

需求分布不确定场景下的应急物资仓储网络选址和分布决策研究

刘子齐¹, 文飞², 张大力¹, 郝爽³

- (1. 上海交通大学中美物流研究院, 上海 200030;
2. 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200030;
3. 上海交通大学安泰经济与管理学院, 上海 200030)

摘要: 为保证包括公共卫生事件在内的灾后物资供应, 合理制定预防性的物资仓储选址和仓储网络中的物资分布策略至关重要。面向灾后需求分布不确定情境, 研究一类多种类应急物资仓储分布模型。基于有限历史样本数据, 制定一个包含关于灾前随机因素部分信息的模糊集合, 构建两阶段物资仓储调度规划的分布鲁棒优化模型, 以最小化模糊集合中定义的所有分布下的成本期望值为优化目标。模型包括仓储网络规划和物资调度分配的两阶段协同优化, 阶段一针对需求分布不确定的预防性仓库选址与物资预储备问题, 阶段二对仓储网络中的应急物资调度分配进行规划。针对模型求解, 通过应用一类对偶方法将非线性分布鲁棒优化转化为线性优化, 并设计一类拉格朗日 L 形方法 (LLSM) 对两阶段模型进行求解。通过构造算例集合对模型和算法的鲁棒性进行验证, 并分析仓储网络选址和物资分布决策对不同级别灾害后物资缺口的敏感性。

关键词: 应急物资规划; 不确定场景; 分布鲁棒优化; 两阶段模型; 拉格朗日 L 形算法

中图分类号: TP391

文献标志码: A

DOI: 10.19678/j.issn.1000-3428.0069772

Research on Location and Distribution Decision of Emergency Material Logistics Network Under Uncertain Demand Distributions Scenario

LIU Ziqi¹, WEN Fei², ZHANG Dali¹, HAO Shuang³

- (1. Sino-US Global Logistics Institute, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China;
2. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China;
3. Antai College of Economics and Management, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China)

【Abstract】 A reasonable preventive strategy for the location and distribution of emergency materials within a logistics network is key to ensuring the supply of materials after urgent events, such as the recent public health crisis. This paper investigates a class of multi-category emergency material storage distribution models under scenarios with uncertain post-event demand distribution. Based on limited historical sample data, a fuzzy set containing information about random factors before a disaster is established, and a distributionally robust optimization model of two-stage material planning is constructed, with the optimization goal of minimizing the expected cost under all distributions defined in the fuzzy set. The model includes two stages of collaborative optimization: warehouse network planning, and material scheduling and distribution. The first stage focuses on the problem of preventive warehouse location and material pre-storage with an uncertain demand distribution. The second stage plans emergency material scheduling and distribution in the warehouse network. Nonlinear distributionally robust optimization is transformed into linear optimization by applying a dual method, and a Lagrangian L-Shaped Method (LLSM) is designed to solve the two-stage model. The robustness of the model and algorithm is verified by constructing an example set, and the sensitivity of warehouse network location and material distribution decision in addressing material gaps after different levels of disasters is analyzed.

【Key words】 emergency material planning; uncertain scenarios; distributionally robust optimization; two-stage model; Lagrangian L-Shaped Method (LLSM)

0 引言

近年来, 包括诸如 COVID19 疫情等事件在内的突发灾害事件频发, 且总伴随着对于各类生活和

医疗应急物资的紧急需求。但由于各类灾害性事件发生概率小、应急物资需求在空间、时间和需求量等维度上的分布存在极端不确定性。因此, 如何利用历史小样本做到预防性的仓储选择和物资分布策

基金项目: 科技创新 2030—“新一代人工智能”重大项目 (2021ZD0114203)。

作者简介: 刘子齐, 女, 硕士研究生, 主研方向为物资仓储分布; 文飞, 副研究员、博士生导师; 张大力, 研究员; 郝爽 (通信作者), 博士研究生。

收稿日期: 2024-04-22

修回日期: 2024-07-31

E-mail: sjtu-haos@sjtu.edu.cn

略,合理开展物资调配一直是相关研究的难点。

目前关于应急物资配置调度的研究主要分为两类,一类是着重研究紧急事件发生后需求的快速满足,以实现损失的最小化^[1-2],另一类研究则是重点考虑在有效满足灾后需求的条件下,如何实现事前物资储备和维护成本的最小化^[3-5]。两类研究内容都面临着包括需求量、地点分布、物资运输网络结构等因素在内的灾后需求不确定性的问题^[6-8]。针对应急物资配置中的不确定性,BALCIK 等^[9]首先提出了通过历史数据样本建立需求,并以最大限度地覆盖突发需求为目标构建随机覆盖模型。丛雯婧等^[10]通过均值聚类算法将台风路径划分为不同的情景,研究各类不同情景对应的物资需求,并结合各情景的发生概率建立了区域物资仓储选址的多目标优化模型。在时间不确定性方面,结合物资需求、运输调度网络等因素,RAWLS 等^[11]研究了紧急事件发生前物资配置问题和发生后各种可能情景下的调度问题。另一方面,HAMDAN 等^[12]在给定的可能情景下,聚焦突发公共卫生事件发生后的血液需求,建立了以期成本和目标响应时间最小化为目标的血液储备和供应网络模型。最近的研究更加关注如何设计仓储策略以平衡各类需求分布下的总体成本和极端情景下的供应能力。其中 MULVEY 等^[13]和 AGHEZZAF 等^[14]分别提出了面向最差需求分布和需求差异性最大情景的仓储网络分布鲁棒优化模型,在后续研究中,JABBARZADEH 等^[15]基于前者构建了针对紧急事件的医疗物资供应选址和发生后调拨策略,SALEHI 等^[16]基于后者考虑物资之间可替代性,设计了多周期物资仓储网络优化模型。WANG 等^[17]提出了一个嵌套在最优停止时间框架中的单阶段自适应鲁棒模型,该模型捕捉了在飓风即将登陆时,增加部署成本和减少不确定性之间的折中。它允许确定在准备飓风时的最佳部署时间,并且其确定性不确定集合产生的解决方案在面对所有不确定性实现时都是鲁棒的,包括最坏情况的情形。NI 等^[18]提出了一个用于设施位置决策、紧急库存预置和救援运营的 min-max 鲁棒模型,其两阶段框架涵盖了跨越灾前和灾后行动的决策。

关于两阶段模型求解的优化算法研究,BAYRAM 等^[19]考虑疏散需求中的不确定性,构建两阶段随机规划模型,并通过 Benders 分解解决了提出的问题。LIU 等^[20]提出了一个两阶段优化框架,用于在大规模紧急情况下确定设施位置并调整容量,开发了基于在线凸优化的拉格朗日松弛方法来求解模型。SINGH 等^[21]和 YU 等^[22]采用情景

树表示设施容量设计和动态选址问题中的不确定性,并通过 Dantzig-Wolfe 分解和随机双重动态整数规划解决了提出的问题。

综上所述,目前的研究仍需要使用一定量的历史数据拟合紧急事件发生后的不确定需求分布。但是紧急事件具有发生概率小以及发生机理、强度和扩展方向一致性低的特点,对特定类别的应急事件也只能获得非常有限的样本数据,因而特定应急事件发生后的需求概率拟合也存在较大偏差^[23]。本文针对这一问题,基于有限样本的统计特征,建立所有可能的需求分布集合和在此集合上的分布鲁棒优化模型。此模型包括仓储网络规划和物资调度分配的两阶段,阶段一针对需求分布不确定的预防性仓库选址与物资预储备问题,阶段二则基于阶段一中的选址和预储备决策结果,对仓储网络中的应急物资调度分配进行规划。本文设计了一类拉格朗日 L 形法对于以上模型进行有效求解,其中针对阶段一主问题设计拉格朗日乘子次梯度迭代算法,通过添加最优分割约束对两阶段模型交替求解。

1 两阶段应急规划分布鲁棒优化模型

1.1 问题描述

本文考虑了由应急物资仓库、物资需求点、转运节点构成的应急物资网络,建立针对不确定情景下的应急物资仓储网络模型和分布鲁棒优化模型,其中应急需求发生前需要做出的决策包括应急物资仓库选址、仓库预储量;同时在应急事件发生后,基于已确定的仓库选址和预储量策略,继续为具体需求场景下的运输流量做出最优决策。

1.2 符号定义

在本文研究的仓储网络中,任意两个节点之间均可进行物资调度,且至少有一种仓库等级足够容纳任何潜在的应急物资预储备方案。

模型参数说明如表 1 所示。

应急事件发生前阶段一相关的选址决策和预储备决策如表 2 所示。

应急事件发生后阶段二相关的调度决策和突发事件不确定变量如表 3 所示。

1.3 模型

面向应急需求的仓储网络和物资分布模型包括:阶段一中紧急事件发生前的主问题模型(P1),其中, $H(\mathbf{y}, \mathbf{r})$ 为在仓储选址决策 $\mathbf{y} = \{y_{ii} : \forall i \in N, i \in L\}$ 和预储量决策 $\mathbf{r} = \{r_i^k : \forall k \in K, i \in N\}$ 给定后;阶段二为应对最差需求分布产生的期望成本,具体表达式由 P2 给出。

表 1 模型参数说明

Table 1 Description of model parameters

符号	定义
(N, A)	(N, A) 为仓储网络, 其中 N 为节点 i 集合, A 为弧 (i, j) 集合, $\forall i, j \in N$
L	仓库等级 l 集合, L 中元素包括小型 ($l=1$)、中型 ($l=2$)、大型 ($l=3$)
K	应急物资类型 k 集合, 本文考虑 3 种物资类型, 即 K 中元素包括医疗物资 ($k=1$)、水资源 ($k=2$) 和食物资源 ($k=3$)
S	突发事件发生后的场景 s 集合, $s \in S = \{1, 2, \dots, S\}$
F_l	建立等级为 l 仓库的固定成本, $\forall l \in L$
B_l	等级为 l 仓库的标准容量, $\forall l \in L$
b^k	物资 k 的单位空间, $\forall k \in K$
h^k	物资 k 的单位库存持有成本, $\forall k \in K$
τ^k	物资 k 的运输单位与网络弧流量单位转换系数, $\forall k \in K$
p_i^k	物资 k 在节点 i 的单位预储成本, $\forall k \in K, i \in N$
c_{ij}^k	物资 k 的单位运输成本, $\forall k \in K, (i, j) \in A$
τ_s	突发事件可能场景 s 发生后造成的损失, $\forall s \in S$
$E^-(\tau)$	突发事件情景的期望损失下界
$E^+(\tau)$	突发事件情景的期望损失上界
v_i^{ks}	场景 s 发生时, 物资 k 在节点 i 的需求, $\forall s \in S, k \in K, i \in N$
ρ_i^{ks}	场景 s 发生时, 物资 k 在节点 i 的可供率, $\forall s \in S, k \in K, i \in N$
q^{ks}	场景 s 发生时, 物资 k 的单位缺货成本, $\forall s \in S, k \in K$
η_{ij}^s	场景 s 发生时, 弧 (i, j) 可通行率, $\eta_{ij}^s \in \{0, 1\}$, $\eta_{ij}^s = 1$ 表示弧 (i, j) 可通行, $\eta_{ij}^s = 0$ 表示弧 (i, j) 不可通行, $\forall s \in S, (i, j) \in A$
U_{ij}^s	场景 s 发生时, 弧 (i, j) 的最大运力, $\forall s \in S, (i, j) \in A$

表 2 阶段一模型变量说明

Table 2 Description of first-stage model variables

符号	定义
y_{il}	$y_{il} \in \{0, 1\}$, $y_{il} = 1$ 表示需要在节点 i 建立等级 l 的仓库, $y_{il} = 0$ 表示不需要在节点 i 建立等级 l 的仓库, $\forall i \in N, l \in L$
r_i^k	物资 k 在节点 i 的预储量, $\forall k \in K, i \in N$

$$\min \sum_{i \in N} \sum_{l \in L} F_l y_{il} + \sum_{i \in N} \sum_{k \in K} p_i^k r_i^k + H(\mathbf{y}, \mathbf{r}) \quad (1)$$

$$\text{s. t. } \sum_{l \in L} y_{il} \leq 1, \forall i \in N \quad (2)$$

$$\sum_{k \in K} b^k r_i^k \leq \sum_{l \in L} B_l y_{il}, \forall i \in N \quad (3)$$

$$y_{il} \in \{0, 1\}, \forall i \in N, l \in L \quad (4)$$

$$r_i^k \geq 0, \forall k \in K, i \in N \quad (5)$$

式(1)为阶段一的目标函数, 以最小化供应仓库选址成本、应急物资预储备采购成本以及选址和预

表 3 阶段二模型变量说明

Table 3 Description of second-stage model variables

符号	定义
P_s	场景 s 发生的概率, $\forall s \in S$, 不确定情景发生难以确定, 随机变量 P_s 服从在给定突发事件情景发生条件约束下的分布
x_{ij}^{ks}	场景 s 发生时, 物资 k 在弧 (i, j) 上的运输量, $\forall s \in S, (i, j) \in A, k \in K$
u_i^{ks}	场景 s 发生时, 物资 k 在节点 i 的剩余库存, $\forall s \in S, (i, j) \in A, k \in K$
w_i^{ks}	场景 s 发生时, 物资 k 在节点 i 的缺货量, $\forall s \in S, (i, j) \in A, k \in K$

储量确定后在阶段二最差需求分布下带来的期望成本综合而成。式(2)为物资供应仓库选址约束, 即每个节点供应点选址数量不得大于 1; 式(3)为仓库容量约束, 即物资预存储量不得超过供应仓库对应容量; 式(4)、式(5)为决策变量约束。基于 P1 模型的仓储选址决策 \mathbf{y} 和预储量决策 \mathbf{r} , 阶段二子问题模型 P2 如下:

$$H(\mathbf{y}, \mathbf{r}) = \min_{\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{w}} \max_{\mathbf{P}} f(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{w}, \mathbf{P}) \quad (6)$$

$$f(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{w}, \mathbf{P}) = \sum_{s \in S} P_s \left[\sum_{(i,j) \in A} \sum_{k \in K} c_{ij}^k x_{ij}^{ks} + \sum_{i \in N} \sum_{k \in K} (h^k u_i^{ks} + q^{ks} w_i^{ks}) \right] \quad (7)$$

$$\text{s. t. } \left[\sum_{j \neq i \in N} x_{ji}^{ks} + \rho_i^{ks} r_i^k \right] - \left[\sum_{j \neq i \in N} x_{ij}^{ks} + v_i^{ks} \right] = u_i^{ks} - w_i^{ks}, \forall s \in S, k \in K, i \in N \quad (8)$$

$$\sum_{k \in K} \eta_{ij}^s x_{ij}^{ks} \leq U_{ij}^s, \forall s \in S, (i, j) \in A \quad (9)$$

$$x_{ij}^{ks} \geq 0, \forall s \in S, k \in K, (i, j) \in A \quad (10)$$

$$u_i^{ks}, w_i^{ks} \geq 0, \forall s \in S, k \in K, i \in N \quad (11)$$

$$P_s \geq 0, \forall s \in S \quad (12)$$

在 P2 中, 式(6)为阶段二的目标函数, $f(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{w}, \mathbf{P})$ 中 \mathbf{P} 为概率分布函数, $\mathbf{P} = \{P_s, \forall s \in S\}$ 且 \mathbb{P} 为满足历史数据样本的所有可能概率分布函数的集合, 即:

$$\mathbb{P} = \left\{ \mathbf{P} \left| \begin{array}{l} P_s \geq 0, \forall s \in S \\ \sum_{s \in S} P_s = 1 \\ \sum_{s \in S} P_s \tau_s \geq E^-(\tau) \\ \sum_{s \in S} P_s \tau_s \leq E^+(\tau) \end{array} \right. \right\} \quad (13)$$

式中: $P_s \geq 0, \sum_{s \in S} P_s = 1$ 保证了 \mathbf{P} 为概率分布; $\sum_{s \in S} P_s \tau_s \geq E^-(\tau)$ 和 $\sum_{s \in S} P_s \tau_s \leq E^+(\tau)$ 为突发事件发生后最小和最大损失期望的估计。此外, 目标函数

$f(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{w}, \mathbf{P})$ 中的 $\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{w}$ 表示阶段二模型所需做出的决策变量, 包括:

运输变量:

$$\mathbf{x} = \{x_{ij}^{ks}, \forall s \in S, (i, j) \in A, k \in K\}$$

库存变量:

$$\mathbf{u} = \{u_i^{ks}, \forall s \in S, i \in N, k \in K\}$$

缺货变量:

$$\mathbf{w} = \{w_i^{ks}, \forall s \in S, i \in N, k \in K\}$$

式(7)为阶段二期望调度成本 $f(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{w}, \mathbf{P})$ 的计算, 表示在情景概率 P_s 下由物资运输成本、剩余持有成本和缺货成本构成的期望调度成本, 式(8)~式(12)为约束条件, 其中, 式(8)为网络节点流量平衡约束, 等式左侧每个节点的流入量与物资预储量之和减去此节点的流出量以及物资需求量, 如果差值为正, 则此节点将存在剩余物资, 反之负值则表明将存在物资缺口, 式(9)为突发事件发生后运输过程中所要满足的网络弧容量约束, 式(10)、式(12)为决策变量约束。

1.4 模型对偶

由于集合 \mathbb{P} 的存在, 灾后场景 s 发生的概率 P_s 在决策过程中不确定, P2 模型的决策过程需要考虑满足集合 \mathbb{P} 条件的所有概率分布中将带来最差结果的概率分布 $\mathbf{P} = \{P_s, \forall s \in S\}$, 因此 P_s 也是分布鲁棒优化问题的决策变量之一。从而 P2 模型的目标函数中存在决策变量 P_s 与其他变量的乘积形式, 对于模型求解带来了一定的难度。

这里将建立一类对偶变换的框架, 将问题转化成线性模型。首先, 将集合 \mathbb{P} 表示为矩阵形式。其中设 $\bar{\mathbf{A}}$ 表示约束系数矩阵, $\bar{\mathbf{A}} = [\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_s]$, $\mathbf{a}_s = [1, -1, -\tau_s, \tau_s]^T, \forall s \in S, \bar{\mathbf{b}}$ 表示约束项, $\bar{\mathbf{b}} = [1, -1, -E^-(\tau), E^+(\tau)]^T, \bar{\mathbf{P}}$ 表示随机概率变量项, $\bar{\mathbf{P}} = [P_1, P_2, \dots, P_s]^T, \forall s \in S$ 。

$$\bar{\mathbf{A}} \cdot \bar{\mathbf{P}} \leq \bar{\mathbf{b}} \quad (14)$$

给定阶段二决策变量 $\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{w}$, 对目标函数式(6)和概率分布函数的集合式(14)进行如下对偶转换, 设定紧急事件情景概率分布函数集合的对偶变量为 $\mathbf{\Gamma} = \{\zeta_d, \forall d \in D\}, D = \{1, 2, 3\}$ 为概率分布函数中的约束个数集合。

$$\min_{\mathbf{\Gamma}} h(\mathbf{\Gamma}) \quad (15)$$

$$h(\mathbf{\Gamma}) = \bar{\mathbf{b}}^T \cdot \mathbf{\Gamma} \quad (16)$$

$$\sum_{d \in D} \mathbf{a}_s \zeta_d \geq \sum_{(i,j) \in A} \sum_{k \in K} c_{ij}^k x_{ij}^{ks} + \sum_{i \in N} \sum_{k \in K} (h^k u_i^{ks} + q^{ks} w_i^{ks}), \forall s \in S \quad (17)$$

上述对偶变换后, 将目标函数转化为式(15),

式(16)为概率分布函数集合的约束项与对应的对偶变量的乘积, 将约束转化为式(17)。原目标函数中的决策变量转换到式(17)中, 同时需满足阶段二模型约束式(8)~式(12)。经过上述对偶变换后, 将阶段二非线性鲁棒优化模型 P2 转化为线性优化模型 P3:

$$H(\mathbf{y}, \mathbf{r}) = \min_{\mathbf{\Gamma}} h(\mathbf{\Gamma}) \quad (18)$$

$$h(\mathbf{\Gamma}) = \bar{\mathbf{b}}^T \cdot \mathbf{\Gamma} \quad (19)$$

$$\text{s. t. } \sum_{d \in D} \mathbf{a}_s \zeta_d \geq \sum_{(i,j) \in A} \sum_{k \in K} c_{ij}^k x_{ij}^{ks} + \sum_{i \in N} \sum_{k \in K} (h^k u_i^{ks} + q^{ks} w_i^{ks}), \forall s \in S \quad (20)$$

$$\left[\sum_{j \neq i \in N} x_{ji}^{ks} + \rho_i^{ks} r_i^k \right] - \left[\sum_{j \neq i \in N} x_{ij}^{ks} + v_i^{ks} \right] = u_i^{ks} - w_i^{ks}, \forall s \in S, k \in K, i \in N \quad (21)$$

$$\sum_{k \in K} \eta_{ij}^s x_{ij}^{ks} \leq U_{ij}^s, \forall s \in S, (i, j) \in A \quad (22)$$

$$x_{ij}^{ks} \geq 0, \forall s \in S, k \in K, (i, j) \in A \quad (23)$$

$$u_i^{ks}, w_i^{ks} \geq 0, \forall s \in S, k \in K, i \in N \quad (24)$$

$$\zeta_d \geq 0, \forall d \in D \quad (25)$$

2 求解方法

2.1 模型解构

本文基于 SLYKE 等^[24] 提出的一类 L 形方法解决 P3 模型中优化目标非线性的问题。在本文的算法中, 通过一组近似函数实现物资预储备量 r_i^k 的外部线性化, 其中近似函数将利用 $H(\mathbf{y}, \mathbf{r})$ 对 r_i^k 变化的偏导数信息, 设置线性近似的截距项 E_t 和斜率系数 $e_{it}^k, \forall t \in T, T$ 表示外部线性近似约束条件数量, 即最优分割约束的数量。这里用 γ_i^k 表示 P3 模型中流量平衡约束式(21)的对偶变量, 则 E_t 和 e_{it}^k 的计算如下:

$$e_{it}^k = \sum_{s \in S} \sum_{k \in K} P_s \gamma_i^{ks}, \forall k \in K, i \in N, t \in T \quad (26)$$

$$E_t = \sum_{s \in S} \sum_{i \in N} \sum_{k \in K} P_s \gamma_i^{ks} v_i^{ks}, \forall t \in T \quad (27)$$

引入中间变量 θ 近似 $H(\mathbf{y}, \mathbf{r})$, 进而将 P1 转化为如下的 P4 模型:

$$\min \sum_{i \in N} \sum_{l \in L} F_l y_{il} + \sum_{i \in N} \sum_{k \in K} p_i^k r_i^k + \theta \quad (28)$$

$$\text{s. t. } \sum_{l \in L} y_{il} \leq 1, \forall i \in N \quad (29)$$

$$\sum_{k \in K} b^k r_i^k \leq \sum_{l \in L} B_l y_{il}, \forall i \in N \quad (30)$$

$$\theta \geq E_t - \sum_{i \in N} \sum_{k \in K} e_{it}^k r_i^k, t \in T \quad (31)$$

$$y_{il} \in \{0, 1\}, \forall i \in N, l \in L \quad (32)$$

$$r_i^k \geq 0, \forall k \in K, i \in N \quad (33)$$

这里每一轮求解 P4 模型问题时, 可通过 P3 模型的最优值 $H(\mathbf{y}, \mathbf{r})$ 来检查当前解, 即在迭代过程

中若 $\theta = H(\mathbf{y}, \mathbf{r})$ 则达到最优, 若 $\theta < H(\mathbf{y}, \mathbf{r})$ 则增加一个新的最优切割, 转化为半无限约束式(31)加入到 P4 模型问题迭代求解。

针对阶段一 P4 模型问题, 通过拉格朗日松弛方法进一步解构为仓库选址整数规划模型和预储备线性规划模型进行求解。即将 P4 模型问题中的仓库容量约束式(30)松弛转化加入目标函数式(28), 设拉格朗日乘子为 $\mu_i, \forall i \in N$, 则 P4 模型问题中的目标函数为:

$$\min \sum_{i \in N} \sum_{l \in L} F_l y_{il} + \sum_{i \in N} \sum_{k \in K} p_i^k r_i^k + \theta + \sum_{i \in N} \mu_i \left(\sum_{k \in K} b^k r_i^k - \sum_{l \in L} B_l y_{il} \right) \quad (34)$$

通过将上式中选择变量 y_{il} 和预储量 r_i^k 进行拆分, 可将 P4 模型拆解为与 y_{il} 相关的选址整数规划模型(P4a)和与 r_i^k 相关的物资预储备线性规划模型(P4b), 分别如下:

$$\min \sum_{i \in N} \sum_{l \in L} (F_l - \mu_i B_l) y_{il} \quad (35)$$

$$\text{s. t. } \sum_{l \in L} y_{il} \leq 1, \forall i \in N \quad (36)$$

$$y_{il} \in \{0, 1\}, \forall i \in N, l \in L \quad (37)$$

$$\min \sum_{i \in N} \sum_{k \in K} (p_i^k + \mu_i b^k) r_i^k \quad (38)$$

$$\text{s. t. } \theta \geq E_t - \sum_{i \in N} \sum_{k \in K} e_{ik}^k r_i^k, t \in T \quad (39)$$

$$r_i^k \geq 0, \forall i \in N \quad (40)$$

针对仓库选址 P4a 采用贪婪算法求解: 对于任意节点 i , 当最小检验数 $\min_l (F_l - \mu_i B_l) < 0$ 时, 则在该节点 i 设置对应供应仓库类型 l , 即 $y_{il} = 1$, 否则令 $y_{il} = 0$ 不设置仓库。P4b 为标准的线性规划模型, 可结合 P3 模型问题的决策结果, 确定不同应急物资的最佳预储备数量。

根据 RAWLS 等^[11]的理论结果, 当 μ_i 经过足够的迭代达到一定的近似精度后, P4a 和 P4b 问题的独立求解结果将满足原模型 P4 的可行性。同时对于任意乘子 $\boldsymbol{\mu} = \{\mu_i, \forall i \in N\}$, 拉格朗日问题 $L(\boldsymbol{\mu})$ 构成原问题的最优目标函数值的下界^[25], 因此通过求解拉格朗日乘子问题 $\max_{\boldsymbol{\mu}} L(\boldsymbol{\mu})$ 来获得最优解的近似下界, 并对非线性函数式(34)迭代求解, 给定 $\boldsymbol{\mu}$ 后求解 P4a 和 P4b。同时基于求解所得 \mathbf{y} 和 \mathbf{r} 使用次梯度搜索更新乘数 $\boldsymbol{\mu}$ 。在迭代中通过松弛 y_{il} 以确保 r_i^k 在约束式(30)的可行性, 获得一个 P4 问题的上界。

2.2 拉格朗日 L 形算法

首先定义参数 T 表示模型 P4 中的最优分割约束式(31)的数量; δ 表示拉格朗日松弛法中乘子迭

代次数; $\mu_i^\delta, \forall i \in N$ 表示第 δ 次迭代的拉格朗日乘子; ϕ^* 表示当前两阶段模型(即主问题模型 P4)最优值, 初始化为无穷大; $\varphi_{P4a}, \varphi_{P4b}$ 分别表示仓库选址模型 P4a 和物资预储备模型 P4b 的最优值; $\mathbf{y}(T), \mathbf{r}(T), \theta(T)$ 表示主问题模型 P4 在 T 个最优分割约束下的最优解; $\mathbf{y}^\delta(T), \mathbf{y}^\delta(T)$ 分别表示仓库选址模型 P4a 在第 δ 次迭代中的最优解和可行解; $\mathbf{r}^\delta(T), \theta^\delta(T)$ 分别表示物资预储备模型 P4b 在第 δ 次迭代中的物资预储备变量最优解和外部线性近似变量最优解; \bar{U}, \bar{L} 分别表示主问题模型 P4 的上界和下界; ϵ 表示模型 P4 上界和下界偏差。拉格朗日 L 形算法(LLSM)具体步骤如下:

参数初始化: 设置 $T = \delta = 0; \mu_i^\delta = 0, \forall i \in N; \phi^* = \infty$ 。

步骤 1 利用拉格朗日乘子迭代法求解内层主问题。判断 T 是否等于 0, 若 $T = 0$ 则此时无最优分割约束, 设置 $\theta^\delta(T) = 0$, 否则设置 $\delta \leftarrow \delta + 1$, 根据当前拉格朗日乘子值 μ_i^δ , 求解模型 P4a 和模型 P4b 得最优解 $\mathbf{y}^\delta(T), \mathbf{r}^\delta(T), \theta^\delta(T)$ 以及最优值 $\varphi_{P4a}, \varphi_{P4b}$ 。

步骤 2 更新内层主问题上下界。其中主问题模型 P4 下界 $\bar{L} = \varphi_{P4a} + \varphi_{P4b}$; 松弛模型 P4a 最优解 $\mathbf{y}^\delta(T)$ 得到一个可行解 $\mathbf{y}^\delta(T)$, 使得模型 P4b 最优解 $\mathbf{r}^\delta(T)$ 在物流网络中的预储备节点设有供应仓库且不超过仓库容量, 计算主问题模型 P4 上界 $\bar{U} = \min\{\phi^*, \varphi_{P4a}[\mathbf{y}^\delta(T)] + \varphi_{P4b}\}$ 。

步骤 3 判断内层主问题是否收敛最优。计算模型 P4 上界和下界偏差 $\epsilon = \frac{\bar{U} - \bar{L}}{\bar{U}}$, 若偏差 ϵ 小于迭代则停止阈值, 或连续 \bar{N} 次迭代不再变化时则停止 (\bar{N} 为网络节点数量), 拉格朗日松弛法求解收敛到模型 P4 近似解, 更新内层主问题当前最优解, $\mathbf{y}(T) \leftarrow \mathbf{y}^\delta(T), \mathbf{r}(T) \leftarrow \mathbf{r}^\delta(T), \theta(T) \leftarrow \theta^\delta(T)$ 转至步骤 5; 否则, 转至步骤 4。

步骤 4 次梯度搜索更新拉格朗日乘子。更新乘子如式(41), 并转至步骤 1。

$$\mu_i^{\delta+1} = \mu_i^\delta + \frac{1}{\delta} \left[\sum_{k \in K} b^k r_i^{k\delta}(T) - \sum_{l \in L} B_l y_{il}^\delta(T) \right] \quad (41)$$

步骤 5 L 形方法求解外层两阶段模型。基于第一阶段主问题最优解, 求解阶段二子问题模型得到最优值 $H[\mathbf{y}(T), \mathbf{r}(T)]$, 更新阶段一主问题当前最优值如下:

$$\phi^* = \sum_{i \in N} \sum_{l \in L} F_l y_{il}(T) + \sum_{i \in N} \sum_{k \in K} p_i^k r_i^k(T) + H[\mathbf{y}(T), \mathbf{r}(T)] \quad (42)$$

若 $H[\mathbf{y}(T), \mathbf{r}(T)] = \theta(T)$, 则求得最优解, 算法停止; 否则计算参数 E_T 和 $e_{i_T}^k$, 加入新的最优分割约束到模型 P4 中, 重置参数 $T \leftarrow T + 1, \delta = 0$,

$\mu_i^\delta = 0, \forall i \in N$, 并转至步骤 1。

上述针对两阶段模型求解的拉格朗日 L 形方法 (LLSM) 流程如图 1 所示。

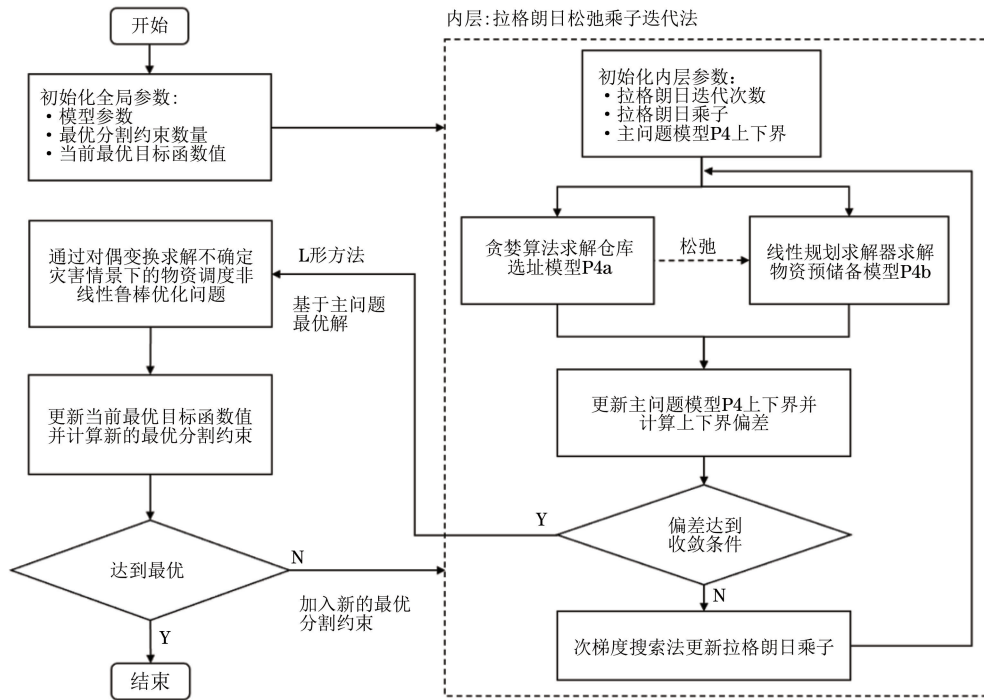


图 1 拉格朗日 L 形方法流程

Fig.1 Procedure of Lagrangian L-shaped method

2.3 时间复杂度分析

时间复杂度反映了算法的收敛速度以及运行时间。根据两阶段模型参数, 网络节点数为 N , 仓库类型有 L 种, 物资类型有 K 种, 突发事件可能情景有 S 种, 模糊集合矩阵维度为 $D \times S$, 算法外层通过对偶变换转化为线性规划模型 P3, 求解时间复杂度为 $O(NKS + D)^2$ 。算法内层拆分为贪婪算法求解 P4a, 该过程在求得选址最优解的基础上计算可行解, 复杂度为 $O(NL)$; 对于物资存储模型 P4b 运用 Gurobi 求解器采用内点法的时间复杂度近似 $O((NK + N + K)^{2.5})$ 。LLSM 算法中拉格朗日迭代过程的复杂度为 $O(L + K)$, 因此内层算法的总体复杂度为 $O((NK + N + K)^{2.5})$ 。假设内外层算法迭代次数为 T , 也即最优分割约束数量, 则 LLSM 算法总时间复杂度为 $O(T(NKS + D)^2)$ 。

3 数值分析

3.1 案例描述

为验证本文研究中模型和算法的有效性, 结合实际数据建立一个灾后局部区域的应急物资供应案例, 包括 10 个节点的全连接应急物资供应网络、应对 5 类可能的突发事件、聚焦 3 大类物资的保障供

应, 其中 10 个可选址的节点结合上海行政区划进行分布。根据实际位置计算获得运输距离, 如表 4 所示。

表 4 全连接网络中节点与节点之间的距离

Table 4 Distance between nodes in

a fully connected network

单位: km

节点	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	26	8	21	21	17	26	8	21	21
2	33	0	14	26	23	33	22	14	26	23
3	17	46	0	6	28	17	46	41	6	28
4	33	12	36	0	5	33	12	36	25	5
5	43	3	18	19	0	43	3	18	19	30
6	17	26	8	21	21	0	26	8	21	21
7	33	22	14	26	23	33	0	14	26	23
8	17	46	41	6	28	17	46	0	6	28
9	33	12	36	25	5	33	12	36	0	5
10	43	3	18	19	30	43	3	18	19	0

本文沿用 RAWLS 等^[1] 研究中关于应急物资的 3 种分类, 即水资源 (单位: kL)、食物资源 (单位: 千份即食食品) 和医药资源, 其中医药物资看作是一系列医疗物品的集合, 获取、储存和运输这些商品的成本和空间估计, 如表 5 所示。

表 5 3 种应急物资的相关参数

Table 5 Relevant parameters of three types of emergency supplies

应急物资种类	采购成本/ 元	占用空间/ m ³	运输成本/ (元·km ⁻¹)
水资源/kL	4 533.90	1 012.20	2.10
食物资源/10 ³ 份	37 940.00	583.31	0.28
医药资源/10 ³ 份	980.00	8.12	4.06×10 ⁻³

基于应急物资单位采购成本信息,假设每种应急物资的预储备单位成本是单位采购成本乘以相关系数,该系数与不确定场景下节点发生损失有关,设置为 $\prod_{s \in S} \log_a(\tau_s)$;物资未满足需求的单位惩罚成本是单位采购价格的 τ_s 倍,单位库存剩余成本是购买价格的 25%。同时,案例考虑了 3 种可能的应急物资供应仓库设施规模,参数如表 6 所示,任何规模

的设施都可以在网络中的任何节点开放。

表 6 3 种供应仓库设施的相关参数

Table 6 Relevant parameters of the three types of supply warehouse facilities

仓库等级	选址固定成本/10 ⁴ 元	仓库最大容量/m ³
小型	83.72	36 400
中型	131.88	408 200
大型	210.00	780 000

表 7 列出了各种突发事件可能场景的特征,包括事件发生位置、对 3 种应急物资资源的需求、指定网络通行损坏以及评估带来的损失。针对模型 P2 中约束式(8)、式(9)的不确定突发事件情景概率约束,即情景发生的随机概率需要满足情景发生的期望损失区间约束,其中设置不确定突发事件情景的期望损失上下界区间取所有情景损失均值的标准差范围,即[8.63,18.37]。

表 7 不确定突发事件可能情景的相关参数

Table 7 Relevant parameters of the possible scenarios of uncertain emergencies

情景	节点	不可通行道路	水资源/kL	食物资源/10 ³ 份	医药资源/10 ³ 份	损失/10 ⁶ 元
1	1	(1,2)	350	525	500	10
1	3	(2,3)	350	525	500	15
2	4	(3,4)	100	100	600	20
3	2	(2,4)	200	450	300	15
4	7	(6,7)	260	320	410	18
5	2	(2,4)	300	400	300	5
5	5	(3,5)	300	400	300	10
5	9	(9,8)	300	400	300	15

3.2 结果分析

本文的拉格朗日 L 形算法以 Python 实现,程序试验运行在 8 核内存 16 GB 的内存上,算法中针对线性规划模型应用 Gurobi10.0.1 求解。表 8 所示为 LLSM 算法对第 3.1 节实例的求解结果。其中阶段一模型决策优化结果中供应仓库选址总成本为 83.72 万元,应急物资预先储备总采购成本为 5 057.99 万元,共设置一个小型仓库在网络节点 8,该供应仓库预置储备应急物资水资源为 900 kL、食物资源为 1 200 份、医药资源为 996 份。

表 8 供应仓库选址结果与应急物资预储备结果

Table 8 Supply warehouse location results and emergency supplies pre-stock results

供应仓库节点	供应仓库等级	水资源/ kL	食物资源/ 10 ³ 份	医药资源/ 10 ³ 份
8	小型	900	1 200	996

基于阶段一模型的选址和物资储备决策结果,针对不确定突发事件可能情景 1~5,采取不同物资

调度方案,对应的调度成本结果如表 9 所示。其中当突发事件情景 1 发生时,调度总成本最大为 1 148.67 万元,当突发事件情景 5 发生时,调度总成本最小为 6.44 万元。针对所有不确定突发事件情景的缺货率为 0.03%,仅在可能情景 1 发生下的调度方案中网络节点 3 无法满足医药资源物资需求 4 单位,带来缺货成本 980 万元。

表 9 各不确定应急事件情景下的调度成本结果

Table 9 Dispatch cost results under each uncertain emergency scenario

情景	emergency scenario			单位:10 ⁴ 元
	运输成本	库存剩余成本	缺货成本	总成本
1	3.72	164.94	980.00	1 148.67
2	0.14	1143.73	0.00	1 143.87
3	0.77	807.77	0.00	808.54
4	0.89	921.58	0.00	922.47
5	4.09	2.35	0.00	6.44

分析鲁棒决策优化结果,即供应仓库选址决策、应急物资预储备决策和不同突发事件可能情景的调

度决策结果,对突发事件情景随机概率进行鲁棒分析,即分析随机情景概率分布下阶段二成本的变化。表 10 求解结果显示,当情景概率分布为情景 3 时有 0.206 的发生概率、为情景 5 时有 0.794 的发生概率时,阶段二调度成本达到下界,总调度成本为 171.67 万元,包括运输成本 3.40 万元、库存剩余成本 168.27 万元,认为不确定突发事件情景接近上述概率分布时,鲁棒决策方案带来的阶段二不确定成本最小;当情景概率分布为情景 1 有 1.0 的发生概率时,

表 10 不确定突发事件情景概率分布下的鲁棒优化分析

Table 10 Robust optimization analysis under the probability distribution of uncertain emergency scenarios

成本结果	运输成本/ 10 ⁴ 元	库存剩余成本/ 10 ⁴ 元	缺货成本/ 10 ⁴ 元	概率				
				情景 1	情景 2	情景 3	情景 4	情景 5
阶段二成本下界	3.40	168.27	0	0.0	0.0	0.206	0.0	0.794
阶段二成本上界	3.72	164.94	980	1.0	0.0	0.000	0.0	0.000

3.3 应急物资缺货成本对求解的影响

在应急物资求解方案中缺货成本对阶段二不确定调度成本结果影响较大,针对不同应急物资缺货惩罚成本参数的设置,对模型求解进行灵敏度分析,分别设置所有应急物资缺货惩罚成本为原参数的 10 倍和 0.1 倍。

如表 11 所示,增加应急物资缺货惩罚成本 10 倍的求解结果显示,物资供应仓库选址成本为 83.72 万元,物资预储备采购总成本为 5 058.76 万元,共设置一个小型仓库在网络节点 8,该供应仓库预置储备应急物资水资源为 900 kL、食物资源为 1 200 份、医药资源为 1 000 份。与原求解结果

表 11 不同物资缺货惩罚成本下的供应仓库选址结果与应急物资预储备结果

Table 11 Supply warehouse location results and emergency supplies pre-stock results under different material stockout penalty costs

物资缺货惩罚成本变化	供应仓库节点	供应仓库等级	水资源/kL	食物资源/10 ³ 份	医药资源/10 ³ 份
原参数	8	小型	900	1 200	1 000
原参数的 10 倍	8	小型	900	1 200	1 000
原参数的 0.1 倍	8	小型	900	1 199	960

针对阶段二不确定突发事件可能情景 1~5,采取不同物资调度方案,对应的调度成本结果如表 12 所示。对于增加应急物资缺货惩罚成本 10 倍的求解结果,当突发事件情景 2 发生时,调度总成本最大为 1 143.97 万元,当突发事件情景 5 发生时,调度总成本最小为 6.54 万元。在该方案下不存在物资缺货情况,即在物资缺货成本参数增大时,通过增加物资预储备量来降低不确定调度成本。对于减少应急物资缺货惩罚成本 0.1 倍的求解结果,当突发事件情景 1 发生时,调度总成本最大为 1150.23 万元,当突发事件情景 5 发生时,调度总成本最小为 807.05 万元。该方案下物资缺货率增加到 0.3%,

阶段二调度成本达到上界,总调度成本为 1 148.67 万元,包括运输成本 3.72 万元、库存剩余成本 164.94 万元、物资缺货成本 980 万元,认为不确定突发事件情景接近上述概率分布时,鲁棒决策方案带来的阶段二不确定成本最大。在不确定突发事件情景概率分布下,求解所得的应急物资仓储方案带来的总调度成本上界与下界偏差为 85.05%,其中运输成本相差-8.73%,库存剩余成本相差 2.01%,支出成本不确定性可控制在 10%内,方案具有较好鲁棒性。

方案对比,选址决策结果一致,物资缺货惩罚成本增加后,物资预储备量增加,由原医药资源供应 996 份增加至 1 000 份,带来物资采购总成本增加 0.77 万元。减少应急物资缺货惩罚成本 0.1 倍的求解结果显示,物资供应仓库选址成本为 83.72 万元,物资预储备采购总成本为 5 050.22 万元,共设置一个小型仓库在网络节点 8,该供应仓库预置储备应急物资水资源 900 kL、食物资源 1 199 份、医药资源 960 份。与原求解结果方案对比,物资缺货惩罚成本减少后,物资预储备量减少,食物资源减少 1 份,医药资源减少 36 份,物资预储备成本减少 7.77 万元。

即在物资缺货成本参数减小时,物资预储备量减少导致缺货增加。

从表 12 可以看出,当物资缺货成本参数变化一定幅度时,将带来应急物资仓储方案的预备成本和不确定情景下的缺货率变化,且不确定情景下的缺货率变化幅度更大,因此在求解应急物资仓储规划方案时,设定合理的缺货成本参数与物资采购储备成本之间的关系,以及不同突发事件下对应急物资满足率的要求,考虑到突发事件后的影响严重程度,设置较大的缺货成本参数,有利于求解得到覆盖更多应急需求,同时控制预备成本在合理范围内的仓储预备方案。

表 12 不同物资缺货惩罚成本下的各不确定应急事件情景下的调度成本结果

Table 12 Dispatch cost results under different material stockout penalty costs for each uncertain emergency scenario

物资缺货惩罚成本变化	情景	运输成本/ 10^4 元	库存剩余成本/ 10^4 元	缺货成本/ 10^4 元	总成本/ 10^4 元
原参数的 10 倍	1	3.71	164.94	0.00	168.66
	2	0.14	1 143.83	0.00	1 143.97
	3	1.70	807.87	0.00	809.57
	4	0.89	921.68	0.00	922.57
	5	4.09	2.45	0.00	6.54
原参数的 0.1 倍	1	6.23	164.00	980.00	1150.23
	2	0.14	1 141.90	0.00	1 142.04
	3	1.11	805.94	0.00	807.05
	4	0.89	919.75	0.00	920.64
	5	4.09	1.47	1 138.20	1 143.76

3.4 算法稳定性和性能分析

本文按照第 3.1 节案例描述的相关信息,随机生成 10 个不同实例,针对两阶段应急物资规划模型求解,以 CPLEX 求解作为基准,对比分析拉格朗日 L 形算法求解的稳定性和有效性。本文对每组实例进行数值实验,比较目标优化值差异和计算效率。假设网络节点数为 N ,突发事件可能情景有 S 种,如表 13 所示,当 $N > 100$ 时,CPLEX 在时间限制内无法获得

最优解,而 LLSM 可以在一定时间内收敛得到最优解。同时对比两种方法求解目标优化值的差距,对于规模较小的实例而言,LLSM 在不到 60 s 内得到的最优值和 CPLEX 计算更长时间得到的最优值差距不到 0.1%,且 LLSM 求解结果求解时间缩短 98%,数值实验的结果表明,LLSM 算法在解决该问题上具有稳定性和有效性。不同参数下的 LLSM 迭代结果如图 2 所示(彩色效果见《计算机工程》官网 HTML 版)。

表 13 不同方法求解结果对比

Table 13 Comparison of solution results using different methods

参数		CPLEX		LLSM		Gap	
N	S	Time/s	obj	Time/s	obj	Time/%	Obj/%
5	5	244.0	3 067.7	2.2	3 067.7	99.098	0.000
10	5	578.6	5 799.0	7.5	5 801.9	98.704	-0.050
20	5	2 355.3	13 994.3	26.2	14 210.4	98.888	-1.544
50	5	9 400.2	26 738.7	160.9	27 375.9	98.288	-2.383
100	5	—	—	622.3	45 972.0	—	—
5	10	699.8	2 938.6	7.7	2 938.9	98.900	-0.010
10	10	2 058.9	6 589.4	25.4	6 596.5	98.766	-0.108
20	10	8 432.5	13 938.8	155.6	14 170.6	98.155	-1.663
50	10	—	—	600.6	26 789.8	—	—
100	10	—	—	2 378.8	458 820.0	—	—

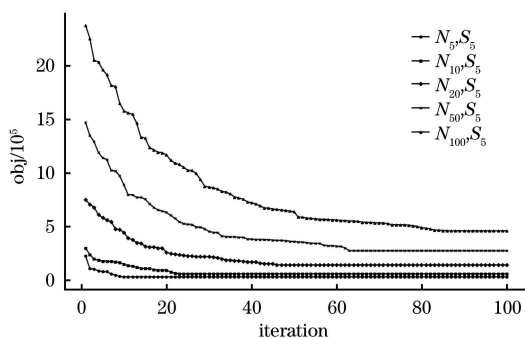


图 2 不同参数下的 LLSM 迭代结果

Fig.2 LLSM iteration results under different parameters

针对子问题选址存储决策的求解,以第 3.1 节案例对比分析 LLSM 算法的内层,即拉格朗日松弛法-动态贪婪分配策略(LRDGA)、确定信息分配策略(DMF)和拉格朗日动态分配策略(LRDA)^[20]。表 14 所示为 3 种策略的结果。结果显示,LRDGA 相较于 DMF 在保持较优的总成本的同时,计算时间显著减少,LRDA 策略尽管计算时间最短,但由于缺货成本高,总体表现不如 LRDGA,因此 LLSM 算法具有一定优越性。

表 14 不同分配策略的对比

Table 14 Comparison of different allocation strategies

指标	LRDGA	DMF	LRDA
总成本/ 10^4 元	5 801.875	5 799	5 824.4
选址成本/ 10^4 元	83.72	83.72	83.72
采购成本/ 10^4 元	5 057.99	5 060.82	5 046.60
运输成本上界/ 10^4 元	3.72	3.72	5.50
库存剩余成本上界/ 10^4 元	164.94	168.2	158.2
缺货成本上界/ 10^4 元	980	960	1 082.8
运输成本下界/ 10^4 元	3.4	3.4	5.1
库存剩余成本下界/ 10^4 元	168.27	173.6	136.56
缺货成本下界/ 10^4 元	0	0	0
计算时间/s	7.5	578.6	5.6

4 结束语

本文研究了需求分布不确定下的应急仓储网络选址和预储量分布鲁棒优化模型。通过基于历史数据的概率分布特征建立可能需求分布集合。该集合对于可能概率分布的约束采用对偶变换,针对非线性分布鲁棒优化进行线性化。设计一类拉格朗日 L 形方法将两阶段模型分为内层和外层进行循环求解,并以上海市市辖区为研究区域构建算例验证模型算法的有效性。未来研究可考虑将此框架拓展到应急物资的不同配置模式,包括考虑现实中经常使用的产能配置方法等。本文研究考虑的网络结构为单层级,为保证在更加复杂的现实场景下实践,可考虑在多层级多路由结构的网络下进行研究,为实际调度提供有效的算法支持。

参考文献

[1] 和媛媛,姜盼松,温禄兴,等. 权衡公平-经济-效率的多品种防疫物资配送策略[J]. 工业工程与管理, 2021, 26(6): 146-153.
HE Y Y, JIANG P S, WEN L X, et al. Distribution strategy of multiple epidemic prevention materials weighing fairness, economy and efficiency [J]. Industrial Engineering and Management, 2021, 26(6): 146-153. (in Chinese)

[2] DASAKLIS T K, RACHANIOTIS N, PAPPIS C. Emergency supply chain management for controlling a smallpox outbreak: the case for regional mass vaccination [J]. International Journal of Systems Science: Operations & Logistics, 2017, 4(1): 27-40.

[3] SANTOSO T, AHMED S, GOETSCHALCHS M, et al. A stochastic programming approach for supply chain network design under uncertainty [J]. European Journal of

Operational Research, 2005, 167(1): 96-115.

[4] KELLE P, SCHNEIDER H, YI H. Decision alternatives between expected cost minimization and worst case scenario in emergency supply: second revision [J]. International Journal of Production Economics, 2014, 157: 250-260.

[5] ZHOU Q S, OLSEN T L. Inventory rotation of medical supplies for emergency response [J]. European Journal of Operational Research, 2017, 257(3): 810-821.

[6] 张玲,叶先宝,陈圣群. 基于线性规则的应急资源配置随机优化模型与算法[J]. 系统科学与数学, 2017, 37(5): 1221-1230.
ZHANG L, YE X B, CHEN S Q. Stochastic optimal resource allocation model and algorithm based on linear rule [J]. Journal of Systems Science and Mathematical Sciences, 2017, 37(5): 1221-1230. (in Chinese)

[7] HOYOS M C, MORALES R S, AKHAVAN-TABATABAEI R. OR models with stochastic components in disaster operations management: a literature survey [J]. Computers & Industrial Engineering, 2015, 82: 183-197.

[8] LIN J T, CHEN T L, CHU H C. A stochastic dynamic programming approach for multi-site capacity planning in TFT-LCD manufacturing under demand uncertainty [J]. International Journal of Production Economics, 2014, 148: 21-36.

[9] BALCIK B, BEAMON B M, SMILOWITZ K. Last mile distribution in humanitarian relief [J]. Journal of Intelligent Transportation Systems, 2008, 12(2): 51-63.

[10] 从雯婧,俞武扬. 考虑台风情景的区域应急物资储备库选址模型与算法[J]. 工业工程与管理, 2020, 25(5): 68-74.
CONG W J, YU W Y. Model and algorithm for location of regional emergency material reserve site in typhoon scenarios [J]. Industrial Engineering and Management, 2020, 25(5): 68-74. (in Chinese)

[11] RAELS C G, TURNQUIST M A. Pre-positioning of emergency supplies for disaster response [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2010, 44(4): 521-534.

[12] HAMDAN B, DIABAT A. Robust design of blood supply chains under risk of disruptions using Lagrangian relaxation [J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2020, 134: 101764.

[13] MULVEY J M, VANDERBER R J, ZENIOS S A. Robust optimization of large-scale systems [J]. Operations Research, 1995, 43(2): 264-281.

[14] AGHEZZAF E H, SITOMPUL C, NAJID N M. Models for robust tactical planning in multi-stage production systems with uncertain demands [J]. Computers & Operations Research, 2010, 37(5): 880-889.

[15] JABBARZADEH A, FAHIMNIA B, SEURING S. Dynamic supply chain network design for the supply of blood in disasters: a robust model with real world application [J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2014, 70: 225-244.

[16] SALEHI F, MAHOOTCHI M, HUSSEINI S M M. Developing a robust stochastic model for designing a blood supply chain network in a crisis: a possible earthquake in Tehran [J]. Annals of Operations Research, 2019, 283(1/2): 679-703.

[17] WANG X, PAUL J A. Robust optimization for hurricane preparedness [J]. International Journal of Production Economics, 2020, 221: 107464.

[18] NI W, SHU J, SONG M. Location and emergency inventory

- pre-positioning for disaster response operations: min-max robust model and a case study of Yushu earthquake [J]. *Production and Operations Management*, 2018, 27(1): 160-183.
- [19] BAYRAM V, YAMAN H. Shelter location and evacuation route assignment under uncertainty: a benders decomposition approach [J]. *Transportation Science*, 2018, 52(2): 416-436.
- [20] LIU K, LIU C, XIANG X, et al. Testing facility location and dynamic capacity planning for pandemics with demand uncertainty [J]. *European Journal of Operational Research*, 2023, 304(1): 150-168.
- [21] SINGH K J, PHILPOTT A B, WOOD R K. Dantzig-wolfe decomposition for solving multistage stochastic capacity-planning problems [J]. *Operations Research*, 2009, 57(5): 1271-1286.
- [22] YU X, SHEN S Q. On the value of multistage risk-averse stochastic facility location with or without prioritization [EB/OL]. [2024-03-20]. <https://arxiv.org/abs/2105.11005>.
- [23] SNYDER L V. Facility location under uncertainty: a review [J]. *IIE Transactions*, 2006, 38(7): 547-564.
- [24] VAN SLYKE R M, WETS R. L-shaped linear programs with applications to optimal control and stochastic programming [J]. *SIAM Journal on Applied Mathematics*, 1969, 17(4): 26.
- [25] FISHER M L. An applications oriented guide to lagrangian relaxation [J]. *Interfaces*, 1985, 15(2): 10-21.

文字编辑 索书志
栏目编辑 赖玉玲