

考虑中断风险的应急物资调度组合优化方法

张 闯¹, 李延通^{2*}, 闫 倩¹, 耿敬益¹, 梁精睿³

(1. 武警工程大学 装备管理与保障学院, 陕西 西安 710086; 2. 大连海事大学 航运经济与管理学院, 辽宁 大连 116026;
3. 中国人民解放军 32302 部队, 北京 101400)

摘 要:针对重大自然灾害可能导致物资集散点供应能力中断的问题,研究应急物资集散点中断风险的灾后应急物资调度问题。为提升问题解的全局最优性,将应急物资集散点选址、需求分配、供应次序确定等决策问题抽象为一类选址-调度组合优化问题,以期望供应完成时间最小化为目标,构建基于情境的混合整数线性规划模型。提出基于预先排序和核搜索的数学启发式算法对问题进行高效求解。数值实验结果表明:所提出的算法具有良好的求解性能,可在合理计算时间内为最大包含 200 个受灾点、5 个集散点的应急物资供应任务提供精确定量、全局最优的物资调度组合优化方案。

关键词:应急物资调度;中断风险;选址调度;核搜索算法;数学启发式算法

中图分类号:F253.4 文献标志码:A 文章编号:1001-2486(2025)05-254-09



Combinatorial optimization methods for emergency material scheduling considering disruption risk

ZHANG Chuang¹, LI Yantong^{2*}, YAN Qian¹, GENG Jingyi¹, LIANG Jingrui³

(1. College of Equipment Management and Support, Engineering University of PAP, Xi'an 710086, China;
2. School of Maritime Economics and Management, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;
3. The PLA Unit 32302, Beijing 101400, China)

Abstract: Aiming at the problem that the supply of emergency material distribution depots might be disrupted after a disaster, the post-disaster emergency material supply considering the disruption risk of distribution depots was studied. In pursuit of globally optimal solutions, decisions including location selection of distribution depots, the assignments of material demands to distribution depots, and the supply sequencing at each distribution depot were integrated into a combinatorial scheduling-location problem. A scenario-based mixed-integer linear programming model was formulated with the objective function of minimizing the expected makespan of the supply task. A matheuristic algorithm based on predetermined ordering and kernel search was proposed to solve the problem efficiently. A numerical experiment is conducted and the result shows that the proposed algorithm is significantly effective and can provide precise, quantitative, and globally optimal scheduling plans for a task with up to 200 disaster-affected areas and 5 distribution depots within reasonable computation time.

Keywords: emergency material scheduling; disruption risk; scheduling-location; kernel search algorithm; matheuristic algorithm

我国是受自然灾害威胁最大的国家之一。据统计,我国 2006 年至 2021 年间因自然灾害导致的直接经济损失超 6.4 万亿元,受灾死亡 11 万余人^[1]。统筹全局、精确高效的应急物资调度是满足灾区基本物资需求、支撑抢险救援行动、维护当地社会秩序的物质保证。应急物资调度方案的拟制是复杂的决策过程,需要解决集散点选址、需求分配、供应次序确定等若干优化问题,这些问题相

互影响、互为条件,若将其分别考虑,进行序贯式优化,难以保证调度方案的全局最优性。因此,有必要统筹考虑多个优化问题,开展组合优化。同时,自然灾害可能导致应急物资集散点因建筑物倒塌、地形改变、道路损毁等引发供应能力中断,影响物资及时分发和运输。因此,制定应急物资调度方案时,需认真评估相关设施的中断风险,充分考虑各种可能情境,制定科学全面、精确量化的

收稿日期:2023-11-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(72201044)

第一作者:张闯(1994—),男,江苏宿迁人,讲师,博士,E-mail:chuangzhang1225@163.com

*通信作者:李延通(1989—),男,辽宁鞍山人,副教授,博士,博士生导师,E-mail:yantong.li@dlmu.edu.cn

引用格式:张闯,李延通,闫倩,等.考虑中断风险的应急物资调度组合优化方法[J].国防科技大学学报,2025,47(5):254-262.

Citation:ZHANG C, LI Y T, YAN Q, et al. Combinatorial optimization methods for emergency material scheduling considering disruption risk[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2025, 47(5): 254-262.

行动预案,以期在最短时间内完成对受灾点的物资供应。

当前针对应急物资调度组合优化问题的研究中:Wex 等^[2]针对灾后救援单元的分配与调度优化问题,构建以加权完成时间最小化为目标的数学模型。Wang 等^[3]考虑时效性和公平性,建立应急物资供应选址-分配问题(location-allocation problem, LAP)组合优化模型。相似地,文献[4-6]同样对应急物资供应 LAP 进行了研究,以同时优化物资供应设施选址和物资需求分配问题,但并未同时考虑供应次序的优化。Zhong 等^[7]考虑等待时间和供应成本的最小化,构建了灾后物资供应选址-路径组合优化双目标模型,以同时决策物资配送中心选址和物资配送路径规划。Tavana 等^[8]在优化设施选址、配送路径规划的基础上,同时考虑物资库存管理,形成一类复杂的应急物资供应选址-库存-路径组合优化问题。

考虑中断风险的应急物资调度组合优化问题的研究成果更加有限。王亚东等^[9]针对战时条件下备件仓库存在中断风险时的 LAP,构建了鲁棒优化模型。Wang 等^[10]针对应急后勤问题中考虑设施中断的 LAP 进行了研究,利用 Benders 分解(Benders decomposition, BD)算法进行求解。Yu^[11]考虑灾后道路的中断风险,同时优化物资供应点选址及物资预储问题,同样采用 BD 算法进行求解。

从当前文献来看:一方面,少有文献同时决策应急物资供应设施选址、需求分配、供应次序确定等问题,形成一类典型的选址-调度(scheduling-location, ScheLoc)组合优化问题。另一方面,对考虑中断风险的应急物资组合优化问题的研究还不充分,部分针对 LAP 的研究没有考虑供应次序的确定,未能涵盖应急物资从集散点到需求点的全过程。

因此,本文针对应急物资集散点面临中断风险时的应急物资优化调度问题,将包含的应急物资集散点选址、需求分配、供应次序确定等问题抽象为 ScheLoc 组合优化问题,考虑灾后物资供应对时效性的迫切要求,以期望完成时间最小化为目标,构建基于情境的混合整数线性规划(mixed-integer linear programming, MILP)模型。提出一种基于预先排序和核搜索的数学启发式算法(matheuristic algorithm based on predetermined ordering and kernel search, MPOKS)进行求解,并通过数值实验对算法性能进行验证分析。下面,对论文所研究问题进行细致描述,为后期模型构

建和算法设计做准备。

1 问题描述

为便于对问题进行准确描述,首先将相关集合及参数进行集中定义,如表 1 所示。

表 1 集合及参数定义		
Tab. 1 Definition of sets and parameters		
类型	符号	释义
集合	K	物资集散点待选位置集合,元素以 k 表示
	J	受灾点集合,元素以 i, j 表示
	S	中断情境集合,元素以 s 表示
参数	n	受灾点数量
	l	物资集散点待选位置数量
	m	拟开设的集散点数量上限
	θ	集散点每小时装载物资量
	d_j	受灾点 j 的物资需求量
	t_{jk}	受灾点 j 至集散点 k 的行车时间
	I_k	集散点待选位置 k 的中断概率
	b_k^s	$b_k^s = 1$ 表示情境 s 下,集散点 k 处发生中断,否则 $b_k^s = 0$
	B_k^s	集散点 k 的中断预计排除时间
	P_s	中断情境 s 的出现概率
	M	一个足够大的正整数

基于表 1 的定义,所研究的问题可描述如下:
假定为某自然灾害高发地区拟制应急物资调度预案,需要在适当位置开设应急物资集散点,完成对受灾点的物资供应。当灾害发生时,村庄、社区、居民区聚集点、临时安置点等受灾点存在迫切的应急物资需求,假定共有 n 个受灾点构成受灾点集合 J 。考虑资源限制,最多开设 m 个临时物资集散点开展物资供应。经过前期勘察研判,确定 l 个位置可供选择,记为待选位置集合 K 。受灾害影响,应急物资集散点供应能力可能发生中断。为应对风险,物资集散点需控制展开规模,同时编组大量人员加强应急处置。因此,集散点不再配置运输车辆配送物资,改由受灾点派出运输车辆主动领取物资。若受灾点 j 的物资需求分配至集散点 k ,则派出运输车辆到达集散点,并按次序进行装载。现实场景中,一个受灾点物资需求可能由多个集散点供应,受人员和设备等限制,集散点平均每小时装载物资量为 θ 。各受灾点装载过程遵循非抢占原则,不间断执行直至完成。定

义受灾点 j 至集散点 k 的行车时间为 t_{jk} 。所有受灾点均完成物资装载后,本次供应任务完成。若供应任务开始时,应急物资集散点处于中断状态,则无法进行物资供应,定义应急物资集散点 k 的中断概率为 I_k 。

根据以上描述,将考虑中断风险的应急物资调度 ScheLoc 问题构建为 MILP 模型,以最小化期望供应完成时间。

2 模型构建

供应任务开始时,应急物资集散点是否处于中断状态具有高度不确定性,难以提前预测。当前供应链管理相关文献中,描述中断风险的方法可分为概率规划、情境分析以及二者的结合等^[12]。救灾指挥中心拟制供应方案时,必须充分考虑各种可能的中断情境,并针对性制定可行、高效的供应预案。因此,在模型构建时采用情境分析法。目前,已有部分文献采用情境分析法处理供应链的中断风险。Lee 等^[13]基于风险规避策略研究考虑区域和个体设施中断的供应商选择和订单分配问题。研究过程中,构建了包含供应商个体及区域两类中断状态的中断情境集合。杜慧莉^[14]针对海外仓选址-库存优化问题,采用情景法描述中断风险,构建中断情景,并采用最大似然法选取其中部分最可能的情景,以降低问题复杂度。于文爽^[15]同样采用情境分析法研究考虑中断风险的应急配送中心选址问题。

基于以上梳理分析,论文基于保障任务开始时集散点 k 的状态,形成所有的中断情境集 S 。定义参数 $b_k^s = 1$ 表示在情境 s 下,集散点 k 发生中断,否则 $b_k^s = 0$ 。当集散点发生中断时,需开展相关排除工作,完成后恢复供应,定义其中断预计排除时间为 B_k^s 。记每个中断情境 $s \in S$ 的出现概率为 P_s 。由以上描述可知:

$$P_s = \prod_{k \in K} I_k^{b_k^s} (1 - I_k)^{(1-b_k^s)} \quad \forall s \in S \quad (1)$$

式中, P_s 以所有物资集散点待选位置 k 的中断状态对应概率的乘积表示。情境 s 下,当位置 k 发生中断,即 $b_k^s = 1$ 时, $I_k^{b_k^s} (1 - I_k)^{(1-b_k^s)} = I_k$, 对应发生中断的概率;同理,当位置 k 未发生中断,即 $b_k^s = 0$ 时, $I_k^{b_k^s} (1 - I_k)^{(1-b_k^s)} = 1 - I_k$, 对应未发生中断的概率。因此,通过对 k 进行连乘,得到情境 s 下所有位置是否中断所对应概率的乘积,即为情境 s 的出现概率 P_s 。

为便于建模,对问题进行如下合理假设:

1) 集散点待选位置通常选用现有应急储备

基地、物流仓库等场地,其中断概率可基于地理位置、建筑类型及完好度、历史受灾情况和仿真推演结果等数据进行估算;

2) 集散点物资储备量能够满足需求,不考虑物资短缺问题;

3) 不考虑相邻两个装载任务之间的间隔时间;

4) 允许需求拆分,但每个集散点对同一受灾点最多供应一次。

同时,定义表 2 所示的决策变量。

表 2 决策变量定义
Tab. 2 Definition of decision variables

符号	释义
z_k	$z_k = 1$ 表示选中待选位置 k 为应急物资集散点,否则 $z_k = 0$
v_{jk}^s	$v_{jk}^s = 1$ 表示情境 s 下受灾点 j 的应急物资需求分配在集散点 k , 否则 $v_{jk}^s = 0$
x_{ijk}^s	$x_{ijk}^s = 1$ 表示情境 s 下,受灾点 i 在集散点 k 处的物资装载次序在 j 之前(不一定相邻),否则 $x_{ijk}^s = 0 (i, j \in J, i < j)$
y_{jk}^s	情境 s 下集散点 k 向受灾点 j 供应的物资量
T_{jk}^s	情境 s 下受灾点 j 在集散点 k 处的供应完成时间
$T_{\max}^s$	情境 s 下的供应任务完成时间

基于以上假设和定义,构建 MILP 模型(记为 P)为:

$$\min \sum_{s \in S} P_s T_{\max}^s \quad (2)$$

目标函数(2)表示最小化期望供应任务完成时间。

约束条件如下:

$$\sum_{k \in K} z_k \leq m \quad (3)$$

约束式(3)表示最多开设 m 处应急物资集散点。

$$\sum_{k \in K} v_{jk}^s \geq 1 \quad \forall j \in J, s \in S \quad (4)$$

约束式(4)表示每个受灾点物资至少由一个应急物资集散点供应。

$$\sum_{j \in J} v_{jk}^s \leq n z_k \quad \forall k \in K, s \in S \quad (5)$$

$$v_{jk}^s \leq z_k \quad \forall j \in J, k \in K, s \in S \quad (6)$$

约束式(5)和式(6)表示受灾点需求仅能分配至开设应急物资集散点的位置。

$$y_{jk}^s \leq d_j v_{jk}^s \quad \forall j \in J, k \in K, s \in S \quad (7)$$

约束式(7)为需求分配和供应量之间的约束关

系,表明只有受灾点 j 的物资需求分配至集散点 k ,才可能产生物资供应量,且供应量不超过该受灾点的物资需求。

$$\sum_{k \in K} y_{jk}^s = d_j \quad \forall j \in J, s \in S \quad (8)$$

约束式(8)表示受灾点的需求量必须得到满足。

$$T_{jk}^s \geq v_{jk}^s t_{jk} + y_{jk}^s / \theta \quad \forall j \in J, k \in K, s \in S \quad (9)$$

约束式(9)表示情境 s 下,若受灾点 j 的物资需求由集散点 k 供应,则 j 的供应完成时间不小于运输车辆到达集散点的时间与物资装载时间之和。需要说明的是,若受灾点 j 的物资需求未分配至集散点 k ,即 $v_{jk}^s = 0$,由约束(7)可知,集散点 k 无法为受灾点 j 供应物资,即 $y_{jk}^s = 0$,代入式(9)可得 $T_{jk}^s \geq 0$ 恒成立。

$$T_{jk}^s \geq v_{jk}^s b_k^s B_k^s + y_{jk}^s / \theta \quad \forall j \in J, k \in K, s \in S \quad (10)$$

约束式(10)表示情境 s 下,若受灾点 j 的需求分配至集散点 k 且集散点 k 发生中断($b_k^s = 1$),则受灾点 j 在 k 处的供应时间至少是中断预计排除时间 B_k^s 与装载时间 y_{jk}^s / θ 之和,即:必须等待中断排除后,才能开始供应;若受灾点 j 的需求分配至集散点 k ,但 k 未发生中断($b_k^s = 0$),则原式可表示为 $T_{jk}^s \geq y_{jk}^s / \theta$,结合约束式(9)可知,该式成立。相反,若受灾点 j 的需求未分配至集散点 k ,则由式(9)可知, $T_{jk}^s \geq 0$ 恒成立。

$$T_{jk}^s \geq T_{ik}^s + y_{jk}^s / \theta - M(3 - x_{ijk}^s - v_{jk}^s - v_{ik}^s) \quad \forall i, j \in J, i < j, k \in K, s \in S \quad (11)$$

$$T_{ik}^s \geq T_{jk}^s + y_{jk}^s / \theta - M(2 + x_{ijk}^s - v_{jk}^s - v_{ik}^s) \quad \forall i, j \in J, i < j, k \in K, s \in S \quad (12)$$

约束式(11)和约束式(12)给出受灾点应急物资装载次序与供应完成时间的关系,即:在情境 s 下,若受灾点 i, j 的物资需求均由集散点 k 满足,且受灾点 i 的装载次序在受灾点 j 之前,则受灾点 j 的供应完成时间至少是受灾点 i 的完成时间加上受灾点 j 的装载时间。其原理为:若满足以上条件,即 $x_{ijk}^s = v_{jk}^s = v_{ik}^s = 1$,则式(11)和式(12)可分别改写为:

$$T_{jk}^s \geq T_{ik}^s + y_{jk}^s / \theta \quad \forall i, j \in J, i < j, k \in K, s \in S \quad (13)$$

$$T_{ik}^s \geq T_{jk}^s + y_{jk}^s / \theta - M \quad \forall i, j \in J, i < j, k \in K, s \in S \quad (14)$$

式(13)表示受灾点 j 在位置 k 的完成时间 T_{jk}^s 至少是 i 的完成时间 T_{ik}^s 与 j 的装载时间 y_{jk}^s / θ 之和。约束式(14)中,由于 M 为足够大的正整数,因此, T_{ik}^s 大于等于一个负数恒成立。反之,若 $x_{ijk}^s + v_{jk}^s + v_{ik}^s < 3$,则同理可知,原约束式(11)和原约束式(12)成立。

$$T_j^s \geq T_{jk}^s \quad \forall j \in J, k \in K, s \in S \quad (15)$$

约束式(15)表示受灾点 j 的供应完成时间至少是 j 在各个集散点 k 处完成时间的最大值。

$$T_{\max}^s \geq T_j^s \quad \forall j \in J, s \in S \quad (16)$$

约束(16)表示整体供应任务的完成时间,至少是所有受灾点的物资供应时间的最大值。即,所有装载任务均完成,供应任务才完成。

$$T_{jk}^s \geq 0 \quad \forall j \in J, k \in K, s \in S \quad (17)$$

$$T_j^s \geq 0 \quad \forall j \in J, s \in S \quad (18)$$

$$w_k \in \{0, 1\} \quad \forall k \in K \quad (19)$$

$$v_{jk}^s, y_{jk}^s \in \{0, 1\} \quad \forall j \in J, k \in K, s \in S \quad (20)$$

$$x_{ijk}^s \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \in J, i < j, k \in K, s \in S \quad (21)$$

约束式(17)~(21)为相关变量的取值范围。

3 算法设计

并行机 ScheLoc 组合优化属于 NP-难问题^[16]。在此基础上进一步考虑应急物资集散点的中断情境,使得问题求解更加复杂。因此,提出一种基于预先排序和核搜索的数学启发式算法(MPOKS),对问题进行高效求解,并通过算例实验验证算法的求解能力。MPOKS 包含了基于预先排序的数学启发式算法以及核搜索算法框架两大要素。下面对相关概念和内涵进行明确。

启发式算法具有求解效率高的特点,其缺点是难以保证解质量的最优性。数学启发式(matheuristic, MH)算法是将数学规划和启发式算法相结合的一类高效求解算法,其特征为:将数学规划模型与启发式算法结合,使得新的算法在保持启发式算法的高求解效率时,显著提升其求解质量。尽管 MH 算法理念的引入不足 20 年^[17],但因其求解质量高、效率快等优点,已经被成功运用于许多复杂优化问题的求解,如背包问题^[18]、调度问题^[19]、一些组合优化问题^[20-21]等,取得了良好的效果。

核搜索(kernel search, KS)算法是另一种求解大规模复杂优化问题的启发式方法。其原理为:为了应对大规模、多变量复杂优化问题求解难度大的问题,找出原问题变量中最有可能取得非零解的变量子集,并将该子集称为原问题的核。仅考虑核子集包含的变量,构成原问题的核问题,求解获得的目标函数值作为原问题的当前最好解。将除去核子集变量后的其余变量通过一定规则进行排序,并划分为若干备用变量组。随后对备用变量组进行迭代遍历,每次迭代利用核子集和一个备用变量组的并集对原模型进行求解,并将获得的目标值与当前最好解进行比较,若新解更优,则更新当前最好解,同时将备用变量组中取

非零的变量加入核子集。相比原问题直接求解, KS 算法的优势在于变量少、求解效率更高,同时,通过确定核子集和对备用变量进行排序,最大限度地保留可能的有效变量,从而保证了问题的求解质量。KS 算法自被提出以来,已经在许多问题的求解中展现出高效性能^[22-24]。

将 MH 算法与 KS 算法相结合形成高效求解算法的案例在文献中尚不多见,目前仅有 Zhang 等^[25]将二者结合,构成 MH-KS 算法,以求解确定环境下的工件加工 ScheLoc 问题。该文献与本文的区别在于:①问题设定不同,文献为确定性环境中的工件加工问题,本文为考虑物资集散点中断风险、允许需求拆分的应急物资调度;②目标函数不同,文献的目标函数为选址固定成本、运输成本以及延误惩罚成本总和的最小化,本文为期望供应完成时间最小化;③预先排序规则不同,文献 MH-KS 算法的预先排序规则为动态规划(小算例)和按照工件完成时限与加工时间及工件释放时间差值的升序排列(大算例),本文 MPOKS 根据目标函数最优性特征,采用单机调度中典型的最早释放时间(earliest release date, ERD)规则,即按到达时间升序的方法进行排序。

因此,MPOKS 具有一定新颖性,且属首次应用于考虑中断风险的应急物资调度组合优化问题求解中。MPOKS 构造基于预先排序的数学启发式算法(记为 MPO),共包含三个阶段。

1)阶段 1:预先排序。假设将所有受灾点 $j \in J$ 全部分配至各个待选位置 k ,分别求解一系列以完成时间最小化为目标的单机调度问题。该问题复杂度较低,能够在多项式时间内获得最优解,采用 ERD 规则以确定各受灾点供应完成时间及总体供应完成时间。排序完成后,定义在待选位置 k 处生成的有序集合为 J_k 。

2)阶段 2:近似求解。定义 g^{ik} 表示在有序集合 J_k 中,第 i 个位置的受灾点编号。例如,有序

集合 $J_1 = \{3, 1, 2, 4\}$,则 $g^{11} = 3$,其余同理。据此构建近似 MILP 模型(记为 AP):

$$\min \sum_{s \in S} P_s T_{\max}^s \tag{22}$$

约束条件为:

式(3)~(10),式(15)~(21),以及

$$T_{g^{ik}}^s \geq T_{g^{i-1,k}}^s + \gamma_{g^{ik}}^s / \theta \quad \forall i \in J \setminus \{1\}, k \in K, s \in S \tag{23}$$

约束式(23)表示受灾点 g^{ik} 在集散点 k 的供应完成时间不小于其紧前受灾点 $g^{i-1,k}$ 的完成时间与其自身装载时间之和。近似模型 AP 求解后,可确定选址变量 w_k 、分配变量 v_{jk}^s 等结果,并将求解获得的目标函数值作为原问题解的上界。

3)阶段 3:改进提升。基于阶段 2 的需求分配结果,再次利用 ERD 规则求解各情境下、各集散点处所构成的单机调度问题,以获得最终解。

以上为 MPO 的求解过程,该算法首先在所有待选位置处基于 ERD 规则预先排序,基于形成的有序集构建近似模型并求解。这种求解方式有效降低了问题的复杂度。但需要注意的是,部分易受灾地区人口居住分散,一旦发生严重灾害,可能出现大量需求点。同时,情境数量随待选位置的增加呈指数增长,仍具有相当的求解难度。MPO 中,模型 AP 通过求解器 CPLEX 内置的分支切割(branch & cut, B&C)算法直接求解,当问题规模增大时,其求解性能将显著降低。为了进一步提升 MPO 性能,在 MPO 基础上引入 KS 算法框架对模型 AP 进行求解,形成完整的 MPOKS。KS 算法求解 AP 模型的流程如图 1 所示,主要包括核初始化和迭代更新两个核心步骤。

1)核初始化。将模型 AP 中的选址变量 w_k 和分配变量 v_{jk}^s 由 0-1 变量松弛为 $[0, 1]$ 之间的连续变量,并对线性松弛的模型 AP 进行求解,若 w_k 和 v_{jk}^s 的解均为整数,则模型已求得最优解,算法结束;否则,记录二者的松弛解。定义集合 Ω

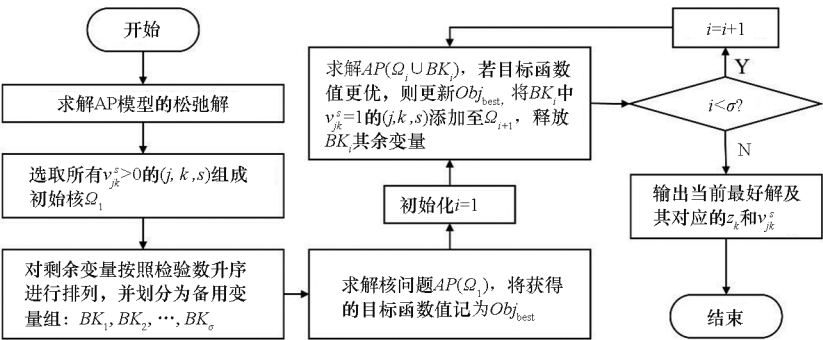


图 1 KS 算法求解 AP 模型流程图

Fig. 1 Flowchart of the KS algorithm solving the AP model

为问题的核,初始核 Ω_1 包含所有分配变量松弛解大于 0 的变量,即 $\Omega_1 = \{(j,k,s) \mid v_{jk}^s > 0\}$,当问题模型仅考虑核 Ω_1 中的变量时,构成原问题的核问题。将剩余分配变量 $v_{jk}^s, \forall (j,k,s) \notin \Omega_1$ 按照其检验数进行升序排列,并按照指定长度 L_{BK} 划分为若干备用变量组,记为 $BK_1, BK_2, \dots, BK_\sigma$,其中 σ 为备用变量组的数量。

2) 迭代更新。恢复模型 AP 中的 0-1 变量。首先将备用变量组中所有分配变量 $v_{jk}^s, (j,k,s \notin \Omega)$ 均设为 0,将仅考虑初始核 Ω_1 的初始核问题记为 $AP(\Omega_1)$,求解后获得的目标函数值作为原问题的当前最好解,记为 Obj_{best} 。随后开始迭代,每次迭代过程中,在核 Ω_i 中加入一个备用变量组,同时将其余备用组(包括上一迭代中的备用组)中的变量设为 0,记新的问题为 $AP(\Omega_i \cup BK_i)$ ($i=1,2,\dots,\sigma$) 并求解,将求得的目标值 $Obj_{\Omega_i \cup BK_i}$ 与当前最好解 Obj_{best} 进行对比,若 $Obj_{\Omega_i \cup BK_i} < Obj_{best}$,则更新当前最好解 $Obj_{best} = Obj_{\Omega_i \cup BK_i}$,并将集合 BK_i 中取 1 的变量,即 $\{(j,k,s) \mid v_{jk}^s = 1, (j,k,s) \in BK_i\}$ 设为核变量,并释放备用组 BK_i 中其余变量,重新设置为 0,进入下一轮迭代。同时,对于初始核变量,若连续取 0 的次数超过预先设定的上限值 $\Omega^{\max}$,则被剔除出核 Ω_i 在后续迭代中取 0。此过程持续迭代,直至遍历所有(或给定数目)的备用变量组。

除利用 KS 算法对模型 AP 进行求解外,MPOKS 其他步骤与 MPO 相同。经 MPO 阶段 3 改进得到的目标函数值及其对应的各变量的解,作为问题的最终解。MPOKS 的框架见算法 1。

算法 1 MPOKS 框架

Alg. 1 MPOKS frame

线性松弛 z_k, v_{jk}^s , 利用 MPO 求解模型 AP
确定初始核 Ω_1 , 备用组 $BK_1, BK_2, \dots, BK_\sigma$
基于初始核求解 $AP(\Omega_1)$, 确定 Obj_{best}
1. int $i = 1$
2. for $i = 1; i \leq \sigma; i++$
3. 求解 $MPO(\Omega_i \cup BK_i)$, 确定 $Obj_{\Omega_i \cup BK_i}$
4. if $Obj_{\Omega_i \cup BK_i} < Obj_{best}$
5. $Obj_{best} = Obj_{\Omega_i \cup BK_i}$
6. $\Omega_{i+1} = \Omega_i \cup \{(j,k,s) \mid v_{jk}^s = 1, (j,k,s) \in BK_i\}$
7. 释放备用组 BK_i 中的剩余变量
8. end if
9. end for
10. 输出 Obj_{best} 及选址变量 z_k 和分配变量 v_{jk}^s 的解
11. 利用 MPO 阶段 3 进一步提升解, 确定最终解

4 数值实验

为验证论文提出的 MILP 模型和 MPOKS 的可行性并比较算法在求解质量和求解效率等方面的性能,基于 80 个随机算例开展数值实验。分别使用 CPLEX 求解器和 MPOKS 对算例进行求解,其中,CPLEX 求解器采用的算法为 B&C 算法。各求解方法均基于 C++ 语言,在一台配置为 Intel(R) Core(TM) i7-13700H 2.40 GHz,16 GB RAM 的计算机上通过 Visual Studio 2015 链接求解器 CPLEX 12.10 编程实现。

4.1 算例生成

假设某自然灾害高发地区制定防灾减灾预案,应急管理部门拟在易受灾地区适当位置开设若干临时集散点,为可能的受灾点(村庄、社区、居民点等)提供应急物资供应。假设灾害发生时,有物资需求的受灾点数 $n = \{10, 20, \dots, 200\}$,经过勘察,适合开设集散点的待选位置数 $l = \{4, 5, 6, 7\}$,最多开设的应急物资集散点数 $m = l - 2$ 。由此,共构成 $20 \times 4 = 80$ 个算例。

每个算例中,受灾点和集散点坐标在区间 $[1 \text{ km}, 200 \text{ km}]$ 内随机分布,所有距离均采用欧式距离计算,并向下取整,运输车辆平均行车速度为 60 km/h。受灾点物资需求量 d_j 在区间 $[20 \text{ t}, 60 \text{ t}]$ 内随机取值,受人员和设备限制,集散点物资装载速度约为 20 t/h。集散点中断概率 I_k 在 $[10\%, 40\%]$ 内随机分布,中断恢复时间 B_k 为区间 $[2 \text{ h}, 8 \text{ h}]$ 内的随机值。

4.2 实验结果分析

针对以上算例,分别使用 CPLEX 求解器的 B&C 算法和 MPOKS 求解,并对结果进行对比分析。设置 B&C 算法的求解时限为 1 500 s, MPOKS 的求解过程相对复杂,求解松弛模型 AP 及后续每次迭代过程的计算时限均为 300 s,总时间上限为 1 500 s。为了更好地进行对比分析,将算例按照规模分成常规算例组($n \leq 100$)和大算例组($n > 100$)。以下分别对各组算例的计算结果进行分析。

4.2.1 常规算例计算结果

常规算例的计算结果见表 3。表 3 中左侧第 1 列为受灾点数量 n ,中间 3 列为 B&C 算法的计算结果,包括可行解数量(#Feas)、平均目标函数值(Obj)以及计算时间(Time),其中,“- -”表示该规模的 4 个算例至少有 1 个未能求得可行解,故不再计算剩余解均值。右 3 列为 MPOKS 的求解结

果。需要说明的是,由于每个相同受灾点数 n 包含 4 个不同待选位置数量 l 的算例,因此,表格中每个数值为 4 个算例结果的平均值。

表 3 常规算例计算结果

Tab. 3 Computational results of common-sized instances

n	CPLEX (B&C)			MPOKS		
	#Feas	Obj	Time/s	#Feas	Obj	Time/s
10	4	9.88	1 500.54	4	8.54	603.36
20	4	21.21	1 501.10	4	22.10	629.33
30	4	38.04	1 502.46	4	23.41	711.61
40	4	46.59	1 504.73	4	30.15	743.03
50	4	61.12	1 507.14	4	38.18	764.24
60	4	84.38	1 503.42	4	44.03	768.87
70	4	127.40	1 502.55	4	62.32	778.99
80	3	--	--	4	69.72	784.92
90	2	--	--	4	66.98	791.16
100	2	--	--	4	81.41	791.75
均值	3.5	--	--	4	44.68	736.73

根据表 3 的计算结果,总体上看,CPLEX 求解器的 B&C 算法共求得 35 个可行解,其中,对 $n \leq 70$ 的 28 个算例均能全部求解,但当 $n \geq 80$ 时开始出现无可行解现象,表明随着算例规模增大,问题求解难度增加,B&C 算法的求解能力下降。而 MPOKS 对所有 40 个常规算例均求得可行解,表现出良好的求解能力。

从目标函数值上看,B&C 算法对 $n \leq 20$ 的小算例的目标函数值与 MPOKS 大致相当,但随着算例增大,B&C 算法的目标函数值显著高于 MPOKS,且差距越来越大。例如,当 $n = 30$ 时,B&C 算法求得的目标函数值是 MPOKS 的 1.62 倍,而当 $n = 70$ 时,该数值为 2.04,即 MPOKS 获得的应急物资供应方案期望用时不到 B&C 算法对应方案的一半,这对紧迫的物资供应任务至关重要,表明 MPOKS 求得的解的质量具有明显优势。从计算时间上看,B&C 算法的每个可行解计算时间均达到计算时限 1 500 s。MPOKS 的求解效率显著高于 B&C 算法,其平均计算时间为 736.73 s,且算例计算时间随算例规模的增加而增加,表明算例规模的增加使得问题求解难度增大,用时增多。综上,MPOKS 在总体求解能力、解的质量以及求解效率等方面,均明显优于 B&C 算法。

4.2.2 大算例计算结果

大算例计算结果见表 4。大算例组的设置和

求解目的在于充分检验所提出的算法的求解性能,以确保为救灾指挥中心提供的决策方法具有良好的能力冗余,有力支撑更多情况、更大范围内的决策需求。

表 4 大算例计算结果

Tab. 4 Computational results of large-sized instances

n	CPLEX (B&C)			MPOKS		
	#Feas	Obj	Time/s	#Feas	Obj	Time/s
110	2	--	--	4	84.38	810.34
120	1	--	--	4	94.85	809.25
130	2	--	--	4	108.57	839.70
140	1	--	--	4	115.66	837.48
150	0	--	--	4	114.28	841.54
160	1	--	--	4	127.67	841.12
170	0	--	--	4	140.90	849.84
180	1	--	--	4	144.66	847.59
190	1	--	--	4	135.01	898.34
200	1	--	--	4	149.84	1 009.31
均值	1	--	--	4	121.58	858.45

从表 4 可以看出,在大算例中,B&C 算法共求得 10 个可行解,且在每个 n 值对应的 4 个算例中,至少 2 个未能求得可行解,求解能力大幅下降。而 MPOKS 依然可获得所有大算例的可行解,其平均目标函数值为 121.58,平均计算时间为 858.45 s,即基于 MPOKS 可在 15 min 内为包含多达 200 个受灾点的应急物资供应任务提供精确定量、全局最优的应急物资选址-调度组合优化方案,对于现实工作具有重要意义。

4.2.3 待选位置数量的影响

以上分析是基于受灾点数 n 形成的不同规模算例,比较各求解方法在可行解数量、解的质量和求解效率三方面的表现。但从问题设置和所构建的模型来看,情境数量 $|S|$ 与物资集散点待选数量 l 相关,表示为 $|S| = 2^l$ 。因此,当集散点待选数量 l 增加时,情境数量将呈指数增加,导致问题复杂度显著提升。为了探究集散点待选位置数量变化给模型运用和算法求解带来的影响,对 B&C 算法和 MPOKS 求解不同 l 值算例时的计算结果进行统计,并对获得的可行解数量、平均目标函数值以及平均计算时间等关键指标进行对比,其结果见表 5,其中,每个结果为包含相同 l 值的 20 个算例的平均值。

表5 待选位置数量的影响

Tab.5 Impacts of the number of candidate locations

<i>l</i>	CPLEX(B&C)			MPOKS		
	#Feas	Obj	Time/s	#Feas	Obj	Time/s
4	18	--	--	20	107.66	634.40
5	12	--	--	20	80.02	786.84
6	8	--	--	20	73.42	871.29
7	7	--	--	20	71.43	897.82
均值	11.25	--	--	20	83.13	797.59

从表5来看,B&C算法获得的可行解数量随着*l*值的增加而减少,且在每个*l*值对应的20个算例中均存在未取得可行解的情况。通过观察MPOKS计算结果可以发现,其目标函数值随*l*值的增加而减小,当*l*值从4增加至7时,MPOKS获得的平均目标函数值从107.66递减至71.43。其可能的原因为:在相同的受灾点数*n*下,拟开设的集散点数量越多($m=l-2$),分配至每个集散点的受灾点数越少,每个集散点要完成的装载时间就越少,因此,总任务完成时间的期望值相应降低。而随着*l*值的增加,MPOKS的计算时间小幅增加,表明待选位置数量越大,问题求解难度越大。

综上,当*l*值增加时,问题复杂度显著提升,CPLEX求解器能够获得的可行解数量显著减少。相比之下,MPOKS仍具有良好的求解能力,对所有算例均获得可行解,平均计算时间小幅增加,表现出良好的稳定性。

5 结论

本文对考虑中断风险的灾后应急物资调度组合优化问题进行了研究,将应急物资集散点选址、需求分配、装载次序确定等问题抽象为一类ScheLoc组合优化问题。考虑集散点的中断风险,构建基于中断情境的MILP模型,以最小化期望供应完成时间。设计了一种基于预先排序和核搜索的启发式算法MPOKS对问题进行求解,并通过算例实验对算法性能进行验证。经过研究发现:①考虑中断风险的应急物资供应ScheLoc组合优化问题属于NP-难问题,其求解难度随算例规模增大而显著提高;②提出的MPOKS具有良好的求解性能,其可行解数量、解的质量以及计算效率均显著优于利用CPLEX求解器的B&C算法直接求解的计算结果。下一步可以研究考虑更多不确定性的应急物资调度优化问题。同时,可以

拓展供应模式,针对“车-无人机”协同配送模式下的应急物资调度优化方法开展研究。

参考文献(References)

[1] 杨莎莎. 考虑道路可靠性的地震灾害应急物资调度优化[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.
YANG S S. Scheduling optimization of earthquake disaster emergency materials considering road reliability [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022. (in Chinese)

[2] WEX F, SCHRYEN G, FEUERRIEGEL S, et al. Emergency response in natural disaster management: allocation and scheduling of rescue units [J]. European Journal of Operational Research, 2014, 235(3): 697-708.

[3] WANG Z, LENG L L, DING J J, et al. Study on location-allocation problem and algorithm for emergency supplies considering timeliness and fairness [J]. Computers & Industrial Engineering, 2023, 177: 109078.

[4] MANUPATI V K, SCHOENHERR T, WAGNER S M, et al. Convalescent plasma bank facility location-allocation problem for COVID-19[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2021, 156: 102517.

[5] HUANG L L, TAN Y, YE J Z, et al. Coordinated location-allocation of cruise ship emergency supplies under public health emergencies[J]. Electronic Research Archive, 2023, 31(4): 1804-1821.

[6] WANG B C, QIAN Q Y, GAO J J, et al. The optimization of warehouse location and resources distribution for emergency rescue under uncertainty [J]. Advanced Engineering Informatics, 2021, 48: 101278.

[7] ZHONG S P, CHENG R, JIANG Y, et al. Risk-averse optimization of disaster relief facility location and vehicle routing under stochastic demand[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2020, 141: 102015.

[8] TAVANA M, ABTAHI A R, DI CAPRIO D, et al. An integrated location-inventory-routing humanitarian supply chain network with pre- and post-disaster management considerations [J]. Socio-Economic Planning Sciences, 2018, 64: 21-37.

[9] 王亚东, 石全, 陈材, 等. 考虑中断风险的备件供应选址-分配优化模型[J]. 兵工学报, 2019, 40(8): 1708-1715.
WANG Y D, SHI Q, CHEN C, et al. Location-allocation joint optimization model of spare parts supply under supply disruption risk [J]. Acta Armamentarii, 2019, 40(8): 1708-1715. (in Chinese)

[10] WANG D J, PENG J, YANG H F, et al. Distributionally robust location-allocation with demand and facility disruption uncertainties in emergency logistics [J]. Computers & Industrial Engineering, 2023, 184: 109617.

[11] YU W Y. A robust model for emergency supplies prepositioning and transportation considering road disruptions[J]. Operations Research Perspectives, 2023, 10: 100266.

[12] 陈娜. 设施中断情景下震后应急物流网络的可靠性优化研究[D]. 重庆: 重庆工商大学, 2018.
CHEN N. Research on reliability optimization of post-earthquake emergency logistics network under facility

disruption scenarios[D]. Chongqing: Chongqing Technology and Business University, 2018. (in Chinese)

[13] LEE J, MOON I. Supplier selection and order allocation problems considering regional and supplier disruptions with a risk-averse strategy[J]. Computers & Industrial Engineering, 2024, 187: 109810.

[14] 杜慧莉. 考虑中断情景的海外仓选址 - 库存优化研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2021.

DU H L. Research on overseas warehouse location-inventory optimization considering disruption scenarios[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2021. (in Chinese)

[15] 于文爽. 考虑损毁风险的应急配送中心选址问题研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2023.

YU W S. Location optimization of emergency distribution centers considering the risk of damage[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2023. (in Chinese)

[16] LI Y T, CÔTÉ J F, CALLEGARI-COELHO L, et al. Novel formulations and logic-based benders decomposition for the integrated parallel machine scheduling and location problem[J]. INFORMS Journal on Computing, 2022, 34(2): 1048 – 1069.

[17] BOSCHETTI M A, MANIEZZO V. Contemporary approaches in matheuristics an updated survey[J]. Annals of Operations Research, 2024, 343: 663 – 700.

[18] LAHYANI R, CHEBIL K, KHEMAKHEM M, et al. Matheuristics for solving the multiple knapsack problem with setup[J]. Computers & Industrial Engineering, 2019, 129: 76 – 89.

[19] FANJUL-PEYRO L, PEREA F, RUIZ R. Models and matheuristics for the unrelated parallel machine scheduling problem with additional resources[J]. European Journal of Operational Research, 2017, 260(2): 482 – 493.

[20] BERTAZZI L, COELHO L C, DE MAIO A, et al. A matheuristic algorithm for the multi-depot inventory routing problem[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2019, 122: 524 – 544.

[21] SCHENEKEMBERG C M, SCARPIN C T, PÉCORA J E, et al. The two-echelon inventory-routing problem with fleet management[J]. Computers & Operations Research, 2020, 121: 104944.

[22] FILIPPI C, GUASTAROBBA G, HUERTA-MUÑOZ D L, et al. A kernel search heuristic for a fair facility location problem[J]. Computers & Operations Research, 2021, 132: 105292.

[23] CARVALHO D M, NASCIMENTO M C V. A kernel search to the multi-plant capacitated lot sizing problem with setup carry-over[J]. Computers & Operations Research, 2018, 100: 43 – 53.

[24] GOBBI A, MANERBA D, MANSINI R, et al. A kernel search for a patient satisfaction-oriented nurse routing problem with time-windows [J]. IFAC-PapersOnLine, 2019, 52(13): 1669 – 1674.

[25] ZHANG C, LI Y T, CAO J H, et al. Exact and matheuristic methods for the parallel machine scheduling and location problem with delivery time and due date[J]. Computers & Operations Research, 2022, 147: 105936.