

## 基于需求更新的救灾品配送公平与效率协调模型

詹沙磊<sup>1,2</sup>, 刘南<sup>1</sup>, 陈素芬<sup>3</sup>, 叶永<sup>1</sup>

(1. 浙江大学 管理学院, 杭州 310058; 2. 浙江工商大学 计算机与信息工程学院, 杭州 310018; 3. 浙江师范大学 经济与管理学院, 浙江 金华 324000)

**摘要:** 鉴于需求准确度与救灾品配送效率之间的悖反关系, 研究了基于需求更新的救灾品配送效率与公平问题. 通过对某市民政局进行调研, 了解到台风灾害发生时的需求变化规律, 设计一种通过已知需求灾区对未知需求灾区的需求进行贝叶斯更新的需求更新方式, 由此建立救灾品配送模型. 将该模型应用于某台风救灾实例, 通过实例分析表明了该模型的求解速率与精度, 并找到了最优“决策点”, 实现了救灾品配送公平与效率的平衡.

**关键词:** 救灾品物流; 需求更新; 贝叶斯分析; 效率; 公平

**中图分类号:** C934; X4

**文献标志码:** A

## Coordination between efficiency and equity in relief allocation problem via demand updates

ZHAN Sha-lei<sup>1,2</sup>, LIU Nan<sup>1</sup>, CHEN Su-fen<sup>3</sup>, YE Yong<sup>1</sup>

(1. School of Management, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. School of Computer Science and Information Engineering, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310018, China; 3. School of Economics and Management, Zhejiang Normal University, Jinhua 324000, China. Correspondent: ZHAN Sha-lei, E-mail: zhanshalei@126.com)

**Abstract:** Considering the trade-off between demand accuracy and relief allocation efficiency, a relief allocation problem based on demand updates is addressed. The rule of demand updating when the typhoon disaster occurred is learned by municipal bureau of civil affairs, thereby a method of demand updating, which uses the known demand to update the unknown demand, is proposed to model the addressed problem. Then the model is applied to an example of the post-disaster rescue after the destruction of typhoon. Computational results show the high velocity and accuracy of the model, and the optimal “decision-making point” is found to coordinate efficiency and equity well.

**Key words:** disaster relief logistics; demand updates; Bayesian analysis; efficiency; equity

## 0 引言

近些年来, 台风等自然灾害给人类社会造成了巨大的生命财产破坏<sup>[1-2]</sup>, 救灾品物流愈发成为学术界的研究热点<sup>[3-4]</sup>.

救灾品配送问题是救灾品物流的一个关键组成部分, 也是应急救援的一个关键步骤<sup>[5]</sup>. 考虑到各种不确定性, 越来越多的研究开始涉及不确定环境下的救灾品配送问题, 人们通过采取随机规划方法<sup>[6-11]</sup>或鲁棒优化方法<sup>[12]</sup>来解决该类问题. 然而在这些研究中, 需求准确度与救灾品配送效率之间的关系少有被探讨过.

事实上, 需求准确度与救灾品配送效率之间是

此消彼长的关系<sup>[13-14]</sup>. 随着时间的推移, 需求准确度会越来越高, 而救灾品配送的效率则越来越低. 强调前者意味着更多的公平, 强调后者意味着更好的效率<sup>[15-16]</sup>, 两者缺一不可, 如何协调两者显得尤为重要. 詹沙磊等将贝叶斯序贯决策方法分别应用于基于单一运输方式的应急选址-配送问题<sup>[15]</sup>和基于多种运输方式的应急扩建-配送问题<sup>[16]</sup>, 探讨了救灾品配送的公平与效率问题. 本文的研究是文献<sup>[15-16]</sup>的延续, 区别在于: 设计一种通过已知需求灾区对未知需求灾区的需求进行贝叶斯更新的需求更新方式, 由此建立救灾品配送模型.

收稿日期: 2013-01-31; 修回日期: 2013-06-20.

基金项目: 国家自然科学基金项目(90924023).

作者简介: 詹沙磊(1985—), 男, 讲师, 博士, 从事物流与供应链管理的研究; 刘南(1961—), 男, 教授, 博士生导师, 从事物流与供应链管理、交通运输规划与管理等研究.

# 1 模型描述

## 1.1 符号

### 1.1.1 集合和参数

令  $I$  为灾区  $i$  的集合,  $i \in I$ ;  $I'$  为未获得准确需求的灾区集合,  $i' \in I'$ ;  $I''$  为已获得准确需求的灾区集合,  $i'' \in I''$ ;  $J$  为救灾中心  $j$  的集合,  $j \in J$ ;  $K$  为救灾品  $k$  的集合,  $k \in K$ ;  $M$  为车型  $m$  的集合,  $m \in M$ ;  $S$  为观测时刻  $s$  的集合,  $s \in S$ ;  $D_{ij}$  为救灾中心  $j$  到灾区  $i$  的距离 (m);  $C$  为救灾中心对灾区的最大覆盖范围 (m);  $w_k$  为反映救灾品  $k$  重要性的权重;  $V_m$  为车辆  $m$  的最大装载重量 (kg/辆);  $U_{jm}$  为车辆  $m$  在救灾中心  $j$  的最大规模 (辆);  $d_{iks}$  为在观测时刻  $s$  灾区  $i$  对救灾品  $k$  的需求 (kg);  $H$  为每两个观测时刻之间的固定时间间隔 (s);  $T_i$  为灾区  $i$  最早获得准确需求的时间 (s);  $f_m$  为车辆  $m$  单位距离的运输成本 (元/m);  $B$  为救灾预算 (元).

### 1.1.2 决策变量

令  $x_{ijm}$  为负责配送救灾品从救灾中心  $j$  到灾区  $i$  的车辆  $m$  的数量 (辆),  $y_{ijkm}$  为救灾品  $k$  通过车辆  $m$  由救灾中心  $j$  配送到灾区  $i$  的数量 (kg),  $u_{ik}$  为灾区  $i$  对救灾品  $k$  的需求短缺量 (kg).

## 1.2 救灾品需求的贝叶斯更新

作者从某市民政局救灾救济社会福利处调研了解到, 台风刚发生时, 决策者无法快速获得准确的救灾品需求, 而且不同地区获得需求的时间各不相同. 此时, 那些较早获得需求的灾区  $i''$  能否为暂时未获得需求的灾区  $i'$  提供需求预测的修正支持? 如果这两类灾区的需求之间存在关联, 且这种关联已知、可量化, 则可以使用贝叶斯定理, 通过部分灾区的已知需求对其他灾区的未知需求进行贝叶斯更新与修正.

首先得出两类灾区的数学表达式, 其中  $i' \in I' = \{i|T_i > s\}$ ,  $i'' \in I'' = \{i|T_i \leq s\}$ ,  $I' + I'' = I$ .

经调研发现, 灾区  $i$  在获取准确的救灾品需求之前, 即当  $T_i > s$  时, 需求是一个概率分布函数已知的随机变量  $P_{ik}$ . 设  $P_{ik}$  服从正态分布, 即  $P_{ik} \sim N(\mu_{ik}, \tau_{ik}^2)$  (这里需要说明的是,  $N(\mu_{ik}, \tau_{ik}^2)$  的值域为  $(-\infty, +\infty)$ , 表明  $d_{iks}$  可能为负数, 当这种情况发生时 (虽然发生概率极低), 可以认为此时灾区  $i$  对救灾品  $k$  的内部供应处于充盈状态). 而当  $T_i \leq s$  时, 表明灾区  $i$  已获得准确的救灾品需求  $Q_{ik}$ . 因此  $d_{iks}$  的表达式如下:

$$d_{iks} = \begin{cases} P_{ik} \sim N(\mu_{ik}, \tau_{ik}^2), & i \in I'; \\ Q_{ik}, & i \in I''. \end{cases} \quad (1)$$

显然, 随着时间的推移, 集合  $I''$  的规模 ( $i''$  的个数) 越来越大, 而集合  $I'$  的规模 ( $i'$  的个数) 越来越小. 这意味着越来越多的灾区获得准确需求, 直至所有的

灾区皆获取准确需求.

$i'$  和  $i''$  的需求之间的关联是可以量化的. 某市作为台风灾害多发区, 积累了几十年的抗台经验和灾情数据. 因此通过相关历史统计数据可以算出似然函数  $\pi(P_{i''k}|P_{i'k})$ , 即

$$\pi(P_{i''k}|P_{i'k}) \sim N(\theta_{i'i''k} \cdot P_{i'k}, \sigma_{i'i''k}^2). \quad (2)$$

由式 (1) 和贝叶斯定理<sup>[17]</sup>, 计算出  $P_{i''k}$  的边际概率分布函数为

$$\pi^{\text{Mar}}(P_{i''k}) \sim N(\theta_{i'i''k} \cdot \mu_{i'k}, \sigma_{i'i''k}^2 + \theta_{i'i''k}^2 \tau_{i'k}^2), \quad (3)$$

以及  $P_{i'k}$  的后验概率分布函数为

$$\pi^{\text{Pos}}(P_{i'k}|P_{i''k}) \sim N(\rho_{i'i''k}, \nu_{i'i''k}^2). \quad (4)$$

其中

$$\rho_{i'i''k} = \frac{\sigma_{i'i''k}^2 \cdot \mu_{i'k} + \tau_{i'k}^2 \cdot \theta_{i'i''k} \cdot P_{i''k}}{\sigma_{i'i''k}^2 + \tau_{i'k}^2 \cdot \theta_{i'i''k}^2}, \quad (5)$$

$$\nu_{i'i''k} = \frac{\sigma_{i'i''k} \cdot \tau_{i'k}}{\sqrt{\sigma_{i'i''k}^2 + \tau_{i'k}^2 \cdot \theta_{i'i''k}^2}}. \quad (6)$$

将  $Q_{i''k}$  视为  $P_{i''k}$  的观测值, 将式 (4) 和 (5) 中的  $P_{i''k}$  用  $Q_{i''k}$  取代, 得到

$$\pi^{\text{Pos}}(P_{i'k}|Q_{i''k}) \sim N(\rho_{i'i''k}, \nu_{i'i''k}^2), \quad (7)$$

$$\rho_{i'i''k} = \frac{\sigma_{i'i''k}^2 \cdot \mu_{i'k} + \tau_{i'k}^2 \cdot \theta_{i'i''k} \cdot Q_{i''k}}{\sigma_{i'i''k}^2 + \tau_{i'k}^2 \cdot \theta_{i'i''k}^2}. \quad (8)$$

这里有一个问题, 随着时间的推移, 集合  $I''$  中的元素  $i''$  的个数会逐渐增多. 由于式 (7) 是针对  $I''$  中的某一个  $i''$  对  $I'$  中的某一个  $i'$  进行需求更新, 当集合  $I''$  中的元素  $i''$  个数为  $n$  (大于 1) 时, 式 (7) 的结果也会有  $n$  个, 相当于对  $i'$  的需求进行了  $n$  次贝叶斯更新. 为了使对  $i'$  的需求预测结果更加准确, 本文综合所有更新的结果, 设计一个加权的贝叶斯更新函数, 由此获得经加权贝叶斯更新后的灾区  $i'$  的需求, 即

$$\pi^{\text{WPos}}(P_{i'k}|Q_{i''k}) = \frac{\sum_{i'' \in I''} \pi^{\text{Pos}}(P_{i'k}|Q_{i''k})}{n}. \quad (9)$$

至此, 可总结出两类灾区  $i'$  和  $i''$  的需求更新方式: 对于  $i'$ , 其需求仍为随机变量, 其后验概率分布函数可通过式 (9) 的贝叶斯更新计算得到; 对于  $i''$ , 其需求为确定性的常数  $Q_{i''k}$ .

## 1.3 基于需求更新的救灾品配送模型

目标函数为

$$\min \sum_i \sum_k w_k \cdot u_{ik}. \quad (10)$$

约束条件为

$$x_{ijm} \begin{cases} \geq 0, & D_{ij} \leq C; \\ = 0, & D_{ij} > C; \end{cases} \quad \forall i, j, m. \quad (11)$$

$$\sum_i \sum_j \sum_m D_{ij} \cdot f_m \cdot x_{ijm} \leq B. \quad (12)$$

$$\sum_i x_{ijm} \leq U_{jm}, \quad \forall j, m. \quad (13)$$

$$\sum_k y_{ijkm} \leq V_m \cdot x_{ijm}, \forall i, j, m. \quad (14)$$

$$\sum_j \sum_m y_{ijkm} \leq E(d_{iks}), \forall i, k. \quad (15)$$

$$u_{ik} = E(d_{iks}) - \sum_j \sum_m y_{ijkm}, \forall i, k. \quad (16)$$

$$E(d_{iks}) = \begin{cases} \sum_{i'' \in I''} \rho_{ii''k} / n, & i \in I'; \\ Q_{ik}, & i \in I''. \end{cases} \quad (17)$$

$$x_{ijm} \text{ 是非负整数, } \forall i, j, m. \quad (18)$$

$$y_{ijkm} \geq 0, \forall i, j, k, m. \quad (19)$$

式(10)表示最小化灾民对救灾品的需求短缺量;式(11)是救灾中心对灾区的覆盖范围约束,旨在保证救灾品配送的及时性;式(12)为预算约束;式(13)是车辆在救灾中心的最大规模约束;式(14)是车辆对救灾品的最大承载重量约束;式(15)表示救灾品供需之间的关系;式(16)表示需求短缺量;式(17)表示对需求按后验概率取数学期望(可以看到,式(15)~(17)中出现了“观测时刻  $s$ ”,此时  $s$  是作为一个已知参数代入的);式(18)和(19)定义了决策变量的取值范围。

### 1.4 衡量及时性和公平性的指标

在建立了上述模型后,可以给“ $s$ ”代入不同的值,以比较有/无需求更新、一次/多次需求更新的求解结果,从而探讨救灾品配送问题中的效率和公平.假设  $s = 1$  表示决策者不更新需求,直接做出救灾品配送决策;  $s = 2$  表示等到时刻 2 时更新需求,再做决策;以此类推。

设置及时性指标  $G_1$  为

$$G_1 = (s - 1) \cdot H, \quad (20)$$

该指标表示因需求更新而延误的时间.随着时间的推移,延误时间也随之增加,因此可视该指标为需求更新的“受损”。

再设置公平性指标  $G_2$  为

$$G_2 = \frac{\sum_i \sum_k w_k \cdot \left| Q_{ik} - \sum_j \sum_m (y_{ijkm})^* \right|}{\sum_i \sum_k w_k \cdot Q_{ik}}, \quad (21)$$

其中  $(y_{ijkm})^*$  为  $y_{ijkm}$  的最优解.该指标的含义是灾民收到的救灾品数量与其实际需求之间的误差率(简称“需求满足的误差率”),分子之所以取绝对值是因为无论供应过量还是短缺都将导致不公平.该指标可以反映需求预测的精确度,随着时间的推移,该指标将随之减小,因此可视该指标为需求更新的“受益”。

## 2 实例分析

### 2.1 实例描述

某台风侵袭了某市,包括 RA、PY、CN、WC、TS 等 5 个县市受灾.台风过后,相关部门组织 SQ、YJ、YQ、DT 四个县市(区)的救灾中心对灾区进行救援.各救灾中心常备有口粮与衣被两种救灾品(重要程度分别为 0.7 和 0.3),以及轻、中、重三种车型.为保证救灾品的及时送达,相关部门拟投入 1 200 万元的救灾预算,且规定车辆的最远配送半径为 150 km.其他参数设置见表 1~表 5。

表 1 随时间更新的救灾品需求

灾区	1 000 kg							
	台风刚发生		24 小时之后		48 小时之后		72 小时之后	
	口粮	衣被	口粮	衣被	口粮	衣被	口粮	衣被
RA	$N(350, 80^2)$	$N(10, 2.3^2)$	450	0	450	0	450	0
PY	$N(200, 45^2)$	$N(8, 1.8^2)$	$N(200, 45^2)$	$N(8, 1.8^2)$	$N(200, 45^2)$	$N(8, 1.8^2)$	315	0
CN	$N(400, 95^2)$	$N(50, 11.8^2)$	$N(400, 95^2)$	$N(50, 11.8^2)$	500	16.2	500	16.2
WC	$N(500, 120^2)$	$N(30, 7^2)$	600	9	600	9	600	9
TS	$N(280, 65^2)$	$N(18, 4.2^2)$	362	4.55	362	4.55	362	4.55

表 2 两类灾区需求之间的关联

$\theta_{i' i'' k}, \sigma_{i' i'' k}$	RA		PY		CN		WC		TS	
	口粮	衣被	口粮	衣被	口粮	衣被	口粮	衣被	口粮	衣被
RA	-	-	0.71, 35	0.76, 1.9	1.22, 68	4.76, 6.3	1.50, 103	2.80, 4.1	0.89, 49	1.63, 2.4
PY	1.91, 65	1.15, 2.3	-	-	2.10, 65	5.95, 6.5	2.63, 100	3.52, 4.2	1.56, 46	2.02, 2.5
CN	0.96, 67	0.18, 2.2	0.62, 33	0.15, 1.8	-	-	1.29, 101	0.56, 4.0	0.78, 48	0.32, 2.3
WC	0.77, 68	0.31, 2.2	0.51, 36	0.25, 1.8	0.84, 67	1.58, 6.0	-	-	0.62, 47	0.54, 2.4
TS	1.39, 66	0.52, 2.3	0.89, 34	0.42, 1.8	1.53, 69	2.63, 6.1	1.87, 106	1.57, 4.3	-	-

表 3 救灾中心到灾区的距离 m

灾区	救灾中心			
	SQ	YJ	YQ	DT
RA	40 000	55 000	60 000	80 000
PY	45 000	70 000	75 000	95 000
CN	65 000	90 000	95 000	115 000
WC	75 000	100 000	110 000	135 000
TS	145 000	170 000	180 000	200 000

表 4 车辆在救灾中心的最大规模 辆

救灾中心	轻型车	中型车	重型车
SQ	32	27	22
YJ	18	13	8
YQ	25	20	15
DT	15	10	5

表5 其他参数

参数	轻型车	中型车	重型车
车辆载重/(kg/辆)	5000	10000	20000
单位运输成本/(元/m)	0.1	0.2	0.3

2.2 实例求解与分析

通过 Xpress-MP 7.0 编程求解, 分别将 1、2、3、4 代入模型中的“s”, 求解不同需求更新情况下的救灾品配送决策. 结果表明, Xpress-MP 运行时间非常少, 每次求解过程均未超 1s, 且最优解十分接近最优界, 具有很高的精度.

各次救灾品配送决策的求解结果如图 1~图 4 所示. 在不同需求更新情况下, 救灾品运到灾区的线路、载体以及数量都不尽相同. 在每一时刻, 决策者根据当前所获得的需求选择最优的配送线路、载体和数量, 以最小化灾民的需求短缺量.

将不同需求更新情况下的最优解集分别代入式 (21), 求得需求满足的误差率分别为 23.84%、7.03%、4.53% 和 4.01%. 显然, 随着时间的推移, 决策者愈发

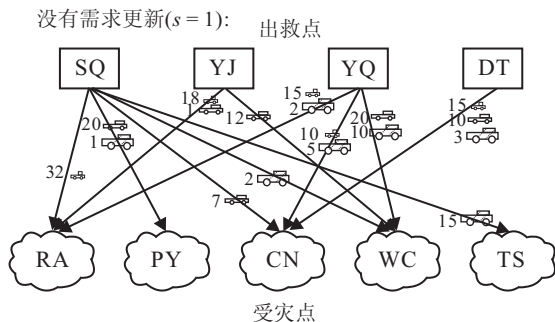


图1 没有需求更新情况下的配送决策

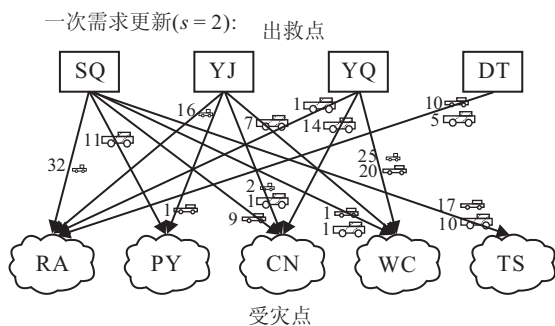


图2 一次需求更新后的配送决策

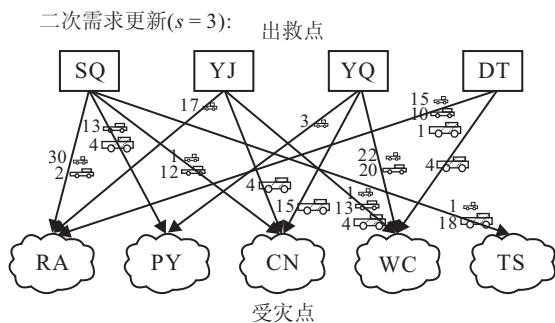


图3 二次需求更新后的配送决策

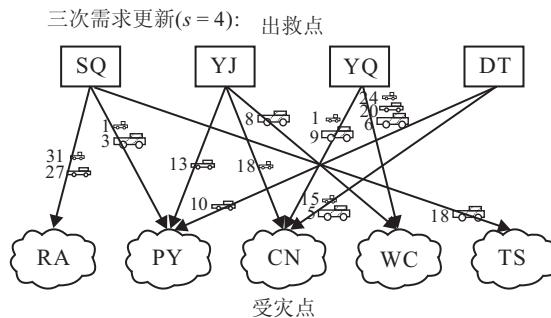


图4 三次需求更新后的配送决策

能够准确地满足灾民的需求, 因为需求准确度在不断提高. 这得益于两方面: 一是越来越多的灾区获得了准确的需求; 二是未获得准确需求的灾区更新了需求预测, 使其更接近于准确需求.

3 效率与公平的权衡

通过前面的求解, 得到了需求满足误差率  $G_2$  的序列数据. 图 5 中的  $G_2$  曲线是据此描绘的需求满足误差率曲线. 由图 5 可知, 需求满足误差率随时间递减, 且其递减率也递减, 即  $\Delta G_2 / \Delta G_1 < 0, \Delta(\Delta G_2 / \Delta G_1) / \Delta G_1 < 0$ . 这说明需求更新在灾害初期的作用比在灾害后期的作用更显著. 因为在灾害初期, 需求的“迷雾”笼罩于大部分灾区, 决策者首先需要了解灾区的需求才能做出正确的救灾决策, 而正确的救灾决策意味着公平性. 在灾害后期, 大部分灾区的需求已明朗, 救灾品的配送效率才是决策者首要考虑的因素.

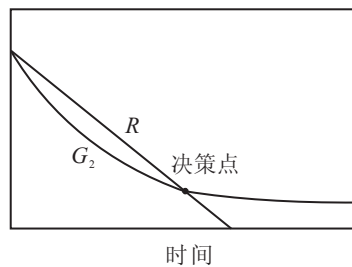


图5 需求满足误差率曲线及“决策点”

现在要考虑的问题是, 在效率与公平面前, 决策者应做如何取舍. 假设  $R$  是决策者可以接受的最大需求满足误差率曲线, 将其绘入图 5 中. 显然, 决策者选择决策的最佳时机是图 5 所示的“决策点”, 此时  $\Delta R = \Delta G_2$ . 在“决策点”左侧, 因为单位时间需求满足误差率的减小量高于决策者的心理预期, 所以决策者选择更新需求, 而不急于决策. 而在“决策点”右侧, 单位时间需求满足误差率的减小量低于决策者的心理预期, 决策者认为此时“效率”优于“公平”, 需马上决策.

如果  $R$  是固定的, 则决策者可以通过使  $G_2$  曲线左移, 从而使“决策点”向右下方移动. 这样, 决策时间推后, 决策者可以获得更多的准确需求. 使  $G_2$  曲线左移的措施有: 提高获得准确需求的速度 (即减小  $H$  的

值)、增加救灾预算等。

## 4 结 论

本文建立了救灾品配送公平和效率的协调模型。主要创新在于:设计一种通过部分灾区的已知需求对其他灾区的未知需求进行贝叶斯更新的需求更新方式,并将救灾品配送模型应用于某台风灾害的救灾实例,找到了最优“决策点”,实现了救灾品配送公平与效率的平衡。

本文的模型仍偏于理想化,现实决策时还需考虑更多复杂因素。有待于进一步拓展的研究方向有:研究更为复杂的救灾品配送网络;研究多种运输方式的救灾品配送问题等。

## 参考文献(References)

- [1] 唐康. 基于受灾点需求动态变化的多阶段应急物资分配问题研究[D]. 杭州: 浙江大学管理学院, 2010: 1-5.  
(Tang K. Research of multi-stage emergency materials allocation problem based on dynamic demand of multi-hit points[D]. Hangzhou: School of Management, Zhejiang University, 2010: 1-5.)
- [2] 彭岷. 基于系统动力学的应急物资补货决策模型研究[D]. 成都: 电子科技大学经济与管理学院, 2012: 1-6.  
(Peng M. System dynamics models of replenishment decision for relief supplies[D]. Chengdu: School of Management and Economics, University of Electronic Science and Technology of China, 2010: 1-5.)
- [3] Sheu J B. An emergency logistics distribution approach for quick response to urgent relief demand in disasters[J]. *Transportation Research Part E*, 2007, 43(6): 687-709.
- [4] Huang M, Smilowitz K, Balci B. Models for relief routing: Equity, efficiency and efficacy[J]. *Transportation Research Part E*, 2012, 48(1): 2-18.
- [5] 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.
- [6] Barbarosoğlu G, Arda Y. A two-stage stochastic programming framework for transportation planning in disaster response[J]. *J of the Operational Research Society*, 2004, 55(1): 43-53.
- [7] Beraldi P, Bruni M E. A probabilistic model applied to emergency service vehicle location[J]. *European J of Operational Research*, 2009, 196(1): 323-331.
- [8] Mete H O, Zabinsky Z B. Stochastic optimization of medical supply location and distribution in disaster management[J]. *Int J of Production Economics*, 2010, 126(1): 76-84.
- [9] Salmeron J, Apte A. Stochastic optimization for natural disaster asset prepositioning[J]. *Production and Operations Management*, 2010, 19(5): 561-574.
- [10] Zhan S, Liu N. A multi-objective stochastic programming model for relief resources allocation based on goal programming[C]. *Proc of the 4th Int Joint Conf on Computational Sciences and Optimization*. Kunming: IEEE Computer Society, 2011: 640-644.
- [11] 詹沙磊, 刘南. 基于模糊目标规划的应急物流多目标随机规划模型[J]. *中国机械工程*, 2011, 22(23): 2858-2862.  
(Zhan S L, Liu N. A multi-objective stochastic programming model for emergency logistics based on fuzzy goal programming[J]. *China Mechanical Engineering*, 2011, 22(23): 2858-2862.)
- [12] Ben-Tal A, Chung B D, Mandala S R, et al. Robust optimization for emergency logistics planning: Risk mitigation in humanitarian relief supply chains[J]. *Transportation Research Part B*, 2011, 45(8): 1177-1189.
- [13] Lodree E J, Taskin S. Supply chain planning for hurricane response with wind speed information updates[J]. *Computers and Operations Research*, 2009, 36(1): 2-15.
- [14] Choi T M, Li D, Yan H M. Optimal single ordering policy with multiple delivery modes and Bayesian information updates[J]. *Computers and Operations Research*, 2004, 31(12): 1965-1984.
- [15] 詹沙磊, 刘南. 基于灾情信息更新的应急物资配送多目标随机规划模型[J]. *系统工程理论与实践*, 2013, 33(1): 159-166.  
(Zhan S L, Liu N. Multi-objective stochastic programming model for relief allocation based on disaster scenario information updates[J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2013, 33(1): 159-166.)
- [16] Zhan S, Liu N, Ye Y. Coordinating efficiency and equity in disaster relief logistics via information updates[J]. *Int J of Systems Science*, 2013, Available online: <http://dx.doi.org/10.1080/00207721.2013.777490>.
- [17] Berger J O. *Statistical decision theory and Bayesian analysis*[M]. 2nd ed. New York: Springer-Verlag, 1985: 139-141.

(责任编辑: 李君玲)