doi:10.11918/j.issn.0367-6234.2016.11.028

# 基于“底线思维”的应急物资分配-运输两层鲁棒规划模型

于　辉，曲亚萍

（重庆大学 经济与工商管理学院，重庆 400044）

**摘　要**：非常规突发事件的应对需要“底线思维”，从“最坏、最困难”的角度展开研究. 为此，针对应急物资的分配与运输的应急规划问题提出基于“底线思维”的两层鲁棒模型. 顶层模型从成本最小化的角度确定应急资源的最优配置量，而底层模型从节约时间的角度对顶层的分配方案实施运输配送，及时、有效地实现应急资源分配的协同优化，最大程度地减少灾难带来的损失. 该模型刻画了灾区物资需求的极度缺失性，在“最坏”情景下利用分解技术研究应急分配与运输的协同过程，不仅揭示了分配与运输的协同价值，而且发现鲁棒的两层规划具有强烈的稳键特征，同时也发现鲁棒的优化过程将有助于增强应急分配过程中的公平程度.

**关键词**：应急物资分配；鲁棒优化；两层模型

**中图分类号**：F251.2　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0367-6234(2016)11-0178-05

# Two-level robust optimization model of emergency relief distribution-transportation from the baseline perspective

YU Hui, QU Yaping

(College of Economics and Business Management, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract**: The unconventional emergency needs to be dealt with from the perspective of baseline. That is, we need to study problems based on the worst scenario. Thus, the paper formulated a two-level robust optimization model to solve the coordination problem arising from the relief distribution and transportation. The topline model determines the optimal distribution of emergency resource from the perspective of cost minimization, while the baseline model is to transport and distribute based on the distribution policy of topline from the perspective of time saving, in order to realize the coordinate optimization of emergency resource allocation timely and efficiently, and reduce most the loss of disaster. The model described the scarcity of relief demand and converted the coordination problem into two connected problems. Finally, the numerical analysis demonstrated the coordination value and robustness of the distribution policy. Besides, robust approach helps improve the equity of distribution plan.

**Keywords**: emergency relief distribution; robust optimization; two-level model

近年来，世界各地的突发事件频繁发生，这些大规模的突发性灾害事件造成了大量的人员伤亡和巨额的经济损失. 灾害事件发生后，面对急剧增长的物资需求，应急物资的分配与运输自然成为救援工作中的重要环节. 因此，采用科学的方法从系统性视角探讨应急物资分配及运输的协同决策是合理展开救援行动的一个关键问题.

很多学者对相关的问题进行了深入研究. 文献[1]研究了地震后向多个受灾地点分配资源的问题，构建了在时间、资源数量和质量有限的情况下，以死亡人数最小作为目标的动态组合优化模型. 文献[2]采用模糊规划的方法探讨了灾后物资分配的多目标规划问题. 文献[3]通过将车辆描述为一种特殊形式的物资形式，把物资分配过程分解为两个网络流问题. 文献[4]针对无法获取灾情详细数据的情况，构建了一个考虑多种类物资的两阶段多随机网络流模型. 文献[5]考虑了应急物资调度过程中公众的感知度问题，建立了以最小化公众风险感知程度和物资未满足度为目标的混合整数规划模型. 文献[6]利用局内决策方法求得了应急物资在两阶段嵌套机制下的有效分配策略. 文献[7-9]从多个角度对应急系统调度中的多出救点问题展开了研究.

应急物资的分配和运输具有关联性和协同性，

**收稿日期**：2015-06-10
**基金项目**：中央高校基本科研业务费项目(CDJKXB14004)
**作者简介**：于　辉(1973—)，男，教授，博士生导师
**通信作者**：于　辉，yuhui@cqu.edu.cn

而大多文献将这两个问题作为单独的主题进行研究,缺少对两者协同的系统考虑. 非常规突发事件下,需求信息的极度缺失是不可回避的,现有文献研究主要假定物资需求为常量或需求不确定环境(但事实上假设需求分布信息已知),没有有效刻画需求信息的极度缺失,更没能体现信息缺失下“底线思维”对应急过程中的决策保障作用. 为此,本文从应急管理者系统决策的特点出发,基于“底线思维”探讨非常规灾害事件下的应急物资协同分配问题,提出两层应急物资分配–运输的优化模型. 模型不仅揭示了分配与运输的协同价值,而且发现了鲁棒的两层规划具有强烈的稳健特征,同时发现了鲁棒的优化过程将有助于增强应急物资分配过程中的公平程度.

# 1　应急物资分配–运输模型

## 1.1　模型描述及假设

在应急初始响应阶段,应急救援决策者通常首先基于对灾情的分析和对物资供应量和需求量的估计决定各个灾区物资的分配量,之后救援部门根据分配方案,利用可得到的运输工具将物资尽快运送至灾区. 因而,应急物资的分配和运输是两个密不可分的救援活动,直接影响了整个救援活动的经济和时间效果. 以灾害事件应对初期的物资分配体系为研究背景,将决策过程转化为两个层次的整数规划模型. 顶层模型从成本最小化的角度确定应急资源的最优配置量,而底层模型从节约时间的角度对顶层的分配方案实施运输配送,合理规划车辆的运输路径和数量安排,进而及时、有效地实现应急资源分配的协同优化,最大程度地减少灾难带来的损失.

此外,鉴于在救援初期应急决策者只能对受灾地区的物资需求情况进行粗略估计,因此纳入不确定参数构建鲁棒优化分配模型,解决应急物资在需求不确定条件下的物资分配问题. 模型的建立基于以下基本假设:

1）已知物资供应中心的储备情况;

2）从供应中心到受灾地区的路况和运输时间均为定值;

3）应急中心有权限可以征集足够的车辆以供物资调度.

## 1.2　顶层模型(应急物资分配模型)

相关参数设置如下:

1）参数: $I$ 为 物资储备中心集合, $i \in I$; $J$ 为受灾地区集合, $j \in J$; $s_i$ 为物资储备中心 $i$ 的储备量; $r_j$ 为对于灾区 $j$, 未满足需求的单位惩罚系数; $c_{ij}$ 为物资储备中心 $i$ 到灾区 $j$ 的车辆运输成本.

2）决策变量: $w_{ij}$ 为储备中心 $i$ 提供给灾区 $j$ 的物资需求比率; $w_j$ 为灾区 $j$ 的物资需求未满足率.

则需求确定情况下的顶层–应急物资分配模型为

$$\min Z = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c_{ij} \cdot d_j \cdot w_{ij} + \sum_{j \in J} r_j \cdot d_j \cdot w_j. \tag{1}$$

$$\text{s.t.} \sum_j d_j \cdot w_{ij} \leqslant s_i, \ \forall i \in I; \tag{2}$$

$$w_j + \sum_i w_{ij} = 1, \ \forall j \in J; \tag{3}$$

$$0 \leqslant w_j \leqslant 1, \ \forall j \in J; \tag{4}$$

$$0 \leqslant w_{ij} \leqslant 1, \ \forall i \in I, \forall j \in J. \tag{5}$$

目标函数式(1)代表应急物资分配的统筹成本最小化,包含应急物资的运输成本和受灾点物资需求未满足的惩罚成本;约束式(2)表示对所有灾区的物资分配总量应少于物资中心 $i$ 的储备量;约束式(3)为灾区 $j$ 的物资需求满足率与缺乏率之和为1;约束式(4)和式(5)表示决策变量约束.

## 1.3　底层模型(应急物资运输模型)

当应急决策者对于物资分配量做出合理决策后,应急施救部门需要考虑物资分配方案在实际情况中的配送效率,即如何依据分配量安排车辆、路径以尽量减少由于时间的延误而导致的人员伤亡.

1）参数: $R$ 为由物资储备中心和灾区组成的可行路径集合; $R_{ij}$ 为从物资储备中心 $i$ 到灾区 $j$ 之间的可行路径集合; $V$ 为运输车辆集合; $C$ 为车辆的最大运载容量; $I_r$ 为路径 $r$ 上的物资储备中心集合; $J_r$ 为路径 $r$ 上的灾区集合; $t_r$ 为物资在路径 $r$ 上的运输时间.

2）决策变量: $s_{ijrv}$ 为车辆 $v$ 通过路径 $r$ 从物资储备中心 $i$ 到灾区 $j$ 的运输数量; $b_{rv}$ 为车辆 $v$ 与路径 $r$ 的关联性,若车辆 $v$ 通过路径 $r$, $b_{rv}=1$, 否则为 0.

利用物资分配量作为输入参数,便得到底层运输配送模型为

$$\min T = \sum_{r \in R} \sum_{v \in V} t_r \cdot b_{rv}. \tag{6}$$

s.t.

$$\sum_{v \in V} \sum_{r \in R_{ij}} s_{ijrv} = d_j w_{ij}, \forall i \in I, \ \forall j \in J; \tag{7}$$

$$\sum_{r \in R} b_{rv} \leqslant 1, \ \forall v \in V; \tag{8}$$

$$\sum_{i \in I_r} \sum_{j \in J_r} s_{ijrv} \leqslant C_v \cdot b_{rv}, \forall r \in R, \forall v \in V; \tag{9}$$

$$b_{rv} \in \{0,1\}, s_{ijrv} \geqslant 0, \ \forall i \in I, \forall j \in J, \ \forall r \in R, \ \forall v \in V. \tag{10}$$

目标函数式(6)代表车辆运输物资耗费的总时间最小;约束式(7)表示从储备中心 $i$ 到灾区 $j$ 的物资运输总量满足顶层的物资分配量;约束式(8)表示每部车辆只能通过一条路径;约束式(9)表示车辆从储备中心 $i$ 运输到灾区 $j$ 的物资总量不得超过该车辆的最大运载能力;约束式(10)规定了决策变量的取值范围.

## 2 需求信息有限下的应急物资分配-运输模型

在紧急救援初期,很难精确预测应急物资的需求量. 为了加强决策的稳健性,从“底线思维”的视角,利用 Bertsimas 等[10]的鲁棒优化理论,将确定性模型转化为鲁棒对应模型,以获得鲁棒优化决策,使物资分配方案不会由于需求的变化而在实际应急物流中失去作用. 相比传统使用的随机优化方法,鲁棒优化并不需要明确不确定因素的概率分布情况,它以最坏情况下的优化为基础,确保优化方案对不确定参数的不敏感性. 根据对灾害发展和灾区的人口情况的统计,物资需求的变动区间为

$$U = \{ d_j : \bar{d}_j - \bar{d}_j\theta_j \leqslant d_j \leqslant \bar{d}_j + \bar{d}_j\theta_j \} .$$

其中: $\bar{d}_j$ 为名义值,即对需求的估计值; $\theta_j$ 为偏离名义值的最大程度,取值区间为[0,1],但分布未知. 同时,鉴于所有受灾地区同时遭遇最大需求的发生概率较低,引入参数 $\Gamma$ (不必为整数)来反映决策者对需求情形的风险态度,以调节解的最优性和鲁棒性. 当 $\Gamma = |J|$ 时,决策者的风险规避意识最强,优化方案的鲁棒性最高,但是最优性最差.

对于约束式(1)和式(2),分别引入参数 $\Gamma_0$ 和 $\Gamma_i, i = 1,\cdots,|I|$,对物资需求的扰动进行控制. 参考给予约束最大保护的原则,约束变为

$$\sum_{j\in J} \bar{d}_j\Big(\sum_{i\in I} c_{ij}\omega_{ij} + \gamma_j\omega_j\Big) + \beta_0(\Gamma_0) \leqslant z,$$

$$\sum_{j\in J} \bar{d}_j\omega_{ij} + \beta_i(\Gamma_i) \leqslant s_i, \ \forall i \in I.$$

其中

$$\beta_0(\Gamma_0) = \max_{\{S_0\cup t_0 | S_0\subseteq J_0, |S_0| = \lfloor \Gamma_0\rfloor, t_0\in J_0\backslash S_0\}} \Big\{ \sum_{j\in S_0} \bar{d}_j\theta_j\Big(\sum_{i\in I} c_{ij}\omega_{ij} + \gamma_j\omega_j\Big) + (\Gamma_0 - \lfloor\Gamma_0\rfloor)\bar{d}_{t_0}\theta_{t_0}\Big(\sum_{i\in I} c_{it_0}\omega_{it_0} + \gamma_{t_0}\omega_{t_0}\Big)\Big\}, \quad (11)$$

$$\beta_i(\Gamma_i) = \max_{\{S_i\cup t_i | S_i\subseteq J_i, |S_i| = \lfloor \Gamma_i\rfloor, t_i\in J_i\backslash S_i\}} \Big\{ \sum_{j\in S_i} \bar{d}_j\theta_j\omega_{ij} + (\Gamma_i - \lfloor\Gamma_i\rfloor)\bar{d}_{t_i}\theta_{t_i}\omega_{it_i}\Big\}, \ \forall i \in I. \quad (12)$$

式中: $J_i = \{j | \theta_j > 0\}, i = 0,\cdots,|I|$, $|J_i|$ 为受灾地区的数量; $\Gamma_i \in [0, |J_i|]$, $\lfloor\Gamma_i\rfloor$ 为小于 $\Gamma_i$ 的最大整数; $S_i \subseteq J_i$, 即 $S_i \subseteq J_i$ 为 $J_i$ 的一个子集; $J_i$ 表示 $t_i \in J_i$, 但 $t_i \notin S_i$.

对于式(11)和式(12)的每个约束,等价于如下的一般形式:

$$\max \sum_{j\in J_i} \bar{d}_j\theta_j a_j z_{ij}.$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{j\in J_i} z_{ij} \leqslant \Gamma_i, \ 0 \leqslant z_{ij} \leqslant 1, \ \forall j \in J_i. \quad (13)$$

根据对偶理论,其等价于如下形式:

$$\min \zeta_i\Gamma_i + \sum_{j\in J} p_{ij}.$$

$$\text{s.t.} \ p_{ij} + \zeta_i \geqslant \bar{d}_j\theta_j a_j, \ \forall j \in J_i,$$

$$p_{ij} \geqslant 0, \ \forall j \in J_i, \ \zeta_i \geqslant 0.$$

最终,得到需求不确定条件下的顶层鲁棒物资分配模型为

$$\min Z = \sum_{j\in J} \bar{d}_j\Big(\sum_{i\in I} c_{ij}\omega_{ij} + \gamma_j\omega_j\Big) + \zeta_0\Gamma_0 + \sum_{j\in J} q_j.$$

s.t.

$$\sum_{j\in J} \bar{d}_j\omega_{ij} + \zeta_i\Gamma_i + \sum_{j\in J} p_{ij} \leqslant s_i, \ \forall i \in I;$$

$$q_j + \zeta_0 \geqslant \bar{d}_j\theta_j\Big(\sum_{i\in I} c_{ij}\omega_{ij} + \gamma_j\omega_j\Big), \ \forall j \in J;$$

$$p_{ij} + \zeta_i \geqslant \bar{d}_j\theta_j\omega_{ij} \ \forall i \in I, \ \forall j \in J;$$

$$\omega_j + \sum_i \omega_{ij} = 1, \ \forall j \in J;$$

$$0 \leqslant \omega_j \leqslant 1, \ 0 \leqslant \omega_{ij} \leqslant 1, \ \forall i \in I, \forall j \in J;$$

$$q_j \geqslant 0, \ p_{ij} \geqslant 0, \zeta_0 \geqslant 0, \zeta_i \geqslant 0, \forall i \in I, \forall j \in J.$$

根据模型的强对偶性,可以求得式(13)的最优解 $z_{ij}^*$, 则底层模型变为

$$\min T = \sum_{r\in R}\sum_{v\in V} t_r \cdot b_{rv}.$$

s.t.

$$\sum_{v\in V}\sum_{r\in R_{ij}} s_{ijrv} = \bar{d}_j w_{ij} + \bar{d}_j\theta_j w_{ij} z_{ij}^*, \forall i \in I, \forall j \in J.$$

## 3 数值分析

以某市应急物资调度为背景进行应急物资鲁棒分配和运输配送计划的有效性以及稳健性的验证. 共有 5 个应急物资储备中心,可能的受灾地区有 11 个. 表 1~ 3 分别列出了模型的基本参数设置. 假设对于未满足的需求,惩罚系数为3 000. 所有的运算均通过 GAMS 软件在一台配置为 Intel(R) Core (I5) 2 Quad CPU (1.6GHz),4.0 GB RAM 的计算机上进行.

### 3.1 稳健性分析

为了验证鲁棒模型的稳健性,研究当需求服从均匀分布时,鲁棒模型及确定性模型在不同的应急物资需求波动和决策者风险偏好下平均成本与成本标准差的表现.

鲁棒模型与确定性模型的成本比较如表 4 所示. 从表 4 可以看到,鲁棒分配方案的平均成本与需求波动水平和风险规避程度呈现正相关关系,说明鲁棒优化方案的稳健性是以经济性的牺牲为代价. 虽然鲁棒分配方案的平均成本高于确定性模型的分配方案,但是前者的成本标准差总低于后者. 因此,当仅获知需

求的区间信息时,决策者采用鲁棒优化模型可以实现稳健性较高的分配方案.

**表 1　物资储备中心到受灾地区的运输成本**

Tab.1　The transportation cost from materials reserve center to affected areas

| 物资储备中心 | 灾区 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 10 | 10 | 17 | 30 | 30 | 50 | 54 | 34 | 31 | 28 |
| 2 | 26 | 28 | 8 | 9 | 16 | 35 | 53 | 34 | 35 | 37 |
| 3 | 51 | 52 | 37 | 30 | 14 | 8 | 32 | 22 | 28 | 33 |
| 4 | 57 | 55 | 49 | 47 | 32 | 22 | 11 | 13 | 15 | 20 |
| 5 | 35 | 31 | 21 | 24 | 18 | 32 | 31 | 33 | 12 | 14 |

**表 2　各灾区对物资需求数量的名义值**

Tab.2　The nominal value of the emergency material in affected areas

| 灾区 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 需求 | 1 500 | 1 600 | 1 400 | 1 600 | 1 500 | 1 500 | 1 400 | 1 300 | 1 800 | 1 400 |

**表 3　各个储备中心的物资供给量**

Tab.3　The materials supply in reserve centers

| 物资储备中心 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|---|
| 供给 | 2 500 | 2 000 | 3 000 | 1 500 | 2 000 |

**表 4　鲁棒模型与确定性模型的成本比较**

Tab. 4　The cost of the robust model compared with the deterministic model

| 风险偏好 ($\Gamma$) | 需求波动 ($\theta$) | 确定性模型 | | 鲁棒模型 | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 平均值 | 标准差 | 平均值 | 标准差 |
| 3 | 0.05 | 1 210 | 1 284 | 18 | 10 |
| | 0.25 | 1 203 | 1 483 | 92 | 57 |
| | 0.5 | 1 194 | 1 670 | 184 | 131 |
| | 0.8 | 1 183 | 1 918 | 29 | 24 |
| 6 | 0.05 | 1 210 | 1 330 | 1 927 | 1 281 |
| | 0.25 | 1 204 | 1 678 | 96 | 81 |
| | 0.5 | 1 196 | 2 014 | 193 | 155 |
| | 0.8 | 1 187 | 2 320 | 308 | 288 |

注:总成本 $10^4$

### 3.2　鲁棒运输方案分析

下面分析与鲁棒物资分配决策相匹配的车辆运输配送计划,以期为灾害发生后实施及时救援提供依据. 假设车辆的最大承载量为 1 000,每条路径以物资储备中心为出发点,以途经的受灾地区顺序依次表示,相应的路径运输时间如表 5 所示.

**表 5　从储备中心到灾区的路径运输时间**

Tab.5　The transport time from reserve center to disaster area

| 储备中心 1 路径 | 储备中心 1 运送时间 | 储备中心 2 路径 | 储备中心 2 运送时间 | 储备中心 3 路径 | 储备中心 3 运送时间 | 储备中心 4 路径 | 储备中心 4 运送时间 | 储备中心 5 路径 | 储备中心 5 运送时间 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 1-2, 9-3, 1-5-6, 4-8-10, 4-10-3, 5-6-7, 7-2-1, 4-8-10-9-3 | 77, 105, 27, 15, 105, 112, 147, 18, 24, 18, 89, 42, 252, 30, 45, 151, 211, 63 | 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 2-1, 5-6, 10-4, 7-6-5, 2-1-10-4, 4-9-8-10, 2-1-3-9-8-4-10, 2-1-10-4-8-9-3 | 25, 14, 133, 126, 26, 32, 42, 133, 140, 19, 28, 38, 128, 102, 238, 153, 533, 533 | 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 2-1, 6-5, 10-4, 3-1-2, 6-5-7, 7-1-2, 2-1-3-9, 4-9-8-10 | 98, 112, 112, 98, 14, 8, 24, 45, 51, 15, 126, 18, 24, 216, 46, 88, 309, 125 | 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 1-2, 3-9, 5-6, 7-6, 7-6-5, 1-2-5-6, 4-9-8-10, 10-4-9-8-3 | 24, 34, 119, 119, 34, 30, 40, 54, 57, 51, 36, 137, 46, 90, 100, 211, 146, 102 | 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 1-2, 3-9, 5-6, 7-2-1, 7-5-6, 1-2-5-6, 10-8-9-4, 10-4-8-9-3 | 147, 56, 154, 66, 108, 96, 48, 69, 75, 63, 159, 172, 120, 112, 108, 334, 96, 114 |

尽管假设应急部门有权调集足够多的车辆以供物资调度,但物资运输模型可以提供一个合理的车辆配置方案满足最差需求情形下的经济性和时间性的最优. 若风险偏好 $\Gamma=3$ 和需求波动 $\theta=0.05$, 则如表 6 所示,每个应急物资储备中心只需分别安排 4, 5, 6 ,4, 3 辆运输车辆即可保证鲁棒物资分配方案的顺利实施. 此外,储备中心 3 安排的车辆数量最多,这与实际中决策者按照供应量最多的物资储备中心配置最多车辆的经验判断是一致的. 从分析方案中的路径选择可知,73%的路径覆盖多个灾区,故保持灾区道路之间的良好联通对于降低物资的运输配送时间起到了重要作用.

### 3.3　公平度分析

在分配应急物资时,为了提高受灾地区群众的满意度,有必要分析分配方案对于灾区群众的公平影响程度. 故定义准则:

公平度 $E_j=\max\limits_j(1-w_j)-\min\limits_j(1-w_j)$,

即不同灾区物资需求满足率之间的最大差异值.

不同风险偏好和需求波动下的公平度对比如图 1 所示. 从图 1 可以发现,在其他参数固定的情况下,随着风险规避程度和需求波动水平的增加,灾区间的不公平度也呈现增长的趋势,说明较小的需求波动和较高的风险偏好可以提高灾区对于鲁棒应急物资分配决策的满意度. 相对于确定性模型求得的

分配方案的不公平度 0.923,在不同风险偏好和需求波动下的鲁棒优化模型求得的公平度总是优于前者. 因此,通过对公平指标的分析,可以帮助决策者从平等主义的角度更好地理解鲁棒模型的优势.

**表 6 物资运输车辆安排及路径选择**

Tab.6 Material transportation vehicles and path selection

| 储备中心 | 车辆 | 路径 | 运载量 |
|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 5-6-7 | 256-155-269 |
| | 2 | 4-8-10 | 256-256-256 |
| | 3 | 9-3 | 256-269 |
| | 4 | 1-2 | 256-272 |
| 2 | 1 | 5-6 | 255-255 |
| | 2 | 3 | 257 |
| | 3 | 7 | 46 |
| | 4 | 4-9-8-10 | 255-257-161-43 |
| | 5 | 2-1 | 245-257 |
| 3 | 1 | 7-1-2 | 300-315-300 |
| | 2 | 9 | 315 |
| | 3 | 3 | 272 |
| | 4 | 10 - 4 | 300-300 |
| | 5 | 8 | 300 |
| | 6 | 6 - 5 | 300-300 |
| 4 | 1 | 5 - 6 | 60-163 |
| | 2 | 10 - 4 - 9 - 8 - 3 | 163-171-382-163-0 |
| | 3 | 7 | 163 |
| | 4 | 1 - 2 | 64-171 |
| 5 | 1 | 7 - 2 - 1 | 219-230-219 |
| | 2 | 7 - 5 - 6 | 0-219-219 |
| | 3 | 10 - 4 - 8 - 9 - 3 | 230-219-0-219-230 |

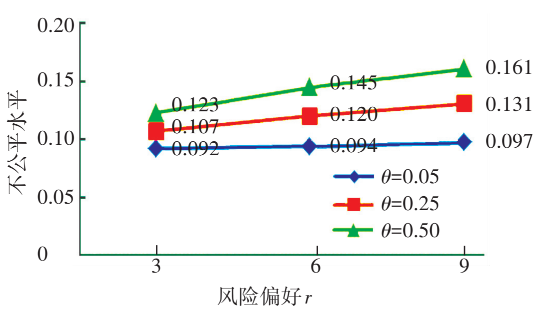


**图 1 不同风险偏好和需求波动下的公平度对比**

Fig.1 The fair degree under demand fluctuations and different risk attitude

## 4 结论与展望

1) 在应急资源的协同管理中,基于分解技术支持的应急物资分配与运输的协同过程具有积极价值.

2) 在信息极度缺失下,体现“底线思维”应急决策过程的鲁棒优化决策具有非常强的稳健特征.

3)鲁棒的两阶段协同优化过程不仅有助于提高应急资源使用效率和运输车辆科学规划,同时非常具有实用价值的是,它能提升应急物资分配过程中的“公平性”.

虽然本文的研究发现了基于“底线思维”的鲁棒两阶段协同规划模型的应急价值,但事实上,应急管理过程中(特别是非常规突发事件应急过程中)应急物资供应以及应急运输过程中也蕴涵着极大的不确定性,如何使“底线思维”的鲁棒模型包括更多的不确性信息是一项极具挑战性的科学任务,需要深入的科学探索. 欣喜的是,鲁棒方法已经引起了应急管理学者的重视,进一步的研究可参考文献[11-12]展开.

## 参考文献

[1] FIEDRICHF, GEHBAUER F ,RICKERS U. Optimized resource allocation for emergency response after earthquake disasters[J]. Safety Science,2000,35(1-3): 41-57.

[2] TZENG G H, CHENG H J ,HUANG T D. Multi-objective optimal planning for designing relief delivery systems[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review,2007,43(6): 673-686.

[3] ÖZDAMAR L, EKINCI E,KÜÇÜKYAZICI B. Emergency logistics planning in natural disasters[J]. Annals of Operations Research, 2004,129(1-4): 217-245.

[4] BARBAROSOGLU G, ÖZDAMAR L, ÇEVIK A. An interactive approach for hierarchical analysis of helicopter logistics in disaster relief operations[J]. European Journal of Operational Research,2002, 140(1): 118-133.

[5] 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 X,MA C,RUAN J. Emergency supplies optimal scheduling considering the public's psychological risk perception[J]. Systems Engineering: Theory & Practice, 2013,33(7):1735-1742.

[6] 于辉 , 刘洋. 应急物资的两阶段局内分配策略[J]. 系统工程理论与实践, 2011,31(3): 394-403.
YU H, LIU Y. Two-stage online distribution strategy of emergency material[J]. Systems Engineering Theory & Practice, 2011, 31 (3):394-403.

[7] 刘春林, 盛昭瀚,何建敏. 基于连续消耗应急系统的多出救点选择问题[J]. 管理工程学报,1999, 13(3):13-16.
LIU C, SHENG Z, HE J. Multi-depot selection problem based on the continuous consumption emergency system[J]. Journal of Industrial Engineering and Engineering Management, 1999,13(3):13-16.

[8] 刘春林, 何建敏 , 盛昭瀚. 多出救点应急系统最优方案的选取[J]. 管理工程学报,2000, 14(1):13-15.
LIU C, HE J, SHENG Z. Selection of optimal scheme for multi-depot emergency systems[J]. Journal of Industrial Engineering and Engineering Management, 2000,14(1):13-15.

[9] 刘春林, 何建敏,施建军. 一类应急物资调度的优化模型研究[J]. 中国管理科学,2001,9(3): 29-36.
LIU C, HE J, SHI J. The study on optimal model for a kind of emergency material dispatch Problem[J]. Chinese Journal of Management Science, 2001,9(3):29-36.

[10] BERTSIMAS D, SIM M. The price of robustness[J]. Operations Research,2004,52(1): 35-53.

[11] BERTSIMAS D, SIM M. Robust discrete optimization and network flows[J]. Mathematical Programming,2003,98(1/2/3): 49-71.

[12] BEN-TAL A, NEMIROVSKI A. Robust optimization-methodology and applications[J]. Mathematical Programming, 2002, 92 (3): 453-480.

(编辑 王小唯 苗秀芝)