真分析,并对比在不同等待救援时间窗约束、不同需求函数以及不同车辆类型情形下采用两种分配策略时的应急救援效果,得出相关结论为政府应急决策部门提升救援效率和救援公平性提供有益思考。

2 建模准备

在有限资源和车辆容量约束下,探讨某一重大灾害发生后的应急救援物资调配过程。为便于清晰展现需求变化与资源动态调配之间的相互影响关系,本文选择从广义上将整个应急救援过程分为两阶段(初始救援阶段和补充救援阶段)来讨论^[9-11]:初救阶段未满足的物资需求须在补救阶段被予以补充配给;补救阶段各受灾点需求量因等待救援时长、以及初救阶段接收物资时间/数量的不同而有所区别。实际上,一方面,多阶段救援过程也可将除初救外的剩余多个救援阶段宏观上合并视为第二阶段,第二阶段的任务既要应对新出现的物资需求还要对初救阶段未满足的需求实施补偿行为;另一方面,灾后初始救援阶段的各方面信息往往不太明了,当灾害信息较为清楚准确时通常会进行第二阶段的补救。

2.1 模型假设与符号说明

所构模型研究面向动态灾害怎样最快调配应急物资以实现最有效最公平缓解各灾民心理创伤,涉及车辆调度问题(vehicle routing problem, VRP)和资源分配问题(resource allocation problem, RAP)。模型重点关注公平缓解灾民创伤和物资调配动态性,仅在单车型单物资品种的经典VRP框架下建模,假设条件如下:1)出救点和受灾点的位置和数量均已知,且各受灾点处灾民人数已知;2)心理创伤的衡量建立在可用经济损失量化灾民遭遇痛苦的基础上;3)各出救点根据等待救援时间窗的不同可对多个受灾点实施物资配给,但鉴于救援资源有限和公平性原则,在每个救援阶段内各受灾点仅接收来自某出救点处单辆车的单次救援服务^[14];4)各救援车辆从各出救点处满载出发,直到将所有物资都分发完后才返回出救点;5)各受灾点处灾民的人均需求量与救援物资抵达时间有关^[16];6)暂不考虑各出救点间或各受灾点间救援物资相互协调的转运问题。

用 S 表示出救点集合, D 表示受灾点集合, P 是应急救援调配网络中所有节点的集合, $P = S \cup D$, E 是应急救援调配网络中所有连接边的集合,意味着物资调配线路。用 i 和 j 来表示救援物资出发点和到达点索引, $(i, j) \in E$ 。 K 是救援运输车辆的集合, $K = \{1, 2, \dots, k, \dots, l\}$ 。 k 是任意车辆索引,每辆车的物资装载容量为 L 。用 o 和 r 来分别标识初救和补救阶段,用 D^{ik} 来表示车辆 k 在到达点 i 之前所救援受灾点的集合,而 D^{ok} 是车辆 k 在初始救援阶段救援受灾点的集合。

t_{ij} 表示车辆从点 i 到点 j 的行驶时间。 t_k^o 是指车辆 k 完成初始救援任务后返回出救点的时间, T^o 是整个初始救援阶段的时长。 t_k^o 是车辆 k 在初始救援阶段抵达受灾点 i 的时间,而 t_k^r 是车辆 k 在补救阶段到达受灾点 i 的时间。用 TW_i 来表示受灾点 i 处能够容忍的等待救援时间窗。分别用 d_i^o 和 d_i^r 来表示受灾点 i 在初救和补救阶段所产生的物资需求量,与点 i 处灾民人数 N_i 、人均物资需求量 $d(t)$ 以及单位时间单个灾民消耗的物资量 M 有关。 $\Gamma(t)$ 表示因缺乏单位救援物资而致灾民遭遇心理创伤的经济衡量,与等待救援时长紧密相关。用 ADC_{ik}^o 与 ADC_{ik}^r 分别表示初救和补救阶段车辆 k 到达点 i 时灾民所承担的绝对剥夺成本;用 RDC_{ijk}^o 和 RDC_{ijk}^r 分别度量在初救和补救阶段车辆 k 途经点 i 和点 j 处灾民们遭遇的相对剥夺成本。

模型有如下4个决策变量: x_{ik}^o 和 x_{ik}^r 分别表示在初救和补救阶段车辆 k 对受灾点 i 所配给的物资数量; y_{ijk}^o 和

y_{ijk}^r 均为 0-1 变量, 分别用来刻画初救和补救阶段车辆 k 在受灾点 i 和 j 间的行驶状况。 $y_{ijk}^o = 1$ 表示初始救援阶段车辆 k 从点 i 开往 j , 否则 $y_{ijk}^o = 0$ 。 y_{ijk}^r 的含义同理。

2.2 各救援阶段的物资需求函数

关注灾害变化、救援调配活动和物资需求量三者之间的相互关联: 一方面, 灾情的严重程度必然决定着物资需求量的多少, 需求规模又直接影响救援调配方案; 另一方面, 合适的救援物资配给量和配给时效性均能在一定程度上缓解物资需求而逐步实现控制灾情的目的。下面分别从初救和补救两阶段讨论物资需求函数。

1) 在初始救援阶段, 各受灾点处物资需求不仅与灾情相关, 而且受到等待救援时长的影响。在此选择用受灾人数来刻画灾情的严重性, 且构造一个时变的人均需求 $d(t)$ 来反映救援物资抵达时间 (即等待救援时长) 对物资需求数量的影响^[16]。故在初始救援阶段受灾点 i 处的需求函数如下:

$$d_i^o = N_i * d(t_{ik}^o), \forall i \in \mathbf{D}, k \in \mathbf{K}. \quad (1)$$

由于救援物资抵达时间是由救援调配活动所决定的, 故上述物资需求函数在一定意义上能够体现灾害变化和救援调配活动的集成影响。参考文献[16,17], 构造人均需求为一个随等待时间呈指数级增长的指数型函数: $d(t) = a_1 * b_1^t$, a_1 和 b_1 皆为常数。

2) 在补充救援阶段, 救援调配活动不仅要满足新增的物资需求, 还要对初救阶段未满足需求量予以补给。需要说明的是, 与生活类应急物资 (如饮用水、食品等) 需求的不可累加特性不同, 这里聚焦需求满足度要求更高的救生类或医疗类应急物资。为体现救援调配活动对物资需求变化的反向影响, 构造补救阶段的需求函数如下, 是一个与初救阶段物资分配量密切有关的函数:

$$d_i^r = N_i * [d(t_{ik}^r) - d(t_{ik}^o + x_{ik}^o / (N_i * M)) + d(t_{ik}^o)] - x_{ik}^o, \forall i \in \mathbf{D}, k \in \mathbf{K}. \quad (2)$$

在整个应急救援调配活动中, 物资需求的变化有三个过程: 第一个过程对应于初始救援阶段, 鉴于灾情和救援调配活动的集成影响, 此时需求随等待救援时间呈指数级增长; 第二个过程指初救调配至各受灾点处的物资量能够维持灾民需求的阶段, 此阶段时长为 $x_{ik}^o / (N_i * M)$, 由于需求在此过程中被予以一定满足, 可假定需求呈线性下降趋势^[17]; 第三个过程, 由于各受灾点逐渐耗尽初救配给的救援物资后出现新的需求, 加之那些原本在初救阶段就未被满足的需求, 此时物资需求再次随等待救援时间呈指数上升态势。

2.3 不同的应急救援分配策略

为讨论不同分配策略对应急救援物资调配方案的影响, 本文关注在初救阶段可能出现的两种典型救援分配策略: 按比例分配策略和随机到达分配策略。

1) 按比例分配策略 (proportion allocation rule, PA)

在按比例分配策略下, 决策者们根据单个受灾点处需求占有所有受灾点总需求的比例来对各受灾点分配救援物资。如此, 初救阶段车辆 k 给受灾点 i 分配的物资数量表达如下:

$$x_{ik}^o = \frac{d_i^o}{\sum_{i \in \mathbf{D}^{ok}} d_i^o} * L, \forall k \in \mathbf{K}. \quad (3)$$

2) 随机到达分配策略 (random arrival allocation rule, RAA)

类似于先到先得原则, 随机到达分配策略强调物资需求满足的优先性依赖于救援车辆抵达各受灾点处的顺序, 即救援车辆先到达的受灾点处需求被先予以充分满足。故在随机到达分配策略下, 初救阶段车辆 k 给受灾点 i 分配的物资数量表达如下:

$$x_{ik}^o = \min \{ d_i^o, \max (0, L - \sum_{j \in \mathbf{D}^{ok}} x_{jk}^o) \}, \forall i \in \mathbf{D}, k \in \mathbf{K}. \quad (4)$$

2.4 反映灾民心理创伤的剥夺成本

最大程度地缓解灾民心理创伤是应急救援调配决策目标之一。本文参考文献[4,13,14], 构造“绝对剥夺成本”来度量各受灾点处灾民们因未及时接收到救援物资而遭受创伤的心理代价。这种心理代价的大小与物

资源匮乏时长、所需物资种类/数目、以及灾民自身经济社会属性均有关,用以 e 为底的指数型函数来近似刻画^[4,13,14]。鉴于模型假设仅考虑单种物资,这里先给出因缺乏单位救援物资而致灾民心理创伤的经济度量,为便于分析,仅以关注物资匮乏时长为例来讨论灾民们心理代价的变化,有: $\Gamma(t) = a_2 * (e^{b_2 * t} - 1)$, 其中 a_2, b_2 皆为常数。

仍分初救和补救两阶段来分别给出灾民们绝对剥夺成本函数(见式(5)(6)),与各受灾点处物资需求量以及在不同救援阶段对各受灾点配给的物资数量有关。

$$ADC_{ik}^o = x_{ik}^o * \Gamma(t_{ik}^o) + (d_i^o - x_{ik}^o) * \Gamma(T^o), \forall i \in D. \quad (5)$$

$$ADC_{ik}^r = x_{ik}^r * \Gamma(t_{ik}^r - T^o), \forall i \in D. \quad (6)$$

需要注意的是,在初始救援阶段,灾民的绝对剥夺成本由两部分组成:等待至接收到救援物资时灾民遭遇创伤的心理代价、以及整个初救阶段结束后灾民仍未收到所需救援物资而累积的心理代价。并且,为强调人道主义救援的公平性原则,特提出以任意两受灾点处灾民绝对剥夺成本的绝对偏差作为“相对剥夺成本”,以度量不同受灾点处灾民因未及时收到救援物资而遭受心理创伤的差异化程度^[15],表达式如下:

$$RDC_{ijk}^u = |ADC_{ik}^u - ADC_{jk}^u|, \forall i, j \in D; u \in \{o, r\}. \quad (7)$$

3 应急救援物资调配模型的构建

基于以上建模准备,构建如下两阶段应急救援物资调配模型,其决策问题是:在各种时间窗、救援物资数量/车辆容量限制以及车辆路径流等约束下,寻求使救援调配时长最短、以及灾民绝对和相对剥夺成本最小的应急救援物资最优调配方案(包括物资的合理分配量和调度路径的选择)。

$$\min f_1 = \min \sum_{k \in K} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} (y_{ijk}^o * t_{ij} + y_{ijk}^r * t_{ij}). \quad (8)$$

$$\min f_2 = \min \sum_{k \in K} \sum_{i \in D} (ADC_{ik}^o + ADC_{ik}^r). \quad (9)$$

$$\min f_3 = \min \sum_{k \in K} \sum_{i \in D} \sum_{j \in D} (RDC_{ijk}^o * y_{ijk}^o + RDC_{ijk}^r * y_{ijk}^r). \quad (10)$$

$$s. t. \quad t_k^o = \sum_{j \in N} \sum_{i \in N} y_{ijk}^o * t_{ij}, \forall k \in K. \quad (11)$$

$$T^o = \max \{t_k^o \mid \forall k \in K\}. \quad (12)$$

$$t_{ik}^u = \begin{cases} \sum_{j \in N} (t_{jk}^u + t_{ji}^u) * y_{jik}^u, & u = o, \\ T^o + \sum_{j \in N} (t_{jk}^u + t_{ji}^u) * y_{jik}^u, & u = r, \end{cases} \forall i \in D. \quad (13)$$

$$t_{ik}^u \leq TW_i, \forall i \in D; k \in K; u \in \{o, r\}. \quad (14)$$

$$\sum_{k \in K} x_{ik}^o + \sum_{k \in K} x_{ik}^r = d_i^o + d_i^r, \forall i \in D. \quad (15)$$

$$x_{ik}^u \leq B * y_{jik}^u, \forall i \in D; j \in N; k \in K; u \in \{o, r\}. \quad (16)$$

$$\sum_{j \in D} \sum_{k \in K} y_{ijk}^u \geq 1, \forall i \in P; u \in \{o, r\}. \quad (17)$$

$$\sum_{j \in N} \sum_{k \in K} y_{ijk}^u \leq 1, \forall i \in D; u \in \{o, r\}. \quad (18)$$

$$\sum_{(i,h) \in E} y_{ihk}^u - \sum_{(h,j) \in E} y_{hjk}^u = 0, \forall i, j \in D; k \in K, u \in \{o, r\}. \quad (19)$$

$$y_{ijk}^u = 0, \forall i, j \in P; u \in \{o, r\}. \quad (20)$$

$$y_{ijk}^o, y_{ijk}^r \in \{0, 1\}, \forall i, j \in N; k \in K; x_{ik}^o, x_{ik}^r \geq 0, \forall i \in D; k \in K. \quad (21)$$

目标函数(8)是最短化两阶段救援物资调配总时长,体现救援效率。目标函数(9)和(10)反映救援有效性和公平性要求,分别表示最小化两救援阶段所有受灾点处灾民的绝对以及相对剥夺成本。约束条件(11)说明车辆 k 完成初始阶段救援任务后返回出救点的时间与调度路径选择有关。式(12)定义了整个初始救援阶段的时长,即初救阶段最后一辆车回到出救点的时刻便是初始救援活动结束时间。式(13)给出车辆 k 在初救和补救阶段抵达受灾点 i 的时间,它们均受到调度路径选择的影响。式(14)是救援车辆抵达各受灾点的时间窗

约束。约束条件(15)指出在实施两阶段的物资救援后各受灾点处于供需平衡状态。不等式(16)采用一个任意大数 B 来刻画救援物资分配量和调度路径间的关联关系,表明只有在初救或补救阶段存在车辆往来的各受灾点之间才能相应实现救援物资配给。式(17)表明不论是初救还是补救阶段,任意出救点均可对多个受灾点实施救援物资的配给。式(18)指出在初救和补救阶段,各受灾点均能且仅能接受来自一辆车的救援服务。约束条件(19)是标准流约束,确保任意区域的车辆流出量等于流入量。式(20)表明各出救点间在两阶段均不存在救援物资的相互转运。式(21)是决策变量的类型约束,指明路径选择为 0-1 变量、救援物资分配量需满足非负限制。

4 遗传算法设计

所构模型是一个多目标决策问题,鉴于如何处理多目标不是本文研究重点,在此采用常用的线性加权求和法将多目标转化成单目标^[15,16]。由于时间和成本具有不同的量纲,在加权前需先进行量纲归一化处理。即便是单目标的物资分配和路径优化也是一个 NP-hard 问题,较多的变量和约束使求解复杂性会随问题规模的增大而迅速增加,寻优效率较高的元启发式智能优化算法因能克服传统精确算法单点搜索效率低的缺点而成为求解此类模型的主要方法^[15,16]。应急物资救援调配活动具有强时效性要求,与其他常用的粒子度、模拟退火以及蚁群等元启发式算法相比,本文选择具有多点并行搜索、不依赖函数可导性、不易陷入局部最优、速度较快及鲁棒性较强等优点的遗传算法实施求解。

4.1 染色体编码

模型中有两类决策变量, y_{ijk}^0 和 y_{ijk}^r 是 0-1 变量, x_{ik}^0 和 x_{ik}^r 是连续型变量,故采用二进制和实数混合的编码方式。针对两救援阶段分别编码,在初救阶段设计一个共有 m 个基因位的子串,从 1~ m 的自然数中随机取值排列用以表示对各受灾点的救援顺序。运用同样方法对补充救援阶段实施染色体编码。

4.2 初始种群和适应度函数设计

设置一定种群规模,随机产生初始种群。考虑到时间窗约束和每辆车装载容量限制,划分初始种群以确定初救阶段车辆行驶路线,并以此计算出各受灾点的等待救援时间,从而得出各受灾点在初救阶段的物资需求量。分别采用按比例分配和随机到达分配策略,得到初救阶段各受灾点的物资配给量,并将其与初救阶段需求量比较,算出初救阶段未满足需求量,依此更新种群得出补充救援阶段物资需求量。在补救阶段各受灾点处等待救援时间窗和装载容量约束下,得出两种策略下补充救援阶段的物资分配量和调度路径。

考虑到所构模型是多目标优化,首先对模型的三个目标进行如下归一化处理加和转化成单个目标:
$$fit(x) = (f_1 - \min f_1) / (\max f_1 - \min f_1) + (f_2 - \min f_2) / (\max f_2 - \min f_2) + (f_3 - \min f_3) / (\max f_3 - \min f_3)$$
,将 $fit(x)$ 作为每组种群的适应度值。由于模型的三个决策目标都是寻求最小化,故作为评价指标的适应度值 $fit(x)$ 越小、个体性能越优秀。

4.3 遗传操作

1) 选择:采取轮盘赌法和最佳个体保留法相结合的选择策略,以保证优秀的个体在每一代的选择过程中都能被复制进入下一代,从而保障算法的收敛性。

2) 交叉和变异:采取自适应交叉算子,运用两点顺序交叉法进行交叉操作。交叉概率由每一代种群中最优个体与其他个体的适应度差值所决定,表达式为: $pc = 1 / (1 + e^{\Theta(\min fit - fit)})$,其中 $\Theta > 0$, $\min fit$ 是种群中最小适应度值。若种群内适应度值的差距越小, pc 值越接近 0.5,如此既能保护优秀个体的染色体结构、又能加快优化求解的速度;若种群内适应度值的差距越大, pc 值越接近 1,此时便于通过交叉操作来产生新的个体,以保证种群的多样性,从而提升整个算法的全局搜索能力。类似地,变异操作采用自适应变异算子实施两点变异方法,且通过区域描述器对变异范围进行限制,以保障变异后的新个体不超出决策变量的边界。

5 案例分析与参数仿真

以 2008 年汶川地震为案例场景,结合真实数据和部分仿真参数设置,将设计的遗传算法应用于求解所构模型,对比分析 PA 和 RAA 两种策略下的救援物资调配方案,并对关键参数实施敏感性分析,得出一些管理启

示供决策者们参考。

5.1 案例场景及对比分析

依据 2008 年 5·12 汶川地震灾情报告,选择 14 个受灾点和灾区附近清平乡的一所小学作为救援物资集散分配中心,14 个受灾点的地理位置及灾民人数见图 1。讨论震后如何快速有效地调配某种急救药品包至各受灾点,该药品包内包括一定量的清创消毒用品(如棉棒)、止血包扎敷料(如创可贴、灭菌级纱布片)、止血包扎固定用品(如医用弹性绷带)等医药物资。药品包属于消耗型物资,不同救援阶段的各受灾点均会产生新的需求。据调研,每份药品包的重量约为 0.36 千克,人均药品包消耗率为 4.5 个/天,救援车辆的载重量为 40 吨,行驶速度为 50 公里/小时,灾民可容忍的最长等待救援时间统一设为 1.3 小时^[18],需求函数和剥夺成本函数中系数分别设为 $a_1 = 2.2$ 、 $a_2 = 1.5$ 、 $b_1 = 1.35$ 、 $b_2 = 0.12$ 。此外,算法相关参数设置如下:种群个数为 200,最大迭代步数为 1000,交叉变异算子中参数 Θ 取为 0.0025。

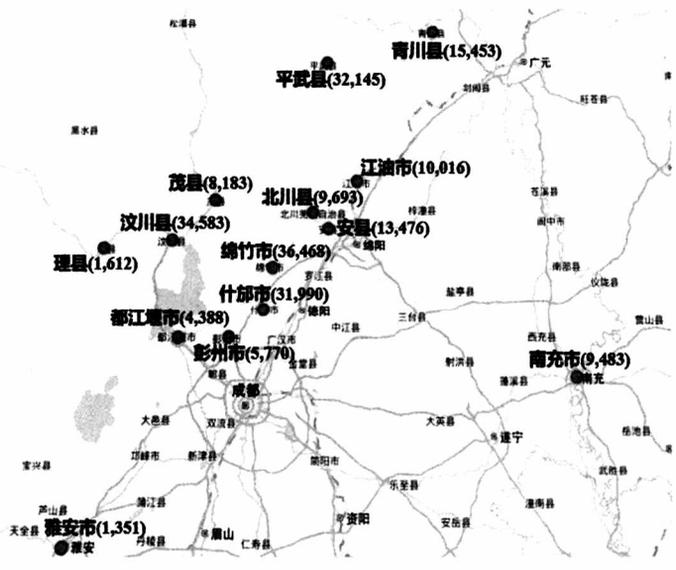


图 1 各受灾点地理位置及灾民人数

基于上述案例场景,在 PA 和 RAA 两种分配策略下应用 MATLAB2015a 来实现求解模型的遗传算法,其良好且稳定的收敛性验证了所构模型和算法的有效性。表 1 列出两种分配策略下应急救援药品包调配方案的比较,其中“DT”代表最短救援调配总时长,“ADC”和“RDC”分别表示最小总的绝对和相对剥夺成本。表 1 显示,从初救和补救两阶段整体救援视角来看,虽 PA 比 RAA 要耗费更长时间来实施救援调配,但 PA 在有效且公平地缓解灾民心理创伤方面比 RAA 表现更好。尤其相较于绝对剥夺成本而言,PA 在相对剥夺成本这一绩效指标上表现得更为优秀,凸显了 PA 分配策略在应急救援公平性方面的优势。

再将两救援阶段分开来看,发现不论是初救还是补救阶段,PA 策略均以耗费更长的救援调配时间来收获比 RAA 策略更好的救援公平性。不过令人稍许意外的是,单独观察初救阶段,PA 策略下灾民们绝对剥夺成本竟高于使用 RAA 策略时的,意味着 PA 在初始救援阶段缓解灾民心理创伤其实不如 RAA 表现得好。但进一步比较补充救援阶段发现,PA 策略在缓解灾民心理创伤方面的表现最终优于 RAA。分析其主要原因在于:RAA 分配策略中先到的原则,使得靠近出救点清平乡的 8 个受灾点在初救阶段就能够接收到足够的药品包,这直接导致初救阶段 RAA 策略下灾民总的绝对剥夺成本较低。但另一方面。RAA 策略下初救阶段也存在剩余的 6 个受灾点未收到任何药品包配给的现象,这 6 个受灾点处灾民随等待救援时长的增加会累积承受越来越高的绝对剥夺成本。故总体来看,在汶川地震案例背景下,虽然 PA 分配策略下调配应急药品包耗用的时间比 RAA 策略更长,但相对而言 PA 策略能够实现一个更加公平且有效的人道主义救援。

表 1 两种策略下应急救援药品包调配方案的比较

路径/决策目标	PA 策略		RAA 策略	
	初救阶段	补救阶段	初救阶段	补救阶段
①	1→9→6→1	1→3→12→1	1→11→2→1	1→4→7→10→5→14→1
②	1→4→7→10→5→14→1	1→13→14→1	1→9→1	1→2→1
③	1→11→2→13→1	1→11→2→10→5→1	1→7→3→1	1→6→9→1
④	1→3→8→12→15→1	1→7→1	1→4→8→1	1→11→13→1
⑤		1→4→8→15→1	1→13→1	1→3→8→12→1
⑥		1→9→6→1		1→15→1
DT(小时)	3.61	4.51	2.51	4.21
ADC(元)	263,041	80,172	262,237	95,595
RDC(元)	145,825	43,765	216,703	82,626

5.2 参数的敏感性分析

在对比两种分配策略的救援效果后,对模型中关键参数实施敏感性分析,观察不同救援时间窗、不同需求函数和不同车辆类型对救援药品包调配方案的影响。

1) 救援时间窗的影响

改变受灾点等待救援时间窗,分别观察 PA 和 RAA 策略下不同阶段三个决策目标值的变化,列于表 2。从表 2 看出,在 PA 和 RAA 两种策略下,随等待救援时间窗的增大,药品包调配所需总时长均变短,灾民遭遇心理创伤均变得更严重且救援公平性更糟糕。调配总时长变短的原因是:时间窗越放松意味着受灾点处灾民能容忍更长的等待时间来接收药品包,这导致每辆车在车载容量允许情况下会倾向于去救援更多的受灾点,故整体来看调配药品包的车辆数变少,应急调配往返出救点的时间得到节约。

接着解释为何不论采用 PA 或 RAA 策略,更大的时间窗均会导致灾民遭遇更高的绝对和相对剥夺成本。PA 是按比例分配策略,每辆车途经的路径越长意味着初救阶段各受灾点处被配给药品包的比例越低,故时间窗的增加使得 PA 策略下各受灾点在初救阶段有更多的未满足需求量,加剧了灾民遭遇心理创伤程度。RAA 是随机到达分配策略,每辆车更长的救援路径一方面虽使初救阶段能有更多的受灾点被配给药品包,但另一方面初救阶段更长时间的耗费直接导致那些未被配给任何药品包的受灾点处灾民需忍受更长时间的救援等待,最终引起灾民整体剥夺成本的增加。

表 2 两种分配策略下不同救援时间窗对应急决策目标的影响

决策目标	PA 策略			RAA 策略			
	$TW_i = 1.2$	$TW_i = 1.3$	$TW_i = 1.4$	$TW_i = 1.2$	$TW_i = 1.3$	$TW_i = 1.4$	
初救阶段	DT(小时)	4.31	3.61	3.59	2.36	2.51	1.82
	ADC(元)	221,440	263,041	287,433	209,757	262,237	283,840
	RDC(元)	101,907	145,825	193,506	201,221	216,703	230,573
补救阶段	DT(小时)	4.59	4.51	4.36	5.40	4.21	3.74
	ADC(元)	59,055	80,172	82,571	76,181	95,595	100,095
	RDC(元)	41,302	43,765	61,768	63,648	82,628	98,425
两救援阶段	DT(小时)	8.89	8.12	7.95	7.76	6.72	5.56
	ADC(元)	280,496	343,213	370,004	285,938	357,832	383,935
	RDC(元)	143,209	189,590	255,274	264,869	299,329	328,999

2) 需求函数的影响

本文构造的需求函数中一个重要元素是人均需求 $d(t)$, 现讨论不同人均需求函数对 PA 和 RAA 策略下调配方案的影响。如图 2 所示, 参考文献[19], 采用体现应急早期救援响应急迫性的幂函数复合函数形式需求函数 $d(t) = 4.5 * t^{0.35}$ (图 2 中 DF1), 连同案例仿真中 $d(t) = 2.2 * 1.35^t$ (图 2 中 DF2) 作比较观察。这两个不同的人均需求函数反映了灾害救援中物资需求的不同特征: “DF1” 增长速度逐渐趋缓, 意味着需求在救援早期的增长比后期快, 这往往体现灾后应对恢复阶段的物资需求特征; 而“DF2” 增长速度呈加速态势, 即救援后期比早期具有更快速增长的物资需求, 这尤其出现在灾害愈发严重或次生灾害发生的情形, 表 3 列出在这两种不同需求函数下采用 PA 和 RAA 策略时两阶段应急救援调配方案中的三个决策目标值。

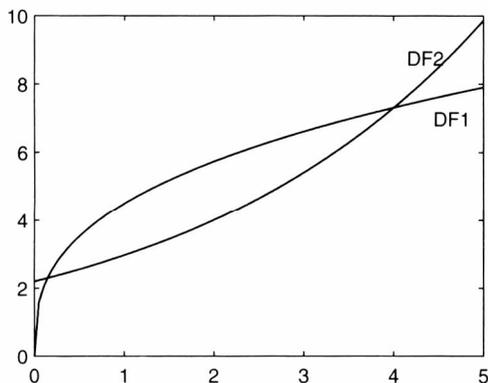


图 2 不同的人均需求函数

表 3 两种分配策略下不同需求函数对应急决策目标的影响

决策目标	PA 策略		RAA 策略		
	DF1	DF2	DF1	DF2	
初救阶段	DT(小时)	3.61	362	2.51	2.97
	ADC(元)	263,041	280,514	262,237	208,707
	RDC(元)	145,825	192,759	216,703	163,954
补救阶段	DT(小时)	4.51	4.72	4.21	4.38
	ADC(元)	80,172	159,272	95,595	125,306
	RDC(元)	43,765	61,385	82,626	54,689
两救援阶段	DT(小时)	812	8.34	6.72	7.356
	ADC(元)	343,213	439,787	357,832	334,013
	RDC(元)	189,590	254,144	299,329	218,644

从两阶段总体救援时效性来看, 表 3 显示无论使用 PA 还是 RAA 分配策略, DF2 需求函数下调配时长均比 DF1 情形所耗更长。这符合常理, 其主要原因是 DF2 类型函数在补救阶段具有更快增长的需求。从初救和补救阶段单独来看, 发现 DF2 类型函数在初救阶段虽具相对更少的需求量, 但仍比 DF1 耗费更长的应急调配时间, 以实施 RAA 策略为例来给予解释, 因为在救援车辆容量约束下, 初救阶段各受灾点处更低的药品包需求使 RAA 策略下的每辆车能够救援更多的受灾点。具体地, DF1 需求函数下初救阶段有 7 个受灾点没收到药品包, 而 DF2 需求函数下初救阶段只有 4 个受灾点未被救援, 正由于初救阶段 DF2 需求函数下每辆车途经更长的路径导致其需耗费更多的救援时间。

再观察表 3 中 PA 和 RAA 分配策略下采用不同需求函数时的绝对和相对剥夺成本, 发现: 当采取 PA 策略

时。DF1 和 DF2 两种需求情形下灾民心理创伤在初救阶段差别不大,但在补救阶段 DF2 情形下的绝对剥夺成本相较 DF1 时呈现大幅提升(由 80,172 元上升至 159,272 元),其主要原因是 DF2 类型需求在后期有一个更大的增长;当使用 RAA 策略时,虽然 DF2 需求函数下灾民在补救阶段承受的绝对剥夺成本要高于 DF1 情形下的,但从两救援阶段整体来看,DF2 需求下灾民心理创伤的缓解要比 DF1 下总体表现得更好(从 357,832 降至 334.013 元)。

3) 车辆类型的影响

下面讨论在两种分配策略下不同车辆类型对应急救援调配方案的影响,选择以装载容量和行驶速度的差别来区分不同种车辆。为示区别,汶川地震案例仿真中车辆种类被记为类型 I,考虑两种其它车辆类型 II 和 III。救援车辆类型 II 和 III 的装载容量分别为 25 和 15 吨,行驶速度相应为每小时 60 和 80 公里。将 PA 和 RAA 分配策略下使用不同车辆类型时三个决策目标值列于表 4,并在图 3 中展示不同车辆类型下最优调度路径的变化,其中每个子图中的左右两图分别代表初救和补救阶段的路径。图 3(a2)(b2)(c2)中特使用实线和虚线来区别标识初救阶段是否获药品包救援的各受灾点,虚线途经的是在初救阶段未被配给药品包的那些受灾点。

从表 4 可看出,在 PA 和 RAA 策略下不论初始还是补充救援阶段,当车辆类型由 I 变为 II 或 III 时,应急救援调配时长均更短,绝对剥夺成本均变得更低。主要原因在于类型 II 或 III 的车辆与类型 I 相比,行驶速度均有一定提升,愈加快速地实施物资配给对缓解灾民心理创伤起到一定积极作用,且观察图 3 也发现,当车辆由类型 I 变化到 II 或 III 时,每辆车的调配路径更短,所需救援车辆数量增加,出现了更多专门为某单个受灾点提供药品包的车辆,如图 3(c2)中在补救阶段的受灾点 4,6,9,11,12 和 15。这一现象再次验证了车辆类型由 I 变为 II 或 III 时灾民心理创伤能够得到更好的缓解。

单独观察表 4 中 PA 和 RAA 策略下车辆类型由 I 到 II 到 III 时相对剥夺成本的变化,发现:RAA 策略下不论在初救还是补救阶段其灾民相对剥夺成本都越来越小,而 PA 策略下使用不同类型车辆的调配结果并未严格遵循此规律,在初救和两救援阶段整体,随着车辆类型从 I 到 II 到 III,PA 策略下各灾民的相对剥夺成本逐渐增加,表明采取 PA 策略时若车辆载容量变小、速度变快,救援公平性可能愈加不理想,这似乎与前述的 PA 分配策略能收获更好救援公平性的结论相左,解释如下:从救援速度来看,在车辆类型由 I 到 II 到 III 的变化中,一定时间窗约束下更快的调配速度使每辆车能服务于更多的受灾点。结合救援路径角度,初救阶段每辆车途经路径越长会导致已接收药品包的受灾点与需等待药品包的受灾点之间灾民遭遇心理创伤的差异性增加,即救援公平性变差。

5.3 管理意义

通过案例仿真和参数分析,得出如下管理意义:

1) 在不同时间窗下,PA 和 RAA 分配策略的对比结果具有较强鲁棒性。即无论等待救援时间窗如何改变,PA 虽都比 RAA 更为耗时,但 PA 策略均能以更公平的方式更好地缓解灾民心理创伤。

2) 决策者们需根据不同需求特征来选择合适的物资分配策略。若面临类似 DF1 需求,即需求增加速率先快后慢,则建议决策者们选择 PA 分配策略;若物资需求类似 DF2,即需求增加速率由慢到快,则建议采取 RAA 分配策略。

3) 不同车辆类型也是应急决策者们选择救援物资分配策略时不容忽视的重要考虑因素之一。若可用救援车辆是类型 III 时,不论从救援及时性还是缓解灾民心理创伤的角度,均首选 RAA 策略;若基于综合考虑选择 PA 策略,则建议决策者们尽量选用诸如类型 I 的救援车辆,因为若使用载容量较小、行驶速度较快的类型 III 车辆,那么 PA 策略在救援公平性方面的优势将难以发挥。

6 结论

本文研究考虑公平缓解灾民心理创伤的应急物资动态优化调配问题,涉及救援物资的合理分配和路径的优化

选择。首先,为强调人道主义救援中公平性原则,特在灾民绝对剥夺成本的基础上构造相对剥夺成本并将其考虑为应急决策目标之一;为更准确地刻画动态灾害和可变需求以及救援物资调配之间的相互影响,提出包含初救和补救两阶段的救援物资需求函数。然后,在 PA 和 RAA 两种不同分配策略下,构建多目标应急救援分配——路径模型,并设计遗传算法对模型实施求解。最后,以 2008 年汶川地震为案例背景做对比分析,以展示不同分配策略在救援效率、有效性及公平性等方面的优势,并通过实施敏感性分析来探讨不同时间窗、不同需求函数和不同车辆类型对应急救援最优调配方案的影响。

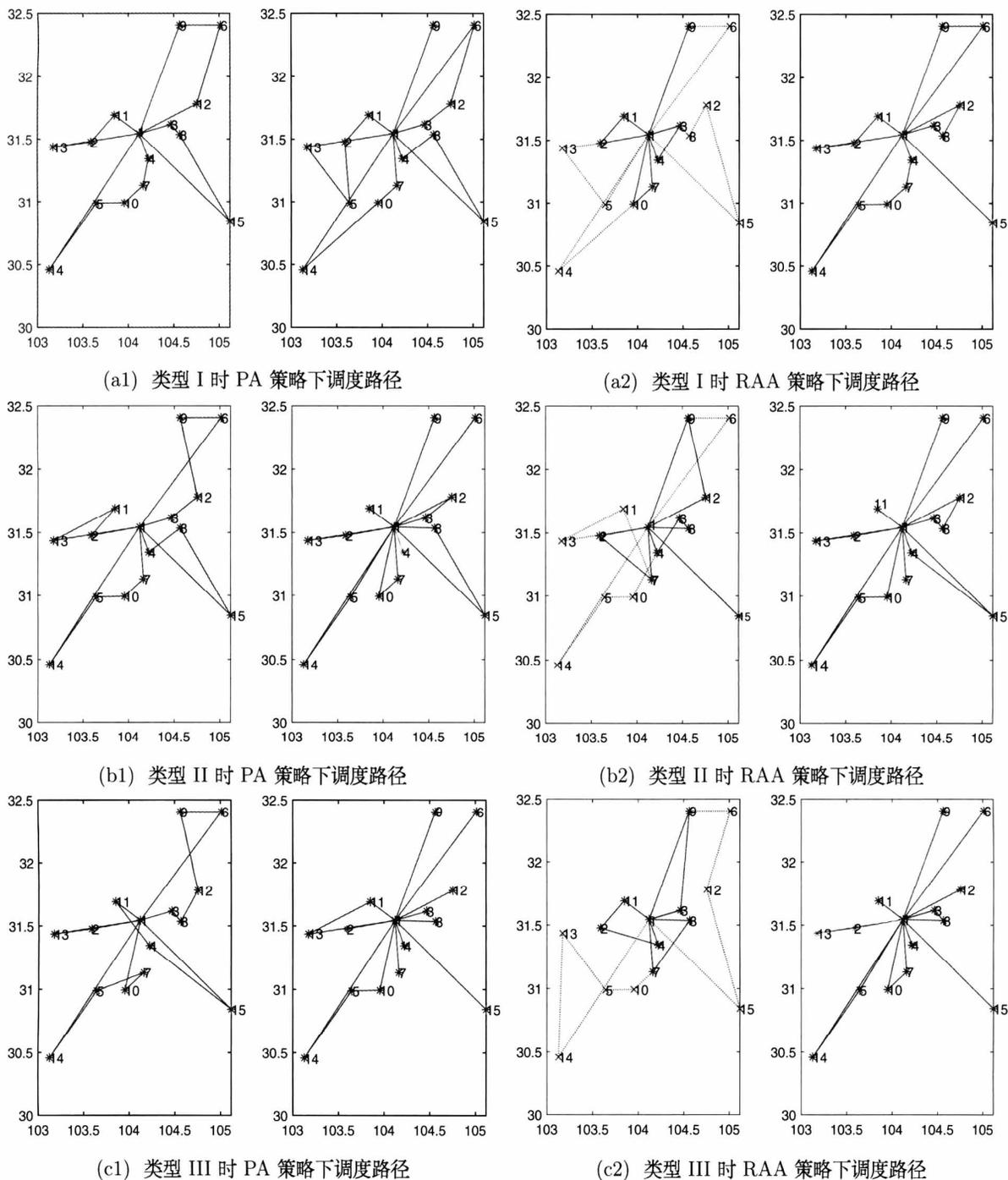


图 3 不同车辆类型下应急救援药品包的最优调度路径

表 4 两种分配策略下不同车辆类型对应急决策目标的影响

决策目标	PA 策略			RAA 策略		
	类型 I	类型 II	类型 III	类型 I	类型 II	类型 III
初救阶段	DT(小时)	3.61	3.30	2.55	2.51	1.26
	ADC(元)	263,041	253,146	248,253	262,237	105,553
	RDC(元)	145,825	166,237	245,643	216,703	75,489
补救阶段	DT(小时)	4.51	3.92	3.27	4.21	3.08
	ADC(元)	80,172	79,394	77,409	95,595	52,064
	RDC(元)	43,765	36,308	29,347	82,626	18,189
两救援阶段	DT(小时)	8.12	7.22	5.82	6.72	4.34
	ADC(元)	343,213	342,540	325,661	357,832	157,617
	RDC(元)	189,590	232,545	274,990	299,329	93,678

未来研究可考虑应用合适算法来实现模型多目标的帕累托最优,并精准分析多个目标间如何权衡。可探讨应急场景下绝对和相对剥夺成本的其它类型函数形式,以观测本文相关结论的鲁棒性。还可尝试改变模型的一些假设,如考虑现实救援中常出现的多种救援物资或多种类型救援车辆并存的现象;或考虑救援调配的不确定场景,如受灾点位置或灾民数量未知。也可思考应急物资调配过程中其它分配策略的应用,还可分析各出救点间或各受灾点间物资相互协调转运对应急救援调配活动的影响。

参考文献:

[1] Gutjahr W. J. Nolz P C. Multicriteria optimization in humanitarian aid[J]. European Journal of Operational Research, 2016, 252(2): 351 - 366.

[2] Özdamar L, Ekinci E, Küçükyazici B. Emergency logistics planning in natural disasters[J]. Annals of Operations Research, 2004, 129(1): 217 - 245.

[3] Matl P, Hartl R F, Vidal T. Workload equity in vehicle routing problems: A survey and analysis[J]. Transportation Science, 2018, 52(2): 239 - 260.

[4] 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.

[5] Gutjahr W J, Fischer S. Equity and deprivation costs in humanitarian logistics[J]. European Journal of Operational Research, 2018, 270(1): 185 - 197.

[6] 王旭坪, 马超, 阮俊虎. 运力受限的应急物资动态调度模型及算法[J]. 系统工程理论与实践, 2013, 33(6): 1492 - 1500.

Wang X P, Ma C, Ruan J H. Model and algorithm of relief materials dynamic scheduling without sufficient vehicle quantity [J]. Systems Engineering - Theory & Practice, 2013, 33(6): 1492 - 1500.

[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 C S, Kou G, Liu D B. Fuzzy dynamic LRP for post - earthquake multimodal relief delivery[J]. Journal of Management Sciences in China, 2016, 19(10): 61 - 72.

[8] 郑斌, 马祖军, 周愉峰. 震后应急物流动态选址 - 联运问题的双层规划模型[J]. 系统管理学报, 2017, 26(2): 327 - 337.

Zheng B, Ma Z J, Zhou Y F. Bi - level model for dynamic location - transportation problem for post - earthquake relief distri-

bution[J]. *Journal of Systems & Management*, 2017, 26(2): 327 – 337.

[9] Barbaroso Ğ lu G, Arda Y. A two – stage stochastic programming framework for transportation planning in disaster response[J]. *Journal of the Operational Research Society*, 2004, 55(1): 43 – 53.

[10] Hong X, Lejeune M A, Noyan N. Stochastic network design for disaster preparedness[J]. *IIE Transactions*, 2015, 47(4): 329 – 357.

[11] Grass E, Fischer K. Two – stage stochastic programming in disaster management: A literature survey[J]. *Surveys in Operations Research and Management Science*, 2016, 21(2): 85 – 100.

[12] 朱莉, 曹杰. 灾害风险下应急资源调配的超网络优化研究[J]. *中国管理科学*, 2012, 20(6): 141 – 148.

Zhu L, Cao J. Supernetwork optimization of emergency resources allocation under disaster risk[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2012, 20(6): 141 – 148.

[13] Holguín – Veras J, Jaller M, Wassenhove L N V, et al. On the unique features of post – disaster humanitarian logistics[J]. *Journal of Operations Management*, 2012, 30(7 – 8): 494 – 506.

[14] Pérez – Rodríguez N, Holguín – Veras J. Inventory – allocation distribution models for postdisaster humanitarian logistics with explicit consideration of deprivation costs[J]. *Transportation Science*, 2015, 50(4): 1261 – 1285.

[15] Zhu L, Gong Y, Xu Y, et al. Emergency relief routing models for injured victims considering equity and priority[J]. *Annals of Operations Research*, 2019, 283(1 – 2): 1573 – 1606.

[16] Sheu J B. Dynamic relief – demand management for emergency logistics operations under large – scale disasters[J]. *Transportation Research Part E: Logistics & Transportation Review*, 2010, 46(1): 1 – 17.

[17] Stauffer J M, Pedraza – Martinez A J, Yan L, et al. Asset supply networks in humanitarian operations: A combined empirical – simulation approach[J]. *Journal of Operations Management*, 2018, 63: 44 – 58.

[18] 姚延敏, 苑航, 李颖, 等. 2008 汶川现场实录——依法救灾: 一案三制威力凸显[J]. *中国质量万里行*, 2008(6): 38 – 40.

Yao Y M, Fan H, Li Y, et al. Cover Report: 2018 Wenchuan live stories[J]. *China Quality Promotion*, 2008(6): 38 – 40.

[19] van der Laan E, van Dalen J, Rohmoser M, et al. Demand forecasting and order planning for humanitarian logistics: An empirical assessment[J]. *Journal of Operations Management*, 2016, 45: 114 – 122.

Dynamic emergency supply distribution considering fair mitigation of victim suffering

Zhu Li Cao Jie Gu Jun Zheng Yi

Abstract: Timely and effective distribution of relief supplies plays an important role in disaster relief operations. By considering two typical allocation strategies, this paper builds a multi – objective dynamic relief distribution model in order to address the reasonable allocation of supplies and optimal path selection decisions. The multiple objectives not only emphasize the relief efficiency, but also include the pursuit of effective and fair mitigation of victim suffering respectively reflected as minimum absolute and relative deprivation costs. We innovatively propose the dynamic demand functions in both the initial and subsequent relief stages and highlight the interaction effects among disaster, relief distribution and demand. Taking the 2008 Wenchuan earthquake as a case, we design a genetic algorithm for the model solution, and perform an experimental comparison and sensitivity analysis followed by some managerial insights for policy – makers.

Key words: emergency relief; fairness; dynamic distribution; deprivation cost; genetic algorithm