

doi: 10.7690/bgzdh.2023.11.016

基于主成分分析和三角模糊数的应急物资供应能力指标体系

张健健^{1,2}, 郭继坤¹, 费青竹¹

(1. 陆军勤务学院勤务指挥系, 重庆 401331; 2. 中国人民解放军陆军工程大学通信士官学校, 重庆 400035)

摘要: 为深入研究应急物资供应能力内涵及变化演化规律, 从功能、要素、系统等多维视角构建由指挥运筹能力、物资筹措能力、物资供应能力、信息管理能力 4 个维度构成的应急物资供应能力体系; 基于主成分分析法对指标体系进行约简和优化, 利用三角模糊层次分析法确定各级指标的权重。结果表明, 该体系可为应急物资供应能力的优化研究提供理论支持。

关键词: 主成分分析; 三角模糊数; 应急物资供应能力

中图分类号: F259.2 **文献标志码:** A

Index System of Emergency Material Supply Capability Based on Principal Component Analysis and Triangular Fuzzy Number

Zhang Jianjian^{1,2}, Guo Jikun¹, Fei Qingzhu¹

(1. Department of Logistics Command, Department Army Logistics University, Chongqing 401331, China;

2. Communication Sergeant Institution, Army Engineering University of PLA, Chongqing 400035, China)

Abstract: In order to deeply study the connotation and evolution law of emergency material supply capability, an emergency material supply capability system is constructed from the perspectives of function, element and system, which consists of four dimensions: command and operation research capability, material financing capability, material supply capability and information management capability; the index system is reduced and optimized based on principal component analysis, and the weights of indexes at all levels are determined by triangular fuzzy analytic hierarchy process. The results show that the system can provide theoretical support for the optimization of emergency supplies supply capacity.

Keywords: principal component analysis; triangular fuzzy number; emergency material supply capacity

0 引言

近年来, 各类突发事件对应急物资供应带来了极大压力, 特别是 2020 年的新冠肺炎疫情公共卫生事件以及常态化防控期间的物资供应问题引起社会广泛关注。目前国内对应急物资供应能力的研究已从多种不同角度展开, 应着眼优化社会应急资源配置和应急供应, 聚焦军地一体、高效联动、应急应战目标, 对应急物资供应能力内涵、构成要素、演化规律、核心能力的优化控制深入研究, 实现应急物资快速、稳定、精准、高效的供应, 是当前应急管理 with 应急物流领域重要和紧迫的研究课题。笔者借助已有研究和经验, 建立应急物资供应能力指标体系, 从要素、功能和效果的视角诠释应急物资供应能力的构成, 建立系统的指标体系并确立各要素的权重, 为后续应急物资供应关键能力的优化研究提供先导和理论支持。

通过文献调研法发现, 国内外学者采用定性研

究和定量研究的方法进行了大量探讨, 主要从应急物资供应管理, 应急物资供应指挥、决策与预案, 应急物流能力内涵, 应急物资供应体系构建, 应急物流协同协作等方面展开了富有成效的研究^[1-9]。但总体来看, 关于应急物资供应能力要素指标的系统研究缺乏, 侧重基本内涵、总体粗线条的体系分析和建设等定性研究, 偏重从宏观层面进行探讨, 对应急物资供应能力的基本构成、演化规律、核心能力优化控制的研究尚不多见。

1 应急物资供应能力构成要素理论建构

应急物资供应能力的构成可以划分为多个维度。借助已有研究、应急事件物资供应经验、文献研究和课题组集智攻关, 综合要素、过程、职能和成效等多维视角, 初步构建应急物资供应能力指标体系。学者们从不同角度运用不同方法对应急物资供应能力进行分析, 多以构建绩效评估体系的途径剖析应急物资供应能力的基本要素, 普遍认为应

收稿日期: 2023-07-15; 修回日期: 2023-08-11

基金项目: 国家社会科学基金资助项目(15CGL066); 军事类研究生重点资助课题(JY2020B103)

第一作者: 张健健(1985—), 男, 山东人, 博士。

急物流能力主要由有形要素和无形要素 2 部分构成^[3, 5, 9-13]。有形要素是指物流系统的物质结构所形成的客观能力，如物资储备库的大小与分布、运输网络的状况、基础设施设备的工作能力等；无形要素主要是指应急物资供应的指挥机构和管理者物资供应全过程的筹划与管控，且无形要素能力是核心所在。

在结合国内外相关研究基础上，选择具有丰富

应急物资供应经验的领导、专家学者以及一线管理人员作为专家组，对应急物资供应能力构成要素展开深入探讨。遵循指标设计全面与重点相结合、系统性与实用性相兼顾、参照性与开创性相衔接的原则，认为应急物资供应能力主要由指挥运筹能力、物资筹措能力、物资供应能力和信息管理能力 4 个因素层 20 个子因素层构成，具体构成及要素说明如表 1 所示。

表 1 应急物资供应能力构成要素及说明

因素层	子因素层	能力要素说明
指挥管理能力	组织计划能力	理解上级意图，环境态势认知，分析判断情况能力
	正确快速决策能力	对拟选方案快速评价、选择，果断下定决心能力
	指挥调度能力	组织机构运行的可靠性、顺畅性，权责关系是否明确，指挥调度人员与各相关部门和任务部队的配合程度，调整供应方案的及时性
	协调控制能力	各部门和环节相互协调、团结合作的程度，准确控制力量行动，并针对偏差及时调整行动
	突发状况处置能力	对运输受阻、筹措物资缺少、节点供应能力不足、需求急剧增加、需求对象变化等战场不确定变化的处置
	支援保障能力	执行跨领域、跨区域支援任务，计划安排，紧急布置及相互间的协作
筹措能力	需求准确掌握能力	分析指定需求和隐含需求，与多种供应力量的统筹协调
	对需求的快速响应能力	需求信息的处理能力，通用物资筹集到位率，专用物资储备的完善程度，储备库物资到达速度
	统筹调配资源能力	统筹调剂资源，统一调配和保障，本区域难以满足的，与其他区域或战略力量的协调进行调剂补充
	临机需求的处理能力	紧急筹措达成率，筹措时效性
	筹措物资的储备与管理能力	在储备仓库或应急仓库的收发、保存与管理能力
供应能力	运力组织与使用能力	测算运力需求，力量的跨域支援需求，物资标准供应能力，投送过程中指挥控制权的交接，流程、技术及术语的标准化
	物资倒运、装载卸载能力	从物资部署地到装载地的倒运，装卸载协同规则是否明确，与多元力量的协同是否明确
	物资配送精确性	适时、适地、适量完成物资配送
	仓库选取设置能力	选址的合理性，机构设置合理性
信息管理	信息获取和处理能力	基于一张网运行，一个平台指挥，提供决策支持工具。主动、及时、可靠收集相关信息，分类、汇总分析能力
	实时感知、监测、预测	实时感知、监控物资信息，分析预测物资保障需求，评估物资供应效果，为决策计划提供依据
	信息共享能力	信息标准化和规范化水平，以及在此基础上不同层次、不同部门间交流与共享的活动的能力，以及实现该活动的时效性
	信息反馈能力	对情况反馈的及时性、连续性、层次性、针对性，以及准确真实程度

2 应急物资供应能力指标体系的构建

在构建物资供应能力 4 个维度的要素体系后，设置调查问卷，展开问卷调查，通过 SPSS19.0 软件，采用主成分分析法进行探索性分析，对初始应急物资供应能力指标体系进行优化，检验其信度和效度，并通过验证性因素分析验证指标体系的优化程度。

2.1 问卷调查

调查对象包括应急物资供应领域的政府工作人员、军方、专家教授、物资供应企业等共计 115 人，主要调查选项是否适合用来表示供应能力。采用李克特五点量表法，按各测量指标相对于应急物资供应能力的重要程度，设置 5 个等级，分别赋予 1~5 分，其中非常不适合为 1 分，不适合为 2 分，一般为 3 分，适合为 4 分，非常适合为 5 分。共发放问卷 115 份，有效问卷 103 份。

2.2 信度与效度检验

2.2.1 信度检验

首先，通过 SPSS19.0 进行问卷调查的信度分析，结果表明调查问卷测量项目的 Cronbach's α 值均大于 0.85，说明所设置问卷具有较高信度。其次，研究对问卷测量项目进行 KMO 和 Bartlett 球形检验，结果如表 2 所示。KMO 值大于 0.6，Bartlett 球形检验值的显著性水平 P 值小于 0.01，运算结果表明此次问卷调查的取样样本足够、具备较好相关性，可进行探索性因子分析。

表 2 KMO 和 Bartlett 的检验

分类	方式	检验值
KMO		0.942
Bartlett 球形度检验	近似卡方	6 634.461
	df	715.000
	Sig	0

2.2.2 效度检验

利用 SPSS19.0 的降维功能对所发放包含 20 个选项的问卷进行探索性因子分析,使用主成分法,基于特征值进行因子数目抽取,设置特征值大于 1,采用方差最大法对因子矩阵进行旋转,前 4 个因子的相应特征值分别为 3.835、2.881、2.146、1.845,均大于所设置特征值(如图 1 所示),前 4 个因子解释的总方差为 73.847%,表明能够解释问卷的所有题项变量,可将前 4 个因子提取为主成分因子,初步验证了前期研究得出的应急物资供应能力 4 个主要维度结论。通过因子旋转后的结果来看,部分题项的因子贡献率较低,通过与专家进行研究,对部分选项进行合并或舍弃,最终形成 17 个选项的量表进行第 2 轮的探索性因子分析。

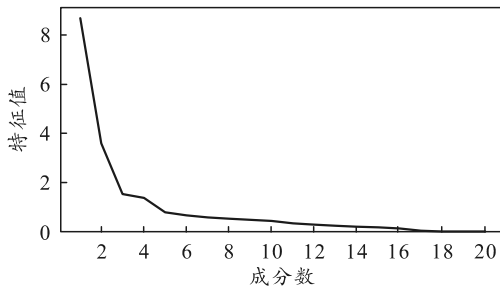


图 1 探索性因子分析碎石

通过主成分分析法,以具有 Kaiser 标准化的正交旋转法进行迭代,结果如表 3 所示,17 个测量项目很好地聚合成 4 个因子,其中: Z11、Z12、Z13、Z14、Z15 归因于因子 1,将原来的“支援保障能力”因素删除,反映物资供应过程中的决策、指挥调度与指挥控制等能力要素; Z21、Z22、Z23、Z24 归因于因子 2 将原来的“筹措物资的储备与管理能力”因素删除,反映物资筹措维度要素; Z31、Z32、Z33、Z34 归因于因子 3,将原来的“防卫能力”因素删除,反映物资供应维度要素; Z41、Z42、Z43、Z44 归因于因子 4,反映信息管理能力维度。各测量项目的因子载荷均大于 0.5,因子载荷的交叉负载不明显,调查问卷的结构效度良好,抽样调查的结果信度较高。

2.3 验证性因子分析

为进一步验证应急物资供应能力指标体系的合理性,运用 LISREL10.2 软件对指标体系进行验证性因子分析。一阶因子模型验证性分析结果显示, χ^2/df 为 2.31, RMSEA 为 0.067, 小于 0.10, 其他拟合指数均大于 0.90 (NNFI 为 0.87), 因子的路径

系数显著水平良好。二阶因子模型验证性分析结果显示, 指挥运筹能力要素、筹措能力要素、供应能力要素和信息管理能力要素的路径系数分别为 0.93、0.86、0.73 和 0.61, 拟合指标与一阶因子分析结果吻合, 与基于主成分分析法的探索性因子分析结果相匹配, 表明本文中的应急物资供应能力要素的结构划分较为合理。

表 3 旋转成份矩阵 a

分 类	成份			
	指挥运筹能力	物资筹措能力	物资供应能力	信息管理能力
a ₁	0.756	-0.030	0.055	0.304
a ₂	0.683	-0.045	0.274	0.286
a ₃	0.697	0.065	0.158	0.127
a ₄	0.701	-0.133	0.323	0.052
a ₅	0.697	-0.071	0.537	0.173
a ₆	0.529	-0.051	0.634	-0.041
a ₇	0.596	-0.074	0.684	-0.080
a ₈	0.487	-0.017	0.698	-0.002
a ₉	0.118	0.058	0.760	0.166
a ₁₀	0.301	0.010	0.378	0.631
a ₁₁	0.190	0.101	0.141	0.584
a ₁₂	0.311	-0.015	0.390	0.725
a ₁₃	0.177	0.025	0.161	0.597
a ₁₄	-0.026	0.926	0.013	-0.015
a ₁₅	-0.014	0.898	0.026	-0.007
a ₁₆	-0.067	0.901	0.027	-0.003
a ₁₇	0.020	0.839	-0.093	0.208

提取方法:主成分分析法。旋转法:具有 Kaiser 标准化的正交旋转法。a: 旋转在 5 次迭代后收敛。

3 三角模糊层次分析法确定指标体系的权重

三角模糊层次分析法是采用三角模糊数取代传统层次分析法的 1~9 标度值对指标进行两两评价,建立模糊判断矩阵,充分考虑了专家在比较判断时,对问题认识的模糊性和不确定性,并在后续的运算中保留此模糊性。判断矩阵中的专家判断结论为三角模糊数,处于所设定的模糊评判区间内,反映了专家对评判结果的自信度,区间跨度越大说明专家对该问题认识的自信度越小,跨度越小则说明专家对该问题认识更为自信,三角模糊层次分析法所包含的自信度衡量的功能,充分考虑了信息模糊性对评价结果的影响,计算指标权重的方法较传统层次分析法不尽相同,具体步骤如下。

3.1 建立模糊判断矩阵

专家对指标体系中各层指标的重要性进行两两比较,比较的结果采用三角模糊数的形式进行表达,将专家判断结论综合后构建模糊判断矩阵:

$$C^h = (p_{ij}^h)_{n \times n} \quad (1)$$

式中： p_{ij}^h 为专家对所对比的2个指标重要性的判断，通过三角模糊数(l_{ij}, m_{ij}, u_{ij})来表达， $i, j=1, 2, 3, \dots, n$ ； l_{ij}, m_{ij}, u_{ij} 分别为三角模糊数的悲观值、可能值和乐观值，由于评判结果来自于多个专家的判断，可运用三角模糊数的运算法则，取加权平均值或几何平均值作为综合三角模糊判断值。

2个三角模糊数 $X_i=(l_i, m_i, u_i)$, $X_j=(l_j, m_j, u_j)$ 的运算法则如下：

$$X_i + X_j = (l_i + l_j, m_i + m_j, u_i + u_j); \quad (2)$$

$$X_i \times X_j = (l_i l_j, m_i m_j, u_i u_j); \quad (3)$$

$$\frac{X_i}{X_j} = \left(\frac{l_i}{l_j}, \frac{m_i}{m_j}, \frac{u_i}{u_j} \right), kX_i = (kl_i, km_i, ku_i). \quad (4)$$

3.2 计算指标权重

首先依据三角模糊数公式：

$$E_i^h = \sum_{j=1}^n p_{ij}^h \div \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n p_{ij}^h \right). \quad (5)$$

计算第 h 层指标 i 的综合模糊值 E_i^h ，同理也可以计算第 h 层指标 j 的综合模糊值 E_j^h ，然后根据三角模糊数公式：

$$V(X_i \geq X_j) = \begin{cases} 1 & m_i \geq m_j \\ \frac{l_i - u_i}{(m_i - m_u) - (m_j - l_j)} & m_i < m_j, u_i \geq l_j \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

表 5 综合模糊判断矩阵

Z_2	Z_{21}	Z_{22}	Z_{23}	Z_{24}
Z_{21}	(1, 1, 1)	(0.18, 0.23, 0.44)	(0.22, 0.31, 0.44)	(0.61, 1.17, 1.67)
Z_{22}	(2.33, 4.33, 5.67)	(1, 1, 1)	(0.28, 0.39, 0.83)	(1.67, 3.33, 5.00)
Z_{23}	(2.33, 3.33, 4.67)	(1.33, 2.67, 3.67)	(1, 1, 1)	(2.33, 3.67, 5.67)
Z_{24}	(0.78, 1.17, 2.00)	(0.21, 0.31, 0.67)	(0.18, 0.28, 0.44)	(1, 1, 1)

3.3.2 计算各层指标权重

以三级指标为例阐述计算指标权重的方法。

1) 计算指标 Z_{21} 的三角模糊数权重 $E^3_{Z_{21}}$ 。

$$\sum_{j=1}^4 p_{1j}^3 = (2.01, 2.71, 3.56), \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 p_{ij}^3 = (16.44, 25.19, 35.18),$$

$$E^3_{Z_{21}} = \sum_{j=1}^4 p_{1j}^3 / \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 p_{ij}^3 = (0.06, 0.11, 0.22), \text{同理可得}$$

Z_{22}, Z_{23}, Z_{24} 的三角模糊权重，分别为： $E^3_{Z_{22}}=(0.15, 0.36, 0.76)$, $E^3_{Z_{23}}=(0.20, 0.42, 0.91)$, $E^3_{Z_{24}}=(0.06, 0.11, 0.25)$ 。

2) 计算 $E^3_{Z_{2i}} \geq E^3_{Z_{2j}}(i, j=1, 2, 3, 4)$ 的可能性程度。

计算 $E_i^h \geq E_j^h$ 可能度，再根据三角模糊数公式

$$e_i^h = \min V(E_i^h \geq E_j^h), i \neq j. \quad (7)$$

将三角模糊数权重转化成实数权重，最后归一化处理得第 h 层指标最终权重 W_h 。

3.3 权重计算

3.3.1 构建模糊判断矩阵

从政府应急管理部门、物流企业管理人员和高校分别邀请一名专家组成3人专家组，对各层指标进行评判，构建模糊判断矩阵，以三级指标的“需求准确掌握能力，对需求的快速响应能力，统筹调配资源能力，临机需求的处理能力”为例构建如表4所示的模糊判断矩阵。

表 4 物资筹措能力要素三角模糊判断矩阵

Z_2	Z_{21}	Z_{22}	Z_{23}	Z_{24}
Z_{21}	(1, 1, 1)	(1/5, 1/4, 1/2)	(1/5, 1/3, 1/2)	(1/2, 1, 1)
	(1, 1, 1)	(1/6, 1/5, 1/3)	(1/4, 1/3, 1/2)	(1/3, 1/2, 1/1)
	(1, 1, 1)	(1/6, 1/4, 1/2)	(1/5, 1/4, 1/3)	(1, 2, 3)
Z_{22}	(2, 4, 5)	(1, 1, 1)	(1/3, 1/2, 1)	(2, 3, 4)
	(3, 5, 6)	(1, 1, 1)	(1/4, 1/3, 1/2)	(1, 3, 5)
	(2, 4, 6)	(1, 1, 1)	(1/4, 1/3, 1)	(2, 4, 6)
Z_{23}	(2, 3, 5)	(1, 2, 3)	(1, 1, 1)	(3, 4, 6)
	(2, 3, 4)	(2, 3, 4)	(1, 1, 1)	(2, 4, 6)
	(3, 4, 5)	(1, 3, 4)	(1, 1, 1)	(2, 3, 5)
Z_{24}	(1, 1, 2)	(1/4, 1/3, 1/2)	(1/6, 1/4, 1/3)	(1, 1, 1)
	(1, 2, 3)	(1/5, 1/3, 1)	(1/6, 1/4, 1/2)	(1, 1, 1)
	(1/3, 1/2, 1/1)	(1/6, 1/4, 1/2)	(1/5, 1/3, 1/2)	(1, 1, 1)

运用式(2)–(4)所示的运算法则求解几何平均值，结果作为综合模糊判断矩阵，如表5所示。同理采用同样的方法构建剩余各级指标综合模糊判断矩阵。

$$V(E^3_{Z_{21}} \geq E^3_{Z_{22}})=0.43, V(E^3_{Z_{21}} \geq E^3_{Z_{23}})=0.45, V(E^3_{Z_{21}} \geq E^3_{Z_{24}})=1, V(E^3_{Z_{22}} \geq E^3_{Z_{21}})=1, V(E^3_{Z_{22}} \geq E^3_{Z_{23}})=0.85, V(E^3_{Z_{22}} \geq E^3_{Z_{24}})=1, V(E^3_{Z_{23}} \geq E^3_{Z_{21}})=0.88, V(E^3_{Z_{23}} \geq E^3_{Z_{22}})=1, V(E^3_{Z_{23}} \geq E^3_{Z_{24}})=1, V(E^3_{Z_{24}} \geq E^3_{Z_{21}})=1, V(E^3_{Z_{24}} \geq E^3_{Z_{22}})=0.42, V(E^3_{Z_{24}} \geq E^3_{Z_{23}})=0.47.$$

根据公式 $w_i^h = \min \{V(E^3_i \geq E^3_j)\}, i \neq j$ 将三角模糊权重转换为实数权重 $W_{z_2}=(0.43, 0.85, 0.88, 0.42)$ ，将上述权重归一化得 $W_{z_2}=(0.17, 0.33, 0.34, 0.16)$ 。同理可得因素层和其他子因素层的权重，分别为： $W_z=(0.34, 0.17, 0.31, 0.15)$, $W_{z_1}=(0.15, 0.18, 0.24, 0.27, 0.16)$, $W_{z_3}=(0.32, 0.17, 0.33, 0.19)$, $W_{z_4}=(0.37, 0.17, 0.31, 0.15)$ 。最终结果如图2所示。

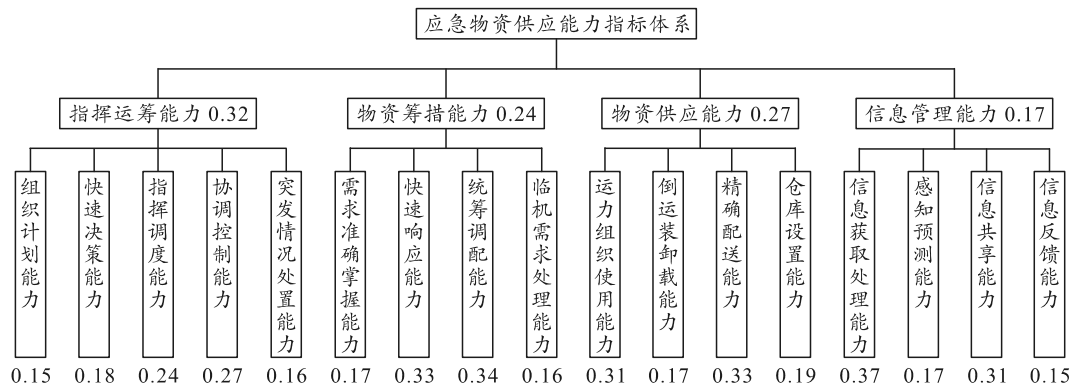


图 2 应急物资供应能力指标及权重

4 结束语

笔者从指挥运筹能力、物资筹措能力、物资供应能力和信息管理能力 4 方面对要素指标进行分析，基于主成分分析法剔除不合理的指标，筛选出 4 个二级指标、17 个二级指标的应急物资供应能力指标体系。应用基于三角模糊数的层次分析法计算各层次要素权重：为破解当前应急物资供应难题，指挥运筹环节要优化管理架构，厘清权责关系，注重体系协同，高效调配物资，做到物资供应过程精确可控；物资筹措环节要优化筹措模式，顺畅体系协同，统筹多方资源，围绕精确筹措、直达保障，形成数据支撑、多方联合、主体能动的物资筹措能力；物资供应环节规范物资保障流程，建立物资保障运行标准规范，强化协调联络，即时顺畅供应，保障手段精确智能；信息管理环节重点打通资源管理、需求提报、信息处理和指挥调控链路，使物资筹措、储存和配送形成整体合力。

笔者虽然构建了应急物资供应能力指标体系，但在评估实践过程中的有效性还需要大量实践数据的验证。采用三角模糊数对专家打分情况进行处理，仍会受到专家个体认识、经验、偏好等的影响，后续需要针对应急物资供应实际保障行动，注重客观数据的采集，对指标体系进行完善修改，最大程度实现客观量化。

参考文献：

[1] 郭景涛. 城市群重大公共安全事件应急指挥协同研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
 [2] 陈慧. 我国应急物流体系存在的主要问题与优化建议

[J]. 中国流通经济, 2014(8): 20-24.
 [3] 徐东, 吴量, 李轲. 基于改进型霍尔模型的应急物流体系建设研究[J]. 物流工程与管理, 2019, 41(7): 8-12.
 [4] 朱永彬, 孙翊, 吴静, 等. 发挥智慧物流在国家应急物资保障体系中作用的建议[J]. 科技中国, 2020(5): 19-21.
 [5] 楼爱花. 供应链物流能力评价模型研究——以浙江省制造业为例[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2011.
 [6] 王茵, 胡大伟, 李博. 基于多供应主体的应急物资供应模型[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2016, 36(6): 98-103.
 [7] 吴磊明, 张文斌, 龙绵伟, 等. 着眼疫情防控物流短板, 加快构建现代应急物流体系[J]. 中国物流与采购, 2020(17): 39-40.
 [8] 赵秋红. 重特大突发事件分形应急物流管理体系建设及其保障机制[J]. 江淮论坛, 2020(4): 13-27.
 [9] MARK W H, JONI A D. Optimizing hurricane disaster relief goods distribution: model development and application with respect to planning strategies[J]. Disasters, 2010, 34(3): 821-844.
 [10] 邓爱民, 张凡, 熊剑, 等. 基于模糊灰色综合评价方法的应急物流能力评价[J]. 统计与决策, 2010, 306(6): 74-76.
 [11] 刘俊. 军民融合应急物流体系保障力生成机理及仿真研究[D]. 西安: 长安大学, 2014.
 [12] TREVOR H C R M. Improving supply chain disaster preparedness a decision process for secure site location [J]. International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, 2015(5): 195-207.
 [13] SHEU J. An emergency logistics distribution approach for quick response to urgent relief demand in disasters[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2017, 43(6): 687-709.