

考虑救援队伍特征的最优调度策略研究

张淑文 廖 灿 诸克军 於世为

(中国地质大学(武汉)经济管理学院,武汉 430074)

摘要:救援队伍作为一类特殊的应急资源,在灾害救援中发挥着至关重要的作用。针对传统指派模型的不足,建立了一个考虑救援队伍特征的集成优化模型。首先,定义了救援队伍的属性,并引入救援队伍与灾情相匹配的效用矩阵,满足受灾点对不同能力救援队伍的需求;其次根据“Burden-Benefit accord”原则提出了灾情优先、距离优先、兼顾灾情和距离三种优先调度策略,探讨救援队伍运送优先级对救援时间和救援效果的影响;然后针对模型编码复杂的问题,设计了相应的非支配排序遗传算法(NSGA-II)对模型进行求解;在此基础上通过C-METRIC指标和模糊逻辑方法选取最佳调度方案;最后,以汶川地震的应急救援情况构造了两组算例,结果表明:在应急调度过程中考虑救援队伍特征是合理的,并且采用优先调度策略的效果明显优于其他方案,但具体采用何种优先调度策略要根据不同灾情允许的最大救援时间来确定。

关键词:救援队伍;调度策略;多目标优化;非支配排序遗传算法(NSGA-II);应急管理

引 言

地震是一种常见的、破坏性巨大的自然灾害,在世界范围内频繁发生,严重威胁到了人类的生命财产安全,引起了广泛关注。灾后合理的救援人员调度方案能够有效的确保救援工作的开展,减少受灾点的人员伤亡和财产损失^[1,2]。需要指出的是,灾害现场,特别是大型灾害,救援人员从政府人员到军队,工程,医护,通讯,外国友人,以及志愿者,当地群众等,需要各行业、各专业的人员。对此,调度方案需要解决来自不同地区、不同机构、不同能力的救援人员的合理分配问题,需要多类别、多数量的救援人员以救援队伍的形式共同合作,而不是单纯的人员指派。另外,由于地震的突发性和强大的破坏性,灾后往往会形成多个地理位置分散、灾情不同的受灾点,本着人道主义救援的原则,在实际的救援过程中,应急资源会优先派往灾情严重的地区^[3,4],但随着时间的推移,经常出现原来受灾较轻的地区由于需求满足率较低而不断加重,影响整体的救援效果,因此,如何选择合适的调度策略将不同能力的救援队伍调配到不同灾情的受灾点,使得有限的资源得到充分的发挥,这具有重要的理论和实践意义。

目前,围绕灾害应急管理,国内外学者进行了一些卓有成效的研究,主要包括事前的应急服务点选址或出救点选择^[5-8],事中的应急资源调度^[9-11]、应急疏散^[12,13]、车辆路径安排^[14,15]以及事后的应急能力评估^[16,17]。这些研究为救灾工作提供了重要的理论支撑,特别是应急资源调度的成功与否成为抢险救灾的关键步骤,得到了众多学者的高度重视。例如, Camacho-Vallejo 等^[18]和 Huang 等^[19]改进了传统的物资分配模型,提高了应急物资的分配效率;进一步,针对灾后面临的诸多不确定性, Sheu^[20]和王旭坪等^[21]研究了救援物资分配的动态优化问题;还有部分学者考虑物资调度与选址、车辆路径的关联性,系统性的研究物资调度问题^[22-24]。

然而,上述文献都是从应急物资的角度出发,没有考虑人的作用。救援人员的异质性导致单一功能的救援人员满足不了受灾点的需要,需要多类别、多数量的救援人员以救援队伍的形式共同合作。仅有的少数研究虽然建立了救援人员的调配模型,如 Wex 等^[25]考虑信息的不完全性和不确定性建立了救援人员与救援任

收稿日期:2016-10-13

基金项目:国家自然科学基金项目(71473232;71573237);教育部人文社科研究规划基金项目(15YJA630019);中央高校基本科研业务专项资金项目(1610491T12)。

作者简介:张淑文(通讯作者),中国地质大学(武汉)经济管理学院博士研究生;廖灿,中国地质大学(武汉)经济管理学院博士研究生;诸克军,中国地质大学(武汉)经济管理学院教授,博士;於世为,中国地质大学(武汉)经济管理学院教授,博士生导师,博士。

务的分配模型;Falasca 和 Zobel^[26] 针对灾后大量志愿者处于混乱无序的状况,提出了解决志愿者调配问题的多目标模型;袁媛等^[27] 考虑救援时间效率以及救援人员的救援意愿,建立了人员调配模型。但灾后救援更多采用的是救援队伍的形式,这些模型以人员指派的方式忽视了救援人员之间的差异和合作,不符合救援的实际情况。此外,灾后一般有多支救援队伍参与执行救援工作,每支救援队伍的专业能力和综合素质不同,每个受灾点的受灾程度和救援难度也不同,在应急调度过程中,救援队伍与灾情具有一定的匹配性,要争取做到人尽其才,人事相宜。张雷等^[28,29] 虽然以救援队伍为对象建立了调配模型,但未考虑救援队伍的特征以及受灾点灾情对不同能力救援队伍的需求。

本文对此展开研究,建立了考虑出救点选择和救援队伍特征的集成优化模型,并根据“Burden-Benefit accord”原则^[30],提出了灾情优先、距离优先、兼顾灾情和距离三种优先调度策略;在此基础上设计了相应的 NS-GA-II 算法对模型进行求解;最后通过算例验证了考虑救援队伍特征的合理性,并比较了各种调度策略下救援队伍运送优先级对救援时间和救援效果的影响,期望为决策者提供决策支持,提高应急救援的效果。

问题描述

某灾区内有地理位置分散、灾情不同的 j 个受灾点,周边有 i 个备选出救点,每个出救点中有数量不等、各有所长的救援人员,为了最大程度的减少受灾点的损失,调度方案需要解决来自不同地区、不同机构、不同能力的救援人员的合理分配问题,需要多类别、多数量的救援人员以救援队的形式共同合作,在考虑灾区的路网受损的情况下,尽快确定各个出救点到受灾点的救援队伍调度方案,如图 1 所示。

在调度过程中,优先调度策略强调的是救援队伍运送的优先级,是派往灾情严重的受灾点还是距离最近的受灾点,由于每支救援队伍的能力不同,同一支救援队伍派往不同受灾点所发挥的作用是不同的,因此,探讨不同调度策略对救援队伍调度效果的影响,能够有效的提高灾害救援的效果。

研究假设:

H1: 出救点与受灾点之间的道路状况及相应地理位置信息通过 GIS 得到。

H2: 各个受灾点对救援队伍的需求与人口规模和幸存人数高度相关。

H3: 出救点与受灾点之间的配送成本用运输时间来计算。

H4: 每支救援队伍仅包括四类人员,即武警官兵,医生,护士和志愿者,原因在于:一是考虑到这四类人员最具代表性,对于减少受灾点的损失具有直接影响;二是考虑到灾后需要立即进行应急响应,但初期仅能够获取灾区房屋倒塌数、伤亡比例等有限信息,而这些信息与四类人员的需求数量密切相关。

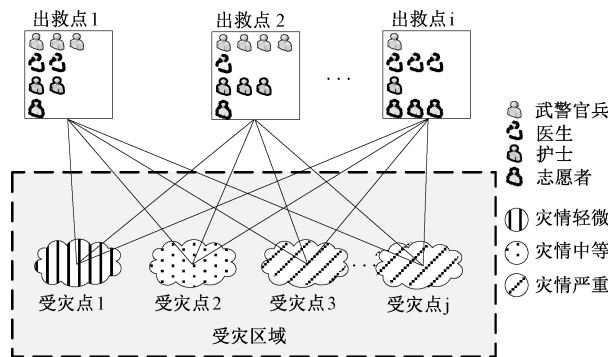


图 1 应急救援队伍调度系统

应急救援队伍多目标调度模型

本文所建立的模型,一方面考虑了救援队伍的特征,通过引入救援队伍与灾情相匹配的效用矩阵,能够充分发挥救援队伍的专业能力,满足受灾点对不同能力救援队伍的需求。另一方面,根据“Burden-Benefit accord”原则,提出优先调度策略:综合考虑灾情、道路状况以及距离因素,定义救援优先级,如果某个受灾点的优先级越高,那么它的需求满足率理应越大;否则,如果某个受灾点的优先级低,那么其需求满足率应该小,通过不同的优先调度策略来探讨救援队伍运送优先级对救援时间和救援效果的影响。

1、符号说明

模型中所用到的变量和参数定义如下:

I : 候选应急出救点集合, $i \in I$;

J : 受灾点集合, $j \in J$;

P_i : 出救点 i 中的救援队伍集合, $p \in P_i, i \in I$;

n_{ip} : 出救点 i 中的救援队伍 p 的人数, $p \in P_i, i \in I$;

s_i : 出救点 i 可以调配的救援队伍数量;

q : 车辆的核载人数;

C_0 : 总的可用救援成本, 反映了灾后初期应急救援工作受到的资源约束, 决策者可以根据灾害的实际情况对 C_0 的值进行调整;

c_p : 应急救援队伍的平均调度成本;

c_{ij} : 运输车辆从出救点 i 到受灾点 j 的单车配送成本, $i \in I, j \in J$;

R_{ij} : 出救点 i 到受灾点 j 之间的道路, $i \in I, j \in J$;

λ_{ij} : 道路 R_{ij} 的损毁程度, $i \in I, j \in J, \lambda_{ij} \in [0, 1]$, 当 $\lambda_{ij} = 0$ 时表示道路未损毁, 当 $\lambda_{ij} = 1$ 时表示道路在短时间内无法修复通行;

l : 道路损毁程度对运输时间的影响系数;

t_{ij}^n : 正常情况下, 车辆从出救点 i 到受灾点 j 的运输时间, $i \in I, j \in J$;

t_{ij}^l : 道路损毁情况下, 修复出救点 i 到受灾点 j 之间道路所需要的时间, $i \in I, j \in J$;

α : 应急救援过程中道路 R_{ij} 受损后但可以通行的临界值, $0 < \alpha < 1$, 当 $\alpha \leq \lambda_{ij} < 1$ 时表示道路 R_{ij} 受损后不可以通行但可以被修复;

t_{ij} : 考虑道路损毁情况, 车辆从出救点 i 到受灾点 j 的运输时间;

A : 救援队伍的属性特征集合, $a \in A$, 救援队伍的属性特征用来衡量救援队伍的专业能力和综合素质, 包括搜救能力、急救能力、护理能力和协助能力四个指标, 在灾害现场紧张的环境下, 面对大量的轻重伤员, 进一步细化医生和护士的职责是必要的^[31];

$U = (u_{ipa})$: 救援队伍的属性特征决策矩阵, 其中, u_{ipa} 表示出救点 i 中救援队伍 p 针对属性 a 的表现值, $0 \leq u_{ipa} \leq 1$ 且 $\sum_{a \in A} u_{ipa} = 1, i \in I, p \in P_i, a \in A$ 。每支救援队伍中武警官兵、医生、护士、志愿者所占比例代表救援队伍的属性, 例如救援队伍的属性可以表示为 $(0.4, 0.2, 0.3, 0.1)$, 即搜救能力 $u_{ip1} = 0.4$, 急救能力 $u_{ip2} = 0.2$, 护理能力 $u_{ip3} = 0.3$, 协助能力 $u_{ip4} = 0.1$;

B : 受灾点的属性特征集合, $b \in B$, 受灾点的属性特征用来衡量受灾点的受灾程度和救援难度, 包括房屋倒塌数、重伤人数、轻伤人数和紧急安置人数四个指标, 其中房屋倒塌越多则对救援队伍的搜救能力要求越高, 重伤人数越多则需要救援队伍具有更高的急救能力, 轻伤人数越多要求救援队伍具有更高的护理能力, 紧急安置人数越多则对救援队伍的协助能力要求越高;

$V = (v_{bj})$: 受灾点的属性特征决策矩阵, 其中, v_{bj} 表示针对属性 b 受灾点 j 的表现值, $0 \leq v_{bj} \leq 1, j \in J, b \in B$;

f_j : 灾情严重程度由受灾点的四个属性特征值相加来确定, 满足 $f_j = \sum_{b \in B} v_{bj}, j \in J$;

d_j : 在受灾点 j 中完成所有应急救援任务所需要的救援队伍数量, $j \in J$;

e_{ipj} : 从出救点 i 调配救援队伍 p 到受灾点 j 的满意值。在灾后应急救援过程中, 由于受灾点对不同能力救援队伍的需求不一样, 因此, 救援队伍要尽量依据受灾点的实际情况进行优先调度, 既满足受灾点对于救援队伍能力的要求, 又能发挥每支救援队伍的作用。根据救援队伍的属性特征决策矩阵 $U = (u_{ipa})$ 和受灾点的属性特征决策矩阵 $V = (v_{bj})$, 通过计算 U 和 V 欧式距离得到救援队伍特征和受灾点灾情相匹配的效用矩阵 $E = (e_{ipj})$ 。

决策变量为:

$$x_i = \begin{cases} 1, & \text{选择应急出救点} \\ 0, & \text{不选择} \end{cases}$$

$$y_{ipj} = \begin{cases} 1, & \text{派遣选中出救点 } i \text{ 中的救援队伍 } p \text{ 到受灾点 } j \\ 0, & \text{不派遣} \end{cases} \quad z_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{修复路线 } R_{ij} \\ 0, & \text{不修复} \end{cases}$$

2、多目标模型

$$\min Z_1 = \max \left\{ \max_{j \in J} \left\{ \max_{i \in I} \left(2 \left\lceil \left(\sum_{p \in P_i} y_{ipj} \right) * n_{ip} / q \right\rceil - 1 \right) \right\} \right\} \quad (1)$$

$$\max Z_2 = \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} \sum_{p \in P_i} e_{ipj} y_{ipj} \quad (2)$$

$$s.t. \sum_{j \in J} \sum_{p \in P_i} y_{ipj} \leq s_i x_i, i \in I \quad (3)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{p \in P_i} c_p y_{ipj} + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} 2c_{ij} \left\lceil \left(\sum_{p \in P_i} y_{ipj} \right) * n_{ip} / q \right\rceil \leq C_0 \quad (4)$$

$$\sum_{i \in I} x_i \geq 1 \quad (5)$$

$$y_{ipj} \leq x_i, i \in I, j \in J, p \in P_i \quad (6)$$

$$t_{ij} = \begin{cases} t_{ij}^n & \lambda_{ij} = 0 \\ t_{ij}^n (1 + l\lambda_{ij}) & 0 < \lambda_{ij} < \alpha \\ t_{ij}^n (1 + l\lambda_{ij}) + t_{ij}^r & \alpha \leq \lambda_{ij} < 1 \\ + \infty & \lambda_{ij} = 1 \end{cases} \quad (7)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{p \in P_i} y_{ipj} \leq d_j, j \in J \quad (8)$$

$$\sum_{j \in J} y_{ipj} = 1, i \in I, p \in P_i \quad (9)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{p \in P_i} \sum_{j \in J} y_{ipj} > \phi \quad (10)$$

$$x_i \in \{0, 1\}, i \in I \quad (11)$$

$$y_{ipj} \in \{0, 1\}, i \in I, j \in J, p \in P_i \quad (12)$$

$$z_{ij} = \begin{cases} 0 & x_i = 0 \text{ or } \sum_{p \in P_i} y_{ipj} = 0 \text{ or } 0 < \lambda_{ij} < \alpha \\ 1 & x_i = 1 \text{ and } \sum_{p \in P_i} y_{ipj} > 0 \text{ and } \alpha \leq \lambda_{ij} < 1 \end{cases} \quad (13)$$

其中:式(1)、(2)为模型的目标函数,式(1)表示救援队伍从出救点全部到达受灾点的救援运输时间最短,由于各个出救点的运输车辆可以并行,取救援队伍到达受灾点的最大运输时间;式(2)表示考虑救援队伍的专业能力与受灾点灾情的匹配性,实现救援队伍调配效果的最大化。

式(3)到式(10)为模型的约束条件,式(3)表示从出救点*i*调配出去的救援队伍不超过其在该点的可调配数量;式(4)表示救援队伍的调配成本和运输成本要受到灾后初期可用救援成本的约束;式(5)表示至少要选择一应急出救点;式(6)表示只能从选中的出救点调配救援队伍;式(7)表示道路不同损毁程度下,车辆从应急出救点*i*到受灾点*j*的运输时间;式(8)表示救援队伍的调配数量不大于该受灾点的需求量;式(9)表示每支救援队伍只能被调配到一个受灾点中;式(10)表示至少要调配 ϕ 支救援队伍参与救援, ϕ 为大于1的常数。

式(11)到式(13)为本文的0-1决策变量,式(11)表示是否选择应急出救点;式(12)表示是否调配救援队伍;式(13)表示是否修复道路。

3、调度策略

第2部分表示的是不考虑救援队伍优先调度的多目标模型,然而在实际救援过程中,决策者往往需要权衡受灾点的灾情、出救点到受灾点的距离、道路状况等各种因素。对此,根据“Burden-Benefit accord”原则,提出了灾情优先、距离优先以及兼顾灾情和距离三种调度策略,见表1。模型中将每种调度策略作为一个单独的约束条件,定义救援优先级,即救援优先级越高,则该受灾点的需求满足率应该越大。

表 1 三种优先调度策略

| 调度策略 | 表达式 |
|-----------|--|
| 灾情优先策略 | $(f_h - f_k) \left(\frac{\sum_{i \in I_p \in P_i} y_{iph}}{d_h} - \frac{\sum_{i \in I_p \in P_i} y_{ipk}}{d_k} \right) \geq 0, h, k \in J, h \neq k$ |
| 距离优先策略 | $(t_{ik} - t_{ih}) \left(\frac{\sum_{i \in I_p \in P_i} y_{iph}}{d_h} - \frac{\sum_{i \in I_p \in P_i} y_{ipk}}{d_k} \right) \geq 0, k, h \in J, k \neq h$ |
| 兼顾灾情和距离策略 | $\left(\frac{f_h}{t_{ih}} - \frac{f_k}{t_{ik}} \right) \left(\frac{\sum_{i \in I_p \in P_i} y_{iph}}{d_h} - \frac{\sum_{i \in I_p \in P_i} y_{ipk}}{d_k} \right) \geq 0, h, k \in J, h \neq k$ |

(1)灾情优先策略:不等式第一部分表示受灾点 h 和受灾点 k 的灾情严重程度之差,第二部分表示受灾点 h 和 k 的需求满足率之差,不等式大于等于 0,则两部分必须同时大于等于 0 或者小于等于 0,即在应急调度中,应该优先满足灾情严重的地区, $h, k \in J$ 。

(2)距离优先策略:不等式第一部分表示受灾点 k 和受灾点 h 到出救点 i 的距离之差,第二部分表示受灾点 h 和 k 的需求满足率之差,不等式大于等于 0,则两部分必须同时大于等于 0 或者小于等于 0,即在应急调度中,应该优先满足离出救点较近的受灾点, $k, h \in J, i \in I$ 。

(3)兼顾灾情和距离策略:不等式第一部分表示受灾点 h 和受灾点 k 的灾情与距离比值之差,第二部分表示受灾点 h 和 k 的需求满足率之差,不等式大于等于 0,则两部分必须同时大于等于 0 或者小于等于 0,即在应急调度中,应该优先满足离出救点近且灾情严重的地区, $h, k \in J, i \in I$ 。

模型求解

针对所建立模型的特点,采用非支配排序的遗传算法(NSGA-II)进行求解。在众多的多目标进化算法中,NSGA-II 被认为是最成功也是应用最广泛的算法之一^[32]。算法思想是首先利用快速非支配排序对初始种群进行分层排序,对于同一层中的 Pareto 解根据拥挤距离进行优劣解的区分,保持解空间的均匀分布;在此基础上根据精英保留策略,选取优良的个体进入下一代子种群,既能保持解的精度,又能确保种群尽快收敛^[33]。这种方法可以很好地搜索非劣解的区域,而且可以使种群很快收敛到这一区域。

1、约束条件处理

本文所建立的模型是一个 0-1 多目标约束优化问题,在求解这种问题之前,通常需要对约束条件进行处理。与传统的将有约束优化转化为无约束问题的处理方式不同,本文是在计算每个约束条件违反度的基础上采用 Deb 修订的支配定义来区分可行解和非可行解^[34]。

首先对不等式约束条件进行处理,将其进行如下转换:

$$\begin{aligned}
 g(1)_i &= \sum_{p \in P_i} \sum_{j \in J} y_{ipj} - s_i x_i \\
 g(2) &= \sum_{i \in I} \sum_{p \in P_i} \sum_{j \in J} c_p y_{ipj} + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} 2c_{ij} \left[\left(\sum_{p \in P_i} y_{ipj} \right) * 100/q \right] - C_0 \\
 g(3) &= 1 - \sum_{i \in I} x_i \\
 g(4)_{ipj} &= y_{ipj} - x_i \\
 g(5)_i &= \sum_{i \in I} \sum_{p \in P_i} y_{ipj} - d_j \\
 g(6) &= \phi - \sum_{i \in I} \sum_{p \in P_i} \sum_{j \in J} y_{ipj}
 \end{aligned} \tag{14}$$

对于等式约束条件,处理方法为将每一个等式约束条件转换成绝对值条件:

$$h(1)_{ip} = \left| \sum_{j \in J} y_{ipj} - 1 \right| \tag{15}$$

每种调度策略是作为一个约束条件加入到模型中的,在求解时同样将其处理成约束违反度的形式:

$$\begin{aligned}
 g(7)_{ihk} &= -(f_h - f_k) \left(\frac{\sum_{i \in I} \sum_{p \in P_i} y_{iph}}{d_h} - \frac{\sum_{i \in I} \sum_{p \in P_i} y_{ipk}}{d_k} \right) \\
 g(8)_{ihk} &= -(t_{ik} - t_{ih}) \left(\frac{\sum_{i \in I} \sum_{p \in P_i} y_{iph}}{d_h} - \frac{\sum_{i \in I} \sum_{p \in P_i} y_{ipk}}{d_k} \right) \\
 g(9)_{ihk} &= -\left(\frac{f_h}{t_{ih}} - \frac{f_k}{t_{ik}} \right) \left(\frac{\sum_{i \in I} \sum_{p \in P_i} y_{iph}}{d_h} - \frac{\sum_{i \in I} \sum_{p \in P_i} y_{ipk}}{d_k} \right)
 \end{aligned} \tag{16}$$

这样,不等式约束的违反度可用 $G(j) = \max\{0, g(j)\}$ 表示,等式约束的违反度可用 $H(j) = \max\{0, |h(j)|\}$ 的形式表示,所有约束条件的违反度则通过 $G+H = \sum_j G(j) + \sum_j H(j)$ 计算。

2、染色体编码

由于模型中决策变量 z_{ij} 可以通过决策变量 x_i 和决策变量 y_{ijp} 来确定,因此不参与染色体编码。 x_i 和 y_{ijp} 都为 0-1 变量,代表解的染色体采用二进制编码策略,每条染色体由两个子串构成,其中前 $P \times J$ 位代表决策变量 y_{ijp} ,后 I 位代表决策变量 x_i ,故整条染色体的长度为 $P \times J + I$,如图 2 所示。

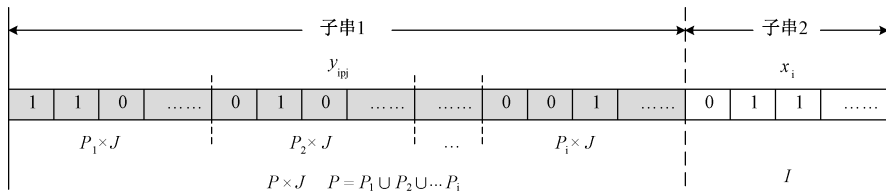


图 2 编码染色体

子串 1 由 J 个长度为 $P_i \times J$ 的基因段构成,每个基因段代表出救点到所有受灾点的救援队伍调配方案。由于每个出救点中救援队伍的数量和属性不同,因此编码时需要考虑救援队伍所在的出救点。例如第 2 个基因段的第 1 位表示调配出救点 2 中的第 1 支救援队伍到受灾点 1,第 2 位表示调配出救点 2 中的第 2 支救援队伍到受灾点 1,假设出救点 2 只有 2 支救援队伍,那么第 3 位表示调配出救点 2 中的第 1 支救援队伍到受灾点 2,直到将该出救点中的救援队伍调配到所有受灾点中。

3、最优 Pareto 解的筛选

覆盖性指标用来衡量进化算法在解空间内的搜索能力,是权衡多目标进化算法性能的一个重要方面。Zitzler 和 Thiele^[35] 提出的 C-METRIC 指标,通过计算在 Pareto 解集 B 中受 Pareto 解集 A 弱支配的解的比例,较好地衡量了 Pareto 解的覆盖性。对此,本文采用该指标来选取最优 Pareto 解集,计算公式如下:

$$C(A, B) = \frac{|\{b \in B \mid \exists a \in A: a \underline{\leq} b\}|}{|B|} \tag{17}$$

其中: $|B|$ 是解集 B 中 Pareto 解的个数, $a \underline{\leq} b$ 表明 a 弱优于 b 。

如果 $C(A, B) = 1$,则表示集合 A 中的 Pareto 解集支配集合 B 中所有的解,即集合 A 中解优于集合 B 中的解;反之如果 $C(A, B) = 0$,则表示集合 B 中所有的解不受 A 弱支配;如果 $C(A, B) > C(B, A)$,则表明解集 A 的覆盖性要优于解集 B 。这里 $C(A, B)$ 不一定等于 $(1 - C(B, A))$ 。本文将 A, B 认为是 NSGA-II 两次运行的 Pareto 解集,通过对算法进行多次运行,选取覆盖性指标接近 1 的一次运行结果作为最优 Pareto 解集。

4、最终解的筛选

多目标优化算法得到的往往是多个非支配解构成的 Pareto 解集,形成了众多的可选方案,决策者难以快速做出决策,这就需要利用多目标最优解的筛选方法选取少数有限的候选方案直接辅助管理者决策。本文采用 Abido^[36] 提出的模糊逻辑方法来从 Pareto 解集中选取最佳折衷解,直接辅助管理者决策,提高应急救援的效率。具体步骤为:

(1) 计算 Pareto 解集中每个候选解在各个目标空间的得分:

$$\mu_i = \begin{cases} 1 & \text{if } F_i \leq F_i^{\min} \\ \frac{F_i^{\max} - F_i}{F_i^{\max} - F_i^{\min}} & \text{if } F_i^{\min} < F_i < F_i^{\max} \\ 0 & \text{if } F_i \geq F_i^{\max} \end{cases} \quad (18)$$

其中: F_i^{\min}, F_i^{\max} 表示第 i 个目标函数 F_i 在所有 Pareto 解集中对应的最小值, 最大值。

(2) 计算 Pareto 解集中每个候选解在整个目标空间的得分:

$$\mu[k] = \sum_{i=1}^M \mu_i[k] / \sum_{j=1}^{N_{Pareto}} \sum_{i=1}^M \mu_i[j] \quad (19)$$

其中: M 是优化目标的数量, N_{Pareto} 是 Pareto 解集的数量, $\mu[k]$ 值最大的候选解就是最佳折衷解。

算例分析

据相关部门统计, 汶川地震后全国各地参与抗震救灾人数超过 1000 万人次^[37], 然而志愿者却反映, 震后有大量救援人员处于混乱、无序的状态, “想帮忙, 反添乱” 的现象严重, 特别有必要对其进行有效的调配。对此, 本文以汶川地震的应急救援情况构造算例对所建立的模型进行验证, 共分为两个部分: 首先通过一个简单的例子, 验证考虑救援队伍特征的合理性和必要性; 其次通过一个大规模算例探讨救援队伍运送优先级对救援时间和救援效果的影响, 以为灾后应急救援工作提供相应的决策依据。

1、算例构建

以汶川地震为背景构造算例, 选取威州镇、凤仪镇、映秀镇等 8 个主要受灾乡镇作为受灾点 (编号为 AP1-8), 以周边的江油市、成都市等 5 个城市作为候选出救点 (编号为 RD1-5), 震后路网的受损情况由 GIS 以及航拍技术获得, 相关数据如表 2-表 6 所示:

表 2 各个受灾点的需求数量及受灾情况

| 受灾点 | 需求数量/支 | 房屋倒塌/万间 | 重伤人数/万人 | 轻伤人数/万人 | 紧急安置/万人 |
|-----|--------|---------|---------|---------|---------|
| AP1 | 1 | 0.621 | 0.856 | 0.388 | 0.684 |
| AP2 | 1 | 0.954 | 0.764 | 0.406 | 0.826 |
| AP3 | 4 | 1.276 | 0.111 | 0.572 | 0.742 |
| AP4 | 2 | 0.995 | 0.937 | 0.381 | 0.924 |
| AP5 | 2 | 1.039 | 0.920 | 0.527 | 0.848 |
| AP6 | 3 | 0.928 | 0.946 | 0.779 | 0.795 |
| AP7 | 6 | 1.439 | 0.949 | 0.346 | 0.982 |
| AP8 | 1 | 0.463 | 0.782 | 0.194 | 0.621 |

各个受灾点的救援优先级通过 $f_j = \sum_{b \in B} v_{bj}$ 得到, 由于表 2 中各灾情指标的度量单位不同, 为了消除量纲的影响, 利用公式 $y = (x - \min) / (\max - \min)$ 将灾情指标数据进行归一化处理, 最终结果如表 3 所示。

表 3 各个受灾点的救援优先级

| 受灾点 | AP1 | AP2 | AP3 | AP4 | AP5 | AP6 | AP7 | AP8 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 救援优先级 | 0.933 | 1.433 | 2.815 | 2.203 | 2.239 | 2.482 | 2.795 | 0.052 |

表 4 出救点到受灾点的单位运输成本 (元)

| | AP1 | AP2 | AP3 | AP4 | AP5 | AP6 | AP7 | AP8 |
|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|
| RD1 | 7810 | 6490 | 6220 | 6060 | 4090 | 2680 | 3830 | 8440 |
| RD2 | 4970 | 3720 | 3450 | 3830 | 3240 | 2970 | 4360 | 5890 |
| RD3 | 4460 | 3200 | 2940 | 3090 | 4450 | 4430 | 5860 | 5070 |
| RD4 | 2340 | 910 | 760 | 920 | 6820 | 6540 | 3480 | 2980 |
| RD5 | 3950 | 2590 | 2330 | 2480 | 5820 | 5840 | 5090 | 4470 |

表 5 出救点中救援队伍可调配数量及人员组成

| 出救点 | 救援队伍编号 | 武警官兵/人 | 医生/人 | 护士/人 | 志愿者/人 |
|-----|--------|--------|------|------|-------|
| RD1 | 1 | 31 | 40 | 19 | 10 |
| | 2 | 50 | 26 | 16 | 8 |
| | 3 | 25 | 50 | 20 | 5 |
| | 4 | 40 | 42 | 9 | 9 |
| RD2 | 1 | 33 | 31 | 23 | 13 |
| | 2 | 27 | 40 | 22 | 11 |
| | 3 | 47 | 25 | 18 | 10 |
| | 4 | 40 | 33 | 21 | 6 |
| | 5 | 41 | 40 | 7 | 12 |
| RD3 | 1 | 46 | 31 | 13 | 10 |
| | 2 | 33 | 39 | 13 | 15 |
| | 3 | 47 | 27 | 21 | 5 |
| | 4 | 29 | 42 | 20 | 9 |
| RD4 | 1 | 24 | 35 | 16 | 25 |
| | 2 | 27 | 41 | 20 | 12 |
| | 3 | 38 | 44 | 8 | 10 |
| | 4 | 32 | 27 | 25 | 16 |
| | 5 | 45 | 32 | 16 | 7 |
| | 6 | 38 | 41 | 15 | 6 |
| | 7 | 50 | 26 | 10 | 14 |
| RD5 | 1 | 26 | 44 | 23 | 7 |
| | 2 | 45 | 28 | 19 | 8 |
| | 3 | 37 | 41 | 15 | 7 |
| | 4 | 43 | 34 | 10 | 13 |
| | 5 | 28 | 39 | 27 | 6 |
| | 6 | 40 | 40 | 6 | 14 |
| | 7 | 34 | 36 | 20 | 10 |
| | 8 | 40 | 25 | 24 | 11 |
| | 9 | 48 | 33 | 9 | 10 |
| | 10 | 50 | 27 | 15 | 8 |

注:假设救援队伍统一调配,每支救援队伍有 100 人。

表 6 出救点到各个受灾点的正常运输时间(小时)、道路损毁情况以及道路抢修时间(小时)

| 受灾点 | RD1 | | | RD2 | | | RD3 | | | RD4 | | | RD5 | | |
|-----|-------|-----------|-------|-------|-----------|-------|-------|-----------|-------|-------|-----------|-------|-------|-----------|-------|
| | t^n | λ | t^r | t^n | λ | t^r | t^n | λ | t^r | t^n | λ | t^r | t^n | λ | t^r |
| AP1 | 3.4 | 0.7 | 2 | 2.2 | 0.4 | 0 | 2.1 | 0.5 | 1 | 1.5 | 0.1 | 0 | 2.4 | 0.9 | 5 |
| AP2 | 2.8 | 0.9 | 10 | 1.8 | 0.7 | 3 | 1.8 | 0.1 | 0 | 1.1 | 0.4 | 0 | 1.9 | 0.3 | 0 |
| AP3 | 2.6 | 0.7 | 3 | 1.5 | 0.2 | 0 | 1.4 | 0.4 | 0 | 0.9 | 0.9 | 4 | 1.7 | 0.1 | 0 |
| AP4 | 2.7 | 0.1 | 0 | 1.7 | 0.3 | 0 | 1.5 | 0.9 | 6 | 1.0 | 0.4 | 0 | 1.8 | 0.7 | 3 |
| AP5 | 2.5 | 0.6 | 2.4 | 2.4 | 0.9 | 8 | 3.0 | 0.2 | 0 | 5.5 | 0.8 | 0 | 4.0 | 0.7 | 4 |
| AP6 | 2.2 | 0.9 | 5 | 2.1 | 0.2 | 0 | 2.6 | 0.85 | 4 | 5.2 | 0.4 | 0 | 3.7 | 0.65 | 2.5 |
| AP7 | 4.3 | 0.2 | 0 | 3.2 | 0.9 | 6 | 3.1 | 0.6 | 5 | 2.5 | 0.7 | 5 | 3.4 | 0.4 | 0 |
| AP8 | 3.8 | 0.1 | 0 | 2.8 | 0.5 | 2 | 2.6 | 0.6 | 4 | 2.0 | 0.7 | 5 | 2.8 | 0.8 | 4 |

2、考虑救援队伍特征的有效性分析

本部分将通过一个简单的例子说明考虑救援队伍特征的必要性和合理性。假设仅有应急出救点 RD5 的第 1 支和第 5 支救援队伍可以参加救援工作,其人员结构分别为(26,44,23,7)和(28,39,27,6)。受灾区域中只有 2 个受灾点,其灾情属性为(0.9,0.4,0.5,0.7)和(0.2,0.8,0.8,0.2),计算得到两个受灾点的救援优先级分别为 $f_1=2.5$ 和 $f_2=2$,两个受灾点都需要 2 支救援队伍。表 7 给出了不考虑救援队伍特征和考虑救援队伍特征下的救援队伍调度结果。

表 7 算例 1 结果比较

| | 不考虑救援队伍特征 | | 考虑救援队伍特征 | |
|-------|-----------|-------|----------|-------|
| | 受灾点 1 | 受灾点 2 | 受灾点 1 | 受灾点 2 |
| 需求满足率 | 100% | 0% | 0% | 100% |
| 调配效果 | 未考虑 | 未考虑 | 1.159 | 1.198 |

从表 7 可以看出,在不考虑救援队伍特征情况下,由于受灾点 1 的救援优先级高,两支救援队伍都调配到了受灾点 1 中;但在考虑救援队伍特征的情况下,两支救援队伍却调配到了受灾点 2 中。原因在于,两支救援队伍中医生和护士的人数比例较大,只有调配到轻重伤员较多的受灾点 2 中才能发挥他们的专业能力,提高调配效果。虽然受灾点 1 的优先级高,但更需要的是武警官兵来执行搜救工作。通过这个例子说明了考虑救援队伍特征的调度方案更加合理。

3、大规模算例分析

本部分将通过求解一个大规模算例进一步探讨救援队伍运送优先级对救援时间和救援效果的影响,以验证模型和算法的有效性。

(1)模型输入参数

候选出救点数目 $I=5$,受灾点总数 $J=8$,救援队伍总数 $P=30$,救援车辆的核载人数 $q=40$,应急救援队伍的平均调度成本 $C_p=25000$ 元,根据灾害发生的实际情况,假设在应急救援过程中,道路 R_{ij} 受损后可以通行的临界值 $\alpha=0.5$,道路损毁程度对运输时间的影响系数 $l=0.5$,灾后初期救援工作受到的资金约束 $C=250$ 万元。

种群规模 $popsize=150$,最大迭代次数 $maxgen=3000$,交叉概率 $pc=0.9$,交叉分布参数 $nc=20$,变异概率 $pm=1/35$,变异分布参数 $nm=80$,锦标赛比赛规模 $tournamentsize=2$,由于救援队伍调度的特殊性,在染色体上决策变量 y_{ipj} 的编码长度 $M=P \times J=240$ 。

(2)优化结果

根据本文建立的应急救援队伍多目标调度模型,以及设计的 NSGA-II 进化算法,分不考虑优先调度、灾情优先、距离优先以及兼顾灾情和距离四种调度策略分别在 MATLAB(R2014a) 上进行编程运算,得到四种调度策略下的 Pareto 前端,如图 3 所示,(a) 代表的是不考虑优先调度策略,(b) 代表的是灾情优先策略,(c) 代表的是距离优先策略,(d) 代表的是兼顾灾情和距离策略。从图 3 可以看出,在一定的时间范围内,不管采用哪种调度策略,救援队伍的调配效果会随着救援队伍全部到达受灾点的时间延长而提高,但之后救援队伍的调配效果趋于稳定。

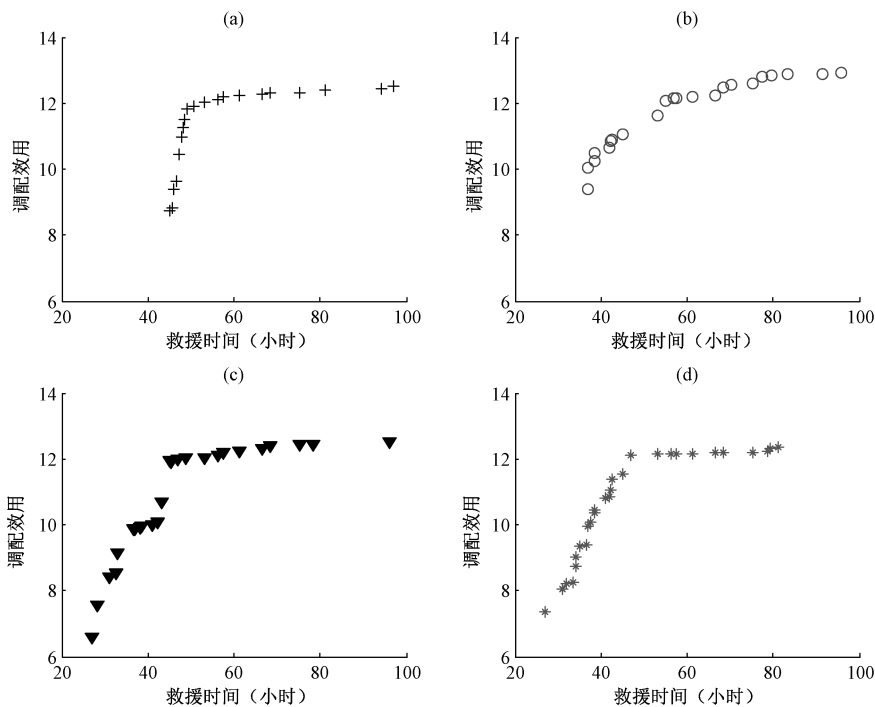


图 3 四种调度策略下的 Pareto 前端

在应急救援过程中,救援效果的好坏会直接影响受灾点的人员伤亡和财产损失,对此本文选取了救援队伍全部到达受灾点的时间、调配效果和需求量满足率三个指标来评价不同调度策略的救援效果(见图 4)。从救援队伍到达受灾点的时间来看,采用灾情优先的调度策略所花费的时间最长,其次为不考虑优先调度策略和距离优先策略,兼顾灾情和距离策略则能确保救援队伍尽快的到达受灾点,救援队伍到达受灾点的最短时间为 37 个小时;从救援队伍的调配效果来看,灾情优先策略的调配效果最好,最大调配效用为 11.63,既满足了不同灾情的受灾点对于不同救援队伍的需求,又发挥了救援队伍的专业能力,其次是距离优先策略、兼顾灾情和距离策略,不考虑优先调度策略的调配效果最差;从受灾点的需求满足率来看,采用灾情优先的调度策略,受灾点的需求满足率最高,最大需求满足率为 95%,而其他三种调度策略的需求满足率则稍差。

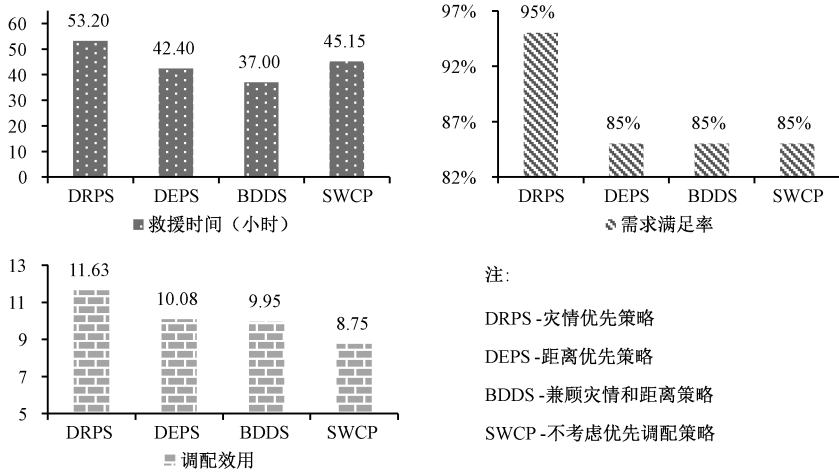


图 4 不同调度策略下的救援效果

总的来说,采用优先调度策略比不采用优先调度策略的救援效果更好,但决策者具体选择何种优先调度策略要根据灾害的实际情况来确定,当灾情允许救援队伍到达受灾点的时间较长时,可以采用灾情优先的调度策略,更大的满足受灾点的需求,最大程度的发挥救援队伍的作用,减少灾害的损失;如果灾情紧急,继续采用灾情优先的调度策略,可能会导致原来某些受灾较轻的地区不断加重,影响应急救援的效果,这就需要救援队伍尽快到达受灾点,因此决策者可以选择距离优先策略或者兼顾灾情和距离策略。

计算得到三种优先调度策略下的具体决策方案:

A. 出救点的选择方案 $\{x_i\}$ 。在本文背景下,三种优先调度策略都选择了全部的备选出救点。在灾后实际的救援过程中,由于道路状况以及资源的分布状况,为了尽快实现应急资源的调度,通常需要从全局出发考虑出救点的选择问题,确定最佳的出救点数目。

B. 道路的修复方案 $\{z_{ij}\}$ 。表 8-表 10 代表三种优先调度策略下的道路修复情况,不难看出,采用灾情优先策略需要修复的道路数量最多,共有 12 条,并且所修复的主要是到灾情严重的受灾点的道路,符合受灾严重优先的调度原则;其次是距离优先的调度策略,需要修复道路 8 条;而兼顾灾情和距离策略仅需要修复道路 4 条。这也是造成三种调度策略下,救援队伍全部到达受灾点的运输时间差异较大的关键原因。

C. 救援队伍的调度方案 $\{y_{ij}\}$ 。决策表 11-表 13 代表三种优先调度策略下救援队伍的最终调度方案。其中表 11 中第 1 行的第 3 个决策向量 $[0,0,1,0,0,0,0,0]_{13}$ 代表灾情优先策略下出救点 1 派第 3 支救援队伍到受灾点 3;决策表 12 中第 5 行的第 2 个决策向量 $[0,0,0,0,0,0,1,0]_{52}$ 代表距离优先策略下出救点 5 派第 2 支救援队伍到受灾点 7;以此类推。

表 8 灾情优先策略下的道路修复情况

| | AP1 | AP2 | AP3 | AP4 | AP5 | AP6 | AP7 | AP8 |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|
| RD1 | | | ===== | | ===== | | | |
| RD2 | | ===== | | | | | ===== | |
| RD3 | | | | | | ===== | ===== | |
| RD4 | | ===== | | | | | ===== | |
| RD5 | ===== | | | ===== | | | | |

表 9 距离优先策略下的道路修复情况

| | AP1 | AP2 | AP3 | AP4 | AP5 | AP6 | AP7 | AP8 |
|-----|-------|-------|-------|-----|-------|-------|-------|-------|
| RD1 | | | | | ===== | | | |
| RD2 | | ===== | | | | | | |
| RD3 | | | | | | ===== | | |
| RD4 | | | ===== | | | | ===== | ===== |
| RD5 | ===== | | | | | ===== | | |

表 10 兼顾灾情与距离策略下的道路修复情况

| | AP1 | AP2 | AP3 | AP4 | AP5 | AP6 | AP7 | AP8 |
|-----|-----|-----|-------|-------|-----|-------|-----|-----|
| RD1 | | | ===== | | | | | |
| RD2 | | | | | | | | |
| RD3 | | | | | | | | |
| RD4 | | | ===== | | | | | |
| RD5 | | | | ===== | | ===== | | |

表 11 灾情优先策略下的调度方案

| | | | | | | | | |
|------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|--|--|--|
| RD1: | [0,0,0,0,0,0,1,0] ₁₁ | [0,0,0,0,0,0,0,0] ₁₂ | [0,0,1,0,0,0,0,0] ₁₃ | [0,0,0,0,1,0,0,0] ₁₄ | | | | |
| RD2: | [0,0,0,0,0,0,0,0] ₂₁ | [0,0,0,0,0,1,0,0] ₂₂ | [0,1,0,0,0,0,0,0] ₂₃ | [0,0,0,0,0,0,0,0] ₂₄ | [0,0,1,0,0,0,0,0] ₂₅ | | | |
| RD3: | [0,0,0,0,0,1,0,0] ₃₁ | [0,0,0,0,0,0,0,0] ₃₂ | [0,0,0,0,1,0,0,0] ₃₃ | [0,0,0,0,0,0,0,0] ₃₄ | | | | |
| RD4: | [0,0,0,0,0,0,0,0] ₄₁ | [0,0,0,0,0,0,1,0] ₄₂ | [0,0,0,0,0,0,0,1] ₄₃ | [0,0,0,0,0,0,0,0] ₄₄ | [0,0,0,0,0,0,0,0] ₄₅ | | | |
| | [0,0,1,0,0,0,0,0] ₄₆ | [0,0,0,1,0,0,0,0] ₄₇ | | | | | | |
| RD5: | [0,0,0,0,0,0,0,0] ₅₁ | [0,0,0,0,0,0,1,0] ₅₂ | [0,0,0,0,0,0,0,0] ₅₃ | [0,0,0,0,0,0,1,0] ₅₄ | [0,0,0,0,0,0,0,0] ₅₅ | | | |
| | [0,0,0,0,0,1,0,0] ₅₆ | [1,0,0,0,0,0,0,0] ₅₇ | [0,0,0,0,0,0,0,0] ₅₈ | [0,0,1,0,0,0,0,0] ₅₉ | [0,0,1,0,0,0,0,0] ₅₁₀ | | | |

表 12 距离优先策略下的调度方案

| | | | | | | | | |
|------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|--|--|--|
| RD1: | [0,0,0,0,0,0,1,0] ₁₁ | [0,0,0,0,0,0,0,0] ₁₂ | [0,0,0,0,0,0,0,0] ₁₃ | [0,0,0,0,1,0,0,0] ₁₄ | | | | |
| RD2: | [0,0,0,0,0,0,0,0] ₂₁ | [0,0,0,0,0,1,0,0] ₂₂ | [0,1,0,0,0,0,0,0] ₂₃ | [0,0,0,0,0,0,0,0] ₂₄ | [0,0,1,0,0,0,0,0] ₂₅ | | | |
| RD3: | [0,0,0,0,0,1,0,0] ₃₁ | [0,0,0,0,0,0,0,0] ₃₂ | [0,0,0,0,1,0,0,0] ₃₃ | [0,0,0,0,0,0,0,0] ₃₄ | | | | |
| RD4: | [0,0,0,0,0,0,0,0] ₄₁ | [0,0,0,0,0,0,1,0] ₄₂ | [0,0,0,0,0,0,0,1] ₄₃ | [0,0,0,0,0,0,0,0] ₄₄ | [0,0,0,0,0,0,0,0] ₄₅ | | | |
| | [0,0,1,0,0,0,0,0] ₄₆ | [0,0,0,1,0,0,0,0] ₄₇ | | | | | | |
| RD5: | [0,0,0,0,0,0,0,0] ₅₁ | [0,0,0,0,0,0,1,0] ₅₂ | [0,0,0,0,0,0,0,0] ₅₃ | [0,0,0,0,0,0,1,0] ₅₄ | [0,0,0,0,0,0,0,0] ₅₅ | | | |
| | [0,0,0,0,0,1,0,0] ₅₆ | [1,0,0,0,0,0,0,0] ₅₇ | [0,0,0,0,0,0,0,0] ₅₈ | [0,0,1,0,0,0,0,0] ₅₉ | [0,0,1,0,0,0,0,0] ₅₁₀ | | | |

表 13 兼顾灾情和距离策略下的调度方案

| | | | | | | | | |
|------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|--|--|--|
| RD1: | [0,0,0,1,0,0,0,0] ₁₁ | [0,0,1,0,0,0,0,0] ₁₂ | [0,0,0,0,0,0,1,0] ₁₃ | [0,0,0,0,0,0,0,1] ₁₄ | | | | |
| RD2: | [0,0,0,0,0,0,0,0] ₂₁ | [0,0,0,0,0,0,0,0] ₂₂ | [0,0,0,0,0,1,0,0] ₂₃ | [0,0,0,0,0,0,0,0] ₂₄ | [0,0,0,0,0,0,0,0] ₂₅ | | | |
| RD3: | [0,0,0,0,0,0,0,0] ₃₁ | [0,0,1,0,0,0,0,0] ₃₂ | [0,0,0,0,1,0,0,0] ₃₃ | [0,0,0,0,1,0,0,0] ₃₄ | | | | |
| RD4: | [0,0,0,0,0,0,0,0] ₄₁ | [0,0,0,0,0,0,0,0] ₄₂ | [0,0,1,0,0,0,0,0] ₄₃ | [0,0,0,0,0,1,0,0] ₄₄ | [0,1,0,0,0,0,0,0] ₄₅ | | | |
| | [1,0,0,0,0,0,0,0] ₄₆ | [0,0,0,0,0,0,0,0] ₄₇ | | | | | | |
| RD5: | [0,0,0,0,0,0,0,0] ₅₁ | [0,0,0,0,0,0,1,0] ₅₂ | [0,0,1,0,0,0,0,0] ₅₃ | [0,0,0,0,0,0,0,0] ₅₄ | [0,0,0,0,0,1,0,0] ₅₅ | | | |
| | [0,0,0,0,0,0,0,0] ₅₆ | [0,0,0,0,0,0,0,0] ₅₇ | [0,0,0,0,0,0,0,0] ₅₈ | [0,0,0,0,0,0,1,0] ₅₉ | [0,0,0,1,0,0,0,0] ₅₁₀ | | | |

结 语

为了合理调配救援人员,有序开展救援工作。本文将多类别、多数量的救援人员以救援队伍的形式调配,通过引入救援队伍与灾情相匹配的效用矩阵,建立了考虑救援队伍特征的集成优化模型,充分发挥救援队伍的专业能力,满足受灾点对于不同能力救援队伍的需求,在此基础上探讨了救援队伍运送优先级对救援时间和救援效果的影响。算例分为两组,第一组验证了考虑救援队伍特征的合理性,第二组算例结果表明,采用优

先调度策略的救援效果更好,但决策者具体选择哪种优先调度策略,需要根据灾情允许的最大救援时间来确定。通过 NSGA-II 算法、C-METRIC 指标和模糊逻辑方法选取的最佳调度方案,更符合救援队伍调度问题的实际需求,达到快速救援的目的。未来的研究将针对模型的特点比较其他高性能的求解算法,并利用分类、聚类算法确定受灾点的灾情等级,以进一步提高应急救援的效率。

参考文献:

- [1] 李双琳,马祖军. 震后交通管制下多出救点应急物资调运问题[J]. 管理科学学报, 2014,17(5):1-13
- [2] Wex F., Schryen G., Neumann D. Assignments of Collaborative Rescue Units during Emergency Response[J]. International Journal of Information Systems for Crisis Response and Management, 2013,5(4):63-80
- [3] Zhang J. H., Li J., Liu Z. P. Multiple-resource and Multiple-depot Emergency Response Problem Considering Secondary Disasters [J]. Expert Systems with Applications, 2012,39(12):11066-11071
- [4] Sheu J. B. An Emergency Logistics Distribution Approach for Quick Response to Urgent Relief Demand in Disasters[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2007,43(6):687-709
- [5] Rawls C. G., Turnquist M. A. Pre-positioning of Emergency Supplies for Disaster Response[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2010,44(4):521-534
- [6] Campbell A. M., Jones P. C. Prepositioning Supplies in Preparation for Disasters[J]. European Journal of Operational Research, 2011,209(2):156-165
- [7] Rawls C. G., Turnquist M. A. Pre-positioning and Dynamic Delivery Planning for Short-term Response Following a Natural Disaster[J]. Socio-Economic Planning Sciences, 2012,46(1):46-54
- [8] 周愉峰,马祖军,王恪铭. 应急物资储备库的可靠性 P-中位选址模型[J]. 管理评论, 2015,27(5):198-208
- [9] 杨继君,余廉. 面向多灾点需求的应急资源调度博弈模型及优化[J]. 中国管理科学, 2016,24(8):154-163
- [10] Vitoriano B., Ortuño M. T., Tirado G., et al. A Multi-criteria Optimization Model for Humanitarian Aid Distribution[J]. Journal of Global Optimization, 2011,51(2):189-208
- [11] Najafi M., Eshghi K., Dullaert W. A Multi-objective Robust Optimization Model for Logistics Planning in the Earthquake Response Phase[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2013,49(1):217-249
- [12] 张永彬,王坚,王超,等. 基于 SAPSO 算法的人群疏散模型研究[J]. 管理评论, 2016,28(8):152-157
- [13] Joo J., Kim N., Wysk R. A., et al. Agent-based Simulation of Affordance-based Human Behaviors in Emergency Evacuation[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2013,32(2):99-115
- [14] 代颖,马祖军,郑斌. 突发公共事件应急系统中的模糊多目标定位-路径问题研究[J]. 管理评论, 2010,22(1):121-128
- [15] 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
- [16] Ju Y., Wang A., Liu X. Evaluating Emergency Response Capacity by Fuzzy AHP and 2-tuple Fuzzy Linguistic Approach[J]. Expert Systems with Applications, 2012,39(8):6972-6981
- [17] 周玲,宿洁,杨华东. 汶川地震灾情与应急广播报道的契合度研究:以中央台《汶川紧急救援》应急物资报道为例[J]. 管理评论, 2016,28(8):87-98
- [18] Camacho-Vallejo J. F., González-Rodríguez E., Almaguer F. J., et al. A Bi-level Optimization Model for Aid Distribution after the Occurrence of a Disaster[J]. Journal of Cleaner Production, 2015,105(15):134-145
- [19] Huang K., Jiang Y., Yuan Y., et al. Modeling Multiple Humanitarian Objectives in Emergency Response to Large-scale Disasters [J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2015,75(10):1-17
- [20] Sheu J. B. Dynamic Relief-demand Management for Emergency Logistics Operations under Large-scale Disasters[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2010,46(1):1-17
- [21] 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
- [22] 马祖军,郑斌,李双琳. 应急物资配送中带中转设施的选址-联运问题[J]. 管理评论, 2013,25(10):166-176
- [23] Sung I., Lee T. Optimal Allocation of Emergency Medical Resources in a Mass Casualty Incident: Patient Prioritization by Column Generation[J]. European Journal of Operational Research, 2016,252(2):623-634
- [24] 方磊,夏雨,杨月明,等. 面向突发性自然灾害的救济供应链研究述评与未来展望[J]. 管理评论, 2016,28(8):238-249
- [25] Wex F., Schryen G., Feuerriegel S., et al. Emergency Response in Natural Disaster Management: Allocation and Scheduling of Rescue Units[J]. European Journal of Operational Research, 2014,235(3):697-708

- [26] Falasca M., Zobel C. An Optimization Model for Volunteer Assignments in Humanitarian Organizations[J]. *Socio-Economic Planning Sciences*, 2012,46(4):250-260
- [27] 袁媛,樊治平,刘洋. 突发事件应急救援人员的调配模型研究[J]. *中国管理科学*, 2013,21(2):152-156
- [28] 张雷,马璐,元昌安. 应急救援多目标时限指派模型[J]. *中国安全科学学报*, 2012,22(6):170-176
- [29] 张雷,元昌安,马璐. 考虑优先权的地震灾害时限应急救援指派模型[J]. *计算机应用研究*, 2013,30(5):1439-1442
- [30] Marsh M. T., Schilling D. A. Equity Measurement in Facility Location Analysis: A Review and Framework[J]. *European Journal of Operational Research*, 1994,74(1):1-17
- [31] 郭晓萱,李红玉,孙培阳,等. 灾害救援中护理人员岗位胜任力指标体系的构建[J]. *护理学杂志*, 2013,28(3):45-47
- [32] Deb K., Pratap A., Agarwal S., et al. A Fast and Elitist Multi-objective Genetic Algorithm; NSGA-II[J]. *Evolutionary Computation, IEEE Transactions on*, 2002,6(2):182-197
- [33] 王海军,杜丽敬,马士华. 震后应急物流系统中双目标开放式选址:路径问题模型与算法研究[J]. *管理工程学报*, 2016,30(2):108-115
- [34] Deb K. *Multi-objective Optimization using Evolutionary Algorithms*[M]. New York: John Wiley & Sons, 2001
- [35] Zitzler E., Thiele L. Multi-objective Evolutionary Algorithms: A Comparative Case Study and the Strength Pareto Approach[J]. *Evolutionary Computation, IEEE Transactions on*, 1999,3(4):257-271
- [36] Abido M. A. Environmental/economic Power Dispatch Using Multi-objective Evolutionary Algorithms: A Comparative Study[J]. *Power Systems, IEEE Transactions on*, 2003,18(4):1529-1537
- [37] 朱健刚,赖伟军. “不完全合作”:NGO 联合行动策略以“5·12”汶川地震 NGO 联合救灾为例[J]. *社会*, 2014,34(4):187-209

Optimal Scheduling Strategy with Emergency Rescue Team's Characteristics Taken into Consideration

Zhang Shuwen, Liao Can, Zhu Kejun and Yu Shiwei

(School of Economics and Management, China University of Geosciences, Wuhan 430074)

Abstract: As a kind of special emergency resource, rescue workers play an important role in disaster relief. In order to overcome the defects of traditional assignment models, a multi-objective model is proposed with the rescue team's characteristics taken into consideration. Firstly, based on the definition of rescue team's attributes, a utility matrix is developed to meet the disaster needs of different rescue teams. Secondly, three priority scheduling strategies are defined in accordance with the principle of "Burden-Benefit accord", and the influence of three priority scheduling strategies on rescue time and rescue effect are analyzed. Furthermore, the designed NSGA-II, CMETRIC and fuzzy logic methods are developed to solve the above model. Finally, a case of emergency rescue in Wenchuan earthquake is conducted to illustrate the efficiency and advantages of the proposed method. The results show that in the process of disaster relief, it is reasonable that considering the characteristics of rescue team, and the three priority scheduling strategies outperform the others, however, which of these three priority strategies is most appropriate for the specific disaster situation depends on the maximum rescue time allowed by the disaster.

Key words: rescue team, scheduling strategy, multi-objective optimization, non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II), emergency management