Vol. 58, No. 4
July 2 0 1 8

文章编号: 1000-8608(2018)04-0428-09

基于最优分配系数的应急救援人员分组方法

李怀明*, 王连庆, 宋方方

(大连理工大学管理与经济学部,辽宁大连 116024)

摘要:针对应急救援任务前期救援人员分组问题,提出了一种基于最优分配系数的人员分组方法.考虑影响各项救援任务紧急程度的一些因素,通过区间数可能度的理论得出最优分配系数,从而对分配给各项救援任务的人员数量进行缩减.进一步地考虑了救援人员抵达救援现场消耗的时间成本和各救援人员对救援任务的基础效益值,以整体救援效果最佳为目标,建立救援人员分组模型,通过对分组模型的求解确定救援人员的最佳分组方式.最后,用一个算例分析验证该方法的可行性和有效性.

关键词:应急救援;人员分组;时间成本;最优分配系数

中图分类号: C934; N945 文献标识码: A doi: 10.7511/dllgxb201804014

0 引 言

近年来,如自然灾害、事故灾难、社会安全事件等各类突发事件的频发造成了巨大的人员伤亡和经济损失,因此针对突发事件应急管理的研究已经引起国内外众多学者的重视.突发事件会造成持续性的伤害,因此在突发事件发生后,需要相关部门马上对受灾地点进行救援,而派遣救援人员前往受灾现场进行救援是应急救援开始阶段重要的决策之一.因此,依据受灾地区和救援人员的特点,合理有效地安排救援人员执行救援任务,最大程度降低受灾地区的各项损失,是一个具有现实意义的课题.

目前,国内外学者就应急救援人员分组问题做了很多研究,针对救援过程中出现的不同状况取得了一定的进展. 救援人员派遣过程实际上是一个对人员的指派过程,其目的是为了使整体效果最佳. Sampson 针对公共服务活动中志愿者的指派问题,综合考虑志愿者的总体数量、各志愿者的能力以及自身的意愿,建立人员指派的线性规划模型,最终得到了最优的志愿者指派方案[1]. Falasca 等则针对人道组织中志愿者指派问题,考虑志愿者对各项任务的参与意愿建立了多目标优

化模型,并得出结论[2].上述两项研究中均考虑了 人本身的能力和意愿进行人员的指派,但指派的 最终目的是志愿者服务各项公益事业等,并非是 应对紧急状况. Topaloglu 在考虑救援过程中医 护人员换班的问题时,提出了对人员约束存在弹 性的必要性[3],解决了面对紧急状况时,人员自身 能力的发挥存在上下浮动的问题,在上述研究中, 更多的是考虑个人的能力问题,但在紧急救援情 况下,往往采用分组的方式更能解决问题. 樊治平 等根据救援人员综合表现值进行人员分组,然后 派遣救援小组执行救援任务[4]. 在救援人员分组 过程中,往往不能只考虑救援人员自身的综合表 现值,还需要考虑救援人员之间的协同关系,进而 实现救援小组综合能力最大化. 为此 Ren 等针对 人员的分组考虑了救援人员之间的协同关系,并 提出其必要性[5]. Chen 等给出了应急响应管理中 的协同框架[6]. 叶鑫等考虑了人员之间的协同效 应以及救援人员的自身属性进行人员分组[7]. 康 凯等提出了在救援过程中有时还需要各个部门、 区域之间协同进行,这样使得职业搭配更加合 理[8]. 上述研究中,仅考虑了救援人员的能力对受 灾地区提供的帮助,忽略了救援人员抵达受灾地 区花费的时间成本,为此袁媛等考虑救援人员抵

收稿日期:2017-12-12: 修回日期:2018-05-09.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71373034,重点项目 71533001).

429

达受灾地区需要花费一定时间的现状,并考虑受 灾地区的最佳救援时间,提出了基于时间满意度 的人员分组方法[9]. 朱莉等考虑伤员在物资运输 过程中坚持的时间提出应急救援运输过程的时间 最优化[10]. 但是,目前各项研究中在考虑救援人 员数量时,往往假设救援人员数量充分满足了所 有救援任务对人员的需求,然而在实际情况中,消 息的传递、救援人员的动员组织等过程,使得在救 援前期救援人员的数量无法满足所有任务的需 求,因此需要决策者根据现场情况对各项救援任 务的人员需求数量缩减. 目前对于这种情况的研 究还不多见,但可以看到当救援物资不足时对救 援物资分配的研究,Yang 等提出了利用多种物资 组合分配的方式,延长救灾地区的保障时间,并建 立相应的优化模型[11]. 葛洪磊等提出了基于受灾 人员的损失数量对应急物资进行分配[12], Chen 等研究了以受灾点损失最小为目标的救援物资分 配模型[13],李永义等提出了基于区间数可能度的 地震救援物资分配[14],陈莹珍等提出了基于公平 的原则对物资进行分配[15]. 上述研究中都根据不 同的规则对不充足的救援物资进行了分配.

在突发事件发生后,相关决策者对受灾地区现场状况进行了解,从而对各项任务的状况、人员需求量等因素进行评估,但该评估往往存在一定误差.本文考虑实际救援人员数量无法满足决策者实际需要的现状,提出通过区间数可能度的方式得到最优分配系数,从而减少对各项救援任务的人员分配量,同时考虑各救援人员对各项任务做出的贡献,以整体救援效果最佳为目标,建立救援人员分组模型,最后对模型进行求解,以实现在救援人员数量不足的情况下,最大化救援效果的人员分组.

1 问题描述

下列符号用来表示在突发事件应急救援人员

分组时相关的集和量.

 $A = \{A_i | i = 1, 2, \dots, m\}$: 突发事件救援人员的出发点集合,其中 A_i 表示第 i 个出发点,假设出发点 A_i 中可派出的救援人员数量为 a_i .

 $P = \{P_{ij} | i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, a_i\}$: 突发事件救援人员集合,其中 P_{ij} 表示第 i 个出发点中的第 j 个救援人员.

 $R = \{R_k | k = 1, 2, \dots, n\}$: 突发事件受灾地区的救援任务集合,其中 R_k 表示第 k 项救援任务.

 $B = \{B_g \mid g = 1, 2, \cdots, q\}$:表示完成救援任务过程中需要救援人员掌握的技能集合,其中 B_g 表示完成任务所需要的第 g 项技能.这里假设所有的技能都是效益型技能,即技能评价得分越高,对救援任务带来的贡献越大.

 $B^k = \{B_g \mid g \in (1,2,\cdots,q)\}$:表示针对救援任务 R_k 需要救援人员掌握的技能. 其中 $k=1,2,\cdots$ $n,B^1 \cup B^2 \cup \cdots \cup B^n = B$.

 $w^{k} = \{w_{g}^{k} | B_{g} \in B^{k}\}$:表示针对救援任务 R_{k} 所需要的各项救援技能在该项救援任务中所占的权重集合,其中 $k = 1, 2, \cdots, n, 0 \le w_{g}^{k} \le 1, \sum_{B_{g} \in B^{k}} w_{g}^{k} = 1.$

 $T = \{t_{ij}^k | i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, a_i, k = 1, 2, \dots, n\}$: 表示救援人员执行各项救援任务时抵达救援点所花费时间,其中 t_{ij}^k 表示救援人员 P_{ij} 出发执行救援任务 R_k 所需时间.

 $D = \{d_k | k = 1, 2, \dots, n\}$:表示各项救援任务所需要的救援人员数量,其中 d_k 表示完成救援任务 R_k 所需要的救援人员数量,该数据并不一定是具体数字,一定情况下为区间形式.

图 1 是突发事件应急救援人员分组问题示意 图. 本文所要解决的问题是:针对实际救援人员数 量无法满足所有救援任务需求的问题,通过区间 数可能度的方式得到最优分配系数,对各项救援 任务的人员需求量进行缩减,进而进行人员分组; 针对各救援人员从不同地点出发抵达救援地点

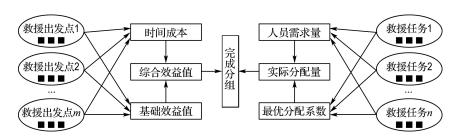


图 1 应急救援人员分组问题示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the emergency rescue personnel grouping problem

花费一定时间的问题,通过时间成本的方式考虑 救援人员可以为各项任务带来的效益值,从而进 行人员分配.最后综合考虑各项任务对救援人员 的要求,各救援人员对各项救援任务的胜任程度, 以完成救援任务效果最佳为目标,构建救援人员 分组模型,并求出最佳的人员分组方案.其中救援 人员掌握的各项技能对各项任务的贡献为基础效 益值,结合救援人员抵达救援现场消耗的时间成 本为综合效益值.

2 综合效益值计算

综合效益值的计算分为两部分,一是根据救援人员自身掌握的技能带来的基础效益值,二是救援人员出发至救援现场消耗的时间成本.

2.1 时间成本

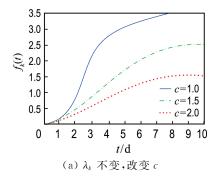
在突发事件中,随着时间的延长,受灾人员的生命受到的威胁越来越大,因此需要救援人员在尽可能短的时间内抵达救援任务点进行救援.对于从不同地点出发的救援人员来说,在出发之前对抵达救援任务点的时间进行估计,即 t_{ij}^k .

基于 Fiedrich 等关于地震被困人员生存概率 函数的研究^[16],以及 Jin 等构建的治愈概率函数^[17-18],结合受灾地点的实际情况,认为某项救援任务对时间的要求类似于被困人员生存概率函数的形态,针对救援任务 R_k ,给出救援人员抵达现场所消耗的时间成本函数:

$$f_k(t) = \frac{K}{c + e^{-t^2/\lambda_k}} - \frac{K}{c+1}$$
 (1)

式中:t 表示救援人员抵达现场执行救援任务 R_k 所需要的时间; λ_k 是一个常量,表示救援任务 R_k 的重要度;K 表示任务的最大时间成本,可根据实际情况任意取值;c 是一个常量,与突发事件类型和救援任务特点有关,表示该项救援任务的最佳救援时间.在地震灾害中,取 K=10,由于各项任务的最佳救援时间不同、重要度不同,取不同的 λ_k 和 c 时,该时间成本函数走势如图 2 所示,其中横坐标表示救援人员出发抵达救援现场所消耗的时间,纵坐标表示救援人员所消耗的时间成本.

从该函数中可以看出,随着时间的增加,受灾人员的生存概率降低,救援人员的救援时间成本增加,因此在进行人员分组时考虑救援人员抵达救援现场的时间是必要的.



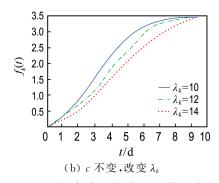


图 2 针对时间成本的函数分析 Fig. 2 Function analysis of time cost

2.2 综合效益值

考虑救援人员自身掌握的技能不同、掌握的各项技能的熟练度不同、救援任务所需要的救援技能不同以及各项技能在救援任务中所占的权重不同,计算出各救援人员对各项救援任务提供的基础效益值.

基于文献[4],对于救援人员的基础效益值计算过程如下:首先,针对所有救援人员的实际情况,对其掌握的各项救援技能进行评价, P_{ij}^g 表示救援人员 P_{ij} 对于救援技能 B_{ik} 所获得的评价,具体评价数值根据救援人员的历史数据获得或根据救援人员对自身的评价获得.接下来根据救援人员掌握的各项技能的熟练度、每项任务所需要的救援技能以及各项技能在任务中占有的权重可以得出各救援人员对各项任务的基础效益值,这里用 e_{ij}^k 来表示救援人员 P_{ij} 对任务 R_{ik} 的基础效益值:

$$e_{ij}^{k} = \sum_{B \in B^{k}} P_{ij}^{g} w_{g}^{k} \tag{2}$$

在计算救援人员的综合效益值时,考虑救援人员的分组只是比较各个救援人员的效益值,因此基础效益值和时间成本两者之间无须考虑权重问题^[19].实际救援过程中,决策者希望得到的救援人员是基础效益值高且时间成本低的人员,因

此综合效益值的计算方法如下:

$$E_{ij}^{k} = \frac{e_{ij}^{k}}{f_{k}(t_{ij})} \tag{3}$$

其中 E_{ij}^k 表示的是救援人员 P_{ij} 在执行救援任务 R_k 时所带来的综合效益值. 综合效益值的影响因素为救援人员的基础效益值和时间成本,基础效益值越高、时间成本越低,该救援人员的综合效益值越高.

3 救援人员分组模型建立与求解

根据上一章中对各救援人员综合效益值 E_{ij}^k 的求解,可以构建出救援人员分组模型.模型求解过程中考虑救援人员数量不足的情况,对分组模型进行优化,然后对模型进行变换求解.

3.1 初始模型建立

由于救援人员数量不足,无法满足所有任务的需求,设 $D' = \{d'_k | k = 1, 2, \cdots, n\}$ 表示对n项救援任务实际分配的人员数量,根据本文的问题和变量定义以及前文对综合效益值的计算,可构建如下的救援人员分组模型:

任务整体效果最佳,其中 $0 \le \lambda_k \le 1$, $\sum_{k=1}^n \lambda_k = 1$, $k=1,2,\cdots,n$. 约束条件 1 表示每个救援人员只能参与一项救援任务,约束条件 2 表示参加救援任务,约束条件 2 表示参加救援任务 R_k 的实际救援人员数量为 d_k' . 在模型中仍含有两个未知的量,分别是各项任务的实际救援人员数量 d_k' 以及各项任务的重要度 λ_k ,其中在求解救援人员综合效益值时也需要任务重要度这一指标,因此在对模型求解之前首先对这两个变量求解,进而优化该模型.

3.2 模型的优化与求解

救援过程中决策者根据现场情况进行决策,但精确确定相关的参数往往很难,通常给出相关 参数的大致范围,如受灾群众人数、受灾面积、救 援人员需求量等,因此采用区间数的方式描述相关参数更容易揭示救援现场的复杂性和客观性.

定义 1 在实数域内,称闭区间[z_1 , z_2]为区间数,特别的,当 z_1 = z_2 时,退化为一个实数.

在救援人员分组过程中,针对各项任务通过 多个区间数进行综合排序是人员分配的重要过程,对区间数排序的方法很多,这里采用可能度方 法进行区间数排序.关于可能度的求解,一些学者 给出了相应的计算模型^[20-23],在文献[24]中证明 了各种计算模型的关系,因此本文结合实际情况 对可能度的定义如下:

定义 2 对于任意两个区间数,设区间数 $h = [h_1, h_2], b = [b_1, b_2],$ 记 $l_h = h_2 - h_1, l_b = b_2 - b_1,$ 则 $h \geqslant b$ 的可能度为

$$p(h \geqslant b) = \max\left\{1 - \max\left(\frac{b_2 - h_1}{l_h + l_h}, 0\right), 0\right\}$$
 (5)

在救援人员分组过程中,决策者根据现场情况给出相关参数的区间数,可以得到各个区间数之间的可能度,进而得到各项救援任务之间的可能度,从而对各项任务的重要程度进行排序,这样就可以根据对任务的排序结果进行救援人员的分配.根据可能度的定义可以得到一些性质,正是这些性质决定了它可以帮助完成人员分配的过程,具体如下:

- $(1)0 \le p(h \ge b) \le 1;$
- $(2) p(h \gg h) = 0.5;$
- (3)在 $h_2 > b_1$ 的前提下, $p(h \ge b) = 0.5$ 当且 仅当 $h_1 + h_2 = b_1 + b_2$, $p(h \ge b) > 0.5$ 当且仅当 $h_1 + h_2 > b_1 + b_2$, $p(h \ge b) < 0.5$ 当且仅当 $h_1 + h_2 < b_1 + b_2$.

决策者针对某项任务进行决策时,会对该项任务的多种因素以区间数的方式进行描述,因此对于各项任务之间的排序过程是考虑多个区间数的.决策者往往考虑根据不同任务的现场情况来揭示该项任务的重要程度,这里给出几个相关的集合量来说明.

决策集:在人员分配过程中,决策者考虑多个不同的决策方案,这里设 $X=\{x_k | k=1,2,\cdots,n\}$ 表示n个决策方案,在人员分组过程中, x_k 表示的就是某一项任务.

参数集:在人员分组过程中,每一个决策方案都是一项任务,每项任务中包含多个影响决策的参数,设 $U = \{u_v | v = 1, 2, \dots, s\}$ 表示对决策影响

的参数集,不同的决策方案在某个参数下的数值 以区间数形式表示: $h_{kv} = [h_{kv}^1, h_{kv}^2]$ 表示决策方案 x_k 的影响参数 u_v 的区间数值.

不同的参数在某项决策中的权重也不尽相同,设 $W = \{w_v | v = 1, 2, \dots, s\}$ 表示不同参数所占的权重,这里有 $\sum_{v=1}^{s} w_v = 1$.

根据可能度的定义,方案 $x_k \ge x_t$ 的可能度为

$$p_{kt} = p(x_k \geqslant x_t) = \sum_{v=1}^{s} w_v p(h_{kv} \geqslant h_{tv})$$
 (6)

两个方案可能度的比较实际上是比较两个方案的优劣性,在人员分组过程中表示的是两项不同任务的重要程度,这里对数值进行规范化处理,定义方案 x_k 的最优分配系数为 λ_k ,其中

$$\lambda_{k} = \sum_{t=1}^{n} p_{kt} / \sum_{k=1}^{n} \sum_{t=1}^{n} p_{kt}$$
 (7)

根据求出的各项任务的最优分配系数 λ_k 可以得到实际分配给各项任务的救援人员数量:

$$d_k' = \lambda_k Y \tag{8}$$

其中 Y 表示目前能够分配的救援人员总量. 在现实应用中计算得到的 d'_k 很可能不是整数,因此取该数值的上下整数值使其成为区间数,分别代表最少实际分配人员与最多实际分配人员,记为 $d'_k = [d'_k, d^*_k]$,其中 d'_k 为 d'_k 向下取整, d'_k 为 d'_k 向上取整.

通过对各项救援任务的最优分配系数以及各项任务实际分配人员数量的计算,对人员分组的模型优化如下:

$$\max y = \sum_{k=1}^{n} \sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{a_i} \lambda_k E_{ij}^k x_{ij}^k$$

s. t.
$$\sum_{k=1}^{n} x_{ij}^{k} = 1$$
; $i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, a_{i}$

$$\sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{a_i} x_{ij}^k \leqslant d_k^u; \quad k=1,2,\cdots,n$$

可以发现该模型是单目标的 0-1 线性规划问题,这种问题已经被证明是 NP-hard 问题,因此是有解的.对于人员分组的实际问题,当人员数量不是很大时,可以采用一些传统的方法进行求解.由于每项任务的实际分配人数为区间数,可以将该问题理解为产销不平衡的运输问题.具体的转

化过程如下:

- (1)每一位救援人员视为一个产地,其产量都 是 1.
- (2)每一项救援任务视为一个销售地,销售地对产品的需求量即为实际分配的人员数量. 以销售地 R_k 为例,其最高需求量为 d_k^u ,最低需求量为 d_k^l .
- (3)产地运往销售地的运费为综合效益值与任务重要度乘积的倒数,即 $\lambda_k E_{ij}^k$ 的倒数,实际计算中可将该倒数统一乘以一个常数.

将该问题理解为运输问题后,可直接通过表上作业法进行求解^[25].在运筹学中,对于运输问题一般是利用表上作业法进行求解,该方法最终求得的结果可能不是唯一的,但是求得的结果却是使得整体的运费最小.因此将救援人员分组问题的模型转化为运输问题进行求解时,得到的结果就是使得整体效益值最大的分组方式,即整体救援效果最佳的人员分组方式.

综上所述,考虑人员数量不足时救援人员分组方法的步骤如下:

- 步骤 1 根据式(7),计算出各项救援任务的 最优分配系数,即任务重要度.
- 步骤 2 根据式(8),计算出实际分配给各项任务的救援人员数量.
- 步骤 3 根据式(1),计算出各救援人员抵达救援现场所花费的时间成本.
- **步骤 4** 根据式(2)、(3),计算出各救援人员 对各项任务提供的综合效益值.
- **步骤 5** 建立该情况下救援人员分组的线性 规划模型(9).
- 步骤 6 将模型转化为产销不平衡运输问题,并根据运输问题的求解方式求出最优解.

在实际计算过程中可根据具体情况将数据进 行标准化以便计算方便.

4 算 例

以地震事件中的医护人员参与救援任务为背景,通过一个算例来说明本文提出的分组方法的合理性和实用性. 假设某地区的地震事件中,医护人员需要参与的救援任务共有3个,分别是:

(1)现场救援任务(R_1):医护人员直接进入 受灾现场对受灾人员现场施救和对伤口进行紧急 处理,该任务的最佳救援时间为 2 h. (2)安置点医疗任务(R₂):医护人员对从现场救回来的受灾人员进行安全救治,包括进行各项手术任务,该任务的最佳救援时间为3h.

(3)受灾现场的卫生防疫任务(R_3):医护人员对灾区进行消毒、防疫等工作,该任务的最佳救援时间为 5 h.

救援人员出发点共有 4 个,其中出发点 A_1 出发人员为 1 人,出发点 A_2 出发人员为 2 人,出发点 A_3 出发人员为 3 人,出发点 A_4 出发人员为 3 人,即共有 9 名救援人员参与救援. 假设同一出发点出发的人员到达现场的时间一致,各出发点抵达现场的预估时间分别为 $t_1=4$ h, $t_2=1$ h, $t_3=3$ h, $t_4=6$ h.

对于上述 3 项救援任务需要救援人员掌握的 救援技能共有 6 项,分别是:急救经验(B_1)、伤病分诊能力(B_2)、临床经验(B_3)、疾病预防能力(B_4)、沟通协调能力(B_5)、灾难危害知识水平(B_6). 采用 1~5 表示各救援人员对各项技能的掌握情况,相关数据如表 1、2 所示.

表 1 救援人员技能评价得分

Tab. 1 Skill evaluation score of rescue personnel

救援	评价得分 P_{ij}^{g}					
人员	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	B_6
P_{11}	5	3	4	4	3	3
P_{21}	2	4	4	3	2	4
P_{22}	4	3	3	5	4	4
P_{31}	3	4	4	3	5	3
P_{32}	3	4	3	2	5	2
P_{33}	4	5	3	2	3	2
P_{41}	4	3	3	4	2	4
P_{42}	5	3	1	2	3	3
P_{43}	2	1	3	2	3	4

表 2 救援任务所需技能的权重

Tab. 2 The skills' weights needed for the rescue mission

任务			权重	$\mathbf{I} w_g^k$		
	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	B_6
R_1	0.5	0.1	0	0	0.3	0.1
R_2	0	0.1	0.5	0	0.3	0.1
R_3	0	0	0	0.5	0.3	0.2

对于上述 3 项任务,决策者需要现场考虑的和救援任务有关的参数包括任务所需救援人员数量 (u_1) 、任务困难程度 $(u_2$,从易到难等级为 $1\sim$

5)、任务涉及区域受灾群众密度(u_3 /(人• km^2))、任务涉及的面积(u_4 / km^2). 将这4个参数作为实际分配救援人员的影响参数,符号表示为参数集 $U = \{u_1, u_2, u_3, u_4\}$,各个参数的权重为 $W = \{0.4, 0.2, 0.3, 0.1\}$,具体的区间数和含义如表3所示.

表 3 救援任务影响参数列表

Tab. 3 Rescue mission impact parameter list

任务	u_1	u_2	$u_3/(人 \cdot \mathrm{km}^{-2})$	u_4/km^2
R_1	[5,8]	[3,5]	[20,30]	[20,50]
R_2	[4,6]	[2,3]	[40,50]	[10,20]
R_3	[2,6]	[2,4]	[10,15]	[20,50]

基于上面给出的实际情况对该医护人员的分组计算过程如下:

(1)根据步骤 1 和步骤 2,分别计算出各项救援任务的最优分配系数和实际分配给各救援任务的人员数量.首先以各项任务为各个决策方案并结合表 3 中的数据得出各个方案优于其他方案的可能度,用矩阵 P 表示,根据可能度的定义知道,无须对表 3 中的各项数据进行标准化,因此得到具体数值如下:

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} 0.500 & 0 & 0.620 & 0 & 0.842 & 8 \\ 0.380 & 0 & 0.500 & 0.633 & 3 \\ 0.157 & 2 & 0.366 & 6 & 0.500 & 0 \end{pmatrix}$$

然后计算出各项任务的最优分配系数,并得出实际分配给各项任务的人员数量,即 λ_k 和 d_k' ,结果为 λ_1 =0.4362, λ_2 =0.3363, λ_3 =0.2275, d_1' =3.9258, d_2' =3.0267, d_3' =2.0475.此时所求得的最优分配系数实际上为各项任务的重要度,实际分配人员数量通过上下取整使其成为区间数.

- (2)根据步骤 3 求出各救援人员抵达现场所消耗的时间成本,其中式(1)的 λ_k 即为上面所求的 λ_k ,由于人员分配过程中只是为了比较各个人员的效益值大小,因此为了使数值明显,可将上述 λ_k 统一扩大 50 倍,如表 4 所示.
- (3)根据步骤 4 计算出各救援人员提供的综合效益值,具体数据如表 5 所示.
- (4)根据分组步骤 5、6 对该问题进行建模并转化为产销不平衡运输问题. 其中销售地 R_1 、 R_2 的最高需求量为 4,最低需求量为 3;销售地 R_3 的最高需求量为 3,最低需求量为 2. 该运输问题的情况如表 6 所示.

表 4 时间成本 Tab. 4 Time cost

出发点		$f_k(t)$	
山及思	R_1	R_2	R_3
A_1	0.6986	0.453 2	0.239 9
A_2	0.050 5	0.036 6	0.023 7
A_3	0.423 4	0.288 8	0.167 1
A_4	1.228 9	0.707 5	0.316 6

表 5 救援人员对各项任务的综合效益值 Tab. 5 The comprehensive utility value of various rescue personnel on various mission

救援人员		综合效益值 E	; j
双仮八贝	R_1	R_2	R_3
P_{11}	5.725 7	7.722 9	14.589 4
P_{21}	47.524 8	92.896 2	122.362 9
P_{22}	77.227 7	92.896 2	189.873 4
P_{31}	8.738 8	14.542 9	21.544 0
P_{32}	8.502 6	12.465 4	17.354 9
P_{33}	8.502 6	10.734 1	13.764 2
P_{41}	2.685 3	3.957 6	10.739 1
P_{42}	3.254 9	2.826 9	7.896 4
P_{43}	1.953 0	4.0989	8.528 1

表 6 产销不平衡运输问题

Tab. 6 Transportation problem of unbalanced production-marketing

产地		运费				
) де	R_1	R_2	R_3	· 产量		
P_{11}	4.003 9	3.850 3	3.012 9	1		
P_{21}	0.482 4	0.320 1	0.359 2	1		
P_{22}	0.296 9	0.320 1	0.2315	1		
P_{31}	2.623 4	2.044 7	2.040 3	1		
P_{32}	2.696 3	2.385 4	2.5328	1		
P_{33}	2.696 3	2.770 2	3.193 5	1		
P_{41}	8.537 3	7.515 2	4.093 1	1		
P_{42}	7.043 3	10.5187	5.5666	1		
P_{43}	11.738 5	7.254 5	5.154 3	1		

通过表上作业法对上述产销不平衡问题进行 求解,得出最优分组结果为 X^* .

根据前面的描述知道通过表上作业法求得的结果即为最优解,因此可知救援人员最终分组结果为医护人员 P_{22} 、 P_{32} 、 P_{42} 负责现场救援任务;医护人员 P_{11} 、 P_{33} 、 P_{41} 负责安置点医疗任务;医护人员 P_{21} 、 P_{31} 、 P_{43} 负责卫生防疫任务.

另外,针对该问题做了一组对比试验,对比试验,不采用最优分配系数对各项任务的重要度进行排名,而是直接根据各项任务实际需求相应地缩减人员分配量.即默认各项任务的重要度一样,同样的数据得到的结果为 X*.

$$\boldsymbol{X}^* = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad \boldsymbol{X}_1^* = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

对这两组试验结果进行对比,根据模型的特点,运输模型中,总体运费越小,综合效益值越大,采用最优分配系数得到的结果的总体运费为31.726,不采用最优分配系数得到的结果的总体运费为38.921.因此,采用最优分配系数对任务重要度排序之后得到的结果更优,能更多地降低受灾地区的损失.

5 结 语

在应急救援人员分组过程中,针对救援前期的人员数量不足以满足所有任务的人员需求及救援人员执行救援任务需要消耗一定时间的问题,本文首先采用时间成本的方式具体量化了救援人员消耗的时间对救援任务的影响,然后基于影响各项任务的具体参数的区间数,通过可能度的方式对各项任务进行排序,得到了各项任务的最优分配系数,从而得出实际分配给各项任务的人数.在此基础上,以整体救援效果最佳为目标建立了0-1的二次规划模型,并利用运输问题的思想对该模型进行了求解,最后通过一个算例证明了本文方法的有效性.

本文方法弥补了传统分组方法中人员充足的假设,得到的结果更符合人员分组的实际需求.不足的是本文方法在计算各项任务的最优分配系数时增大了整体的计算量,同时在最终的分组计算过程中存在不唯一解,因此在接下来的研究中将逐渐克服这些问题,同时针对模型的特点设计出高效的求解方法.

参考文献:

樊治平,刘

Chinese)

[8]

- [1] SAMPSON S E. Optimization of volunteer labor assignments [J]. Journal of Operations Management, 2006, 24(4):363-377.
- [2] FALASCA M, ZOBEL C. An optimization model for volunteer assignments in humanitarian organizations [J]. Socio-Economic Planning Sciences, 2012, 46(4):250-260.
- [3] TOPALOGLU S. A multi-objective programming model for scheduling emergency medicine residents [J]. Computers and Industrial Engineering, 2006, 51(3):375-388.

媛,等. 突发事件应急救援人

洋,袁

- 员的分组方法研究[J]. 运筹与管理,2012,21(2):1-7.

 FAN Zhiping, LIU Yang, YUAN Yuan, et al.

 Study on the grouping method for rescue workers in the emergency rescue [J]. Operations Research and Management Science, 2012, 21 (2):1-7. (in
- [5] REN Yuqing, KIESLER S, FUSSELL S R. Multiple group coordination in complex and dynamic task environments: interruptions, coping mechanisms, and technology recommendations [J].

 Journal of Management Information Systems, 2008, 25(1):105-130.
- [6] CHEN Rui, SHARMAN R, RAO H R, et al. Coordination in emergency response management [J]. Communications of the ACM, 2008, 51(5):66-73.
- [7] 叶 鑫,王 雪,仲秋雁. 考虑协同效应的突发事件 救援人员分组方法[J]. 运筹与管理,2015,24(1): 237-245. YE Xin, WANG Xue, ZHONG Qiuyan. Grouping method of rescuers in emergency rescue considering the synergistic effect [J]. Operations Research and
 - Chinese) 康 凯,陈 涛,袁宏永. 多层级应急救援协同调度 模型[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2016,

Management Science, 2015, 24 (1): 237-245. (in

- 56(8):830-835,843.

 KANG Kai, CHEN Tao, YUAN Hongyong.

 Cooperative scheduling model for multi-level emergency response teams [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2016, 56(8): 830-835,843. (in Chinese)
- [9] 袁 媛,樊治平,刘 洋. 突发事件应急救援人员的派遣模型研究[J]. 中国管理科学, 2013, 21(2):

152-160.

YUAN Yuan, FAN Zhiping, LIU Yang. Study on the model for the assignment of rescue workers in emergency rescue [J]. Chinese Journal of Management Science, 2013, 21 (2): 152-160. (in Chinese)

- [10] 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 Li, GU Jun, MA Zheng, et al. Routing optimization of cross-regional emergency rescue considering differentiated disaster impacts [J]. Control and Decision, 2017, 32 (5): 879-884. (in Chinese)
- [11] YANG Zhaosheng, ZHOU Huxing, GAO Xueying, et al. Multiobjective model for emergency resources allocation [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2013:538695.
- [12] 葛洪磊,刘 南,张国川,等. 基于受灾人员损失的多受灾点、多商品应急物资分配模型[J]. 系统管理学报, 2010, 19(5):541-545.
 GE Honglei, LIU Nan, ZHANG Guochuan, et al. A model for distribution of multiple emergency commodities to multiple affected areas based on loss of victims of calamity [J]. Journal of Systems & Management, 2010, 19(5):541-545. (in Chinese)
- [13] CHEN Daqiang, MIAO Yaping, LIU Nan. Resource allocation model with emergency response cost constraints in emergency logistics [C] // Logistics: The Emerging Frontiers of Transportation and Development in China. Chengdu: ASCE, 2008: 1197-1203.
- [14] 李永义,周正华,李伯权,等. 基于区间数可能度的 地震应急物资分配优化方法[J]. 应用基础与工程 科学学报, 2015, 23(3):637-644. LI Yongyi, ZHOU Zhenghua, LI Boquan, et al. Optimization method for earthquake emergency material distribution based on possibility degree of interval numbers [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2015, 23(3):637-644. (in Chinese)
- [15] 陈莹珍,赵秋红. 基于公平原则的应急物资分配模型与算法[J]. 系统工程理论与实践, 2015, 35(12):3065-3073.
 CHEN Yingzhen, ZHAO Qiuhong. The model and algorithm for emergency supplies distribution based on fairness [J]. Systems Engineering Theory &
 - Practice, 2015, 35(12):3065-3073. (in Chinese)
 [16] FIEDRICH F, GEHBAUER F, RICKERS U.

- Optimized resource allocation for emergency response after earthquake disasters [J]. **Safety Science**, 2000, **35**(1/2/3):41-57.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 俞武扬. 基于时间满意度的应急物资中转运输模型[J]. 系统管理学报,2013,22(6):882-887.
 YU Wuyang. Transshipment model for emergency materials based on time satisfaction criterion [J].
 Journal of Systems & Management, 2013, 22(6): 882-887. (in Chinese)
- [20] FACCHINETTI G, RICCI R G, MUZZIOLI S. Note on ranking fuzzy triangular numbers [J]. International Journal of Intelligent Systems, 1998, 13(7):613-622.
- [21] 达庆利,刘新旺. 区间数线性规划及其满意解[J]. 系统工程理论与实践,1999,19(4):3-7. DA Qingli, LIU Xinwang. Interval number linear programming and its satisfactory solution 「J].

- Systems Engineering Theory & Practice, 1999, **19**(4):3-7. (in Chinese)
- [22] 张吉军. 区间数的排序方法研究[J]. 运筹与管理, 2003(3):18-22.

 ZHANG Jijun. Research on method for ranking interval numbers [J]. **Operations Research and Management Science**, 2003(3):18-22. (in Chinese)
- [23] 李德清,谷云东. 一种基于可能度的区间数排序方法[J]. 系统工程学报,2008,23(2):243-246.

 LI Deqing, GU Yundong. Method for ranking interval numbers based on possibility degree [J].

 Journal of Systems Engineering, 2008, 23(2):243-246. (in Chinese)
- [24] 高峰记.可能度及区间数综合排序[J].系统工程理论与实践,2013,33(8):2033-2040.
 GAO Fengji. Possibility degree and comprehensive priority of interval numbers [J]. Systems Engineering Theory & Practice, 2013, 33(8): 2033-2040. (in Chinese)
- [25] 王竹芳,缪文清. 一种求解救灾物资运输问题的改进解法[J]. 运筹与管理,2012(1):142-146,179. WANG Zhufang, MIAO Wenqing. An improved algorithm to solve the transportation problems of relief materials [J]. **Operations Research and Management Science**, 2012(1):142-146,179. (in Chinese)

Personnel grouping method of emergency rescue based on optimal allocation coefficients

LI Huaiming*, WANG Lianging, SONG Fangfang

(Faculty of Management and Economics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: A personnel grouping method based on optimal allocation coefficients is proposed for the rescue personnel grouping problem in early stages of emergency rescue mission. Considering the factors that can affect the urgency of various rescue missions, the optimal allocation coefficients are derived using the theory of the interval numbers possibility degree, to reduce the number of personnel assigned to various rescue missions. Furthermore, both the time cost of rescue personnel arriving at the rescue site and the basic utility value of rescue personnel during rescue missions are taken into account to construct the rescue personnel grouping model to achieve the best overall rescue performance. The best grouping way of rescue personnel is obtained by solving the grouping model. Finally, the feasibility and effectiveness of the proposed method are analyzed and verified by an example.

Key words: emergency rescue; personnel grouping; time cost; optimal allocation coefficients