

考虑企业生产能力储备的应急物资配置随机规划模型

胡少龙¹, 韩传峰¹, 孟令鹏², 吴启迪²

(1. 同济大学 经济与管理学院, 上海 200092; 2. 同济大学 电子与信息工程学院, 上海 201804)

摘要 需求的不确定性极大地影响着应急物资配置, 易导致物资供应不足或过剩. 本文引入企业生产能力差异, 考虑受灾地和需求量的不确定性, 以经济成本和惩罚成本最小为目标, 建立基于情景的应急物资配置两阶段随机规划模型, 第 1 阶段确定不同生产能力企业的布局和实物储备, 第 2 阶段根据情景中受灾地需求量的不同生产并配送物资, 应用样本均值逼近方法求解模型. 基于 2008 年雨雪冰冻灾害、汶川地震、华南和中南地区洪灾, 以及台风“黑格比”等自然灾害数据, 设计情景进行算例分析. 结果表明, 储备物资生产能力, 并适当考虑供给延迟和不足的惩罚, 既可大幅减少实物储备, 又能降低物资供应不足的风险; 过度追求风险最小, 需大量增加实物和生产能力储备, 易造成资源浪费.

关键词 应急物资配置; 选址; 生产能力储备; 两阶段随机规划模型; 样本均值逼近法

A stochastic programming model for emergency supplies allocation with consideration of production capacity reserves of enterprise

HU Shaolong¹, HAN Chuanfeng¹, MENG Lingpeng², WU Qidi²

(1. School of Economics and Management, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. School of Electronics Information and Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract The uncertainty of demand impose great impact on emergency supplies allocation. The inappropriate decisions may easily result in insufficient supply or waste. The production capacity of enterprise and uncertainties in disaster-affected locations and demand are integrated in a two-stage stochastic programming model, which are configured with the objectives of minimizing economic and penalty costs. The location of enterprises and physical inventory are determined in the first stage. Then, depending on demand for scenarios, production and distribution decisions are made in the second stage. A sample average approximation method is proposed for solving the model. Based on data from snowstorm, earthquake, flood and typhoon in China, 2008, a serial scenarios are designed for numerical studies. The results show that storing production capacity for supplies and introducing penalty for delay and shortage of demand are beneficial for decreasing physical inventory and risk of insufficient supply. Moreover, physical inventory and production capacity should be greatly increased if minimizing risk of insufficient supply, which may easily result in waste of resources.

Keywords emergency supplies allocation; location; production capacity reserves; two-stage stochastic

收稿日期: 2017-01-09

作者简介: 胡少龙 (1988-), 男, 汉, 湖南益阳人, 博士研究生, 研究方向: 公共安全与应急管理; 通信作者: 韩传峰 (1962-), 男, 汉, 山东寿光人, 教授, 博士生导师, 研究方向: 管理系统与系统工程, E-mail: hancf@tongji.edu.cn; 孟令鹏 (1984-), 男, 汉, 山东昌乐人, 博士后, 研究方向: 关键基础设施网络规划; 吴启迪 (1947-), 女, 汉, 浙江温州人, 教授, 博士生导师, 研究方向: 管理科学与工程.

基金项目: 国家自然科学基金 (71503185, 91224003, 71403186)

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (71503185, 91224003, 71403186)

中文引用格式: 胡少龙, 韩传峰, 孟令鹏, 等. 考虑企业生产能力储备的应急物资配置随机规划模型 [J]. 系统工程理论与实践, 2018, 38(6): 1536-1544.

英文引用格式: Hu S L, Han C F, Meng L P, et al. A stochastic programming model for emergency supplies allocation with consideration of production capacity reserves of enterprise[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2018, 38(6): 1536-1544.

programming; sample average approximation method

1 引言

自然灾害应急物资需求具有紧急性、不确定性、多样性等特征, 政府储备供应迅速、保障能力强, 但面临着采购资金不足、储备种类单一、物资轮换困难等问题. 为最大限度地确保物资供应并节约成本, 需充分发挥企业储备在应急物资保障中的补充作用^[1]. 2008 年以来, 我国政府通过编制《自然灾害应急救助物资生产商名录》, 与生产企业签订紧急购销协议, 以及设立物资储备、更新、轮换的财政补偿和核销制度等, 提升了国家的应急物资保障能力^[2]. 但是, 2013 年雅安地震和 2014 年鲁甸地震的救助中, 食物、水、帐篷、棉被、药品和消毒剂等应急物资依然紧缺, 主要原因在于所编制名录仅为各级救灾部门的应急物资采购提供依据和参考, 紧急购销协议没有明确规定物资的种类和数量等. 因此, 亟需优化应急物资配置, 以降低物资供应风险.

实物储备和生产能力储备是常用的应急物资储备方式. 实物储备有利于提高自然灾害应急响应的速度, 但由于应急需求难以预测, 增大了实物储备的决策难度, 储备不足影响救援效率, 过多易造成物资浪费. 生产能力储备指企业保有富余生产能力^[3], 根据应急需求紧急生产, 能够节约库存成本, 降低实物储备不足的风险. 因此, 实物储备与生产能力储备有机结合的应急物资配置模式, 既能满足自然灾害发生初期的物资需求, 为生产赢得时间, 又能减少浪费.

应急物资实物储备的研究多关注库存管理^[4]、采购决策^[5,6]和供应商选择^[7]等问题. 库存管理的研究涉及设施选址、物资分配方案制定和混合库存管理策略^[8,9]等. 采购决策受数量折扣、运输成本、汇率、交货期和服务水平等多种因素影响^[10-13]. 为节约救援成本、降低物资供应风险, 针对不同的突发事件情景, 选择供应商时, 应综合考虑库存管理^[14]、产品线设计^[15]或运输工具选择^[16,17]等问题.

应急物资生产能力储备的研究主要从政府、企业, 以及政企结合的角度展开. 政府角度, 研究无措施、惩罚、惩罚与补贴并行 3 种策略对企业生产能力储备的影响^[18]; 企业角度, 研究政府采购价格对企业实物储备和生产能力储备均衡的影响^[19]; 政企结合角度, 以政府储备成本最小和企业利润最大为目标, 研究企业生产能力储备与政府实物储备或补贴^[20,21]等的均衡, 以及政企联合生产能力储备的资金规划^[22]等问题.

综上, 应急物资实物储备的研究多未考虑生产能力储备, 难以有效降低物资库存成本. 应急物资生产能力储备的研究多从微观角度分析生产能力储备与实物储备或政府补贴等的均衡, 未考虑生产企业的整体布局对运输成本和物资供应及时性的影响, 且多假设需求量服从某种连续分布, 不适用于概率分布函数无法提取的重大自然灾害. 学者多运用基于情景的应急决策方法^[8], 考虑受灾地、灾害发生时间、道路通行能力、物资需求量和供应量等因素, 构建情景描述重大自然灾害的复杂性和不确定性^[23-26].

本文引入企业的储备能力、生产能力和销售价格差异, 考虑受灾地和需求量的不确定性构建自然灾害情景, 以经济成本和惩罚成本最小为目标, 建立应急物资配置的两阶段随机规划模型, 优化企业布局、实物储备和物资生产配送, 模型结构, 见图 1. 考虑的不确定因素较多时, 情景规模增大, 模型复杂度提升, GAMS、CPLEX 等规划软件求解困难, 为此, 设计样本均值逼近方法, 通过算例验证方法的有效性. 与已有研究相比, 本文的主要贡献之一, 即提出考虑企业生产能力的应急物资配置两阶段随机规划模型, 以有效应对应急需求的不确定性.

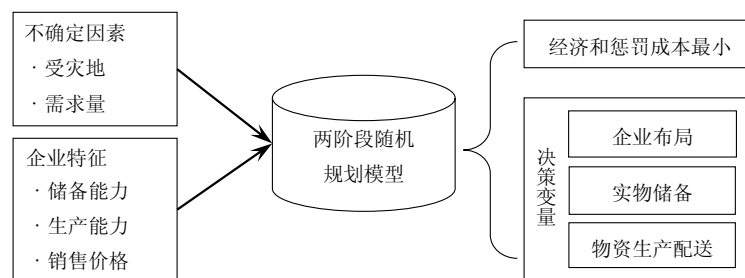


图 1 应急物资配置的两阶段随机规划模型结构

2 应急物资配置的两阶段随机规划模型

假设条件: 应急物资为饮用水; 不同类型企业的储备能力、生产能力和销售价格不同, 且不随情景变化; 若允许企业延期交货, 政府可获得折扣率.

1) 集合和参数

I 表示省份集合, $i \in I$; J 表示受灾省份集合, $j \in J$; L 表示企业类型集合, $l \in L$; T 表示时段集合, $t \in T$; S 表示自然灾害情景集合, $s \in S$. 随情景 s 变化的参数包括情景发生概率 ω_s 和受灾省份 j 的物资需求量 $D_{j,s}$. 受灾省份的不确定性通过需求量表示, 令未受灾省份 j 的需求量为 0. 企业相关参数包括 l 型企业的仓库租用价格 CF_l 、生产能力 V_l 、储备能力 Q_l 和物资销售价格 $CV_{l,t}$, 其中, 若政府获得折扣率, 有 $CV_{l,t} > CV_{l,t+1}$. $H_{i,j}$ 表示省份 i 到 j 的距离, CH 表示单位物资的库存价格, CT 表示单位物资的运输价格.

情景 s 发生后, 各受灾省每时段需要物资救助. 任意时段 t 开始后, 实物储备的物资被快速运往各受灾省, 若数量不足, 需临时生产再进行配送, 会造成供应延迟; 当该时段结束后, 若生产的物资数量仍小于受灾省的需求量, 视为物资供应不足. 本文仅考虑生产的物资有供应延迟, 对供应延迟进行惩罚可确保企业配置一定数量的实物储备, 对供应不足进行惩罚可确保供应一定数量的应急物资. 供应延迟的单位惩罚系数为 α , 供应不足的单位惩罚系数为 β , 规定 $\alpha < \beta$.

2) 决策变量

第一阶段决策变量, 包括是否选择 i 省的 l 型企业 $x_{i,l}$ 和 i 省 l 型企业的实物储备量 $e_{i,l}$. 第二阶段决策变量, 包括情景 s 下, 时段 t 内, i 省企业分配给受灾省份 j 的实物储备物资量 $q_{i,j,t,s}$, i 省 l 型企业为受灾省份 j 生产的物资量 $p_{i,l,j,t,s}$, i 省 l 型企业生产物资的剩余量 $z_{i,l,t,s}$, 受灾省份 j 未满足的需求量 $w_{j,t,s}$, 以及情景 s 结束后, i 省企业实物储备的剩余量 $h_{i,s}$.

$$f = \min fc + ic + \sum_{s \in S} \omega_s \cdot (pc_s + hc_s + tc_s + lc_s), \quad (1)$$

$$fc = \sum_{i \in I} \sum_{l \in L} CF_l \cdot x_{i,l}, \quad (2)$$

$$ic = \sum_{i \in I} \sum_{l \in L} CV_{l,1} \cdot e_{i,l}, \quad (3)$$

$$pc_s = \sum_{i \in I} \sum_{l \in L} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} CV_{l,t} \cdot p_{i,l,j,t,s}, \quad (4)$$

$$hc_s = \sum_{i \in I} CH \cdot h_{i,s}, \quad (5)$$

$$tc_s = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} CT \cdot H_{i,j} \cdot \left(q_{i,j,t,s} + \sum_{l \in L} p_{i,l,j,t,s} \right), \quad (6)$$

$$lc_s = \sum_{i \in I} \sum_{l \in L} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} \alpha \cdot p_{i,l,j,t,s} + \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} \beta \cdot w_{j,t,s}, \quad (7)$$

$$\sum_{l \in L} x_{i,l} \leq 1, \forall i \in I, \quad (8)$$

$$e_{i,l} \leq x_{i,l} \cdot Q_l, \forall i \in I, l \in L, \quad (9)$$

$$z_{i,l,1,s} = 0, \forall i \in I, l \in L, s \in S, \quad (10)$$

$$p_{i,l,j,1,s} = 0, \forall i \in I, l \in L, j \in J, s \in S, \quad (11)$$

$$h_{i,s} = \sum_{l \in L} e_{i,l} - \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} q_{i,j,t,s}, \forall i \in I, s \in S, \quad (12)$$

$$z_{i,l,t,s} = z_{i,l,t-1,s} + x_{i,l} \cdot V_l - \sum_{j \in J} p_{i,l,j,t,s}, \forall i \in I, l \in L, t \in T : t \geq 2, s \in S, \quad (13)$$

$$w_{j,t,s} = D_{j,s} - \sum_{i \in I} q_{i,j,t,s} - \sum_{i \in I} \sum_{l \in L} p_{i,l,j,t,s}, \forall j \in J, t \in T, s \in S, \quad (14)$$

$$x_{i,l} \in \{0, 1\}, \forall i \in I, l \in L, \quad (15)$$

$$e_{i,l}, q_{i,j,t,s}, p_{i,l,j,t,s}, z_{i,l,t,s}, w_{j,t,s}, h_{i,s} \geq 0, \forall i \in I, l \in L, j \in J, t \in T, s \in S. \quad (16)$$

其中, f 表示总成本, fc 表示仓库租用成本, ic 表示实物储备物资的采购成本, pc 表示生产物资的采购成本, hc 表示库存成本, tc 表示运输成本, lc 表示惩罚成本. 式 (7) 计算供应延迟和不足的惩罚成本, 式 (8) 限定每省最多选择一类企业, 式 (9) 限定实物储备量不超过企业储备能力, 式 (10) 和 (11) 分别限定初始生产量和生产物资分配量等于 0, 式 (12) 计算实物储备的剩余量, 式 (13) 表示生产物资的剩余量等于总量减已分配量, 式 (14) 计算未满足的需求量, 式 (15) 限定 x 只能取 0 或 1, 式 (16) 为非负约束.

3 样本均值逼近法

样本均值逼近 (sample average approximation, SAA) 是求解随机规划模型的常用方法之一. SAA 方法生成许多独立同分布的样本, 利用样本均值函数替代原问题的目标函数, 应用分支定界、列生成等精确算法, 或 L-shaped、PH 等启发式算法求解样本问题 (样本问题规模远小于原问题), 选取样本最优解作为原问题的近似解. 由于 SAA 方法具有良好的扩展性, 常用于求解大规模情景问题, 如空箱调运^[27,28]、物资转运^[29]等. 因此, 针对研究问题构建 SAA 方法框架, 应用分支定界算法求解样本问题, 其中, 分支定界算法通过 CPLEX 软件实现.

SAA 方法步骤如下:

第 1 步: 生成 $|M|$ 个概率分布为 p 的独立样本 N , 每个样本包含 $|N|$ 个情景;

第 2 步: 对所有 $m \in M$, 分别求解模型

$$\begin{aligned} \min \hat{g}_N &= fc + ic + \frac{1}{N} \sum_{s \in N} (pc_s + hc_s + tc_s + lc_s) \\ \text{s.t.} & \text{式(2) } \sim \text{(16)}, \forall s \in N \end{aligned} \quad (17)$$

其中, \hat{g}_N 表示样本目标值, 收集样本最优解作为候选近似解, 令其分别为 $(\hat{x}_N^1, \hat{e}_N^1), (\hat{x}_N^2, \hat{e}_N^2), \dots, (\hat{x}_N^m, \hat{e}_N^m)$;

第 3 步: 生成一个更大的样本 N' , 对所有 $m \in M$, 分别求解模型

$$\begin{aligned} \min \hat{g}_{N'}(\hat{x}, \hat{e}) &= fc + ic + \frac{1}{N'} \sum_{s \in N'} (pc_s + hc_s + tc_s + lc_s) \\ \text{s.t.} & (\hat{x}, \hat{e}) = (\hat{x}_N^m, \hat{e}_N^m) \\ & \text{式(2) } \sim \text{(16)}, \forall s \in N' \end{aligned} \quad (18)$$

其中, $|N'| \gg |N|$, $\hat{g}_{N'}(\hat{x}, \hat{e})$ 为估计目标值;

第 4 步: 选取满足式

$$(\hat{x}^*, \hat{e}^*) \in \arg \min \{ \hat{g}_{N'}(\hat{x}, \hat{e}) : (\hat{x}, \hat{e}) \in \{(\hat{x}_N^1, \hat{e}_N^1), (\hat{x}_N^2, \hat{e}_N^2), \dots, (\hat{x}_N^m, \hat{e}_N^m)\} \} \quad (19)$$

的解作为原问题的近似解, 令其为 (\hat{x}^*, \hat{e}^*) ;

第 5 步: 使用式

$$gap = \frac{\hat{g}_{N'}(\hat{x}^*, \hat{e}^*) - f}{f} \times 100\% \quad (20)$$

计算估计目标值与最优目标值的差异率. 第 3 步中生成的样本用来评估候选近似解的优劣, 样本情景规模应尽量接近原问题情景数, 以保证评估的精确性. 第 5 步中差异率越小表示样本近似解越接近原问题的最优解. 若差异率或计算时间不满足要求, 可通过增减样本数或样本的情景数进行改进.

4 算例分析

4.1 参数设置

本文根据 2008 年影响范围广、破坏力强的南方雨雪冰冻灾害、汶川地震、华南和中南地区洪水, 以及台风“黑格比”4 种自然灾害的转移安置人口及各省实际受灾程度^[30], 设计自然灾害情景, 进行算例分析. 设置转移安置人口为总受灾人数, 根据实际受灾程度估计各省的受灾人数, 4 种自然灾害中受灾省及受灾人数, 见表 1. 以冰灾的受灾人数设置为例, 根据民政部国家减灾中心网站描述, 因南方雨雪冰冻灾害转移安置 166

万人,四川、云南、贵州、湖北、湖南、广西、安徽、江西等的受灾程度均较重,设置总受灾人数为 166 万,且各省受灾人数均等.假设表 1 中各省都有多类可供选择的企业,且每个省为一个受灾地,则 $|I| = 14$, $|J| = 14$.

假设表 1 中 25% 的受灾人需要饮用水;供应容量为 19 升的桶装水,每人每天需要 1.5 升;供应时间为 30 天,3 天为一个时段,时段集合 $|T| = 10$;自然灾害影响越大,发生概率越小.基于上述假设和表 1 的数据,生成 16 种自然灾害情景,不同情景的发生概率及各省每时段的饮用水需求量,见表 2.

假设各省都有小、中、大 3 类企业可供选择,则 $|L| = 3$. 各类企业的仓库租用价格、生产能力、储备能力和桶装水销售价格,见表 3,其中,生产能力值根据企业的富余生产能力设定.桶装水销售价格设定原则:第 1 时段内各类企业桶装水的销售价格均为 10 元;若允许企业第 2 或第 3 时段内交货,政府可获得 1%~5% 或 6%~10% 的折扣率;若允许企业第 4 至 10 时段内交货,政府可获得 11%~20% 的折扣率;供货企业的规模越大,政府可获得的折扣率越大.假设库存价格为 1 元/桶,运输价格为 0.01 元/桶·千米,供给延迟的惩罚系数为 10 元/桶,供给不足的惩罚系数为 40 元/桶.

表 1 4 种自然灾害中受灾省及受灾人数 (万人)

编号	受灾省	冰灾	地震	洪水	台风
1	四川	20.75	755.30	12.70	0
2	云南	20.75	226.59	0	31.44
3	重庆	0	226.59	0	0
4	贵州	20.75	226.59	43.18	0
5	湖北	20.75	37.77	12.70	0
6	湖南	20.75	37.77	43.18	0
7	广西	20.75	0	43.18	62.88
8	安徽	20.75	0	0	0
9	江西	20.75	0	43.18	0
10	广东	0	0	43.18	62.88
11	江苏	0	0	0	0
12	上海	0	0	0	0
13	浙江	0	0	12.70	0
14	福州	0	0	0	0
总受灾人数		166.0	1510.6	254.0	157.2

表 2 不同情景的发生概率及各省每时段的饮用水需求量 (万桶)

情景	四川	云南	重庆	贵州	湖北	湖南	广西	安徽	江西	广东	浙江	概率
1	44.72	13.42	13.42	13.42	2.24	2.24	0	0	0	0	0	0.005
2	35.78	10.73	10.73	10.73	1.79	1.79	0	0	0	0	0	0.005
3	13.42	44.72	13.42	13.42	2.24	2.24	0	0	0	0	0	0.005
4	10.73	35.78	10.73	10.73	1.79	1.79	0	0	0	0	0	0.005
5	5.37	17.89	5.37	5.37	0.89	0.89	0	0	0	0	0	0.04
6	4.29	14.31	4.29	4.29	0.72	0.72	0	0	0	0	0	0.04
7	17.89	5.37	5.37	5.37	0.89	0.89	0	0	0	0	0	0.04
8	14.31	4.29	4.29	4.29	0.72	0.72	0	0	0	0	0	0.04
9	0	0.75	0	2.56	0.75	2.56	2.56	0	2.56	2.56	0.75	0.1025
10	0	0.60	0	2.05	0.60	2.05	2.05	0	2.05	2.05	0.60	0.1025
11	0	1.86	0	0	0	0	3.72	0	0	3.72	0	0.1025
12	0	1.49	0	0	0	0	2.98	0	0	2.98	0	0.1025
13	1.23	1.23	0	1.23	1.23	1.23	1.23	1.23	1.23	0	0	0.1025
14	0.98	0.98	0	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0	0	0.1025
15	4.47	1.34	1.34	1.34	0.22	0.22	0	0	0	0	0	0.1025
16	3.58	1.07	1.07	1.07	0.18	0.18	0	0	0	0	0	0.1025

表 3 企业的仓库租用价格、生产能力、储备能力和桶装水销售价格

企业类型	仓库租用价格 (万元)	生产能力 (万桶)	储备能力 (万桶)	销售价格 (元)		
				2	3	4
小型	1	5	15	9.90	9.39	8.40
中型	2	10	30	9.70	9.23	8.20
大型	3	15	45	9.51	9.11	8.02

4.2 算例结果分析

应用 CPLEX 12.5 求解情景 $|S| = 16$ 的算例,运算时间少于 10 秒,得到考虑生产能力储备的企业布局和实物储备分布,见图 2. 大型企业和大部分实物储备集中在西南部省份,唯一一家中型企业位于湖南. 由于对西南各省影响最大的地震灾害所造成的受灾人数远超冰灾、洪水和台风,西南各省的物资需求量大,需选取具有较大仓储和生产能力的大型企业. 湖南位于中南各省的中心位置,到各受灾省距离适中,也需要储备

一定的应急物资和生产能力。

令式 (11) 中 $x_{i,l} \cdot V_l$ 等于 0, 即不考虑企业生产能力储备, 求解可得企业布局 and 实物储备分布, 见图 3。由于西南各省的物资需求量更大, 68% 的实物储备集中在云南、重庆、贵州、广西等西南省份。

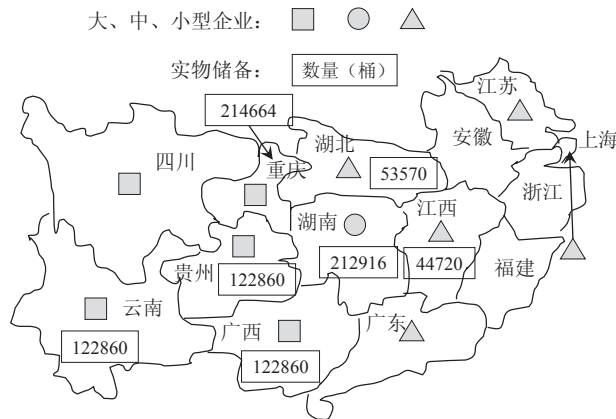


图 2 考虑生产能力储备的企业布局 and 实物储备分布

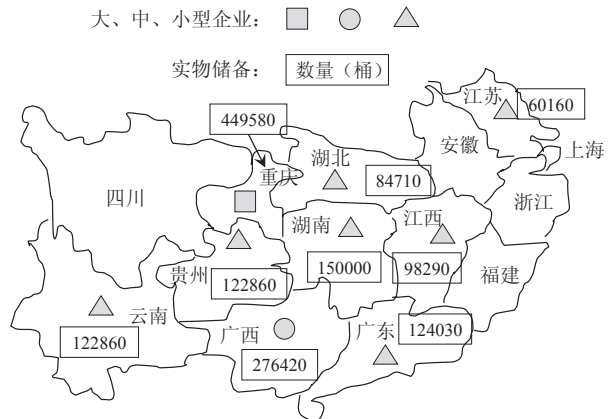


图 3 不考虑生产能力储备的企业布局 and 实物储备分布

考虑与不考虑企业生产能力储备的成本对比, 见表 4。与不考虑企业生产能力储备相比, 考虑的情况下, 仅需增加 3.6% 的经济成本即可降低 62.04% 的惩罚成本, 实物储备总量减少 39.93%, 库存成本更是大幅降低 89.51%。实际应用中, 可将节约的库存资金补贴给企业, 以增加物资生产能力储备。

表 4 考虑与不考虑企业生产能力储备的成本对比 (万元)

目标值	fc	ic	pc	hc	tc	lc	经济成本
考虑生产能力储备	22	894.45	513.52	4.48	617.37	622.10	2051.82
不考虑生产能力储备	12	1488.91	0	42.69	436.94	1638.92	1980.53
变化率	+83.33%	-39.93%	-	-89.51%	+41.29%	-62.04%	+3.60%

经济成本与惩罚成本存在明显的冲突, 即经济成本的增大或减小伴随着惩罚成本的减小或增大。以式 (21)~(23) 代替式 (1), 研究风险权重的变化对经济成本、惩罚成本和总成本的影响。

$$\min f = (1 - \gamma) \cdot c + \gamma \cdot r \tag{21}$$

$$c = fc + ic + \sum_{s \in S} \omega_s \cdot (pc_s + hc_s + tc_s), \tag{22}$$

$$r = \sum_{s \in S} \omega_s \cdot lc_s. \tag{23}$$

分别设置 $\gamma = 0, 0.05, \dots, 0.95, 1$, 求解模型, 可得经济成本与惩罚成本的 Tradeoff 曲线, 见图 4。当风险权重从 0 增大至 1, 经济成本从 0 增大至 8546.83 万, 惩罚成本减少 99.4%。随着风险权重增大, 需选择更多的大型企业, 并增加实物储备, 以降低物资供应不足的风险。

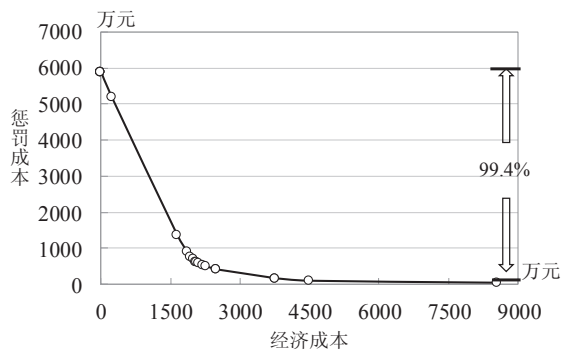


图 4 经济成本与惩罚成本的 Tradeoff 曲线

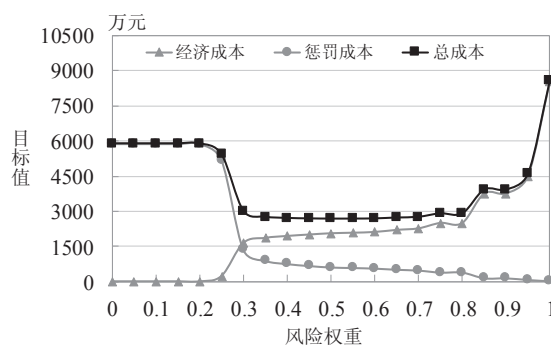


图 5 不同风险权重下经济成本、惩罚成本和总成本的变化趋势

不同风险权重下经济成本、惩罚成本和总成本的变化趋势, 见图 5。风险权重对经济成本、惩罚成本和总成本的影响可分为 $[0, 0.3)$ 、 $[0.3, 0.8]$ 和 $(0.8, 1]$ 3 个阶段, 风险权重从 0 增大至 0.3, 投入 1640.64 万的经

济成本即可降低 76.8% 的惩罚成本; 风险权重在 $[0.3, 0.8]$ 范围内取值, 经济成本和惩罚成本无显著变化, 总成本最小; 风险权重从 0.8 增大至 1, 投入 6053.34 万的经济成本仅可降低 6.3% 的惩罚成本. 适当考虑供给延迟和不足的惩罚, 有利于降低物资供应不足的风险, 而过度追求风险最小, 需要大量投入以增加实物和生产能力储备, 易造成资源浪费. 实际应用中, 风险权重可表示地区的重要程度, 由人口密度、交通便利程度等因素综合确定. 决策者可通过评估确定地区风险权重, 基于所建模型, 获得该地区的最优资金投入量和物资供应风险值.

4.3 SAA 方法有效性分析

在 CPU 和内存分别为 Intel i5 3.2G HZ 和 4 GB 的电脑上验证 SAA 方法的有效性. 当情景 $|S| = 100$ 时, CPLEX 12.5 求解原问题耗时 515 秒, 最优目标值为 3533.30 万元. 应用 Matlab2013a 编译 SAA 方法, 不同 $|M|$ 值的求解结果, 见表 5. 与 CPLEX 计算结果相比, 当 $|N| = 10$, $|M| \leq 30$ 时, SAA 方法耗时更少, 且获得的近似目标值与最优目标值之间的差异率不超过 0.37%. 当 $|N|$ 值不变时, $|M|$ 值越大, 可获得的候选解数量越多, 有更大的概率获得更好的近似解.

表 5 不同 $|M|$ 值的求解结果 ($|N| = 10$)

$ M $	10	15	20	25	30
时间 (秒)	137	206	274	343	411
估计目标值 (万元)	3544.25	3546.46	3543.00	3540.65	3537.59
Gap	0.31%	0.37%	0.27%	0.21%	0.12%

不同 $|N|$ 值对估计目标值 \hat{g}_{N^v} 的影响, 见图 6. 不同 $|N|$ 值的求解结果, 见表 6. 当 $|M|$ 值不变时, $|N|$ 值越大, 样本的估计目标值逐渐向底部集中. 当 $(|M|, |N|) = (20, 30)$ 或 $(20, 40)$ 时, 估计目标值与最优目标值的差异率仅为 0.05%. 样本数量不变, 各样本的情景数量越多, 候选解的质量越高, SAA 方法更耗时.

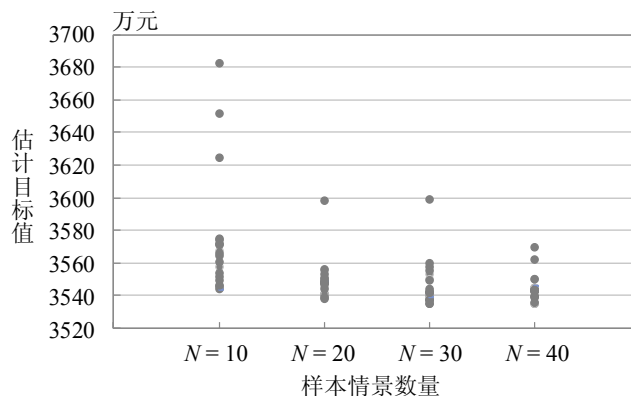


图 6 不同 $|N|$ 值对估计目标值 \hat{g}_{N^v} 的影响 ($|M| = 20$)

表 6 不同 $|N|$ 值的求解结果 ($|M| = 20$)

$ N $	10	20	30	40
时间 (秒)	274	761	1594	2709
估计目标值 (万元)	3543.00	3538.29	3535.10	3535.14
Gap	0.27%	0.14%	0.05%	0.05%

5 结论

自然灾害难以准确预测, 导致需求具有极大的不确定性, 应急物资配置决策面临严峻挑战. 为降低物资供应过剩和不足的风险, 本文提出考虑企业生产能力储备的应急物资配置问题, 建立基于情景的两阶段随机规划模型, 针对该模型构建 SAA 方法, 设计自然灾害情景进行算例分析, 计算得出最优的生产企业布局、实物储备和物资生产配送等决策. 算例结果表明, 实物储备与生产能力储备相结合的应急物资配置模式仅需小幅增加经济成本, 即可大幅提高物资需求的满足率; 为避免物资供应过少或资源闲置过多, 要合理考虑成本和风险, 实现应急物资配置效率最大; 与 CPLEX 相比, SAA 方法求解大规模情景问题耗时更少. 本文研究

拓展了随机规划理论和 SAA 方法的应用领域, 有助于提高应急物资储备、生产企业选择和物资配送等的效率, 为优化应急物资保障体系提供决策支持。

《国家综合防灾减灾规划(2016–2020年)》明确提出, 要健全救灾物资储备体系, 完善救灾物资储备管理制度、运行机制和储备模式, 科学规划、稳步推进各级救灾物资储备库(点)建设和应急商品数据库建设。研究结果表明, 应急物资储备模式需以风险评估为基础, 并重视企业生产能力储备及其与实物储备的有机结合。当前, 我国应急物资储备体系的储备品种较为单一, 缺乏科学的风险评估机制, 且以实物储备为主。应统筹协调储备、企业代储、生产能力储备和家庭储备等多种方式, 建立应急物资的联动机制与统一的应急物资管理平台, 构建科学多元的应急物资储备体系, 提高突发事件的应对效率和效果。

应急物资配置决策问题中, 决策者还面临诸多挑战, 如企业生产能力的不确定性极大地影响着应急物资供应效率, 不同情景的发生概率及需求量对于模型结果影响重大, 应急物资储备品种单一难以满足大规模自然灾害的需求。因此, 进一步考虑上述问题具有重要的应用价值。

参考文献

- [1] 中华人民共和国民政部规划财务司. 国家综合防灾减灾规划“十二五”规划 [EB/OL]. [2016-11-20]. <http://cws.mca.gov.cn/article/jhgh.2011102/201110200133426.shtml>.
- [2] 张文峰. 应急物资储备模式及其储备量研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2010.
- [3] 张永领. 中国政府应急物资的储备模式研究 [J]. 经济与管理, 2011, 25(2): 92–96.
Zhang Y L. The study on emergency material reserve model of Chinese government[J]. Economy and Management, 2011, 25(2): 92–96.
- [4] Doyen A, Aras N, Barbarosoglu G. A two-echelon stochastic facility location model for humanitarian relief logistics[J]. Optimization Letters, 2012, 6(6): 1123–1145.
- [5] 田军, 葛永玲, 侯从丛. 政府主导的基于实物期权契约的应急物资采购模型 [J]. 系统工程理论与实践, 2014, 34(10): 2582–2590.
Tian J, Ge Y L, Hou C C. Government-driving emergency supplies procurement model based on real option contract[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2014, 34(10): 2582–2590.
- [6] Falasca M, Zobel C W. A two-stage procurement model for humanitarian relief supply chains[J]. Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management, 2011, 1(2): 151–169.
- [7] Balcik B, Ak D. Supplier selection for framework agreements in humanitarian relief[J]. Production and Operations Management, 2014, 23(6): 1028–1041.
- [8] 葛洪磊, 刘南. 复杂灾害情景下应急物资配置的随机规划模型 [J]. 系统工程理论与实践, 2014, 34(12): 3034–3042.
Ge H L, Liu N. A stochastic programming model for relief resources allocation problem based on complex disaster scenarios[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2014, 34(12): 3034–3042.
- [9] Roni M S, Jin M, Eksioglu S D. A hybrid inventory management system responding to regular demand and surge demand[J]. Omega, 2015, 52: 190–200.
- [10] Mansini R, Savelsbergh M, Tocchella B. The supplier selection problem with quantity discounts and truckload shipping[J]. Omega, 2012, 40(4): 445–455.
- [11] Hammami R, Temponi C, Frein Y. A scenario-based stochastic model for supplier selection in global context with multiple buyers, currency fluctuation uncertainties, and price discounts[J]. European Journal of Operational Research, 2014, 233(1): 159–170.
- [12] Qian L. Market-based supplier selection with price, delivery time, and service level dependent demand[J]. International Journal of Production Economics, 2014, 147: 697–706.
- [13] Ware N R, Singh S P, Banwet D K. A mixed-integer non-linear program to model dynamic supplier selection problem[J]. Expert Systems with Applications, 2014, 41(2): 671–678.
- [14] Guo C, Li X. A multi-echelon inventory system with supplier selection and order allocation under stochastic demand[J]. International Journal of Production Economics, 2014, 151: 37–47.
- [15] Deng S, Aydin R, Kwong C K, et al. Integrated product line design and supplier selection: A multi-objective optimization paradigm[J]. Computers & Industrial Engineering, 2014, 70: 150–158.
- [16] Choudhary D, Shankar R. Joint decision of procurement lot-size, supplier selection, and carrier selection[J]. Journal of Purchasing and Supply Management, 2013, 19(1): 16–26.
- [17] Choudhary D, Shankar R. A goal programming model for joint decision making of inventory lot-size, supplier selection and carrier selection[J]. Computers & Industrial Engineering, 2014, 71: 1–9.
- [18] 罗静, 李从东. 基于演化博弈的应急物资生产能力储备策略 [J]. 工业工程, 2015, 18(2): 15–19.
Lou J, Li C D. Capacity reserve strategy of emergency materials based on evolutionary game[J]. Industrial

- Engineering Journal, 2015, 18(2): 15–19.
- [19] 陈涛, 黄钧, 张玲. 协议企业实物储备、生产能力储备模式的协调性研究 [J]. 中国管理科学, 2013, 21(5): 149–156.
Chen T, Huang J, Zhang L. Research on coordination of the enterprises in-kind agreement physical reserves and production capacity reserves mode[J]. Chinese Journal of Management Science, 2013, 21(5): 149–156.
- [20] 陈业华, 史开菊. 突发事件灾前应急物资政企联合储备模式 [J]. 系统工程, 2014, 32(2): 84–90.
Chen Y H, Shi K J. Emergency materials reserve mode based on government and manufacture joint before emergencies[J]. Systems Engineering, 2014, 32(2): 84–90.
- [21] 张自立, 李向阳, 王桂森. 基于生产能力储备的应急物资协议企业选择研究 [J]. 运筹与管理, 2009, 18(1): 146–150.
Zhang Z L, Li X Y, Wang G S. Research on selecting emergency material agreement enterprises based on productivity reserve[J]. Operations Research and Management Science, 2009, 18(1): 146–150.
- [22] 张自立, 李向阳, 张紫琼. 基于生产能力共同储备的政府和企业应急经费规划模型 [J]. 管理工程学报, 2011, 25(1): 56–61.
Zhang Z L, Li X Y, Zhang Z Q. Emergency fund planning model based on associated production capacity reserve of the government and enterprises[J]. Journal of Industrial Engineering/Engineering Management, 2011, 25(1): 56–61.
- [23] Barbarosoglu G, Arda Y. A two-stage stochastic programming framework for transportation planning in disaster response[J]. Journal of Operational Research Society, 2004, 55: 43–53.
- [24] Chang M S, Tseng Y L, Chen J W. A scenario planning approach for the flood emergency logistics preparation problem under uncertainty[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2007, 43(6): 737–754.
- [25] Rawls C G, Turnquist M A. Pre-positioning of emergency supplies for disaster response[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2010, 44(4): 521–534.
- [26] Mete H O, Zabinsky Z B. Stochastic optimization of medical supply location and distribution in disaster management[J]. International Journal of Production Economics, 2010, 126(1): 76–84.
- [27] Dong J X, Lee C Y, Song D P. Joint service capacity planning and dynamic container routing in shipping network with uncertain demands[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2015, 78: 404–421.
- [28] Long Y, Lee L H, Chew E P. The sample average approximation method for empty container repositioning with uncertainties[J]. European Journal of Operational Research, 2012, 222(1): 65–75.
- [29] Özdemir D, Yücesan E, Herer Y T. Multi-location transshipment problem with capacitated production[J]. European Journal of Operational Research, 2013, 226(3): 425–435.
- [30] 民政部, 水利部. 2008 年十大自然灾害事件 [J]. 中国减灾, 2009(1): 7–9.