

# 控制与决策

Control and Decision

考虑效率和公平的跨区域协同应急救援路径选择

朱莉

引用本文:

朱莉. 考虑效率和公平的跨区域协同应急救援路径选择[J]. 控制与决策, 2021, 36(2): 483–490.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0919>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[基于广义罚函数可行性准则的DE算法对不确定数据的处理](#)

Application of improved DE algorithm based on generalized penalty function feasibility criteria in uncertain data processing

控制与决策. 2021, 36(2): 498–504 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0728>

[基于鲁棒优化的云医疗资源配置问题](#)

Robust optimization based medical resource allocation problem in cloud healthcare system

控制与决策. 2021, 36(2): 469–474 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0455>

[考虑卸载顺序约束的成品油二次配送车辆路径问题](#)

Vehicle routing problem of refined oil secondary distribution considering unloading sequence constraints

控制与决策. 2020, 35(12): 2999–3005 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1756>

[凸优化与A\\*算法结合的路径避障算法](#)

Convex optimization and A-star algorithm combined path planning and obstacle avoidance algorithm

控制与决策. 2020, 35(12): 2907–2914 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0351>

[考虑时间序列的动态大群体应急决策方法](#)

Dynamic large group emergency decision-making method considering time series

控制与决策. 2020, 35(11): 2609–2618 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0088>

# 考虑效率和公平的跨区域协同应急救援路径选择

朱莉<sup>†</sup>

(1. 南京信息工程大学 管理工程学院, 南京 210044;  
2. 南京信息工程大学 中国制造业发展研究院, 南京 210044)

**摘要:** 面对灾害波及多个不同区域, 构造相对剥夺成本来度量各受灾点处伤员遭遇痛苦的差异性, 研究带有时间窗限制、考虑灾害救援差异的跨区域伤员协同救援问题. 以救援总耗时最短、绝对和相对剥夺总成本最低为多个决策目标, 构建兼顾效率和公平的跨区域协同应急救援路径选择模型. 应用蚁群算法实施算例仿真求解, 并将各区域独自应急的不协同情形与基于距离和基于时间的跨区域协同应急情形作对比分析, 讨论跨区域不同协同策略的适用性和有效性. 研究结果可为构建高效的跨区域协同应急救援体系提供有益参考.

**关键词:** 应急救援; 跨区域; 车辆路径问题; 剥夺成本; 公平性; 蚁群算法

中图分类号: F252; U116.2

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2019.0919

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



引用格式: 朱莉. 考虑效率和公平的跨区域协同应急救援路径选择[J]. 控制与决策, 2021, 36(2): 483-490.

## Routing optimization of cross-regional collaborative emergency rescue considering efficiency and fairness

ZHU Li<sup>†</sup>

(1. School of Management Science and Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. China Institute of Manufacturing Development, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

**Abstract:** Given different regions affected by disasters, we use the relative deprivation cost to measure differences among injured persons' sufferings, and study the cross-regional collaborative routing problem in the rescue of injured people considering time window restrictions and differentiated disaster relief. Taking the minimization of the total rescue time, the absolute and relative deprivation cost as multiple objectives, we build a routing optimization model of cross-regional collaborative emergency rescue considering efficiency and fairness. By comparing the non-cooperative rescue of different regions with the cross-regional collaboration mode based on the distance or time principle, we discuss the applicability and efficiency of different cross-regional emergency collaboration strategies. The results provide some suggestions for establishing an effective cross-regional collaborative emergency rescue system.

**Keywords:** emergency relief; cross-region; vehicle routing problem; deprivation cost; fairness; ant colony algorithm

## 0 引言

灾后应急救援路径的选择涉及多个方面, 包括应急物资配送路径、伤员救援路径以及灾民撤退路径等优化决策. 无论选择哪种路径, 都是一个多目标决策过程, 需综合考量救援效率、救援有效性和公平性等因素<sup>[1-3]</sup>. 公平性在应急救援中尤为重要, 传统上大多采用物资需求满足等救援绩效的客观指标来度量, 如以需求满足比例为表征的救援覆盖率最大<sup>[4]</sup>、未满足

足需求量的最小<sup>[5]</sup>、对各灾民施救服务水平间的差异最小等<sup>[6]</sup>. 近年来, 也有少量研究开始从心理感知等主观角度思考救援公平性问题, 如文献[3,7]提出应急决策目标中需关注对灾民心理遭遇痛苦缓解的公平性; 文献[8]考虑灾民非理性攀比心理, 选择以所有灾区的损失攀比效应总和最小为目标来保障应急物资分配的公平性.

实际上, 由于应急救援涉及人道主义运作, 在应

收稿日期: 2019-06-28; 修回日期: 2019-10-08.

基金项目: 国家自然科学基金项目(71571103); 江苏省高校优势学科建设工程项目; 江苏省高校品牌专业建设工程项目.

责任编辑: 陈虹.

<sup>†</sup>通讯作者. E-mail: lzhu@nuist.edu.cn.

急决策中的确需要重视从心理层面对灾民痛苦、绝望、愤怒等负面情绪的缓解<sup>[9-11]</sup>. 文献[9]在对灾后垃圾逆向处理物流决策中考虑了灾民因等待医疗救援和灾后垃圾清除而产生的心理代价成本最小化. 文献[11]在应急物资储备和分配决策中采用剥夺成本(deprivation cost)来衡量灾民因救援物资需求未得到及时满足而遭遇痛苦的心理代价. 本文借鉴人道主义运营领域学者 Holguín-Veras 及其团队的系列研究<sup>[7,11]</sup>, 选用剥夺成本来度量灾民灾后心理创伤. 但由于一味地追求最小化灾民心理剥夺成本反而常常会导致救援不公平的现象<sup>[12]</sup>, 故本文提出伤员救援路径选择决策时, 在控制运营层面的效率因素同时(如成本、时间等), 更要做好伤员所受绝对剥夺成本以及相对剥夺成本的权衡与兼顾, 即不仅要重视灾民心理创伤的缓解, 也要关注从心理层面感知救援的公平性.

另一方面, 灾后应急救援路径的多目标决策基本都在“单(多)出救点、单(多)受灾点”的同一区域情境下讨论如何以不同决策目标去选择最优路径, 很少有研究关注不同区域间如何实施协同救援路径的优化, 更鲜有文献对跨区域不同协同策略进行比较分析. 本文以此为切入点, 面向灾害所涉多区域场景提出构建一个打破区域界限、跨区域伤员协同救援的创新模式, 并对不同区域划分原则下的协同应急策略进行对比分析. 具体地, 本文针对灾后“多出救点、多受灾点”场景下的伤员救援问题, 创新性地构造相对剥夺成本来衡量各伤员遭受痛苦程度的差异性, 以救援时间最短、各灾区伤员绝对和相对层面的心理遭遇痛苦程度最小作为决策目标, 分别将行驶距离和行驶时间作为划分不同区域的依据, 构建跨区域不同协同模式下兼顾效率和公平的应急救援路径优化模型. 应用蚁群算法对模型实施仿真求解, 并将两种跨区域协同策略与各区域独自应急情形进行对比分析, 得出的相关结论可为政府部门应急协同决策提供参考建议.

## 1 问题描述与建模准备

所研究问题的场景描述如下: 某突发灾害的爆发对一些相邻区域内多个地点造成不同程度的影响. 每个区域内均设有一个医疗中心, 若干救援车辆从各医疗中心出发, 对各自所属区域管辖范围内的所有受灾点处的伤员实施救援后将其送回医疗中心, 要求在应急救援所耗时间最短且各伤员遭受心理痛苦及差异化程度最低的决策目标下对伤员救援路径进行选择.

### 1.1 模型假设及符号说明

假设条件:

- 1) 各区域内有且仅有一个医疗中心, 医疗中心处在救援行动开始时没有待救伤员, 故不受救援时间窗限制;
- 2) 相邻区域各受灾点位置和待救伤员数量均已知;
- 3) 救援车辆数不限且车型相同, 车辆最大荷载人数唯一并已知, 且任意一个受灾点内伤员数量不超过单车容量;
- 4) 各受灾点有且仅有一辆车对其实施伤员救援;
- 5) 救援车辆在各受灾点处停留时间与该受灾点内伤员人数成正比;
- 6) 救援车辆穿梭于各受灾点间的行驶速度与各受灾点间道路受损程度相关;
- 7) 由于受灾害影响程度不同, 各区域受灾点内伤员救援的时间窗约束、以及伤员在途可坚持时长(伤员从被接上各救援车辆到顺利抵至医疗中心接受救治整个过程中所能容忍的最大时间间隔)均存在差异;
- 8) 医疗中心派出的车辆在各区域独自应急的不协同情形下仅负责救援本区域内各受灾点, 在协同应急策略下可对其他区域内受灾点处伤员实施救援.

灾害影响总共  $H$  个区域, 任意相邻的两个区域记作  $h$  和  $h+1$ , 所有区域的集合表示为  $\mathcal{H} = \{1, 2, \dots, h, h+1, \dots, H\}$ . 各区域内有  $N$  个受灾点, 任一受灾点记作  $i$  或  $j$ , 受灾点的集合表示为  $\mathcal{N} = \{1, 2, \dots, i, \dots, j, \dots, N\}$ , 另用  $\mathcal{N}'$  和  $\mathcal{N}''$  分别表示以距离和时间为区域划分原则下的受灾点集合. 医疗中心共有  $K$  辆救援车辆, 任一救援车辆记为  $k$ , 所有车辆的集合表示为  $\mathcal{K} = \{1, 2, \dots, k, \dots, K\}$ , 每辆车荷载限制人数为  $W_k$ . 所有救援车辆均从各区域内医疗中心出发, 遍历若干受灾点后返回医疗中心, 特用  $m$  来表示医疗中心. 区域  $h$  内受灾点  $i$  与  $j$  间的距离表示为  $d_{ij}^h$ , 用  $d_{im}^h$  特指区域  $h$  内受灾点  $i$  与该区域医疗中心  $m$  间的距离. 另用  $d_{im}^{h,h+1}$  来表示区域  $h+1$  处的医疗中心  $m$  到区域  $h$  内受灾点  $i$  的距离, 而  $d_{im}^{h+1,h}$  相应表示区域  $h$  处医疗中心  $m$  到区域  $h+1$  内受灾点  $i$  的距离. 车辆  $k$  在区域  $h$  内从受灾点  $i$  行驶到受灾点  $j$  所耗时间为  $t_{ijk}^h$ , 而  $t_{imk}^h$  表示车辆  $k$  在区域  $h$  内从受灾点  $i$  到该区域医疗中心  $m$  处所需的行驶时间. 类似地,  $t_{imk}^{h,h+1}$  是车辆  $k$  从区域  $h+1$  处医疗中心  $m$  到区域  $h$  内受灾点  $i$  所花费的时间,  $t_{imk}^{h+1,h}$  则是车辆  $k$  从区域  $h$  处医疗中心  $m$  到区域  $h+1$  内受灾点  $i$  所耗时间.  $\Gamma_{ik}^h$  表示区域

$h$  受灾点  $i$  处伤员等待车辆  $k$  救援时心理所感知的绝对剥夺成本, 区域  $h$  内受灾点  $i$  与  $j$  处伤员等待车辆  $k$  救援所承受的相对剥夺成本用  $RI_{ijk}^h$  表示.

未受灾情况下车辆  $k$  在区域  $h$  内从受灾点  $i$  到  $j$  间的平均行驶速度为  $V_{ijk}^{h0}$ , 而  $V_{ijk}^h$  表示灾后救援车辆  $k$  在区域  $h$  内从受灾点  $i$  到  $j$  路段上的平均通行速度,  $\varepsilon_{ijk}^h$  表示车辆  $k$  在区域  $h$  内从受灾点  $i$  到  $j$  路段上受灾害影响的速度衰减系数. 区域  $h$  内受灾点  $i$  处需要被救援的伤员人数用  $q_i^h$  来表示; 救援车辆必须在时间窗  $[0, a_i^h]$  内到达各区域受灾点处,  $b_i^h$  是区域  $h$  内受灾点  $i$  处伤员的在途可坚持时长;  $t_{ik}^h$  是车辆  $k$  在区域  $h$  内受灾点  $i$  处接收每位伤员上车所耗费的时间. 用 0-1 决策变量  $x_{ijk}^h$  来刻画应急救援路径选择,  $x_{ijk}^h = 1$  意味着救援车辆  $k$  途经区域  $h$  内受灾点  $i$  与  $j$  间,  $x_{ijk}^h = 0$  则表示未经过. 另一决策变量  $s_{ik}^h$  的含义是车辆  $k$  到达区域  $h$  受灾点  $i$  处的时刻, 而  $s_{mk}^h$  特指车辆  $k$  返回区域  $h$  内医疗中心处的时刻.

### 1.2 绝对和相对剥夺成本

借鉴文献[7, 11], 本文也采用剥夺成本来度量伤员在未收到救援物资时所承受痛苦的程度. 不过值得注意的是, 这里与文献[7, 11]中的剥夺成本存在两处不同, 为区别, 下文将其称为绝对剥夺成本.

其一, 本文认为伤员心理创伤的主观感受应随应急救援过程的实施呈三阶段形态<sup>[13]</sup>, 即绝对剥夺成本函数的概率密度函数表达如下:

$$f(t) = \begin{cases} e^{g_1 t} + e^{h_1}, & 0 < t < s_{ik}^h; \\ -g_2 t + h_2, & s_{ik}^h \leq t < s_{ik}^h + t_{ik}^h \cdot q_i^h; \\ e^{g_3 t} + e^{h_3}, & s_{ik}^h + t_{ik}^h \cdot q_i^h \leq t \leq s_{mk}^h. \end{cases}$$

首先, 灾害发生后, 各灾区伤员在等待车辆救援时, 其自身遭遇的绝对剥夺成本随等待时长呈指数上升<sup>[7, 11]</sup>; 接着, 车辆抵达灾区, 接收伤员上车并实施初步的医疗救助, 在此期间伤员痛苦开始缓解, 绝对剥夺成本呈线性下降态势<sup>[14]</sup>; 然后, 车内伤员在被送至医疗中心的在途行驶过程中所感知的绝对剥夺成本随行驶时间增加仍出现新的指数上升趋势, 鉴于伤员已得到初步医疗救助, 故此阶段上升速率相较第1阶段有所趋缓.

其二, 为强调人道主义应急救援中的公平性原则, 在用三阶段绝对剥夺成本度量各伤员心理痛苦的基础上, 本文创新性地提出相对剥夺成本概念, 通过衡量不同伤员心理创伤的差异性来表征救援的公平性. 对相对剥夺进行度量的思路来源于经济学中运用基尼系数来衡量居民收入差距, 目的在于通过

最小化相对剥夺成本来实现从心理感知层面对救援公平性的保障. 事实上, 有很多种方式可以用来刻画代表差异性的相对剥夺成本<sup>[14-17]</sup>, 如最小化最大值、最小化范围度量、最小化绝对偏差、最小化标准差或最小化基尼系数等. 本文参考文献[17], 采用最小化任意两受灾点处伤员绝对剥夺成本间的绝对偏差, 来刻画体现公平性的相对剥夺成本函数, 即  $RI_{ijk}^h = |\Gamma_{ik}^h - \Gamma_{jk}^h|$ .

## 2 跨区域协同应急救援路径优化模型

### 2.1 模型构建

在伤员救援路径选择中, 不仅考虑各救援车辆行驶总时长最短, 同时关注各灾区伤员承受的绝对和相对剥夺总成本最低为多个决策目标, 构建兼顾效率和公平的跨区域协同应急救援路径优化模型, 为跨区域协同应急模式的实施提供可行性分析. 有

$$\min \sum_{h \in \mathcal{H}} \sum_{k \in \mathcal{K}} \sum_{i, j \in \mathcal{N}} t_{ijk}^h \cdot x_{ijk}^h, \quad (1)$$

$$\min \sum_{h \in \mathcal{H}} \sum_{k \in \mathcal{K}} \sum_{i \in \mathcal{N}} \Gamma_{ik}^h, \quad (2)$$

$$\min \sum_{h \in \mathcal{H}} \sum_{k \in \mathcal{K}} \sum_{i, j \in \mathcal{N}} RI_{ijk}^h \cdot x_{ijk}^h. \quad (3)$$

s. t.

$$V_{ijk}^h = V_{ijk}^{h0} \cdot \varepsilon_{ijk}^h, \quad (4)$$

$$t_{ijk}^h = d_{ij}^h / V_{ijk}^h, \quad (5)$$

$$\Gamma_{ik}^h = \int_0^{s_{ik}^h} (e^{g_1 t} + e^{h_1}) dt + \int_{s_{ik}^h}^{s_{ik}^h + t_{ik}^h \cdot q_i^h} (-g_2 t + h_2) dt + \int_{s_{ik}^h + t_{ik}^h \cdot q_i^h}^{s_{mk}^h} (e^{g_3 t} + e^{h_3}) dt, \quad (6)$$

$$RI_{ijk}^h = |\Gamma_{ik}^h - \Gamma_{jk}^h|, \quad (7)$$

$$\sum_{k \in \mathcal{K}} \sum_{j \in \mathcal{N}} x_{ijk}^h = 1, \quad (8)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{N}} q_i^h \sum_{j \in \mathcal{N}} x_{ijk}^h \leq W_k, \quad (9)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{N}} x_{mjk}^h = 1, \quad (10)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{N}} x_{ipk}^h - \sum_{j \in \mathcal{N}} x_{pjk}^h = 0, \quad (11)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{N}} x_{imk}^h = 1, \quad (12)$$

$$s_{ik}^h + t_{ik}^h \cdot q_i^h + t_{ijk}^h \leq s_{jk}^h + B \cdot (1 - x_{ijk}^h), \quad (13)$$

$$s_{ik}^h \leq a_i^h, \quad (14)$$

$$s_{mk}^h - s_{ik}^h \leq b_i^h, \quad (15)$$

$$s_{ik}^h \geq 0, \quad x_{ijk}^h \in \{0, 1\}. \quad (16)$$

目标函数(1)~(3)分别表示应急救援车辆行驶总时长、伤员遭遇的绝对和相对剥夺总成本最小化;约束条件(4)刻画救援车辆的行驶速度随灾害影响速度衰减系数的改变而变化;式(5)是行驶速度、时间和距离之间的关系表达;式(6)、(7)分别是伤员感知的绝对和相对剥夺成本函数表达式;式(8)保证对各受灾点处伤员予以施救,且每个受灾点仅有一辆车前往救援;式(9)确保救援车辆救助若干受灾点处的伤员总人数不超过该车辆荷载容量限制;式(10)~(12)为标准流量守恒约束,表明各救援车辆从医疗中心出发并最终返回医疗中心;式(13)是车辆抵达前后两受灾点处分别实施伤员救援的时间关联约束,其中 $B$ 代表一个极大的数;式(14)是救援车辆到达各区域受灾点处的不同时间窗约束;式(15)是对不同区域受灾点处伤员在途可坚持时间窗的约束,以保障伤员能在各自可容忍时长内被顺利送抵医疗中心接受救治;式(16)是各决策变量的类型约束。

### 2.2 不同区域划分原则下的协同应急救援策略

在讨论不同的区域划分原则之前,先定义各区域独自应急救援的不协同情形:各区域医疗中心派出的车辆仅负责救援本区域内受灾点处伤员,即不协同应急时车辆救援各区域的受灾点集合仍为 $\mathcal{N} = \{1, 2, \dots, i, \dots, j, \dots, N\}$ 。

#### 1) 以距离远近为区域划分的协同原则。

以距离远近为区域划分的协同原则是指:面对灾害影响的不同区域,不受固有行政区域的约束,考虑将一些相对而言更靠近邻近区域医疗中心处的受灾点(如遍布在某区域边缘的一些受灾点)划入邻近区域,以作为邻近区域医疗中心施救的对象。这种区域划分方法与商业物流网络中采取从距离最近配送中心调配物资来满足需求的原则相类似,以运输距离的长短作为车辆路径调度的依据。显然,在其他客观因素均相同的条件下,根据距离远近来重新划分区域的协同应急策略将会缩短救援车辆行驶的总路程,运输成本相应减少,具有一定经济效益。在该区域划分原则下,协同救援的受灾点集合被调整为

$$\mathcal{N}' = \mathcal{N} \cup \{i | d_{im}^{h+1,h} \leq d_{im}^{h+1}\} \setminus \{i | d_{im}^{h,h+1} \leq d_{im}^h\},$$

即把区域 $h$ 内更靠近区域 $h+1$ 医疗中心的受灾点划出并入区域 $h+1$ ,且将邻近区域 $h+1$ 内更靠近区域 $h$ 医疗中心的受灾点划出并入区域 $h$ 。

#### 2) 以行驶时间长短为区域划分的协同原则。

以距离远近为区域划分的原则,虽然能够保证车辆通行路程最短,但由于突发灾害发生后有时道路受损情况不一,严重地区甚至可能出现道路完全阻断、

无法通行的情况,故应考虑以救援车辆行驶时间长短为区域划分的如下协同原则:将一些相对而言行驶至邻近区域医疗中心所耗时间更短的受灾点划入邻近区域,以作为邻近区域医疗中心施救的对象。这种以行驶时间为依据来划分区域的方法能够保证救援所耗总时长最短,该原则下协同救援的受灾点集合被调整为

$$\mathcal{N}'' = \mathcal{N} \cup \{i | t_{imk}^{h+1,h} \leq t_{imk}^{h+1}\} \setminus \{i | t_{imk}^{h,h+1} \leq t_{im}^h\},$$

即把区域 $h$ 内能更快行至区域 $h+1$ 医疗中心的受灾点划出并入区域 $h+1$ ,同时将邻近区域 $h+1$ 处能够更快行驶到区域 $h$ 医疗中心的受灾点纳入区域 $h$ 。

## 3 算例求解与对比分析

本文所构模型属于带时间窗的车辆路径(VRPTW)优化范畴,是典型的NP-hard问题<sup>[13]</sup>,加之剥夺成本相关函数的非线性形式,拟采用常见的智能优化算法实施求解<sup>[18-19]</sup>。在计算复杂度比较方面,应用蚁群算法求解耗时约30s,相同算例场景下遗传算法却需耗费180s才能完成模型求解。这是由于蚁群算法的正反馈原理能在一定程度上加快寻优进程,尤其作为一种并行算法可凭借个体间信息交互来快速搜索全局最优解,非常适用于解决所构复杂路径的寻优问题<sup>[20-21]</sup>。故应用蚁群算法在Matlab 7.0中实施算例求解,算法步骤参见文献<sup>[18-19]</sup>。

### 3.1 算例场景设置

某暴雨洪涝灾害波及A、B两个区域(省或市级范围),两区域均设有一个医疗中心(见表1中区域A和B的受灾点1)以及各自具有不同程度伤员的15个受灾点(县或街道范围),从医疗中心派出车辆分别将各受灾点处伤员接至医疗中心接受救治。搜集各受灾点的地理位置坐标、各受灾点处伤员人数以及道路通达性等指标数据,综合采用层次分析法等评价方法得出各受灾点灾情相关评估值,并根据受灾评估值对模型参数进行合理设置<sup>[18-19]</sup>,将所有相关数据列于表1:一方面,依据评估值将各受灾点分成3个等级,并对不同等级的受灾点设定不同的救援时间窗和伤员在途可坚持时间窗。其中:受灾等级为1(评估值范围0~0.33)表示受灾害影响程度最大,受灾等级为2表示受灾程度适中(范围0.34~0.66),受灾等级为3(范围0.67~1)表示受灾害影响程度最小。另一方面,对各受灾点受灾程度评估值采用两两配对加和平均的方式,作为两受灾点间车辆行驶速度的衰减系数用以表征两受灾点间道路的受损程度,进而得出灾后救援车辆在两受灾点间的行驶速度。

表 1 两区域各受灾点处灾情相关的参数评估与设置

受灾点	区域A					区域B				
	伤员数	评估值	受灾等级	$a_i^h$	$b_i^h$	伤员数	评估值	受灾等级	$a_i^h$	$b_i^h$
1	0	0.71	3	10000	10000	0	0.79	3	10000	10000
2	3	0.71	3	2	2	3	0.56	2	1.5	1.5
3	6	0.20	1	1	1	5	0.24	1	1	1
4	2	0.70	3	2	2	3	0.37	2	1.5	1.5
5	6	0.35	2	1.5	1.5	1	0.88	3	2	2
6	1	0.70	3	2	2	5	0.34	2	1.5	1.5
7	4	0.58	2	1.5	1.5	2	0.67	3	2	2
8	3	0.53	2	1.5	1.5	3	0.45	2	1.5	1.5
9	5	0.40	2	1.5	1.5	4	0.36	2	1.5	1.5
10	3	0.65	2	1.5	1.5	5	0.31	1	1	1
11	7	0.29	1	1	1	2	0.68	3	2	2
12	2	0.56	2	1.5	1.5	1	0.73	3	2	2
13	5	0.46	2	1.5	1.5	6	0.34	2	1.5	1.5
14	2	0.76	3	2	2	2	0.72	3	2	2
15	4	0.41	2	1.5	1.5	3	0.60	2	1.5	1.5
16	3	0.50	2	1.5	1.5	4	0.36	2	1.5	1.5

3.2 跨区域应急协同的对比分析

基于以上仿真算例场景求解最优应急救援路径, 将各区域独自应急的不协同情形分别与以距离和时间更短为区域划分依据的协同应急方案实施对比, 并讨论各种情形下跨区域不同协同应急策略的适用性和有效性。

3.2.1 独自应急对比于基于距离的跨区域协同应急

根据以距离更短为区域划分的协同应急原则, 将虽隶属区域A但距离上更靠近区域B的5个受灾点(A4、A6、A9、A15、A16)划拨至区域B医疗中心的救援范围. 分别在两区域独自应急情形以及基于距离的跨区域协同应急策略下实施模型求解, 将救援路径方案和决策目标值列于表2。

表 2 不协同独自应急与基于距离的跨区域协同应急对比

路径编号	不协同独自应急的路径	基于距离的跨区域协同应急路径
1	A1→A2→A7→A14→A1	A1→A2→A7→A14→A1
2	A1→A3→A1	A1→A3→A1
3	A1→A4→A9→A1	区域A A1→A5→A1
4	A1→A5→A1	A1→A10→A8→A1
5	A1→A6→A16→A15→A1	A1→A11→A1
6	A1→A10→A8→A1	A1→A12→A13→A1
7	A1→A11→A1	B1→B12→B2→B13→B1
8	A1→A12→A13→A1	B1→B3→B16→B1
9	B1→B12→B2→B13→B1	B1→B4→A4→A9→B1
10	B1→B3→B1	区域B B1→B15→B5→B14→B1
11	B1→B4→B16→B1	B1→B6→B7→B10→B1
12	B1→B14→B5→B15→B7→B1	B1→B8→B9→B1
13	B1→B6→B10→B1	B1→B11→B1
14	B1→B8→B11→B9→B1	B1→A6→A16→A15→B1
最短路径总长度/km	720	698
最小绝对剥夺总成本/元	9335	10255
最小相对剥夺总成本/元	11921	12456

从表2路径方案的对比中不难发现,将某区域一些受灾点划分至距离更近的相邻区域医疗中心接受救援服务,这种基于距离的跨区域协同应急策略会使得车辆路径发生一系列变化.如原本在各区域独自应急下由区域A医疗中心施救的受灾点A4和A9改由区域B医疗中心负责救援,救援车辆路由A1→A4→A9→A1相应地变成B1→B4→A4→A9→B1.这是因为由区域B医疗中心对受灾点A4和A9实施救援,能够使救援车辆到这两受灾点的行驶距离大大缩短,在符合时间窗约束的前提下车辆甚至在行驶至A4和A9两受灾点之前还能对途中的受灾点B4处伤员实施救援.

再比较独自应急和基于距离跨区域协同应急这两种情形下的决策目标相关值,显然以距离更短为区域划分依据的协同应急方案能更好地节约行驶路程,这从表2显示的最短行驶路径总长由720 km减少至698 km中能够得到验证.然而,与独自应急的不协同情形相比,基于距离的跨区域协同应急策略造成伤员心理创伤程度更为严重,最小绝对剥夺总成本由9335元增至10255元,且最小相对剥夺总成本由11921元上升至12456元,这表明以距离更短为区域划分的协同应急策略在公平缓解伤员心理痛苦方面却并未显示出优势.究其原因,是因为在相同的道路受损条件下,车辆行驶路程越短,所耗费的行驶时间就越短,从医疗中心派出的车辆在满足既定时间窗约束下可以更加从容地救援更多的受灾点.这也就意味着在基于距离的跨区域协同应急模式下,有些受灾点处伤员虽能够在规定时间窗内接受救援,但其等待车辆到达也许需要更长的时间,亦或是伤员自被接上车辆后所历经的在途运输时长可能被延至更长,这均会导致用来度量伤员心理创伤程度的绝对与相对剥夺总成本上升.例如,同样观察A1→A4→A9→A1与B1→B4→A4→A9→B1这两条路径,虽具有更短的行驶路程,但后者给伤员所造成的绝对与相对剥夺总成本均比前者更高.

基于表2的对比分析,对参与应急救援决策的政府或非政府组织可提供如下管理建议:一味地依据距离最短来实施跨区域协同应急救援,虽然救援车辆行驶总距离能够得到很好的控制,但在人道主义救援中更为关注的伤员痛苦遭遇缓解方面却不一定能取得好的效果.换言之,基于距离的跨区域协同应急救援未必一定优于各区域独自应急情形.

### 3.2.2 独自应急对比于基于时间的跨区域协同应急

由于表1算例场景下各路段所耗行驶时间的差

别较小,导致以时间更短为区域划分依据的协同应急与基于距离的跨区域协同方案无明显差异.为了进一步观察基于时间的跨区域协同应急方案特征,随机假设若干受灾点至区域A或B医疗中心间的路段受灾损毁严重,设其车辆行驶速度降至20 km/h.鉴于灾害下各路段受损程度对车辆行驶时间的影响,考虑以下基于时间的跨区域协同应急场景:区域A内医疗中心对区域B处受灾点B12和B15实施协同救援,而区域A中5个受灾点A6、A7、A9、A15和A16处伤员接受来自区域B内医疗中心的跨区域救援.在此算例场景设置下,将两区域独自应急和基于时间的跨区域协同应急救援路径方案及相关决策目标值列于表3.

由表3可以看出,基于时间的跨区域协同应急方案相比于两区域独自应急情形需要更多救援车辆,且最短行驶路径总长也由803 km增至1027 km.这表明面对道路差异化受损情境,以行驶时间长短为区域划分原则的协同应急模式可能需要耗费更高的运营成本才能保障救援时间更短.另一方面,表3显示基于时间的跨区域协同应急方案下伤员所遭受绝对和相对剥夺总成本更小,这说明基于时间的跨区域协同应急方案能更好地缓解各受灾点处伤员心理创伤程度.该对比结果基本符合以更短时间为区域划分的协同应急模式的预期,充分展示了基于时间的跨区域协同应急方案对人道主义救援弱经济性特点的诠释,即花费更高的成本以保障更好的救援时效性.

基于表3的对比分析,能够提供给相关应急决策者以下管理建议:当各区域受灾程度差别较大时,尤其面对各区域路段所耗行驶时间差异性较大的应急救援场景,采用以时间更短为区域划分依据的协同应急模式能更好地保障人道主义救援及其公平性.

### 3.2.3 基于距离与时间的跨区域协同应急选择比较

结合表2和表3中应急路径优化选择的算例对比结果发现,无论哪种跨区域协同应急策略均有一定的适用性,进而提出如下管理建议以供灾害救援领域的各类应急决策者参考.

若各区域行驶路段的受灾差异不明显,具体表现为救援车辆在各路段上通行速度差别不大时,可考虑采用各区域独自应急方案.因为在受灾程度趋同的情形下,无论是基于距离还是基于时间的跨区域协同应急模式,虽然都能使整个救援路程和运输时长得以降低,但各受灾点处伤员遭遇的心理绝对和相对剥夺总成本均有一定程度的上升,这有悖于人道主义救援中以人为本的第一原则.而当各区域行驶路段的受

表3 不协同独自应急与基于时间的跨区域协同应急对比

路径编号	不协同独自应急的路径	基于时间的跨区域协同应急路径
1	A1→A2→A14→A1	A1→A2→A14→A8→A1
2	A1→A3→A1	A1→A3→A1
3	A1→A4→A15→A16→A1	A1→A5→A1
4	A1→A5→A1	A1→A4→B12→A1
5	区域A A1→A6→A13→A12→A1	区域A A1→A10→A1
6	A1→A7→A8→A1	A1→A11→A1
7	A1→A9→A1	A1→A12→A13→A1
8	A1→A10→A1	A1→B15→A1
9	A1→A11→A1	B1→B2→B1
10	B1→B12→B2→B13→B1	B1→B3→B16→B1
11	B1→B3→B1	B1→B4→B1
12	B1→B4→B1	B1→B5→B14→B13→B1
13	B1→B14→B5→B15→B7→B1	区域B B1→B11→B6→B7→B1
14	区域B B1→B6→B8→B1	B1→B8→B9→B1
15	B1→B9→B11→B1	B1→B10→B1
16	B1→B10→B1	B1→A6→A16→A15→B1
17	B1→B16→B1	B1→A7→B1
18		B1→A9→B1
最短路径总长度/km	803	1027
最小绝对剥夺总成本/元	11 526	9907
最小相对剥夺总成本/元	16 159	15 191

灾差异显著时,则建议采用基于时间的跨区域协同应急方案,虽然在该协同应急模式下,反映物流运营成本的运输路径总长和救援车辆数量常会有所增加,但此协同策略可凭借把控时效性来提高救援效率,从而更加公平有效地缓解伤员面对灾害时所遭受的心理痛苦.

### 4 结论

面对重大灾害下“多出救点、多受灾点”场景,救援车辆及时高效的调度是顺利开展伤员救助工作的重要保障.传统带时间窗的应急车辆路径研究中很少关注打破地域界限的跨区域协同应急救援,更少有研究探讨跨区域不同协同策略下如何在最优路径选择时兼顾人道主义救援所要求的效率和公平.本文创新性地提出了相对剥夺成本概念用来刻画伤员心理创伤缓解的公平性程度,并以救援时长最短、伤员心理痛苦被更有效更公平地缓解作为决策目标,构建了兼顾效率和公平的跨区域协同应急救援路径选择模型.应用蚁群算法对模型实施算例仿真和对比分析,以各区域独自应急的不协同情形作为基准对比,分别将距离更短和行驶时间更短作为不同区域划分的依据,讨论基于距离和基于时间的跨区域协同应急

策略的适用性和有效性.研究结果可以为政府部门制定合理高效的跨区域应急管理方案提供有益的参考建议.

未来研究拟进一步对模型参数实施敏感性分析,找出影响跨区域协同应急救援的关键因素;也可研究绝对和相对剥夺成本函数不同构造方式对应急救援决策的影响;另外,本文仅讨论了以距离和时间为区域划分依据的协同应急策略,今后可探讨更多不同的跨区域协同应急模式的可行性.

### 参考文献(References)

[1] Gralla E, Goentzel J, Fine C. Assessing trade-offs among multiple objectives for humanitarian aid delivery using expert preferences[J]. *Production and Operations Management*, 2014, 23(6): 978-989.

[2] Huang K, Jiang Y P, Yuan Y F, et al. Modeling multiple humanitarian objectives in emergency response to large-scale disasters[J]. *Transportation Research, Part E: Logistics and Transportation Review*, 2015, 75: 1-17.

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

[4] Balcik B, Beamon B M. Facility location in humanitarian

- relief[J]. *International Journal of Logistics: Research and Applications*, 2008, 11(2): 101-121.
- [5] Özdamar L, Ekinci E, Küçükyazici B. Emergency logistics planning in natural disasters[J]. *Annals of Operations Research*, 2004, 129(1/2/3/4): 217-245.
- [6] Huang M, Smilowitz K, Balcik B. Models for relief routing: Equity, efficiency and efficacy[J]. *Transportation Research, Part E: Logistics and Transportation Review*, 2012, 48(1): 2-18.
- [7] 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.
- [8] 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): 2057-2063.  
(Liu C S, Luo L, Zhou X C, 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): 2057-2063.)
- [9] Hu Z H, Sheu J B. Post-disaster debris reverse logistics management under psychological cost minimization[J]. *Transportation Research, Part B: Methodological*, 2013, 55: 118-141.
- [10] 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.
- [11] Pérez Rodríguez N, Holguín-Veras J. Inventory-allocation distribution models for post disaster humanitarian logistics with explicit consideration of deprivation cost[J]. *Transportation Science*, 2015, 50(4): 1261-1285.
- [12] Gutjahr W J, Fischer S. Equity and deprivation costs in humanitarian logistics[J]. *European Journal of Operational Research*, 2018, 270(1): 185-197.
- [13] Zhu L, Gong Y M, Xu Y S, et al. Emergency relief routing models for injured victims considering equity and priority[J]. *Annals of Operations Research*, 2019, 283(1/2): 1573-1606.
- [14] Cantillo V, Serrano I, Macea L F, et al. Discrete choice approach for assessing deprivation cost in humanitarian relief operations[J]. *Socio-Economic Planning Sciences*, 2018, 63: 33-46.
- [15] Karsu Ö, Morton A. Inequity averse optimization in operational research[J]. *European Journal of Operational Research*, 2015, 245(2): 343-359.
- [16] Matl P, Hartl R F, Vidal T. Workload equity in vehicle routing problems: A survey and analysis[J]. *Transportation Science*, 2017, 52(2): 239-260.
- [17] Itani M N. Dynamics of deprivation cost in last mile distribution: The integrated resource allocation and vehicle routing problem[D]. Fargo: North Dakota State University, 2014.
- [18] 朱莉, 顾珺, 马铮, 等. 面向受灾差异的跨区域应急救援路径优化[J]. *控制与决策*, 2017, 32(5): 879-884.  
(Zhu L, Gu J, Ma Z, et al. Routing optimization of cross-regional emergency rescue considering differentiated disaster impacts[J]. *Control and Decision*, 2017, 32(5): 879-884.)
- [19] 朱莉, 丁家兰, 马铮. 应急条件下异构运输问题的协同优化研究[J]. *管理学报*, 2018, 15(2): 309-316.  
(Zhu L, Ding J L, Ma Z. Collaborative optimization of heterogeneous transportation problems under emergency[J]. *Chinese Journal of Management*, 2018, 15(2): 309-316.)
- [20] Dorigo M, Gambardella L M. Ant colony system: A cooperative learning approach to the traveling salesman problem[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 1997, 1(1): 53-66.
- [21] Dorigo M, Stützle T. *Ant colony optimization*[M]. Cambridge: The MIT Press, 2004: 123-127.

### 作者简介

朱莉(1983—),女,副教授,博士,从事应急管理、物流与供应链管理、运营优化等研究, E-mail: lzhu@nuist.edu.cn.

(责任编辑:李君玲)