

# 救援物资跨区域调度双层规划模型<sup>①</sup>

——考虑幸存者感知满意度和风险可接受度

曹策俊<sup>1,2</sup>, 李从东<sup>2,3</sup>, 屈挺<sup>3</sup>, 杨琴<sup>4</sup>

(1. 重庆工商大学商务策划学院, 重庆 400067; 2. 天津大学管理与经济学部, 天津 300072;  
3. 暨南大学智能科学与工程学院, 珠海 519070; 4. 四川师范大学商学院, 成都 610101)

**摘要:** 为减少幸存者的痛苦、提高灾害响应效率和降低各种损失, 聚焦于跨区域救援物资反应性调度主从优化问题。综合考虑救援物资调度与分配网络中不确定供应-需求-行程时间、公平性分配原则、幸存者多层次异质性与风险可接受度限制、利益相关者的层级或纵向“府际”关系、需求可拆分、多灾点、多供应点和多运输模式等特征; 构建了上层最小化加权行程时间总和, 下层最大化加权感知满意度的双层整数规划模型。通过分析模型的特征, 设计了以互补松弛条件为基础的原始-对偶算法对其进行求解。最后, 以汶川地震为算例, 验证了所提出模型与求解策略的可行性与有效性。

**关键词:** 救援物资跨区域调度; 幸存者感知满意度; 风险可接受度; 双层规划模型; 原始-对偶算法

中图分类号: F272.3 文献标识码: A 文章编号: 1007-9807(2019)09-0111-16

## 0 引言

近年来, 大规模自然灾害造成的人员伤亡、财产或经济损失及环境破坏尤为突出<sup>[1,2]</sup>。然而, 大部分损失并非灾害本身直接造成, 而是由于缺乏有效的、合理的和恰当的灾害响应策略导致<sup>[3]</sup>。例如, 以不变应万变的应急措施未有效刻画不确定性因素(如需求、供应和行程时间)导致应急预案实用性较低, 以物为核心的分配策略缺乏考虑公平原则和幸存者感知而导致灾害管理社会目标难以实现, 以层级内部协作为焦点的救援物资调度策略缺乏考虑利益相关者间的纵向“府际”关系导致灾害响应效率较低。因此, 为减少/降低大规模自然灾害带来的严重损失/后果, 在数量有限且不充分供应的情形下, 如何综合考虑纵向“府际”

关系和幸存者风险可接受度两个因素, 通过优化不确定条件下救援物资分配策略, 提高灾害响应效率和衡量公平性的幸存者感知满意度是当前面临的挑战和契机。

国内外学者对灾害运作管理问题进行了大量有意义的探索, 并取得了较为丰硕的成果<sup>[1,2,4]</sup>。从不确定条件下救援物资调度问题、幸存者感知满意度刻画和双层规划模型构建三个方面对文献进行梳理。大规模自然灾害发生后, 救援物资需求、供应和行程时间等具有高度不确定性。为了应对/处理这些不确定性, 引入了生产制造/工程管理领域的反应性决策方法。例如, 文献[5]在考虑震后物资需求模糊性和动态性、以及路网动态修复的基础上, 研究了面向应急物资配送的模糊动态定位-路径优化问题。文献[6]探究了路网、物

① 收稿日期: 2017-05-23; 修订日期: 2018-01-15。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71904021; 71672074); 重庆市社会科学规划项目(2019QNGL27); 重庆市教委科学技术研究项目(KJQN201900830); 重庆工商大学校内科研项目(1951025); 重庆工商大学引进高层次人才科研启动经费资助项目(1955011); 广东省哲学社会科学规划资助项目(GD15CGL07); 四川省教育厅重点资助项目(14ZA0026)。

作者简介: 曹策俊(1990—), 男, 四川南充人, 讲师, 博士。Email: caocejun0601@tju.edu.cn

资供应和需求动态变化情况下,考虑最小分配率和属地管理原则的应急物流选址-联运主从优化问题.文献[7]构建了综合考虑多周期应急物资模糊需求、路网损毁与修复和车辆行驶时间因素的模糊动态设施定位-路线规划问题.文献[8]研究了受影响区域信息不完全条件下救援物资动态需求预测和管理问题.文献[9]探究灾害响应初始救援阶段需求信息不完全情况下的物资供应和需求平衡问题.文献[10]构建了考虑接受治疗或救助时间不确定条件下的伤员救援多目标组合优化模型.

在幸存者感知满意度刻画方面,文献[11, 12]指出在救援物资不充分供应情形下需考虑幸存者间的分配公平性.同时,文献[13, 14]明确指出救援物资分配公平性可用幸存者对数量和行程时间的感知满意度来衡量,即可将幸存者感知满意度视为公平性结果的测量指标.在救援物资分配数量公平性维度,文献[11]运用实际与理想需求满足率的距离来衡量分配公平性.文献[12, 15]用相对需求比例函数来衡量救援物资分配数量层面的公平性.文献[16-18]指出可采用需求满足率或满意率来刻画救援物资数量分配公平性.在救援物资时间公平性维度,文献[14, 15, 19]采用前景理论来刻画灾民在救援物资响应时间层面的公平性.文献[20]引入与不满意需求相关的负效用函数来计算运输时间的公平性.文献[21]通过最小化行驶时间总和来衡量时间公平性.文献[22]利用救援时间提前率来刻画等待时间满意度.

在救援物资调度双层规划模型构建方面,郑斌和 Camacho-Vallejo 等指出灾害情境下的利益相关者间存在典型的层级或纵向“府际”关系<sup>[23, 24]</sup>.文献[6]构建了上层最大化物资运送时间满意度,下层最大化物资分配公平性的双层规划动态模型.文献[23]针对震后初期应急物流系统优化问题,建立了一个上层最小化有限的应急物资配送时间,下层最大化物资分配公平性的双层规划模型.文献[24]构建的救援物资分配双层规划模型中,上层决策目标函数为最小化救援物资运输总的响应时间,下层决策目标函数为最小化从其他国家和国际救援组织的运输成本.文献[25]在上层决策中考虑了决策者最大化覆盖率

和最小化建设成本的优化问题,在下层决策中考虑用户均衡因素.文献[26]将应急救援响应和车辆总花费时间、未满足需求惩罚作为上层决策的目标,将车辆再分配所耗费的时间作为下层决策的目标,进而构建应急车辆分配与再分配的双层规划模型.文献[27]构建了大规模洪涝灾害后避难所选址的双层规划模型,上层决策目标为最小化疏散时间总和,下层决策目标为最小化灾民到避难所最少耗费时间.文献[28]针对多受灾点应急资源竞争和分配不均问题,构建考虑及时性和公平性的双层规划模型.

总体而言,国内外学者从不同视角对灾害救援物资管理进行了有意义的探索,并取得了较为丰硕的成果,但已有成果在以下几个方面存在缺口,仍需继续深入研究.第一,大多数文献关注救援物资需求、路网、车辆路径、车辆行驶时间、伤员接受治疗时间和综合信息的不确定性或模糊性或不完全性,且聚焦于属地管理原则下的救援物资调度问题;综合考虑救援物资供应、需求和行程时间不确定因素的跨区域救援物资反应性调度研究相对缺乏.第二,通常从救援物资需求数量或行程时间单维度衡量或刻画公平性原则,多考虑理性需求、同质幸存者,未明确地综合考虑幸存者感知满意度和风险可接受度;考虑幸存者理性与非理性需求、多层次异质性、多维度感知满意度的集成研究相对较少.第三,大多数成果关注集中决策情形下未考虑利益相关者层级关系的供应点-分配中心-需求点间的救援物资调度与分配问题;以分配中心-需求点-受影响具体区域为主线,考虑需求可拆分和纵向“府际”关系,聚焦多灾点多需求点多运输模式下的救援物资主从优化调度集成问题亟待深入研究.此外,尽管文献[5-10]考虑了灾害运作管理中的不确定性,文献[6]考虑了救援物资最小分配率,文献[11-22]将公平性原则考虑到救援物资反应性调度模型中,文献[6, 23-28]考虑了利益相关者间的层级关系,但均有差异,且均未同时考虑这些问题.

针对上述问题,考虑幸存者感知满意度和风险可接受度的跨区域救援物资反应性调度主从优化问题具有以下特点:1) 以分配中心-需求点-受影响具体区域为主线,考虑救援物资反应性调度和分配中的理性与非理性需求;2) 在需求点间的

空间距离相对较短的情形下,救援物资调度和分配可跨行政区域;3)需求点和受影响具体区域的需求是可拆分的,即可多次累计满足;4)救援物资需求、供应和行程时间不确定,可通过区间数表示;5)幸存者异质性可从需求点和受影响具体区域两个维度来衡量;6)受影响具体区域分为搜索-救援区域、临时治疗区域和临时居住区域三种类型;7)异质性可通过不同权重衡量;8)利益相关者间存在典型的层级或纵向“府际”关系;9)文献[11,20]明确指出统一定义和刻画救援物资分配过程中的公平性比较困难,但文献[13,14,29]尝试用感知满意度来测量公平性的结果;继承并拓展这些观点,提出幸存者感知满意度的概念来衡量救援物资分配公平性的结果;幸存者感知满意度是指决策者在考虑幸存者需求的情况下,从救援物资数量和行程时间两个维度对灾害响应策略绩效评价的结果。10)文献[30]表明学术界对风险可接受度的概念并未形成统一认识,并指出其在可忍受上限原则下被界定为系统中利益相关者的风险不能超过可忍受的上限;文献[13]提出了救援物资数量最低可接受程度的概念;在文献[13]和文献[30]的基础上将风险可接受度定义为,在灾害运作管理过程中,幸存者对救援物资期望数量被满足的最低可接受比例/率。基于此,构建了上层最小化加权行程时间总和,下层最大化系统整体加权幸存者感知满意度总和的双层规划模型;并根据模型的特征,设计了以互补松弛定理为基础的原始-对偶算法对此模型进行求解。

## 1 问题描述

### 1.1 救援物资反应性调度与分配网络

灾害运作管理可分为预防、准备、响应和恢复四个阶段<sup>[1,24]</sup>。根据幸存者心理感知状态、需求程度等方面的差异,响应过程可划分为黄金救援、缓冲救援和应急恢复阶段<sup>[13,29]</sup>。本研究仅聚焦于黄金救援阶段。灾害情境下的反应性决策是指灾后基于对应急救援过程中实际变化情况的掌握,运用恰当的在线调度策略动态调整基准救援计划,进而保证救援目标的顺利和有效实现<sup>[24]</sup>。针对救

援物资反应性调度问题,设计恰当且有效的分配网络是灾害响应的关键任务。本研究考虑从救援物资分配中心(relief distribution centers,RDCs)到救援物资需求点(relief demand points,RDPs),再到受影响具体区域(affected specific areas,ASAs)的应急物流活动。

具体而言,RDCs是指接收来自各供应点(如企业)的救援物资储存点,通常由省级或市级决策者控制。例如,在汶川地震中,成都北站、双流机场和军用机场作为分配中心服务于灾区。其与灾害发生地的距离较远,设在非(或弱)受影响区域内,需再次通过交通工具将救援物资运送至各需求点。RDPs是指受影响区域内接收救援物资或发出需求信号的临时点,通常由市级或县级决策者控制。例如,汶川地震中汶川县、北川县和茂县等属于典型的重要需求点。在黄金救援阶段,假定其位置固定或变化较小(可忽略不计)。ASAs是指大规模自然灾害发生后,幸存者的主要聚集区域,其对各级决策者制定的响应策略(如救援物资调度)进行评价和信息反馈。例如,安置受轻伤或未受伤幸存者的临时庇护场所(临时居住区域)、受伤程度未知的幸存者现场救援区域(搜索-救援区域)和受重伤幸存者治疗/处理区域(临时治疗区域)。在救援物资反应性调度决策制定过程中,利益相关者(决策、供给和需求主体)间存在纵向“府际”或层级关系,其属于典型的双层优化问题<sup>[23,24]</sup>。

### 1.2 救援物资反应性调度问题描述

救援物资反应性调度问题可采用经典三元组方法( $\alpha/\beta/\gamma$ )来描述。其中, $\alpha$ 域描述资源环境, $\beta$ 域描述任务特征和约束, $\gamma$ 域描述系统调度目标。

#### 1) 资源环境( $\alpha$ 域)

救援物资调度和分配分为两个阶段。第1阶段供应主体根据省级或市级决策者制定的灾害响应方案从RDCs向RDPs运送恰当数量的救援物资;第2阶段市级或县级政府根据幸存者的受伤程度将救援物资分配给临时居住、临时治疗和搜索-救援区域。特别地,协调者或具有更高权利的决策者针对这三类幸存者所需救援物资实行跨区域分配。救援物资分配中心供应能力可能不同,救援物资需求点间的幸存者是异质的(不同受灾程度)不同类型的受影响具体区域是异质的(不同

受伤程度).这样,RDCs,RDPs和ASAs共同决定了问题的规模.此外,对各决策者和作为需求主体的幸存者而言,感知满意度的衡量方式属于公共信息且已知.决策者设计的衡量方式主要用于在救援物资分配方案制定过程中估计幸存者感知满意度.

2) 任务特征和约束( $\beta$ 域)

对以系统整体加权幸存者感知满意度总和最大化为目标的下层优化问题而言,关注从RDPs到ASAs的救援物资分配问题.其主要特征和约束包括,救援物资运输量平衡性要求,不充分供应条件,RDCs和ASAs需求总量的平衡性限制,ASA内幸存者风险可接受度约束,决策变量的非负和取整约束.对以加权行程时间总和最小化为目标的上层优化问题而言,关注从RDCs到ASAs的救援物资运输和分配问题.其主要特征和约束包括,RDCs的库存和容量限制,不充分供应约束,RDP内幸存者风险可接受度限制,决策变量的非负和取整约束.

3) 系统调度目标( $\gamma$ 域)

对上层规划问题而言,中央或省市级具有较高权利的决策者需确定从RDCs向RDPs运输的救援物资数量,关注如何提高系统整体响应效率.上层优化模型的目标函数为最小化加权行程时间总和(包括从RDCs到RDPs的运输时间和从RDPs到ASAs的分配时间).权重从需求点受灾和幸存者受伤程度两个层面体现了异质性.对下层规划问题而言,市县级具有相对较低权利的决策者需要确定从RDPs向ASAs分配的救援物资数量,关注如何制定相对公平的分配方案提高受影响具体区域所有幸存者的感知满意度.下层优化模型的目标函数为最大化加权幸存者感知满意度总和.权重体现了救援物资分配时间的差异性和幸存者在受伤程度方面的异质性.特别地,仅将RDPs与ASAs间的行程时间作为幸存者感知满意度测量的权重(体现时间差异性)的原因主要包括:① 地方政府或低层级决策主体仅能对从RDPs到ASAs的救援物资分配策略进行决策,没有权利决定救援物资到达RDPs的时刻;② 幸存者与地方政府或低层级决策主体接触最频繁、最直接,其能相对较快地获得救援物资到达RDPs的时间信息,并将其作为心理参考或比较的零时

刻;③ 由于幸存者感知满意度测量或估计的主体是地方政府或低层级决策主体,故可仅考虑从RDPs到ASAs的行程时间对幸存者产生的影响,即假设不考虑从RDCs到RDPs的行程时间对幸存者产生的影响.具体而言,采用相对需求比例函数来衡量幸存者在救援物资数量层面的感知满意度,差异性和异质性作为救援物资数量感知满意度的权重,共同决定了幸存者感知满意度总和.

## 2 救援物资反应性调度双层规划模型构建

### 2.1 参数及符号说明

$i \in I$  表示任意的RDCs,数量记为 $\bar{i}$ ;  $j \in J$  表示任意的RDPs,数量记为 $\bar{j}$ ;  $k \in K$  表示任意的ASAs,数量记为 $\bar{k}$ ;  $m \in M$  表示任意的运输方式,数量记为 $\bar{m}$ ,且 $M = \{1, 2, 3\} = \{\text{海}, \text{陆}, \text{空}\}$ ;  $t_{ijm}^1$  表示从RDC $i$ 向RDP $j$ 通过方式 $m$ 运输每单位救援物资所耗的平均时间,  $t_{jkm}^2$  表示从RDP $j$ 向ASA $k$ 通过方式 $m$ 分配每单位救援物资所花的平均时间;  $D_j^1$ 和 $D_k^2$ 分别表示RDPs和ASAs的救援物资需求数量,且 $D_j^1 = D_{jr}^1 + D_{je}^1$ ,  $D_k^2 = D_{kr}^2 + D_{ke}^2$ ; 其中, $D_{jr}^1$ 和 $D_{kr}^2$ 表示理性需求, $D_{je}^1$ 和 $D_{ke}^2$ 表示非理性需求;  $\eta_j^1$ 和 $\eta_k^2$ 分别表示RDP和ASA内幸存者对获得救援物资数量的可接受程度,其取值上限可由总库存和总需求数量共同决定;  $W_j$ 和 $W_k$ 分别表示RDP和ASA的权重,前者可根据需求点的受灾程度和其他因素来计算,后者可通过幸存者的受伤级别来确定;  $Q_i$ 表示在实施或执行应急决策时各RDC的库存数量.

决策变量, $x_{ijm}$ 表示从RDC $i$ 向RDP $j$ 通过方式 $m$ 运输的救援物资实际数量, $y_{jkm}$ 表示从RDP $j$ 向ASA $k$ 通过方式 $m$ 分配的救援物资实际数量.

### 2.2 基本假设

假设1 救援物资分配中心、需求点和受影响具体区域的数量和位置已知,可从国家应急管理预案中或借助先进灾害技术获取相关信息.

假设2 救援物资是受影响具体区域共同需要的,均需通过RDCs进行管理和分配;已按必要结构进行配套,每人仅分配单套成品,且考虑不充

分供应。

假设 3 虽然救援物资运输方式有限(海、陆和空),但对应可利用轮船、车辆和飞机数量是充足的。

假设 4 救援物资需求点和受影响具体区域是幸存者的聚集地,其救援物资需求包括理性与非理性两个部分,考虑需求可拆分,即可多次累计满足。

假设 5 受影响具体区域救援物资需求信号主要从临时居住区域、临时治疗和搜索-救援区域发出,且救援物资可进行跨区域分配。

假设 6 考虑幸存者异质性,体现在救援物资需求点和受影响具体区域两个层面。

假设 7 在某种程度上,不确定的救援物资需求和供应数量、及行程时间可通过区间数来刻画。

假设 8 救援物资从 RDCs 出发的时间点被记为零时刻,且不考虑从不同供应点出发的初始时刻的差异性(或差异性较小,可忽略不计)。

假设 9 在黄金救援阶段,根据综合信息评估结果,救援物资调度方案仅发生单次调整。

### 2.3 双层离散型线性规划模型构建

综上所述,考虑幸存者感知满意度和风险可接受度的跨区域救援物资反应性调度问题可被刻画为双层整数线性规划模型。为清晰建立双层规划模型,从上层和下层规划问题两个部分分别进行描述。

上层规划问题:确定从 RDCs 向 RDPs 运输的救援物资数量,关注提高系统整体响应效率;

决策变量:  $x_{ijm} (\forall i, j, m)$  为非负整数变量;

目标函数和约束条件见公式(1)~公式(6)。

$$\min \sum_{x_{ijm}} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{m \in M} W_j \cdot x_{ijm} \cdot t_{ijm}^1 + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{m \in M} W_k \cdot y_{jkm} \cdot t_{jkm}^2 \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{j \in J} \sum_{m \in M} x_{ijm} = Q_i / \forall i \in I / \quad (2)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{m \in M} x_{ijm} \leq \text{Cap}_i / \forall i \in I / \quad (3)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{m \in M} x_{ijm} \leq D_j^1 / \forall j \in J / \quad (4)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{m \in M} x_{ijm} \geq \eta_j^1 D_j^1 / \forall j \in J / \quad (5)$$

$$x_{ijm} \in N / \forall i \in I, j \in J, m \in M / \quad (6)$$

下层规划问题:确定从 RDPs 向 ASAs 分配的

救援物资数量,关注如何提高幸存者感知满意度;

决策变量:  $y_{jkm} (\forall j, k, m)$  为非负整数变量。

目标函数和约束条件见公式(7)~公式(12)。

$$y_{jkm} \in \arg \max \sum_{y_{jkm}} \sum_{k \in K} \sum_{j \in J} \sum_{m \in M} W_k \cdot y_{jkm} / (D_k^2 \cdot t_{jkm}^2) \quad (7)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{k \in K} \sum_{m \in M} y_{jkm} = \sum_{i \in I} \sum_{m \in M} x_{ijm} / \forall j \in J / \quad (8)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{m \in M} y_{jkm} \leq D_k^2 / \forall k \in K / \quad (9)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{m \in M} y_{jkm} \geq \eta_k^2 D_k^2 / \forall k \in K / \quad (10)$$

$$\sum_{j \in J} D_j^1 = \sum_{k \in K} D_k^2 \quad (11)$$

$$y_{jkm} \in N / \forall j \in J, k \in K, m \in M / \quad (12)$$

因此,式(1)~式(12)定义了救援物资反应性调度双层整数线性规划模型。式(1)表示上层规划问题的目标函数为最小化加权行程时间总和;式(2)定义了每个 RDC 的救援物资实际供应数量等于其库存数量;式(3)给出了救援物资分配中心的容量限制条件;式(4)和式(9)分别刻画了任意 RDPs 和 ASAs 的实际接收数量不超过其需求量,体现了不充分供应的情形;式(5)和式(10)分别确保了需求点和受影响具体区域的幸存者都能得到救援物资,确保 RDPs 和 ASAs 的幸存者获得的实际数量不低于其可接受量;式(6)和式(12)定义了所有的决策变量;式(7)表示下层规划问题的目标函数为最大化系统整体加权幸存者感知满意度总和;式(8)体现了 RDPs 运输量需要满足物资平衡性要求,即从 RDCs 接收的救援物资总量等于分配给 ASAs 的总量;式(11)表明在 RDPs 与 ASAs 的幸存者的救援物资需求数量相等。

### 3 双层整数线性规划模型求解策略设计

双层规划模型是受斯坦伯格博弈理论的启发而提出,属于主从优化问题<sup>[31,32]</sup>。此模型描述了具有主从递阶结构的系统优化问题,上层优化问题的目标函数和约束条件不仅与上层决策变量相关,而且还依赖于下层优化问题的最优解。同时,下层优化问题的最优解又受上层决策变量的影响。双层规划模型的求解思路可分为间接和直接法。前者包括原始-对偶算法、k 次最好法、KKT 条件等,后者包括诸如遗传算法、粒子群算法、模拟植物生长算法等的智能或启发式算法。上述构建

的双层整数线性规划模型属于非凸规划,且与文献[24]建立的模型相似,可采用间接求解方法对其进行变换.

### 3.1 双层规划模型变换策略

借鉴并拓展文献[24]的求解思路,采用对偶理论与原始-对偶最优性条件替代下层优化问题,进而将双层规划转化为单层规划模型.固定上层决策变量  $x_{ijm}$ , 下层优化问题可被描述为典型的运输问题.此外,需将约束条件(10)放松为  $y_{jkm} \geq 0$ ,引入  $b_j(\forall j \in J)$ 、 $c_k(\forall k \in K)$  和  $d_k(\forall k \in K)$  分别作为约束条件式(8)~式(10)的对偶变量.因此,下层规划的对偶问题见式(13)~式(17).

$$\min_{b_j, c_k, d_k} \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} \sum_{m \in M} x_{ijm} \cdot b_j + \sum_{k \in K} D_k^2 \cdot c_k + \sum_{k \in K} (-\eta_k^2 \cdot D_k^2) \cdot d_k \quad (13)$$

$$\text{s.t.} \quad b_j + c_k - d_k \geq W_k / (D_k^2 \cdot t_{jkm}^2) \quad (14)$$

$$b_j \geq 0 / \forall j \in J \quad (15)$$

$$c_k \geq 0 / \forall k \in K \quad (16)$$

$$d_k \geq 0 / \forall k \in K \quad (17)$$

同时,为确保获得最优解,结合互补松弛条件,可将原双层整数线性规划模型等价变换为式(18)~式(35)定义的单层混合整数非线性规划模型.

$$\min_{x_{ijm}, y_{jkm}, b_j, c_k, d_k} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{m \in M} W_j \cdot x_{ijm} \cdot t_{ijm}^1 + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{m \in M} W_k \cdot y_{jkm} \cdot t_{jkm}^2 \quad (18)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{j \in J} \sum_{m \in M} x_{ijm} = Q_i / \forall i \in I \quad (19)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{m \in M} x_{ijm} \leq Cap_i / \forall i \in I \quad (20)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{m \in M} x_{ijm} \leq D_j^1 / \forall j \in J \quad (21)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{m \in M} x_{ijm} \geq \eta_j^1 D_j^1 / \forall j \in J \quad (22)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{m \in M} y_{jkm} = \sum_{i \in I} \sum_{m \in M} x_{ijm} / \forall j \in J \quad (23)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{m \in M} y_{jkm} \leq D_k^2 / \forall k \in K \quad (24)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{m \in M} y_{jkm} \geq \eta_k^2 D_k^2 / \forall k \in K \quad (25)$$

$$b_j + c_k - d_k \geq W_k / (D_k^2 \cdot t_{jkm}^2) \quad (26)$$

$$y_{jkm} \cdot (b_j + c_k - d_k - W_k / (D_k^2 \cdot t_{jkm}^2)) = 0 \quad (27)$$

$$c_k \cdot (D_k^2 - \sum_{j \in J} \sum_{m \in M} y_{jkm}) = 0 / \forall k \in K \quad (28)$$

$$d_k \cdot (\sum_{j \in J} \sum_{m \in M} y_{jkm} - \eta_k^2 D_k^2) = 0 / \forall k \in K \quad (29)$$

$$\sum_{j \in J} D_j^1 = \sum_{k \in K} D_k^2 \quad (30)$$

$$x_{ijm} \in N / \forall i \in I, j \in J, m \in M \quad (31)$$

$$y_{jkm} \geq 0 / \forall j \in J, k \in K, m \in M \quad (32)$$

$$b_j \geq 0 / \forall j \in J \quad (33)$$

$$c_k \geq 0 / \forall k \in K \quad (34)$$

$$d_k \geq 0 / \forall k \in K \quad (35)$$

其中式(18)定义了变换后的单层规划模型的目标函数,式(19)~式(25)与式(30)~式(32)给出了原问题的可行域,式(26)与式(33)~式(35)表示了对偶问题的可行域.此外,根据原始-对偶问题获得最优值的充分条件,增加了非线性约束条件(27)~约束条件(29).

在这样的情形下,双层规划模型变换为包括  $x_{ijm}$ 、 $y_{jkm}$ 、 $b_j$ 、 $c_k$ 、 $d_k$  五类决策变量的单层非线性规划问题.然而,由于约束条件的非线性导致直接求解此模型仍然困难.

### 3.2 非线性条件变换策略

为解决第3.1节中单层混合整数规划模型的非线性问题,引入0-1辅助变量化简非线性约束条件(27)~约束条件(29).针对约束条件(27),引入参数  $N$  为足够大的正常数,  $\delta_{jkm} \in \{0, 1\}$  为辅助变量.同时,结合约束条件(26)和约束条件(32)可知,  $y_{jkm} \geq 0$ , 且  $b_j + c_k - d_k - W_k / (D_k^2 \cdot t_{jkm}^2) \geq 0$ .因此,约束条件(27)的等价表达见式(36)和式(37).

$$y_{jkm} \leq N \cdot (1 - \delta_{jkm}) / \forall j \in J, k \in K, m \in M \quad (36)$$

$$b_j + c_k - d_k - W_k / (D_k^2 \cdot t_{jkm}^2) \leq N \cdot \delta_{jkm} \quad (37)$$

相似地,  $\tau_k \in \{0, 1\}$  作为0-1辅助变量被用来处理约束条件(28)的非线性问题.此外,结合约束条件(24)和约束条件(34)可知,  $c_k \geq 0$ , 且  $D_k^2 - \sum_{j \in J} \sum_{m \in M} y_{jkm} \geq 0$ .因此,约束条件(28)的等价表达见式(38)和式(39).

$$c_k \leq N \cdot (1 - \tau_k) / \forall k \in K \quad (38)$$

$$D_k^2 - \sum_{j \in J} \sum_{m \in M} y_{jkm} \leq N \cdot \tau_k / \forall k \in K \quad (39)$$

同理,  $\varepsilon_k \in \{0, 1\}$  作为0-1辅助变量被用来

处理约束条件 (29) 的非线性问题.同时 结合约束条件 (25) 和约束条件 (35) 可知,  $d_k \geq 0$ , 且  $\sum_{j \in J} \sum_{m \in M} y_{jkm} - \eta_k^2 D_k^2 \geq 0$ .因此 约束条件 (29) 的等价表达见式 (40) 和式 (41).

$$d_k \leq N \cdot (1 - \varepsilon_k) / \forall k \in K / \quad (40)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{m \in M} y_{jkm} - \eta_k^2 D_k^2 \leq N \cdot \varepsilon_k / \forall k \in K / \quad (41)$$

综上所述 双层整数线性规划模型最终转化为包括  $x_{ijm}$   $y_{jkm}$   $b_j$   $c_k$   $d_k$   $\delta_{jkm}$   $\tau_k$   $\varepsilon_k$  八类决策变量的单层混合整数线性规划模型 见式 (42) ~ 式 (65).

$$\min_{x_{ijm} \ y_{jkm} \ b_j \ c_k \ d_k \ \delta_{jkm} \ \tau_k \ \varepsilon_k} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{m \in M} W_j \cdot x_{ijm} \cdot t_{ijm}^1 + \quad (42)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{m \in M} W_k \cdot y_{jkm} \cdot t_{jkm}^2$$

$$\text{s.t.} \sum_{j \in J} \sum_{m \in M} x_{ijm} = Q_i / \forall i \in I / \quad (43)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{m \in M} x_{ijm} \leq \text{Cap}_i / \forall i \in I / \quad (44)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{m \in M} x_{ijm} \leq D_j^1 / \forall j \in J / \quad (45)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{m \in M} x_{ijm} \geq \eta_j^1 D_j^1 / \forall j \in J / \quad (46)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{m \in M} y_{jkm} = \sum_{i \in I} \sum_{m \in M} x_{ijm} / \forall j \in J / \quad (47)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{m \in M} y_{jkm} \leq D_k^2 / \forall k \in K / \quad (48)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{m \in M} y_{jkm} \geq \eta_k^2 D_k^2 / \forall k \in K / \quad (49)$$

$$b_j + c_k - d_k \geq W_k / (D_k^2 \cdot t_{jkm}^2) / \forall j \in J \ k \in K / \quad (50)$$

$$y_{jkm} \leq N \cdot (1 - \delta_{jkm}) / \forall j \in J, \quad k \in K \ m \in M / \quad (51)$$

$$b_j + c_k - d_k - W_k / (D_k^2 \cdot t_{jkm}^2) \leq N \cdot \delta_{jkm} / \forall j \in J \ k \in K \ m \in M / \quad (52)$$

$$c_k \leq N \cdot (1 - \tau_k) / \forall k \in K / \quad (53)$$

$$D_k^2 - \sum_{j \in J} \sum_{m \in M} y_{jkm} \leq N \cdot \tau_k / \forall k \in K / \quad (54)$$

$$d_k \leq N \cdot (1 - \varepsilon_k) / \forall k \in K / \quad (55)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{m \in M} y_{jkm} - \eta_k^2 D_k^2 \leq N \cdot \varepsilon_k / \forall k \in K / \quad (56)$$

$$\sum_{j \in J} D_j^1 = \sum_{k \in K} D_k^2 \quad (57)$$

$$x_{ijm} \in N / \forall i \in I \ j \in J \ m \in M / \quad (58)$$

$$y_{jkm} \in N / \forall j \in J \ k \in K \ m \in M / \quad (59)$$

$$b_{jurs} / \forall j \in J / \quad (60)$$

$$c_k \geq 0 / \forall k \in K / \quad (61)$$

$$d_k \geq 0 / \forall k \in K / \quad (62)$$

$$\delta_{jkm} \in \{0, 1\} / \forall j \in J \ k \in K \ m \in M / \quad (63)$$

$$\tau_k \in \{0, 1\} / \forall k \in K / \quad (64)$$

$$\varepsilon_k \in \{0, 1\} / \forall k \in K / \quad (65)$$

在模型中 式 (42) 表示最小化加权行程时间总和的目标函数 式 (43) ~ 式 (57) 表示响应的约束条件 式 (58) ~ 式 (65) 定义了所有决策变量的取值.

## 4 算例仿真

### 4.1 汶川地震与参数取值范围确定

汶川地震于 2008 年 5 月 12 日 14 时 28 分发生在四川省阿坝藏族羌族自治州汶川县,里氏 8.0 级.据不完全统计,截至 2008 年 9 月 25 日 12 时 死亡约 70 000 人,受伤约 400 000 人,失踪约 20 000 人.重灾区包括汶川、茂县、北川、都江堰、广元等.为简化问题,算例仅选择汶川、茂县和北川作为 RDPs,成都北站和双流机场作为 RDCs,ASAs 分为搜索-救援区域(编号 1 和编号 2)、临时治疗区域(编号为 3)和临时居住区域(编号 4 和编号 5)三类.在这样的形势下,可知  $|I| = 2$ ,  $|J| = 3$ ,  $|K| = 5$ ,  $|M| = |\{2\}| = 1$  涉及到的其他有关参数见下表 1.

表 1 参数取值范围描述

Table 1 Parameters description

名称	详细描述与刻画
救援物资需求	$D_j^1 \in [30, 50]$ , $D_{je}^1 \in [5, 10]$ , $D_j^1 \in [35, 60]$ ; $D_{kr}^2 \in [10, 30]$ , $D_{ke}^2 \in [5, 10]$ , $D_k^2 \in [15, 40]$
行程时间	$t_{i12}^1 \in [2, 3]$ , $t_{i22}^1 \in [3, 4]$ , $t_{i32}^1 \in [4, 5]$ ; $t_{j12}^2$ , $t_{j22}^2$ , $t_{j32}^2 \in [1, 2]$ , $t_{j42}^2$ , $t_{j52}^2 \in [2, 3]$
权重/异质性	$W_j \in [0, 1]$   $W_1 + W_2 + W_3 = 1$ ; $W_k \in [0, 1]$   $W_1^1 + W_2^1 + W_3^1 + W_4^1 + W_5^1 = 1$
其他	$Q_i \in [10, 30]$ , $\eta_j^1$ , $\eta_k^2 \in [0, 1]$ ; $N$ 足够大的正常数

### 4.2 算例结果分析

为探究不确定性因素、风险可接受度和决策模式对救援过程中行程时间和幸存者感知满意度两个

目标的影响,从不同维度对这三类问题进行了对比分析.特别地,针对表1中的参数,借助计算机和 Matlab 软件产生一组随机数作为初始值,见表2.

表2 各参数的初始值

Table 2 Initial value of parameters

名称	各参数初始值
救援物资需求	$D_1^1 = 40/D_{1r}^1 = 28, D_{1e}^1 = 12/; D_2^1 = 35/D_{2r}^1 = 25, D_{2e}^1 = 10/; D_3^1 = 35/D_{3r}^1 = 25, D_{3e}^1 = 10/;$ $D_1^2 = D_2^2 = D_3^2 = 20/D_{1r}^2, D_{2r}^2, D_{3r}^2 = 14   D_{1e}^2, D_{2e}^2, D_{3e}^2 = 6/; D_4^2 = D_5^2 = 25/D_{4r}^2, D_{5r}^2 = 17   D_{4e}^2, D_{5e}^2 = 8/$
行程时间	$t_{112}^1 = 2.2, t_{122}^1 = 3.7, t_{132}^1 = 4.3, t_{212}^1 = 2.9, t_{222}^1 = 3.4, t_{232}^1 = 4.7; t_{112}^2 = 1.4, t_{122}^2 = 1.9, t_{132}^2 = 1.6, t_{142}^2 = 3.0,$ $t_{152}^2 = 2.5; t_{212}^2 = 1.6, t_{222}^2 = 1.5, t_{232}^2 = 1.3, t_{242}^2 = 2.5, t_{252}^2 = 2.4; t_{312}^2 = 1.3, t_{322}^2 = 1.6, t_{332}^2 = 1.7, t_{342}^2 = 3.0,$ $0, t_{352}^2 = 2.8$
权重/异质性	$W_j   W_1 = 0.5, W_2 = 0.2, W_3 = 0.3; W_k   W_1^1 = W_2^1 = W_3^1 = 0.26, W_4^1 = W_5^1 = 0.11;$
其他	$Q_1 = 20, Q_2 = 25; \eta_j^1, \eta_k^2 = 0.2; N = 10\ 000;$

在这种情形下,结合所提出的模型和算法,借助 Matlab(2016b)软件,在 Windows 8.1 系统、酷睿 i5-5200 双核处理器的计算机上实现所有的仿真实验.根据表2中的初始值,获得上层优化问题最小加权行程时间总和为 52.056 t,下层优化问题最大加权幸存者感知满意度为 0.290 6,程序运行时间为 59.9 s.仿真结果表明:1)汶川、茂县和北川的救援物资期望需求均未全部被满足;其中,茂县的相对需求比例较高,而汶川和北川仅获得了最低的物资数量.2)针对 ASAs 而言,临时治疗区域的物资需求被全部满足,但搜索-救援和临

时居住区域仅得到部分满足.特别地,第2个搜索-救援区域、编号为4和编号为5的临时居住区域仅获得了最低的物资数量.此外,用  $F(x, y)$  (单位: h) 和  $f(x, y)$  分别表示上层和下层规划问题的目标函数;  $T$  表示程序运行时间,单位: s.

#### 4.2.1 救援物资供应不确定视角下的仿真结果分析

救援物资供应不确定体现在 RDCs 的救援物资库存数量是随机的,灾害响应决策系统中可利用的物资数量直接影响着整体救援效果.根据表1中库存数量取值范围,绘制灵敏度分析图,见图1.

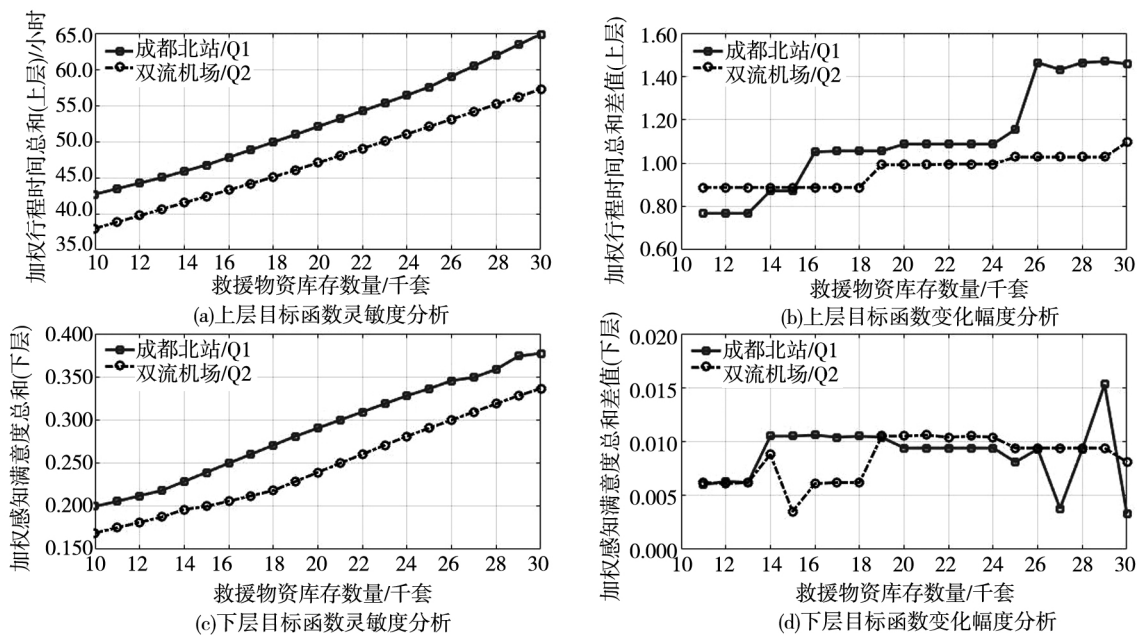


图1 救援物资供应变化视角下参数灵敏度分析

Fig. 1 Sensitive analysis of parameters from the perspective of uncertain relief-supply



根据图 1(a) 和图 1(b) 可知: 随着 RDCs 库存数量的增加, 1) 加权行程时间总和与加权感知满意度总和都呈现出上升趋势; 2) 与双流机场相比, 成都北站库存数量变化形成的目标函数趋势线均在其上方, 对应的数值较大; 3) 表明库存数量变化时, 两个救援目标并未同时朝着期望方向趋近, 决策者需要根据具体情况选择合适的救援物资调度方案。

根据图 1(c) 和图 1(d) 可知: 随着 RDCs 库存数量的增加, 1) 加权行程时间总和的变化幅度 /

率总体上呈现出上升趋势, 而加权感知满意度总和没有特定的规律; 2) 对两个救援目标而言, 无论是成都北站还是双流机场库存变化对其影响都是动态的; 3) 在库存数量为 14 千套和 15 千套时, 两个供应点库存变化对加权行程时间总和的影响程度几乎相同; 当大于此数量时, 前者的影响程度大于后者; 反之, 前者的影响程度小于后者。然而, 图 1 仅考虑了单个 RDC 库存数量变化的灵敏度情况, 成都北站和双流机场库存数量同时变化的仿真结果见表 3。

表 3 考虑成都北站和双流机场库存数量同时变化的仿真结果

Table 3 Results with uncertain inventory of both North Railway Station of Chengdu and Shuangliu Airport consideration

指标 \ 编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均值
$F(x, y) / h$	47.920	46.236	37.012	50.632	37.132	41.332	52.904	47.588	47.348	45.936	45.404
$f(x, y)$	0.249 9	0.228 8	0.162 9	0.270 8	0.162 9	0.196 3	0.300 0	0.239 3	0.239 3	0.228 8	0.227 9
$T / s$	12.50	1.00	0.50	0.10	0.10	0.10	0.04	0.10	0.02	0.03	1.45

根据表 3 可知, 在十次实验中, 最小加权行程时间在第 3 次获得, 为 37.012 t; 最大加权感知满意度在第 7 次获得, 为 0.3; 程序运行时间最大值为 12.5 s(第 1 次获得)。考虑随机性和不确定性, 获得平均行程时间为 45.404 t, 平均感知满意度为 0.227 9, 程序平均运行时间为 1.45 s。结果表明: 在救援物资需求为 110 千套, 风险可接受度系数为 0.2, 行程时间已知, 库存数量不确定的情况下, 与获得的初始最优值相比较, 1) 加权行程时间总和降低了  $(52.056 - 45.404) / 52.056 \times 100\% = 12.8\%$ ; 2) 加权感知满意度总和降低了  $(0.290 6 - 0.227 9) / 0.290 6 \times 100\% = 6.27\%$ ; 3) 程序运行时间降低了 97.6%。

#### 4.2.2 救援物资需求不确定视角下的仿真结果分析

救援物资需求不确定体现在 RDPs 和 ASAs 理性与非理性需求的随机性。为简化问题, 仅以第 1 个搜索-救援区域为例分析不确定需求对行程时间和幸存者感知满意度两个救援目标的影响。此外, 为保证获得最优解, 假设第 1 个搜索-救援

区域的需求变化仅影响重灾区汶川县, 其理性和非理性的比例为 14: 6。考虑总需求、理性和非理性需求的取值范围, 绘制仿真结果趋势图, 见图 2。

图 2(左) 和图 2(右) 分别呈现了在受影响具体区域需求变化过程中, 加权行程时间与感知满意度的变化趋势。仿真结果表明: 随着受影响具体区域总需求的增加, 1) 救援物资分配加权行程时间总体呈现出阶梯状的上升趋势, 可知在一定范围内, 需求变化不会影响加权行程时间的最优值; 2) 加权幸存者感知满意度呈现出下降趋势, 表明即使较小的物资需求变化也会影响加权感知满意度的最优值。总体而言, 理性需求与非理性需求变化对行程时间和感知满意度最优值的影响规律未见较大差异; 但前者的影响范围大于后者, 原因可能是由于模型仅通过数值区分理性和非理性需求, 未考虑其具体衡量方式的差异性。此外, 考虑第 1 个搜索-救援区域理性和非理性需求同时变化的仿真结果见表 4。

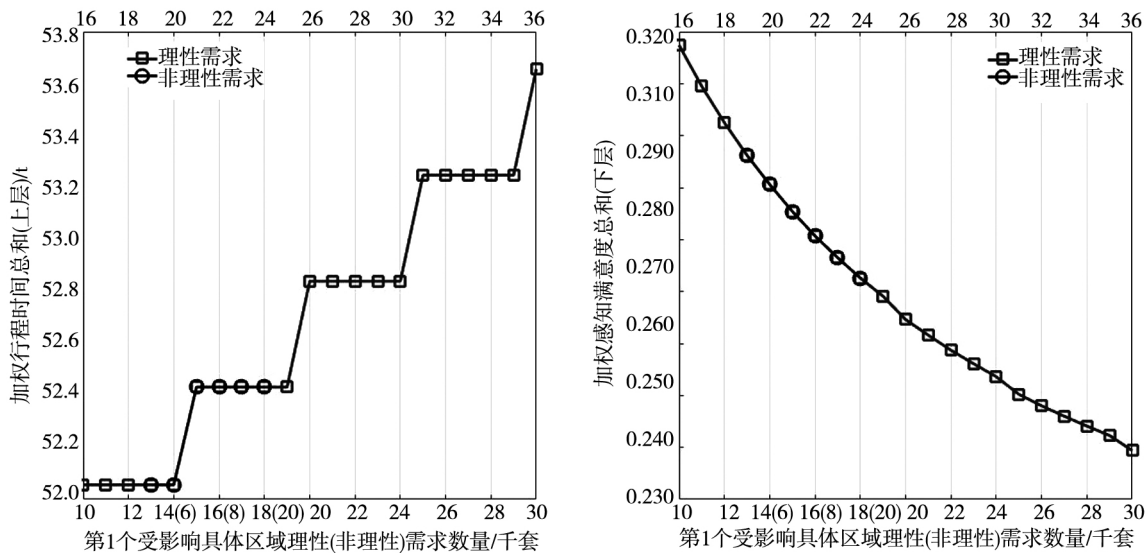


图2 救援物资需求变化视角下的仿真结果

Fig. 2 Results with uncertain relief-demand consideration

表4 考虑第1个搜索-救援区域理性和非理性需求同时变化的仿真结果

Table 4 Results with both uncertain rational and emotional demand of the first search-rescue area consideration

指标 \ 编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均值
$F(x, y) / h$	53.656	53.656	52.840	53.248	52.056	52.432	53.656	53.248	53.656	53.248	53.170
$f(x, y)$	0.233 5	0.234 8	0.261 6	0.242 3	0.302 5	0.269 1	0.236 3	0.242 3	0.234 8	0.248 0	0.250 5
$T / s$	0.02	0.02	0.03	0.02	0.03	0.06	0.02	0.02	0.03	0.02	0.03

根据表4可知,在十次仿真实验中,最小的加权行程时间与最大的加权感知满意度都是在第5次获得,分别为52.056 t和0.302 5;程序运行时间都相对较短,均小于0.1 s.考虑救援物资需求不确定性,可得到平均加权行程时间为53.17 t,平均加权感知满意度为0.250 5,程序平均运行时间为0.03 s.仿真结果表明:在救援物资库存数量为45千套,风险可接受度系数为0.2,行程时间已知,需求数量不确定的情况下,与获得的初始最优值相比较,1) 加权行程时间

总和增加了2.1%; 2) 加权感知满意度总和降低了13.8%; 3) 程序运行时间几乎降低了100%.

#### 4.2.3 行程时间不确定视角下的仿真结果分析

救援物资行程时间不确定体现在第1阶段从RDCs向RDPs运输和第2阶段从RDPs向ASAs分配救援物资过程中路径选择和运输方式差异带来的随机性,且采用区间数来表示或衡量这种不确定性.结合行程时间的取值范围,考虑行程时间不确定的仿真结果见表5.

表5 考虑行程时间不确定的仿真结果

Table 5 Results with uncertain travel time consideration

指标 \ 编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均值
$F(x, y) / h$	52.056	52.235	51.539	51.751	48.926	54.302	49.654	51.602	51.964	56.469	52.050
$f(x, y)$	0.290 6	0.328 1	0.339 7	0.221 7	0.310 7	0.247 8	0.324 1	0.287 7	0.286 6	0.302 4	0.293 9
$T / s$	0.8	14.7	1.3	0.6	0.2	0.1	33.0	46.4	20.1	75.6	19.3

根据表 5 可知, 加权行程时间总和最小值为 48.926 t (第 5 次获得), 加权感知满意度总和最大值为 0.339 7 (第 3 次获得). 通过十次仿真实验, 得到其平均值分别为 52.05 h 和 0.293 9, 程序平均运行时间为 19.3 s. 仿真结果表明: 在救援物资库存总量为 45 千套, 需求为 110 千套, 风险可接受度系数为 0.2, 行程时间不确定的情况下, 1) 执行所有任务的加权行程时间平均值为 52.05 t, 且幸存者感知满意度为 0.293 9; 与前面两种情况相比, 2) 在加权行程时间方面, 库存数量不确定下的结果最优, 行程时间次之, 需求耗时最长; 3) 在加权感知满意度方面, 行程时间不确定下的值最大, 需求次之, 库存数量最小; 4) 库存数量不确定对救援物资调度和分配过程中实现加权行程时间最优的目标影响最小, 行程时间不确定对实现最大化加权感知满意度的救援目标影响最小.

4.2.4 风险可接受度变化视角下的仿真结果分析

从两个方面考虑风险可接受度对救援物资调度和分配方案的影响. 第一种情况: RDPs 和 ASAs 的风险可接受度系数相同, 其上限由库存和需求总量的比值来确定, 且确保获得最优解, 故  $\eta_j^1 = \eta_k^2 \in (0, 45/110] \approx (0, 0.4]$ . 结合约束条件(46)、约束条件(49)和约束条件(56), 绘制风险可接受度系数变化视角下的仿真结果趋势图, 见图 3. 为避免出现需求点和受影响具体区域分配数量为零的情况, 仿真实验用 0.001 表示趋近于零.

从图 3 可以看出, 随着风险可接受度系数变大, 1) 加权行程时间总体呈上升趋势, 但其增加

幅度由小变大, 再变小, 表明风险可接受度与上层目标存在正相关关系; 2) 加权感知满意度呈现出先减小后增加再减小的下降趋势, 表明其与下层目标存在弱负相关甚至无特定关系; 3) 加权行程时间总和的最小值在系数为 0.05 时获得, 为 49.326 t; 加权感知满意度总和的最大值在系数趋近于零时获得, 为 0.317 1; 可知两个目标的最优值并非在相同系数处获得; 4) 在实际救援过程中, 在供应、需求和行程时间不变且已知的条件下, 为使加权行程时间总和尽可能小, 决策者可通过救援信息和处置流程公开透明化、事前教育培训等手段减小风险可接受度系数; 5) 进而寻找最大幸存者感知满意度总和对应的最佳系数, 需要强调的是虽在系数趋近于零时可获得最大感知满意度值, 但极有可能导致某个或多个需求点/受影响具体区域的实际分配数量为零, 与现实不符, 应剔除此解. 此外, 不确定条件下, 考虑相同风险可接受度系数的仿真结果见表 6.

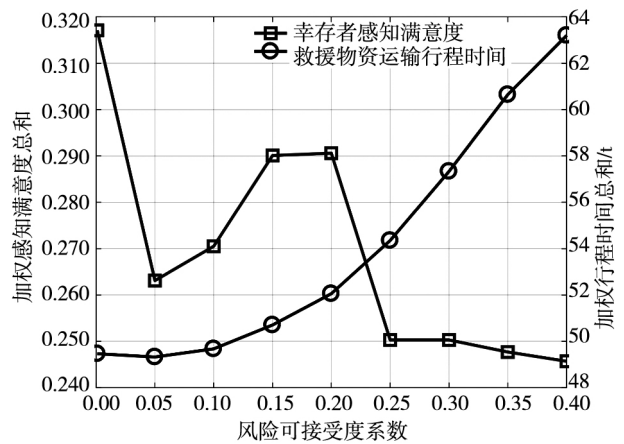


图 3 风险可接受度变化视角下的仿真结果

Fig. 3 Results with varying risk acceptability consideration

表 6 考虑风险可接受度系数相同且不确定的仿真结果

Table 6 Results with uncertain but identical risk acceptability consideration

指标 \ 编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均值
$F(x, \rho) / h$	50.706	49.496	51.266	52.088	49.326	54.182	49.676	50.706	54.182	52.056	51.368
$f(x, \rho)$	0.291 0	0.269 9	0.287 9	0.289 5	0.263 1	0.272 0	0.270 5	0.291 0	0.272 0	0.290 6	0.279 8
$T / s$	0.2	0.0	0.2	0.3	1.2	2.0	7.1	0.8	3.6	0.2	1.6

第二种情况: RDPs 和 ASAs 两类风险可接受度系数不同 即都是随机和独立的,但每类系数是相同的 即  $\eta_j^1, \eta_k^2 \in (0, 45/110] \approx (0, 0.4]$ . 不确定条件下 考虑不同风险可接受度系数的仿真结果见表 7.

表 7 考虑风险可接受度不同且不确定的仿真结果

Table 7 Results based on uncertain acceptance level of risk with different values

指标 \ 编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均值
$F(x, y) / h$	49.682	53.670	60.544	56.290	56.656	61.234	58.024	51.046	49.496	54.316	55.096
$f(x, y)$	0.276 5	0.319 4	0.248 1	0.301 6	0.388 0	0.246 6	0.315 3	0.297 7	0.269 9	0.378 9	0.304 2
$T / s$	24.0	16.3	6.9	2.0	1.5	0.2	0.1	0.5	0.1	0.1	5.2

根据表 6 可知,在 RDPs 和 ASAs 内幸存者风险可接受度相同的情况下,加权行程时间总和的平均值为 51.368 t,平均加权感知满意度总和为 0.279 8,程序平均运行时间为 1.6 s.根据表 7 可知,在考虑 RDPs 和 ASAs 内幸存者风险可接受度不同的情况下,平均加权时间总和为 55.096 t,加权感知满意度总和的平均值为 0.304 2,程序平均运行时间为 5.2 s.结果表明:1) 在风险可接受度系数相同的条件下,获得的平均加权行程时间总和与程序运行时间性能指标较优;2) 在风险可接受度系数不同的条件下,获得加权感知满意度总和的平均值较大;3) 在灾害运作管理实践中,决策者可根据具体灾害类型、受灾程度等因素选择和设置恰当的风险可接受度系数,从而保障实现相应的救援目标.

4.2.5 不同决策模式下的仿真结果分析

在灾害运作管理中,集中、分散和混合决策是

三种主要的决策模式.其中,单层规划模型通常是集中决策模式的体现,双层规划模型是混合决策模式的表现,分散决策模式视情况而定.

本节考虑集中和混合决策两种模式,且前者包括主者(leader)和从者(follower)两个视角. leader 视角下的规划模型旨在最小化加权行程时间总和而不关注市县级决策者的选择,其由式(1)~式(6)和式(8)~式(12)共同决定, leader 控制了所有的决策变量. follower 视角下单层规划模型的目标函数为最大化加权感知满意度总和;式(7)为目标函数,式(2)~式(6)和式(8)~式(12)是约束条件.幸存者感知满意度的大小决定了所有的决策变量.前文构建的双层规划模型是基于 leader-follower 视角提出的.在这种情形下,获得考虑确定性(上标为 1)和不确定性(上标为 2)因素的仿真结果,分别见表 8 和表 9.

表 8 不同决策模式下考虑确定性因素的仿真结果

Table 8 Results considering certain factors under different decision modes

模式 \ 最优值	leader-follower 视角/bi-level model			leader 视角/single-level model			follower 视角/single-level model		
	$F(x, y) / h$	$f(x, y)$	$T / s$	$F(x, y) / h$	$f(x, y)$	$T / s$	$F(x, y) / h$	$f(x, y)$	$T / s$
#	52.056	0.290 6	59.9	52.056	0.290 6	18.34	77.36	0.459 2	0.86

表 8 的仿真结果是根据参数初始取值获得的.根据表 8 可知,不同决策模式下的性能指标关系分别为  $F_{bi-level}^1 = F_{leader}^1 < F_{follower}^1, f_{bi-level}^1 = f_{leader}^1 < f_{follower}^1, T_{bi-level}^1 > T_{leader}^1 > T_{follower}^1$ .

结果表明:在救援物资分配中心库存数量、需求点和受影响具体区域需求数量、行程时间和风险可接受度系数固定的情况下,1) leader-follower 视角下的双层规划模型和 leader 视角下的单层规

划模型获得的最优解和最优值相同,但前者的程序运行时间大于后者;2) 基于 leader-follower 和 leader 视角,省市级决策者能在最短的时间内完成救援物资调度任务,但受影响具体区域的幸存者感知满意度较低;3) 基于 follower 视角,市县级决策者可获得最大的幸存者感知满意度,但完成所有的救援物资调度任务耗时较长;4) 第 1 和第 2 点结论与文献[24]的不同,可能是双层规划模

型上下层目标函数与决策变量关系的差异性导致; 模型中构建的目标函数均与救援物资分配数量直接相关,而在文献 [24] 中,上层目标与是否分配救援物资相关,下层目标与实际分配数量相

关; 5) 针对具有层级关系的救援物资调度与分配问题,在各因素确定的情况下,上下层目标函数与决策变量的关系很可能会直接影响最优调度方案.

表 9 不同决策模式下考虑不确定性因素的仿真结果

Table 9 Results considering uncertain factors under different decision modes

模式 编号	leader-follower 视角/bi-level model			leader 视角/single-level model			follower 视角/single-level model		
	$F(x, y) / h$	$f(x, y)$	$T / s$	$F(x, y) / h$	$f(x, y)$	$T / s$	$F(x, y) / h$	$f(x, y)$	$T / s$
1	48.558	0.321 1	0.03	53.823	0.249 7	0.03	52.284	0.174 3	0.28
2	43.475	0.214 1	0.03	67.145	0.284 0	0.12	71.712	0.418 7	0.04
3	45.957	0.250 4	0.04	41.697	0.166 8	0.11	55.998	0.230 3	0.03
4	56.048	0.332 1	0.03	50.942	0.360 5	0.17	73.479	0.317 6	0.05
5	48.523	0.251 9	0.04	55.377	0.270 3	0.05	52.588	0.281 8	0.03
6	56.629	0.273 8	0.04	52.324	0.371 2	0.03	69.282	0.393 3	0.03
7	61.230	0.302 6	0.04	61.795	0.440 5	0.04	67.143	0.318 4	0.07
8	64.706	0.395 5	0.06	41.023	0.237 4	0.05	46.620	0.318 6	0.02
9	52.346	0.315 4	9.03	49.373	0.252 1	0.04	60.599	0.342 6	0.08
10	68.540	0.485 5	0.03	57.904	0.325 0	0.03	74.902	0.365 2	0.05
平均值	54.601	0.314 2	0.937	53.140	0.295 8	0.067	62.461	0.316 1	0.068

根据表 9 可知,各性能指标的关系如下:

$$\bar{F}_{\text{follower}}^2 > \bar{F}_{\text{bi-level}}^2 > \bar{F}_{\text{leader}}^2, \bar{f}_{\text{follower}}^2 > \bar{f}_{\text{bi-level}}^2 > \bar{f}_{\text{leader}}^2, \bar{T}_{\text{bi-level}}^2 > \bar{T}_{\text{follower}}^2 > \bar{T}_{\text{leader}}^2.$$

结果表明:在救援物资供应数量、需求数量、行程时间和幸存者可接受度系数不确定的情况下,1) 基于 leader 视角,省市级决策者能以最快的速度(53.140 t)完成所有的救援物资调度与分配任务,但受影响具体区域平均感知满意度(0.295 8)最低,程序平均运行时间最短(0.067 s); 2) 基于 follower 视角,市县级决策者可获得最大平均感知满意度(0.316 1),但平均行程时间最长(62.461 t); 程序平均运行时间与 leader 视角下的非常接近; 3) 基于 leader-follower 集成视角,可获得行程时间与感知满意度两个目标函数值的平衡点,程序运行平均时间最长(0.937 s).

结合表 8、表 9 与文献 [24],可得出如下结论:在双层规划模型中,1) 若上下层目标函数与决策变量关系相似,确定和不确定因素均会直接影响救援物资调度与分配最优方案和目标函数值; 2) 若上下层目标函数与决策变量关系差异较大,确定与不确定因素对获得救援物资调度与分配最优目标函数值或平均值的影响较小,即得到

的结论相似.总体而言,双层规划模型(混合决策模式)可获得分别考虑上层或下层目标函数单层数学模型(集中决策模式)最优值的平衡点,但程序运行时间相对较长(但此结论不适用于考虑确定性因素,上下层目标函数与决策变量关系相似的情况).此外,在绝大多数情况下,决策模式会直接影响救援物资调度与分配方案,在灾害运作管理实践过程中,决策者应根据需要选择恰当的模式来制定针对性的应急措施.

## 5 结束语

针对具有层次结构的跨区域救援物资反应性调度与分配网络,考虑供应-需求-行程时间不确定、幸存者风险可接受度和感知满意度、幸存者异质性的多层次性、需求可拆分等特征,构建了多灾点多需求点多运输模式的救援物资反应性双层规划模型,上层目标最小化加权行程时间总和,下层问题最大化加权感知满意度总和;并根据模型的特点,设计了以互补松弛定理为基础的原始-对偶算法对其进行求解;最后,以汶川特大地震为算例,验证了模型与求解策略的可行性和有效性.

研究问题仅考虑跨区域的单个从者的情况, 基于属地管理原则的多从者救援物资分配问题是接下来的工作. 虽然模型考虑了多运输模式, 但仿真实验中由于客观因素仅考虑了陆运方式, 不同运输模式对救援物资调度与分配机制的影响可成为未来的研究方向. 并且, 尽管模型中考虑了分配的公平性和幸存者感知, 但如何将社会、环境和经

济可持续发展理念融入救援物资分配问题是值得研究的主题. 此外, 模型中虽然区分了理性和非理性需求, 但仅通过数值区分, 考虑采用不同的衡量方式测量这两类需求及其对调度方案的影响是有价值的. 最后, 构建的双层整数线性规划模型是针对初始救援阶段的静态模型, 采用离散方式研究动态的救援物资调度与分配问题是具有意义的.

#### 参考文献:

- [1] Galindo G, Batta R. Review of recent development in OR/MS research in disaster operations management [J]. *European Journal of Operational Research*, 2013, 230(2): 201-211.
- [2] Cao C J, Li C D, Yang Q, et al. Multi-objective optimization model of emergency organization allocation for sustainable disaster supply chain [J]. *Sustainability*, 2017, 9(11): 2103.
- [3] 张海波, 董星. 中国应急管理结构变化及其理论概化 [J]. *中国社会科学*, 2015, (3): 58-84.  
Zhang Haibo, Tong Xing. Changes in the structure of emergency management in China and a theoretical generalization [J]. *Social Sciences in China*, 2015, (3): 58-84. (in Chinese)
- [4] Prasad S, Zakaria R, Altay N. Big data in humanitarian supply chain networks a resource dependence perspective [J]. *Annals of Operations Research*, 2018, 270(1-2): 383-413.
- [5] 代颖, 马祖军, 朱道立, 等. 震后应急物资配送的模糊动态定位-路径问题 [J]. *管理科学学报*, 2012, 15(7): 60-70.  
Dai Ying, Ma Zujun, Zhu Daoli, et al. Fuzzy dynamic location-routing problem in post-earthquake delivery of relief materials [J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2012, 15(7): 60-70. (in Chinese)
- [6] 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): 326-337.  
Zheng Bin, Ma Zujun, Zhou Yufeng. Bi-level model for dynamic location-transportation problem for post-earthquake relief distribution [J]. *Journal of Systems & Management*, 2017, 26(2): 326-337. (in Chinese)
- [7] 刘长石, 寇刚, 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 Changshi, Kou Gang, Liu Daobo. Fuzzy dynamic LRP for post-earthquake multimodal relief delivery [J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2016, 19(10): 61-72. (in Chinese)
- [8] Sheu J B. Dynamic relief-demand management for emergency logistics operations under large-scale disasters [J]. *Transportation Research Part E*, 2010, 46(1): 1-17.
- [9] Barbarosoglu 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] Wilson D T, Glenn I Hawe, et al. A multi-objective combinatorial model of casualty processing in major incident response [J]. *European Journal of Operational Research*, 2013, 230(1): 643-655.
- [11] 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*, 2015, 75(3): 1-17.
- [12] 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)
- [13] Cao C J, Li C D, Yang Q, et al. A novel multi-objective programming model of relief distribution for sustainable disaster supply chain in large-scale natural disasters [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 174: 1422-1435.
- [14] 王旭坪, 董莉, 陈明天. 考虑感知满意度的多受灾点应急资源分配模型 [J]. *系统管理学报*, 2013, 22(2): 51

-56.

Wang Xuping, Dong Li, Chen Mingtian. Multiple-area post-disaster resource distribution model considering perception satisfaction[J]. *Journal of Systems & Management*, 2013, 22(2): 51-56. (in Chinese)

- [15] 王旭坪, 马超, 阮俊虎. 考虑公众心理风险感知的应急物资优化调度[J]. *系统工程理论与实践*, 2013, 33(7): 1735-1742.

Wang Xuping, Ma Chao, Ruan Junhu. Emergency supplies optimal scheduling considering the public's psychological risk perception[J]. *Systems Engineering: Theory & Practice*, 2013, 33(7): 1735-1742. (in Chinese)

- [16] Zhou Y W, Liu J, Zhang Y T, et al. A multi-objective evolutionary algorithm for multi-period dynamic emergency resource scheduling problems[J]. *Transportation Research Part E*, 2017, 99: 77-95.

- [17] Mohammadi R, Ghomi S M T F, Jolai F. Pre-positioning emergency supplies for earthquake response: A new multi-objective particle swarm optimization algorithm[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2016, 40(9-10): 5183-5199.

- [18] Lin Y H, Batta R, Rogerson P A, et al. A logistics model for emergency supply of critical items in the aftermath of a disaster[J]. *Socio-economic Planning*, 2011, 45(4): 132-145.

- [19] 王旭坪, 杨相英, 杨挺, 等. 动态路况下考虑决策者风险感知的地震物资调配动力学模型[J]. *系统管理学报*, 2015, 24(2): 174-184.

Wang Xuping, Yang Xiangying, Yang Ting, et al. System dynamic model of earthquake material allocation considering decision-makers' psychological risk perception and dynamic traffic[J]. *Journal of Systems & Management*, 2015, 24(2): 174-184. (in Chinese)

- [20] Huang M, Smilowitz K, Balci B. Models for relief routing: Equity, efficiency and efficacy[J]. *Transportation Research Part E*, 2012, 48(1): 2-18.

- [21] Campbell A, Vandenbussche D, Hermann W. Routing for relief efforts[J]. *Transportation Science*, 2008, 42(2): 127-145.

- [22] Hu S L, Han C F, Meng L P. A scenario planning approach for propositioning rescue centers for urban waterlog disasters[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2015, 87: 425-435.

- [23] 郑斌, 马祖军, 李双琳. 基于双层规划的震后初期应急物流系统优化[J]. *系统工程学报*, 2014, 29(1): 113-125.

Zheng Bin, Ma Zujun, Li Shuanglin. Integrated optimization of emergency logistics systems for post-earthquake initial stage based on bi-level programming[J]. *Journal of Systems Engineering*, 2014, 29(1): 113-125. (in Chinese)

- [24] Camacho-Vallejo J F, Gonzalez-Rodriguez E, et al. A bi-level optimization model for aid distribution after the occurrence of a disaster[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 105: 134-145.

- [25] Gutjahr W J, Dzubur N. Bi-objective bilevel optimization of distribution center locations considering user equilibria[J]. *Transportation Research Part E*, 2016, 85(1): 1-22.

- [26] Duan X, Song S, Zhao J. Emergency vehicle dispatching and redistribution in highway network based on bilevel programming[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015, 2015: 1-12.

- [27] Kongsomsaksakul S, Yang C, Chen A. Shelter location-allocation model for flood evacuation planning[J]. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 2005, 6: 4237-4252.

- [28] 王苏生, 王岩. 基于公平优先原则的多受灾点应急资源配置算法[J]. *运筹与管理*, 2008, 17(3): 16-21.

Wang Susheng, Wang Yan. Emergency resource allocation among multiple disaster places under fair priority principle[J]. *Operations Research and Management Science*, 2008, 17(3): 16-21. (in Chinese)

- [29] Cao C J, Li C D, Li W B. Research on the Relief Scheduling Model Considering Victims' Satisfaction for Emergency Response in Large-Scale Disasters[C]. *Proceedings of the 22nd International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, Guangzhou, 2015, 679-690.

- [30] 刘旭峰, 李静, 黄晨, 等. 油气管道风险可接受标准与应用评述[J]. *中国安全科学学报*, 2011, 21(12): 134-142.

Liu Xufeng, Li Jing, Huang Chen, et al. Review of risk acceptance criteria and their practice on oil and gas pipelines[J].

China Safety Science Journal , 2011 , 21( 12) : 134–142. ( in Chinese)

- [31] Bracken J , McGill J T. Mathematical programs with optimization problems in the constraints [J]. Operations Research , 1973 , 21( 1) : 37–44.
- [32] Bard J F. Practical Bilevel Optimization: Algorithm and Application [M]. The Netherlands: Klumer Academic Publishers , 1998.

## **A bi-level programming model for relief trans-regional scheduling: Taking into consideration survivors' perceived satisfaction and risk acceptability**

*CAO Ce-jun*<sup>1 2</sup> , *LI Cong-dong*<sup>2 3</sup> , *QU Ting*<sup>3</sup> , *YANG Qin*<sup>4</sup>

1. School of Business Planning , Chongqing Technology and Business University , Chongqing 400067 , China;
2. College of Management and Economics , Tianjin University , Tianjin 300072 , China;
3. School of Intelligent Systems Science and Engineering , Jinan University , Zhuhai 519070 , China;
4. School of Business , Sichuan Normal University , Chengdu 610101 , China

**Abstract:** To decrease the suffering of survivors , improve efficiency of disaster response , and reduce various losses , a leader-follower optimization problem for trans-regional relief reactive scheduling is considered. A bi-level integer programming model that characterizes uncertain relief-supply and demand , varying travel time , equitable principle , multi-level heterogeneity and risk acceptability of survivors , vertical intergovernmental relations of beneficiaries , split demand , multiple supply and demand points , and multi-mode transportation is formulated. The objectives are to minimize total weighted travel time at the upper level and maximize total weighted survivors' perceived satisfaction at the lower level. Then , a primal-dual algorithm based on complementary slackness constraints is designed by analyzing the characteristics of this mathematical model. Finally , a case study from Wenchuan earthquake is presented to illustrate the proposed model and solution strategies.

**Key words:** relief trans-regional scheduling; survivors' perceived satisfaction; risk acceptability; bi-level programming model; primal-dual algorithm