

## Review and Prospect of Emergency Logistics under Uncertainty Conditions

Hanping Zhao<sup>1,2\*</sup>, Chence Niu<sup>1,2</sup>, Tingting Zhang<sup>1,2</sup>, Sida Cai<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster, Ministry of Education of China, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

<sup>2</sup>Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, Ministry of Civil Affairs & Ministry of Education the Peoples' Republic of China, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Received March 21, 2018

Accepted April 20, 2018

### Abstract

Emergency logistics is the key process of disaster relief activities. Abruptness and inaccurate prediction of disaster make emergency logistics operated under the condition of uncertainty; these uncertainties are essentially different from ones in traditional business decision. To seek the core and future of research in emergency logistics optimization, the mainly research of emergency logistics under uncertainty conditions in recent years were reviewed. The characteristics of uncertainty appearing in emergency logistics process were analyzed, and the expression of uncertain factors, demand forecasts and objective function definition in decision-making optimization model were summarized; moreover, this article analyzed the key points of research in aspects of emergency logistics operations, uncertainties origination and emergency risks, and provided useful reference and directions for future research.

**Keywords:** emergency logistics, uncertainty, demand forecasts, optimization

## 不确定条件下的应急物流研究综述与展望

赵晗萍<sup>1,2\*</sup>, 牛晨策<sup>1,2</sup>, 张婷婷<sup>1,2</sup>, 蔡思达<sup>1,2</sup>

1. 北京师范大学环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 北京 100875

2. 北京师范大学, 民政部/教育部减灾与应急管理研究院, 北京 100875

**摘要:** 突发事件发生具有突发性和无法准确预测性的特点, 这导致应急物流在构建与运作过程中存在不确定性。这种不确定性与传统商业决策问题中的不确定性有着本质差别。为了确定应急物流研究的核心和方向, 本文对近些年来国内外不确定条件下应急物流优化方面的研究进行了综述: 从灾害的本身特点出发, 阐述了应急物流问题的特征; 从不确定性因素的刻画、需求预测与决策目标定义三个方面总结应急物流主要研究进展; 最后, 本文建议, 应该将应急物流运作、不确定因素的来源和应急过程风险评估等三个方向, 作为应急物流问题的研究重点。

**关键词:** 应急物流, 不确定性, 需求预测, 优化

应急物流是为了满足紧急情况下受灾人员的应急需求, 从救灾点向突发事件发生地, 对应急物

资、信息以及服务的有效流动进行计划、管理与控制的过程<sup>[1]</sup>。它是应急响应的核心活动, 它能否有效的运作是保证灾后幸存者维持生命和生活的关键<sup>[2]</sup>。应急物流要根据灾情或灾害风险评估结果来确定救灾物资的需求, 然后根据需求信息安排物资的供应, 从各级物资储备库或潜在物资的供应商调运到受灾地点, 发放到物资需求者的手中。

**作者简介:** 赵晗萍 (1977-), 女, 汉, 副教授, 博士, 研究方向: 灾害风险评估、离散系统仿真、应急响应技术  
**资助项目:** 国家自然科学基金(41471424); 中央高校基本科研业务费专项资金资助

国内外对应急物流问题越来越关注，一些学者对应急物流方面研究做了详尽综述。如，Kovacs 等<sup>[3]</sup>对灾害救助中的物流运营方面做了详细综述；陈丽群<sup>[4]</sup>对应急物流中有关物资调运的研究进行分析总结；李创<sup>[5]</sup>归纳整理了近些年国内外应急物流的研究文献，并从基础理论、物资调运和运输优化、系统构建三个方面入手，对国内外应急物流的研究现状进行了综述分析。高文军等<sup>[6]</sup>从基本理论、系统构建、风险、存在问题、存在问题对策及相关模型六个方面对应急物流的研究进展进行了综述；Galindo 和 Batta<sup>[7]</sup>在 2013 年从灾害管理中的运用方法、参与环节、灾害的类型、研究贡献和研究过程中的假设这几个方面对灾害管理研究现状进行综述分析。目前，应急物流决策优化问题的研究是从传统运筹学模型改进与扩展而来，其主要分类如图 1 所示。

## 1. 应急物流问题特征分析

### 1.1 不完备的需求信息

自然灾害的发生难以精确预测，不具有周期性，加之人类行为活动的不可预测性，应急物流的需求不确定性的复杂程度要高于传统物流问题。灾害发生后短期灾情速报信息通常是不完备不准确的。如，2014年云南“8·03”鲁甸地震由于偏远地区村寨在地震中有大量山体垮塌，部分村寨几乎整村被掩埋，救援力量到达后才得以进行详细统计。8月3日当日统计的死亡人数为221人，但到了8月7日截止到19:00时的死亡人数已经达到了615人，灾情信息在短时间内发生意料之外的波动。此外，需求信息的发布者并不是物资的需求人——通常灾害救助的政府管理者或者慈善团体才是发布需求信息的主

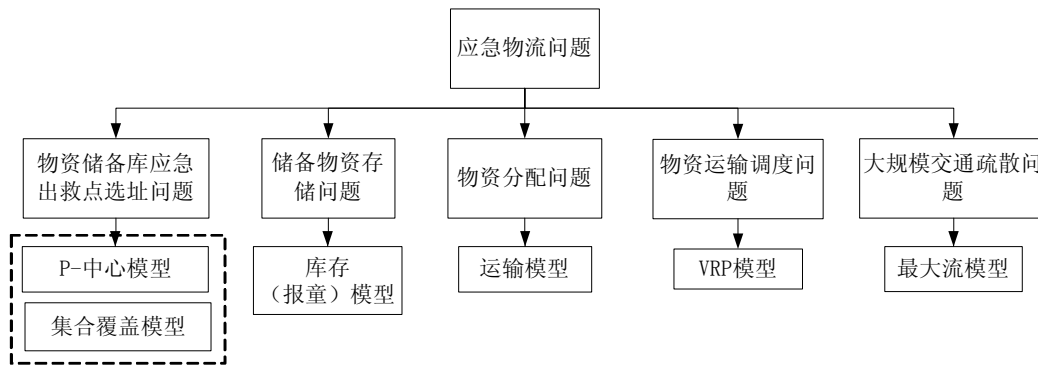


图 1 应急物流问题模型分类

但应急物流问题研究必须要正视其自身的属性特征，在突发事件的应急响应过程中，面对的往往是个不可预测极端不确定的环境，应急救助过程中常常发生各种极端干扰（公路网条件差、内部冲突和有限的技术资源等）而导致应急供应链无法正常运行甚至中断，发展中国家的灾害管理面临的这一问题更加显著。BBC（2011年）的报告，在最近十年遭受自然灾害影响的27亿人中，有99%的人生活在发展中国家<sup>[8]</sup>。在2008年5·12汶川地震发生后，途经重灾区的G317和G213道路中断，导致无法获取灾情信息、救援力量无法进入灾区等应急响应活动受阻。

不确定性是应急管理必须要重点关注的因素，解决应急物流问题也要从本质上分析其不确定特征、刻画不确定因素、解决需求预测问题、合理定义应急决策目标。因此本文将在分析应急物流不确定因素特点基础上，总结应急物流研究进展并展望未来主要研究方向。

体；需求信息的发布存在不确定性——需求的信息在各级物资调配部门之间传递过程中，会由于各种原因导致需求信息的进一步变异或失真。

### 1.2 多样化的不确定因素

应急物流系统不是一个稳定运行的日常系统，不仅是需求难以预测，其供应的主体是由很多渠道组成的，包括政府、非政府组织、企业、个人等。在应急状态下对物资的供应并不是按照需求来供给，其中会有诸多因素（如紧迫性、媒体舆论等）来影响不同受灾区域的供给数量。在物资调运中会有意外干扰破坏交通路网和信息通讯导致供应中断或延迟、甚至在有的极端情况下提前准备好的库存会在灾害发生后被毁于一旦，这使得应急物资在生产和运输过程中也会发生不确定变化。因此应急物流系统中不确定因素种类是多样的。应急物流问题也会因致灾因子、需求物资类型、应急过程不同而

存在本质差异,比如不可预测地震和可以预测的台风,前者侧重于灾后响应后者侧重于灾前备灾,前者对于需求无法预报后者可以进行概率预报。因此针对不同应急情景和问题要选取恰当不确定因素描述方式。

### 1.3 非逐利的决策目标

应急物流不单追求在物资成本、运输成本、库存成本等直接成本的最小化,而是更关注在应急过程中如何保证公众安全,如由于物资短缺而产生的人员伤亡损失,物资公平性分配的满意度评价等。因此如何选取决策目标的评价指标是一个关键问题。应急决策过程中会出现各种不确定条件甚至是极端事件(低概率高损失)干扰,那么如何建立一个合理目标度量方式,使得决策方案在发生各种不确定变化情况下依然稳健也是需要关注的问题。

针对考虑不确定性因素与干扰条件下的应急物流决策优化问题的研究,表1将主要文献进行分类汇总。在第2节中,将具体介绍其研究方法。

## 2. 不确定应急物流问题处理方法

一个考虑不确定性应急优化问题基本表达形式如下:

$$\begin{aligned} \min/\max \quad & F(x,b,\zeta) \\ \text{s.t.} \quad & g_j(x,\zeta) \leq 0, \quad j=1,2,\dots,J \end{aligned} \quad (1)$$

其中,  $\zeta$  为不确定性参数,  $x$  为决策向量,  $b$  为参数向量;  $F(x,b,\zeta)$  为目标函数,表达了衡量应急物流运行效率的标准,如成本、时间、需求被满足程度等;  $g_j(x,\zeta) \leq 0$  为约束条件函数,通常应急过程中受到人力、财力、时间、物资的限制,还会受到交通网络、决策时间逻辑等条件约束。对于包含不确定因素的应急物流决策问题,首先要找到适合于模型中的不确定性因素的刻画方法,然后确定合适的决策目标,并用有效的算法求解这个问题。

### 2.1 不确定因素刻画方法

目前应急物流优化问题中,描述不确定性主要有以下几种的方法:

#### (1) 区间不确定集合

式(1)中不确定因素  $\zeta$  可看作一个对称有界的随机变量,在对称区间  $(\zeta^0 - \zeta, \zeta^0 + \zeta)$  内取值,即区间型不确定集合

$$\Xi = \{ \zeta \mid \zeta \in (\zeta^0 - \zeta, \zeta^0 + \zeta) \}$$

其中  $\zeta^0$  为区间的均值,  $\zeta$  则定义了区间的边界。

应用区间不确定集合估计不确定性比较粗糙,但可以方便的转化成为线性规划模型,目前有一些学者<sup>[9-11]</sup>利用这种方法估计应急需求,并采用鲁棒优化技术解决该问题。

#### (2) 情景分析法

情景分析法将利用构成所研究的系统问题的关键事件(因素)及每个事件和事件之间的发展变化的概率(影响程度),对事件未来的发展状态或结果进行分析与描述<sup>[39]</sup>。按照灾害等级或者影响程度将灾后划分为不同情景  $\omega, \omega=1,2,\dots,s$ ,并定义情景

$\omega$  发生概率为  $p(\omega)$ ,且  $\sum_{\omega=1}^s p(\omega)=1$ 。用  $\zeta_{\omega}$  记在情景

$\omega$  中不确定性因素向量。

情景分析法是目前应急问题中较为常用的一种方法。应急问题是需求推动的,因此需求是最常用的划分情景的依据<sup>[17] [15] [16]</sup>,而交通是应急物流运行的载体也是容易产生不确定的因素<sup>[20]</sup>。从本质上而言,应急问题不确定性来源于灾害不确定性,因此利用灾害风险分析的结果划分情景则更加有依据<sup>[40] [21]</sup>。

灾害发展是一个连贯的影响过程并且影响因素复杂,Barbarosoglu<sup>[41]</sup>根据地震的震级划分地震情景(ES, earthquake scenario);然后根据每种地震情景下的影响划分不同的影响情景(IS, impact scenario)。王旭坪等<sup>[39]</sup>利用具有不确定性的多属性向量对应急路径每个路段未来可能的情景加以分析。

#### (3) 概率分布法

如果根据经验或数据估计不确定参数的近似分布,可以用概率分布描述不确定参数,即令  $\zeta$  服从分布  $\Phi(\cdot)$ 。

如,Shen等<sup>[30]</sup>假设运输时间和需求点需求量是服从对数正态分布,从而建立了大规模灾害下的两阶段车辆路径模型;Beamon和Kotleba<sup>[42]</sup>假设需求服从均匀分布,建立了库存控制模型,以确定在长期应急响应中最优订货量和订货点;He和Hu等<sup>[23]</sup>则假设需求点的需求为泊松分布,为应急供应链系统建立了一个多重营救模型。

#### (4) 机会约束法

在应急条件下,要求绝对满足某些约束条件是不现实的,机会约束规划(Chance constrained programming)模型可以解决这样的问题<sup>[43, 44]</sup>,为允

表 1 主要文献分类汇总

不确定性实现方法	突发事件	解决问题				不确定性因素				目标函数构成				求解方法	作者
		选址	分配	运输	库存	需求	供应	时间	其他参数	成本	时间	满意度	其他		
区间不确定集合	地震	√	√			√				√		√		Lingo	王晶等 <sup>[9]</sup>
	洪水		√			√				√		未满足补偿		Lingo	张玲等 <sup>[10]</sup>
	台风			√		√						受困人群暴露度		CPLEX	Yao 等 <sup>[11]</sup>
	突发		√	√		√				√				仿射调节鲁棒优化	Aharon 等 <sup>[12]</sup>
情景分析法	洪水	√	√		√	√				√				SAA 算法	Chang 等 <sup>[13]</sup>
	地震		√	√		√	√		道路运输能力	√				GMS/OSL	Barbarosoglu <sup>[14]</sup>
	突发	√				√						满足需求数量		CPLEX	Jia 等 <sup>[15]</sup>
	地震	√	√			√	√		成本	√		√		均衡规划	Bozorgi-Amiri <sup>[16]</sup>
	飓风	√	√			√				√				拉格朗日 L-shaped 方法	Rawls 等 <sup>[17]</sup>
	地震	√	√			√		√		√	√			GAMS/CPLEX	Mete 等 <sup>[18]</sup>
	突发			√				√	安全性、畅通度			√		蒙特卡罗模拟和遗传算法的混合智能方法	王旭坪等 <sup>[19]</sup>
	突发			√				√			√			可靠路径搜索算法	缪成等 <sup>[20]</sup>
	突发				√	√								GAMS/CPLEX	Salmeron 等 <sup>[21]</sup>
	突发	√	√			√	√		成本、运输条件	√				粒子群优化算法	Bozorgi-Amiri 等 <sup>[22]</sup>
	台风	√	√			√					√			遗传算法	He 等 <sup>[23]</sup>
	突发				√	√							未满足货物	库存模型	Chakravarty <sup>[24]</sup>
	机会约束	地震	√	√	√	√	√		√	运输成本	√				CPLEX、拉格朗日松弛算法
地震		√	√		√	√		√		√				GAMS/CPLEX	Mete <sup>[26]</sup>
突发				√						√				混合智能算法	孙莉 <sup>[27]</sup>
突发		√		√		√				√				CPLEX	Beraldi 等 <sup>[28]</sup>
概率分布	突发	√		√		√				√				AIMMS & CPLEX	Beraldi 等 <sup>[29]</sup>
	突发		√	√		√	√			√		未满足需求数量		CPLEX、禁忌启发式	Shen 等 <sup>[30]</sup>
随机过程	突发			√					运输速度		√			Dijkstra 算法和蚁群遗传算法	Yuan 等 <sup>[31]</sup>
	突发				√	√				√				库存模型	Beamon <sup>[32]</sup>
模糊集	地震		√			√				√	√			马尔科夫决策分析	王伟等 <sup>[33]</sup>
	突发		√					√	灾害发生概率	√			人口数量	马尔科夫过程分析	Economou 等 <sup>[34]</sup>
模糊集	突发		√			√		√			√			基于仿真优化算法	刘春林 <sup>[35]</sup>
	地震		√	√		√		√	风险	√	√		风险	混沌优化算法	Zheng 等 <sup>[36]</sup>
	突发				√			√			√			模拟退火算法	杨勃等 <sup>[37]</sup>
	突发		√	√		√			成本	√				库存模型	钱佳 <sup>[38]</sup>

许所作决策在一定程度上不满足约束条件，即约束条件满足概率不小于某一置信水平。即令

$$\Pr\{g_{\theta}(x, \zeta) \leq 0, \theta = 1, 2, \dots, p\} \geq \alpha$$

其中  $g_{\theta}(x, \zeta)$ ,  $\theta = 1, 2, \dots, p$ , 为随机约束函数, 是预先设定的置信水平。

比如, Beraldi 等<sup>[28, 29]</sup>在研究急救医疗服务问题时利用机会约束条件描述服务车辆以一定概率满足



需求量。Shen 等<sup>[30]</sup>研究了大规模突发事件下的车辆规划问题时用机会约束表示了需求和时间的不确定性；孙莉<sup>[27]</sup>对不确定环境下应急物资配送问题，将车辆在路径上的行走时间和运输风险设为模糊变量，建立了不确定环境下的机会约束规划模型。

#### (5) 随机过程

随机过程理论常被用于刻画具有时变特点的不确定性。令  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n \dots$  随机变量的一个数列， $X_n$  的值是在时间  $n$  的状态。如果  $X_{n+1}$  对于过去状态的条件概率分布仅是  $X_n$  的一个函数，则

$$p(X_{n+1} = x | X_0, X_1, X_2, \dots, X_n) = p(X_{n+1} = x | X_n)$$

由于马尔科夫过程的特殊性质，在一般物流问题中经常被采用，Chakravarthy 和 Daniel<sup>[45]</sup>将需求假设为马尔科夫过程，补货期假设为负指数分布，并证明供应过程也可以看作马尔科夫过程。Feeney 和 Sherbrooke<sup>[46]</sup>假定需求是任意复合泊松过程。在应急过程中，王伟等<sup>[33]</sup>通过马尔科夫决策过程实现应急资源调度方案的动态优化。Economou 和 Fakinos<sup>[34]</sup>运用马尔科夫决策方法，刻画了灾害变化下应急资源调配的动态优化过程。

概率分布和随机过程都需要足够的历史数据积累估计统计分布，多适用于较常规的应急问题，如消防和医疗急救等。但在极端灾害的应急物流方面还没有足够的历史数据积累，很多情况下对于不确定参数单纯的统计方法难以完全适用。

#### (6) 模糊集

在巨灾的应急物流管理过程中，通常是在缺乏数据经验和信息条件下，面对复杂问题要运转一个复杂系统。有很多难以量化的指标，它们没有分明的数量界限。模糊数是一个解决定性指标有效手段 (Zadeh, 1965)<sup>[47]</sup>，将模型中的不确定变量设为模糊变量  $\xi$ ，其对应的模糊集为  $\Xi$ ，然后用  $\mu_{\xi}(\xi)$  来表示模型中该因素对应的隶属函数。模糊隶属度的形式有很多种，比如三角模糊函数、梯形模糊函数、区间函数等。

Zheng 和 Ling<sup>[36]</sup>把公路运输时间、需求量、救灾物资的期望到达时间和预计到达时间、购置额外物资的上限、价格等不确定变量设为三角模糊变量。刘春林<sup>[35]</sup>利用拟梯形模糊隶属度关系定义应急供应时间满意度和数量满意度。杨勃<sup>[37]</sup>采用模糊数来描述出救点到受灾点的时间。汪传旭和邓先明<sup>[48]</sup>，田军<sup>[49]</sup>等探讨了受灾点需求为模糊变量时的应急救援车辆路径与物资运输优化问题。Behret 和 Kahraman<sup>[50]</sup>将需求、存货、短缺成本看作一个三角

形隶属函数模糊集并且随时间模糊集的模糊性降低，预测越来越准确，具有时间动态性。

#### (7) 函数表达法

在应急响应过程中，由于灾后影响，有一些因素会随着时间或其他连续因素的变化而变化。即用  $\xi(t)$  表示随时间变化的不确定因素。函数表达法最常用于描述应急交通中交通流量变化状态，因为交通流问题已经有了较完备的研究基础。但在其他方面函数建立需要大量数据和精确的物理过程描述。如，Yuan 等<sup>[31]</sup>考虑到随着灾害发生后的时间和影响范围的扩大，运输速度是不确定的。因此引入速度随时间连续变化的函数来描述速度的不确定性。

$$v_{hm}(t) = v_{hm}^0 \times \alpha_{hm} \times e^{-\beta_{hm}t}$$

其中， $v_{hm}(t)$  为灾害条件下  $t$  时刻弧段 (h,m) 上的速度； $v_{hm}^0$  为正常条件下弧段 (h,m) 上的速度； $\alpha_{hm}$  和  $\beta_{hm}$  为在弧段 (h,m) 的参数，根据弧段到灾害中心的距离推断出来。

Fiedrich 等人<sup>[51]</sup>利用指数函数描述了受伤人数随时间变化的规律，建立了动态规划模型，解决地震灾害发生后的应急资源配置问题。

以上几种方法有时并不是单独使用的，可以多种方法结合起来。如，孙莉<sup>[30]</sup>对不确定环境下应急物资配送问题进行研究，根据实际情况将车辆在路径上的行走时间和运输风险设为模糊变量，建立了不确定环境下的机会约束规划模型；Beraldi 等<sup>[29]</sup>针对了在应急系统中的选址问题，用不同的情景来描述需求的变化，建立了两阶段的机会约束规划模型；Shen 等<sup>[30]</sup>研究了大规模突发事件下的车辆规划问题并根据实际情况将问题分为两个阶段—规划阶段和运营阶段，假设运输时间和需求点的需求量是服从对数正态分布的变量，建立了两阶段的机会约束规划模型。

## 2.2 不确定需求预测

在传统物流中，供应商和零售商对于商品的历史信息记录较为完备，市场表现较为稳定，时间序列分析技术作为一项比较灵活的动态分析模型被广泛应用，但这些模型比较适用于较长时间的需求预测和随机规律刻画。在应急物流决策中，准确的需求信息是保障和驱动所有决策正确实施的前提。应急响应的大部分活动都是在紧迫、随时变化甚至是通讯不畅通或中断的情况下进行的，需求的预测只能根据灾前风险评估结果和应急状态下受灾点的实时信息进行。

在灾害发生之前,可以根据灾害影响和区域社会经济特征估算需求,如聂高众等<sup>[52]</sup>提出了基于地区和季节系数城市灾害事故救援力量需求量的预测模型。王楠等<sup>[53]</sup>选取受灾人口、直接经济损失、受灾面积、灾害强度等4个因素,建立了他们与救援物资需求的回归预测模型。这种预测模型适用于可预报的灾害或者为了应急储备做出粗略预估,精确度较低。

而在灾害发生之后,可能无法及时获取需求信息,即使可以获取,需求信息来源混杂,各级政府、灾民自身、企业和NGO等各类组织都会发布需求信息,针对这种情况,Sheu<sup>[54]</sup>应用信息熵模型计算每个发布信息的权重,进而用熵权法确定预测动态救助需求。这个方法在目前信息传播渠道多样化情况下是值得借鉴的。

对于具有时变特点的不确定需求,贝叶斯更新是广泛应用于传统物流的方法<sup>[55-58]</sup>。在应急响应中,通过灾情上报制度、无人机侦查、遥感等手段,可以有效获取相关附加信息。因此可以利用贝叶斯更新方法更加准确预测需求。如Lodree和Taskin<sup>[59, 60]</sup>使用贝叶斯分析将不断获得的飓风风速信息融合到应对飓风的物资储备决策中,建立了一个修正的报童库存模型。Choi等<sup>[55]</sup>比较了两类贝叶斯更新模型,预测季节性产品的均值和方差先验概率。詹沙磊等<sup>[61]</sup>利用贝叶斯定理,对灾害情景的发生概率进行更新和修正。

### 2.3 不确定优化决策目标

应急物流问题决策往往不是以成本或收益为目标,而是考虑受灾公众的救助情况,如最小化伤亡人数(Fiedrich<sup>[51]</sup>),最小化物资到达或延迟时间(Yuan等<sup>[31]</sup>、Zheng等<sup>[36]</sup>、Mete等<sup>[18]</sup>、孙莉<sup>[27]</sup>、缪成等<sup>[20]</sup>、He等<sup>[23]</sup>),最大化受灾群众的满意度(刘春林<sup>[35]</sup>、Bozorgi-Amiri<sup>[16]</sup>、王旭坪等<sup>[19]</sup>);最小化未满足需求物资(Shen等<sup>[30]</sup>、Jia等<sup>[15]</sup>、Chakravarty<sup>[24]</sup>)。应急物流往往是一个复杂系统,要兼顾时间、费用、损失等各方面目标,因此很多学者构建多目标函数<sup>[16, 27, 62-65]</sup>作为决策目标。此外应急问题设计到民生,还要考虑公平性<sup>[64]</sup>和均衡性<sup>[63]</sup>。

除了应急物流问题决策目标的内容,如何选择决策目标的度量也非常关键。不确定优化通常采用期望值准则,无法计算解析解时可以采取样本均值逼近法(SAA: Sample Average Approximation Method)<sup>[66]</sup>。

但基于期望值准则的优化无法体现决策者的偏好,并且应急救援追求目标不仅是传统决策优化意义上找到一个最高效的决策方案,更重要的是要兼顾这个决策方案的稳健性,让其在极端的干扰下依然可以比较稳定持续的运行。鲁棒优化(Mulvey等<sup>[67]</sup>)是一个可行选择,其目的是找到一个近似最优解,使它对任意的不确定性参数观测值不敏感。目前鲁棒优化主要采取两种处理方式,针对使用离散情景描述不确定问题<sup>[68-73]</sup>,用遗憾值或惩罚函数控制在不同情景下最优目标值差距。针对连续的区间不确定集合来描述不确定因素的问题<sup>[9-12, 74]</sup>。通常将不确定因素转化为不确定集合的鲁棒对应问题。

突发事件的发生尤其是极端事件很多是高损失小概率事件,在计算过程中会被忽略。Haimes<sup>[75]</sup>提出分割多目标风险法(The Partitioned Multi-objective Risk Method, PMRM),该方法引入条件期望函数,假定损害落入在一个特定的超越概率范围内。这种方法可以在解决小概率事件风险度量问题,也可以考虑将其纳入应急问题的优化目标中。

### 3. 主要挑战和研究展望

应急物流问题不仅相较于传统物流问题多了不确定的因素,几个本质性的理论问题亟待解决:

应急物流运作过程刻画:实际的应急物流过程是一个涉及政府部门、慈善组织、企业和个人等多个节点和层级的供应体系。对应急物流的运作过程而言,应急供应链不是商业利益驱动,而是纯粹的需求拉动,并且运作的目的不是为了满足商业利益最大化,而是尽量使需求满足程度增加。应急供应链节点之间的物资流通不是完全按照契约关系,而且不同供应方的信息不完全透明。信息的传递也不是按照层级的关系逐级传递,因此对于应急物流乃至应急供应链的运作模式还需要改变传统商业物流问题的模式,从其供需关系的角度进行重新刻画。

确定不确定因素的来源:多数研究关注应急物流不确定刻画,如果要从根本上解决不确定性问题,需要在应急物流运作分析基础上,探讨应急物流中信息与物资的传递变化规律,进而发现信息不确定的根源。此外,由社会舆论导向、信息传播等因素产生的不确定性定量刻画与分析还相对薄弱。目前无人机、遥感等技术手段可以用于灾情损失核查,这些实时信息的更新对应急物流运作不确定性条件的影响也需要充分考虑。

应急过程风险评估:应急物流决策活动以减轻灾害产生的风险后果为目标,因此在自然灾害风险评估体系中应纳入应急物流过程的风险要素。灾害

风险评估理论框架包括致灾因子危险性与承灾体脆弱性评估两部分，多数是以损失评估为结果，并不涉及与减轻灾害风险相关的决策活动，导致风险决策与风险评估脱节。显而易见，应急响应各个环节的决策活动对于灾害风险最终结果是有影响的，但这种动态决策活动如何影响风险结果还没有理论指导。如果将风险评估应用于指导决策，必须要将应急过程风险内容加入到风险评估环节。

### 参考文献

- [1] Sheu J B. An emergency logistics distribution approach for quick response to urgent relief demand in disasters. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2007, 43(6): 687-709.
- [2] Yi W, Kumar A. Ant colony optimization for disaster relief operations. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2007, 43(6): 660-672.
- [3] Kovács G, Spens K M. Humanitarian logistics in disaster relief operations. *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, 2007, 37(2): 99-114.
- [4] 陈丽群. 应急物流中物资调运研究综述. *物流科技*, 2008, (12): 4-6.  
Chen L Q. Renew on the research of material distribution in emergency logistics. *Logistics Sci-tech*, 2008, 31(12):4-6.
- [5] 李创. 国内外应急物流研究综述. *华东经济管理*, 2013, (06): 160-165.  
Li C. Review on domestic and foreign research on emergency logistics. *East China Economic Management*, 2013, (06): 160-165.
- [6] 高文军, 陈菊红, 胡飞虎. 我国应急物流研究综述与展望. *物流科技*, 2009, (08): 6-10.  
Gao W J, Chen J H, Hu F H et al. The retrospect and prospect of chinese emergency logistics study. *Logistics Sci-tech*, 2009, 32(8):6-10.
- [7] Galindo G, Batta R. Review of recent developments in OR/MS research in disaster operations management. *European Journal of Operational Research*, 2013, 230(2): 201-211.
- [8] News B. Counting disaster: Who's dying where? <http://www.bbc.co.uk/news/science-environment-15592761>. 2011-11-05.
- [9] 王晶, 张玲, 黄钧, 等. 基于不确定需求的鲁棒应急物流系统. *数学的实践与认识*, 2009, 39(20): 53-60.  
Wang J, Zhang L, Huang J. The robust emergency logistics system based on uncertain demand. *Mathematics in Practice and Theory*, 2009, 39(20):53-60.
- [10] 张玲, 王晶, 黄钧. 不确定需求下应急资源配置的鲁棒优化方法. *系统科学与数学*, 2010, 30(10): 1283-1292.  
Zhang L, Wang J, Huang J. Robust optimal resource allocation model for uncertain demands. *Journal of Systems Science and Mathematical Sciences*, 2010, 30(10): 1283-1292.
- [11] Yao T, Mandala S R, Chung B D. Evacuation Transportation Planning Under Uncertainty: A Robust Optimization Approach. *Networks & Spatial Economics*, 2009, 9(2): 171-189.
- [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. *Transportation Research Part B Methodological*, 2011, 45(8): 1177-1189.
- [13] Chang M S, Tseng Y L, Chen J W. A scenario planning approach for the flood emergency logistics preparation problem under uncertainty. *Transportation Research Part E Logistics & Transportation Review*, 2012, 43(6): 737-754.
- [14] Barbarosoğlu G, Arda Y. A two-stage stochastic programming framework for transportation planning in disaster response. *Journal of the Operational Research Society*, 2004, volume 55(1): 43-53(11).
- [15] Jia H, Ordóñez F, Dessouky M. A modeling framework for facility location of medical services for large-scale emergencies. *Iie Transactions*, 2007, 39(1): 41-55.
- [16] Bozorgi-Amiri A, Jabalameli M S, Al-E-Hashem S M J M. A multi-objective robust stochastic programming model for disaster relief logistics under uncertainty. *Operations Research-Spektrum*, 2013, 35(4): 905-933.
- [17] Rawls C G, Turnquist M A. Pre-positioning of Emergency Supplies for Disaster Response// Pre-positioning of Emergency Supplies for Disaster Response. *IEEE International Symposium on Technology and Society*. 1-9.
- [18] Mete H O, Zabinsky Z B. Stochastic optimization of medical supply location and distribution in disaster management. *International Journal of Production Economics*, 2010, 126(1): 76-84.
- [19] 王旭坪, 李小龙, 郭武斌. 基于情景分析的应急路径选择研究. *运筹与管理*, 2012, (5): 67-72.  
Wang X P, Li X L, Guo W B, et al. Emergency path selection based on scenario analysis. *Operations Research and Management Science*, 2012,(5):67-72.
- [20] 缪成, 吴启迪, 许维胜. 突发灾害下可靠路径搜索模型与算法. *计算机工程与应用*, 2007, 43(28): 1-3.  
Miao C, Wu Q D, Xu W S. Model and algorithm of reliable path finding under sudden-onset disaster. *Computer Engineering and Applications*, 2007, 43(28):1-3.
- [21] Salmerón J, Apte A. Stochastic Optimization for Natural Disaster Asset Prepositioning. *Production & Operations Management*, 2010, 19(5): 561-574.
- [22] Bozorgi-Amiri A, Jabalameli M S, Alinaghian M, et al. A modified particle swarm optimization for disaster relief logistics under uncertain environment. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2011, 60(1-4): 357-371.
- [23] Xinhua He W H. Modeling Relief Demands in an Emergency Supply Chain System under Large-Scale Disasters Based on a Queuing Network. *Scientific World Journal*, 2014, 2014(1): 195053-195053.



- [24] Chakravarty A K. Humanitarian relief chain: Rapid response under uncertainty. *International Journal of Production Economics*, 2014, 151(151): 146-157.
- [25] Döyen A, Aras N, Barbarosoğlu G. A two-echelon stochastic facility location model for humanitarian relief logistics. *Optimization Letters*, 2011, 6(6): 1123-1145.
- [26] Mete H O, Zabinsky Z B. Preparing for disasters: medical supply location and distribution.
- [27] 孙莉. 不确定环境下应急物资配送优化研究. 兰州交通大学, 2013.
- [28] Beraldi P, Bruni M E, Conforti D. Designing robust emergency medical service via stochastic programming. *European Journal of Operational Research*, 2004, 158(1): 183-193.
- [29] Beraldi P, Bruni M E. A probabilistic model applied to emergency service vehicle location. *European Journal of Operational Research*, 2009, 196(1): 323-331.
- [30] Shen Z, Dessouky M, Ordóñez F. Stochastic vehicle routing problem for large-scale emergencies. *Ise Working Paper*, 2007.
- [31] Yuan Y, Wang D. Path selection model and algorithm for emergency logistics management. *Computers & Industrial Engineering*, 2009, 56(3): 1081-1094.
- [32] Beamon B M, Kotleba S A. Inventory modelling for complex emergencies in humanitarian relief operations. *International Journal of Logistics*, 2006, 9(1): 1-18.
- [33] 王炜, 刘茂, 王丽. 基于马尔科夫决策过程的应急资源调度方案的动态优化. *南开大学学报:自然科学版*, 2010, (3): 18-23.  
W W, Liu M, Wang L. The dynamic optimal method of emergency resources deployment planning based on Markov decision process. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Nankaiensis*. 2010, (3): 18-23.
- [34] Economou A, Fakinou D. A continuous-time Markov chain under the influence of a regulating point process and applications in stochastic models with catastrophes. *European Journal of Operational Research*, 2003, 149(3): 625-640.
- [35] 刘春林, 施建军, 李春雨. 模糊应急系统组合优化方案选择问题的研究. *管理工程学报*, 2002, 16(2): 25-28.  
Liu C L, Shi J J, Li C Y, et al. Selection of the combinatorial optimal scheme for fuzzy emergency system. *Journal of Industrial Engineering and Engineering Management*, 2002, 16(2): 25-28.
- [36] Zheng Y J, Ling H F. Emergency transportation planning in disaster relief supply chain management: a cooperative fuzzy optimization approach. *Soft Computing*, 2013, 17(7): 1301-1314.
- [37] 杨勃, 李小林, 杜冰. 模糊环境下应急系统多目标调度问题求解. *系统管理学报*, 2013, 22(4): 518-525.  
Yang B, Li X L, Du B, et al. Solving Multi-objective emergency scheduling problem in fuzzy environments. *Journal of Systems & Management*, 2013, 22(4): 518-525.
- [38] 钱佳. 不确定环境下模糊应急物资库存模型. *上海海事大学学报*, 2010, 31(1): 33-38.
- Qian J. Fuzzy inventory models of emergency supplies under uncertain environment. *Journal of Shanghai Maritime University*, 2013, 22(4): 518-525.
- [39] 王旭坪, 李小龙, 郭武斌. 基于情景分析的应急路径选择研究. *运筹与管理*, 2012, (5): 67-72.  
Li X L, Li X L, Guo W B. Emergency path selection based on scenario analysis. *Operations Research and Management Science*, 2012, (5): 67-72.
- [40] Chang M S, Tseng Y L, Chen J W. A scenario planning approach for the flood emergency logistics preparation problem under uncertainty. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2007, 43(6): 737-754.
- [41] Barbarosolu G, Arda Y. A two-stage stochastic programming framework for transportation planning in disaster response. *Journal of the Operational Research Society*, 2004, 55(1): 43-53.
- [42] Kotleba B M B, A. S. Inventory modelling for complex emergencies in humanitarian relief operations. *International Journal of Logistics*, 2006, 9(1): 1-18.
- [43] 张英楠, 牟德一, 李辉. 基于机会约束规划的航班应急调度问题研究. *中国安全科学学报*, 2012, 22(12): 82.  
Zhang Y N, Mou D Y, Li H, et al. Solving flight emergency scheduling problem based on chance-constrained programming. *China Safety Science Journal*, 2012, 22(12): 82-88.
- [44] Charnes A, Cooper W W. Chance-Constrained Programming. *Management Science*, 1959, 6(1): 73-79.
- [45] Chakravarthy S R, Daniel J K. A Markovian inventory system with random shelf time and back orders. *Computers & Industrial Engineering*, 2004, 47(4): 315-337.
- [46] Feeney G J, Sherbrooke C C. The S-1, S Inventory Policy Under Compound Poisson Demand. *Manage Sci*, 1966, 12(5): 391-411.
- [47] Zadeh L A. Fuzzy sets. *Information & Control*, 1965, 8(65): 338-353.
- [48] 汪传旭, 邓先明. 模糊环境下多出救点应急救援车辆路径与物资运输优化研究. *系统管理学报*, 2011, 20(3): 269-275.  
Wanf C X, Deng X M. Multi-depot emergency vehicle routing and transportation optimization with fuzzy variables. *Journal of Systems & Management*, 2011, 20(3): 269-275.
- [49] 田军, 马文正, 汪应洛, 等. 应急物资配送动态调度的粒子群算法. *系统工程理论与实践*, 2011, 31(5): 898-906.  
Tian J, Ma W Z, Wang Y L, et al. Emergency supplies distributing and vehicle routes programming based on particle swarm optimization. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2011, 31(5): 898-906.
- [50] Behret H, Kahraman C. A multi - period newsvendor problem with pre - season extension under fuzzy demand. *Journal of Business Economics & Management*, 2010, 11(4): 17.
- [51] Fiedrich F, Gehbauer F, Rickers U. Optimized resource allocation for emergency response after earthquake disasters. *Safety Science*, 2000, 35(1-3): 41-57.



- [52] 聂高众, 高建国, 苏桂武, 等. 地震应急救援需求的模型化处理——来自地震震例的经验分析. 资源科学, 2001, 23(1): 69-76.  
Nie G Z, Gao J G, Su G W, et al. Models on rapid judgment for the emergent rescue needs during earthquake—by analysis on post-earthquake events. Resources Science, 2001, 1, 23(1): 69-76.
- [53] 王楠, 刘勇, 曾敏刚. 自然灾害应急物流的物资分配策略研究. 第五届中国物流学术年会, 2006.
- [54] Sheu J B. Dynamic relief-demand management for emergency logistics operations under large-scale disasters. Transportation Research Part E Logistics & Transportation Review, 2010, 46(1): 1-17.
- [55] Choi T M, Li D, Yan H. Quick response policy with Bayesian information updates. European Journal of Operational Research, 2006, 170(3): 788-808.
- [56] Choi T M, Li D, Yan H. Optimal single ordering policy with multiple delivery modes and Bayesian information updates. Computers & Operations Research, 2004, 31(12): 1965-1984.
- [57] Iyer A V, Bergen M E. Quick response in manufacturer-retailer channels. Management Science, 1997, 43(4): 559-570.
- [58] Eppen G D, Iyer A V. Improved fashion buying with bayesian updates. Operations Research, 1997, 45(6): 805-819.
- [59] Taskin S, Lodree E J. Inventory Decisions for Emergency Supplies Based on Hurricane Count Predictions. International Journal of Production Economics, 2010, 126(1): 66-75.
- [60] Lodree E J, Taskin S. Supply chain planning for hurricane response with wind speed information updates. Computers & Operations Research, 2009, 36(1): 2-15.
- [61] 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. 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. Systems Engineering —Theory & Practice, 2013, 33(1): 159-166.
- [62] Gong Q, Batta R. Allocation and reallocation of ambulances to casualty clusters in a disaster relief operation. Iie Transactions, 2007, 39(1): 27-39.
- [63] 朱建明. 损毁情景下应急设施选址的多目标决策方法. 系统工程理论与实践, 2015, (3): 720-727.  
Zhu J M. Methods of multi-objective decision-making for emergency facility location problem under failure scenario. Systems Engineering —Theory & Practice, 2015, (3): 720-727.
- [64] Huang M, Smilowitz K, Balci B. Models for Relief Routing: Equity, Efficiency and Efficacy. Procedia - Social and Behavioral Sciences, 2011, 17(1): 416-437.
- [65] Zhang Z H, Jiang H. A robust counterpart approach to the bi-objective emergency medical service design problem. Applied Mathematical Modelling, 2014, 38(3): 1033-1040.
- [66] Pagnoncelli B K, Ahmed S, Shapiro A. Sample Average Approximation Method. Mat Puc.
- [67] Mulvey J M, Zenios S A. Robust optimization of large-scale systems. Operations Research, 1995, 43(2): 264-281.
- [68] 刘波, 李波, 李砚. 不确定条件下应急资源布局的鲁棒双层优化模型. 计算机工程与应用, 2013, 49(16): 13-17.  
Liu B, Li B, Li Y. Robust bi-level optimization model for emergency resource location and allocation under uncertain condition. Computer Engineering and Applications, 2013, (16): 13-17.
- [69] 姜涛, 朱金福. 应急设施鲁棒优化选址模型及算法. 交通运输工程学报, 2007, 7(5): 101-105.  
Jiang T, Zhu J F. Robust optimization model and algorithm of emergency establishment. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2007, 7(5): 101-105.
- [70] 王保华, 何世伟. 不确定环境下物流中心选址鲁棒优化模型及其算法. 交通运输系统工程与信息, 2009, 9(2): 69-74.  
Wang B H, He S W. Robust optimization model and algorithm for logistics center location and allocation under uncertain environment. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2009, 9(2): 69-74.
- [71] 钟慧玲, 庄楠, 张冠湘, 等.  $\alpha$ -鲁棒的危险品道路运输应急设施选址问题. 系统工程理论与实践, 2013, 33(5): 1262-1268.  
Zhong H L, Zhuang N, Zhang G X, et al.  $\alpha$ -robust emergency facilities location problems for hazardous materials transportation. Systems Engineering —Theory & Practice, 2013, 33(5): 1262-1268.
- [72] 朱雷, 黎建强, 汪明. 不确定条件下应急管理人力供应链多功能资源配置鲁棒优化问题. 系统工程理论与实践, 2015, (3): 736-742.  
Zhu L, Li J Q, Wang M. Multi-resource robust optimization of emergency human resource supply chain management under uncertainty. Systems Engineering —Theory & Practice, 2015, (3): 736-742.
- [73] 陈涛, 黄钧, 朱建明. 基于信息更新的两阶段鲁棒-随机优化调配模型研究. 中国管理科学, 2015, 23(10): 67-77.  
Chen T, Huang J, Zhu J M. Two-stage Robust-Stochastic Decision Model for Relief Allocation Based on Disaster Scenario Information Updata. Chinese Journal of Management Science, 2015, 23(10): 67-77.
- [74] Yao T, Bental A, Chung B D, et al. Robust Optimization for Dynamic Traffic Assignment Under Demand Uncertainty// Robust Optimization for Dynamic Traffic Assignment Under Demand Uncertainty. Transportation Research Board 89th Annual Meeting, 2010.
- [75] 海姆斯. 风险建模、评估和管理. 西安: 西安交通大学出版社, 2007.