

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2025.01.019

陆相林, 于峰, 赵宁. 等级型城市群应急物资储备库网络优化模型——以京津冀城市群为例 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2025, 47(1): 226-238.

等级型城市群应急物资储备库网络优化模型

——以京津冀城市群为例

陆相林¹, 于峰², 赵宁¹

1. 石家庄学院 经济管理学院, 石家庄 050035; 2. 临沂大学 商学院, 山东 临沂 276005

摘要: 构建具有等级性、多目标特征的应急物资储备库网络, 对于城市群应急物资储备库的良性互动和城市群应急物资储备库网络的协同发展具有重要现实意义。结合城市群实际情况, 对传统的等级设施选址模型加以改进, 以实现城市群内受灾点民众接受应急物资配置总满意度最大、应急物资储备库之间总关联度最高和应急物资储备建设与储存成本最小为目标, 构建了适用于城市群应急物资储备库网络优化的等级型设施选址模型。针对所构建模型的等级性、多目标特点, 对传统两阶段启发式算法进行拓展, 设计了三阶段启发式算法加以求解。以京津冀城市群为例进行实证, 优化结果表明: 所构建模型稳健性较强, 所设计算法能实现对模型的有效求解。京津冀城市群内应设立北京市、天津市、石家庄市等 6 个区域级应急物资储备库, 且进一步形成由区域级、市级、县(市、区)级 3 个等级构成的应急物资储备库网络协作区。

关键词: 应急物资储备库网络; 等级多目标设施选址; 三阶段

启发式算法; 京津冀城市群

中图分类号: TP18; F224.3

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



文章编号: 1673-9868(2025)01-0226-13

Hierarchical Optimization Model and Empirical Study on Metropolitan Emergency Material Depository Network

——A Case Study of Beijing-Tianjin-Hebei Metropolitan

LU Xianglin¹, YU Feng², ZHAO Ning¹

1. College of Economics and Management, Shijiazhuang University, Shijiazhuang 050035, China;

2. School of Business, Linyi University, Linyi Shandong 276005, China

Abstract: Constructing an emergency material depository network with hierarchical and multi-objective

收稿日期: 2024-01-05

基金项目: 河北省自然科学基金项目(D2019106020); 国家社会科学基金项目(21BGL150)。

作者简介: 陆相林, 教授, 硕士研究生导师, 主要从事管理系统优化与物流管理研究。

通信作者: 于峰, 副教授, 硕士研究生导师。

characteristics is of great practical significance for the positive interaction of urban emergency material depository and the coordinated development of urban emergency material depository network. Based on the actual situation of metropolitan, the traditional hierarchical facility location model was improved. To achieve the goals of maximum total satisfaction of the people in disaster-affected location for receiving the allocation of emergency materials, the highest total correlation degree among the emergency material depositories, and the minimum cost of the construction and storage of emergency materials, the hierarchical facility location optimization model of the emergency material depository network of metropolitan was constructed. According to the hierarchical and multi-objective characteristics of the constructed model, the traditional two-stage heuristic algorithm was extended and a three-stage heuristic algorithm was designed. Taking the Beijing-Tianjin-Hebei Metropolitan as an empirical region, the optimization results showed that the constructed model was robust and the designed algorithm could solve the model effectively. Six region-level emergency material depositories such as Beijing, Tianjin and Shijiazhuang should be constructed, and a three-level network structure of emergency material depositories, including region-level emergency material depositories, municipal emergency material depositories, and county (city, district) emergency material depositories, should be further formed.

Key words: emergency material depository network; hierarchical multi-objective facility location; three-stage heuristic algorithm; Beijing-Tianjin-Hebei Metropolitan

灾害种类多、发生频率高、分布地域广、受灾损失重是我国的基本国情之一^[1]。随着我国城市群建设的快速推进,重特大安全风险呈逐年增加趋势。在重特大安全风险转化为灾害过程中,除灾害本身直接造成损失外,缺乏有效、恰当的应对策略也是造成损失的重要原因^[2],例如:应急物资调度因层级间和层级内协作缺乏优化而应急响应效率低下,灾害管理社会目标因应急资源分配不公而难以实现等。应急物资在突发事件应对中极其重要,我国政府高度重视应急物资储备保障工作,目前已经形成了中央、省、市、县、乡镇 5 级政府应急物资储备体系。然而,“新冠”疫情表明,应急物资储备不足、调配效率偏低、储备库网络协同水平不佳仍是应急物资保障的突出问题。2014 年,京津冀协同发展作为重大国家战略被提上日程,完善各项安全监管措施,健全各种应急救援手段,构建城市应急物资储备库网络,成为京津冀城市群综合竞争力提升和发展的重要保障。

1 城市群应急物资储备库网络等级性问题的提出

城市群应急物资储备库网络是由城市群内应急物资储备库以及应急物资调配通道共同构成的网络状结构,常常表现出等级性特征。表 1 描述了一个 3 等级的城市群应急物资储备库网络。

表 1 城市群应急物资储备库网络等级结构

层次	潜在受灾点层	低应急物资储备库层(l 层)	高应急物资储备库层(h 层)
名称	第 0 层	第 1 层	第 2 层
代码	i	j	k
实体	城市群内各城市下辖县 (市、区)级	市级(快速救援)	区域级(枢纽)
功能	产生应急服务需求。	提供相对低等级应急服务,用 A 代称。	网络结构分为嵌套和非嵌套 2 种情况。一是嵌套网络时,除了提供低等级服务 A 外,还能够提供其他中等级服务 M;二是当网络为非嵌套网络时,则只提供中等级服务 M。

城市群应急物资储备库网络等级优化问题本质上属于设施选址问题中的等级设施选址问题。设施选址问题是有关一系列设施(如基础设施、交通站点等)如何做出合理位置选择的问题^[3]。等级设施选址问题是设施选址问题研究中极具复杂性、挑战性,且与现实联系密切的一个领域^[4-5],对于公共设施网络优化有重要指导意义^[6-8]。学者们从等级设施网络优化中的单流与多流模式划分^[9]、服务可用性考察中的嵌套和非嵌套特征^[10]、空间优化中的同调性和非同调性结构^[11],以及整体优化中的单目标与多目标实现^[12]等维度展开了研究。陈志宗^[13]探索了城市防灾减灾设施的等级网络优化问题;杨珺等^[14]构建了碳排放政策影响的多容量等级设施选址模型;陆相林等^[15]基于等级设施选址模型,对北京房山应急物资储备库网络优化问题进行了实证研究;常征等^[16]对内陆港等级选址问题展开研究;Yavari等^[17]提出了考虑不确定性、覆盖半径扩展和容量受限的重构型等级设施选址问题,并设计启发式算法求解;Chouksey等^[18]基于印度产妇保健设施可获得性有限的困境,从用户和政府角度规划所需的产妇保健设施,构建了容量受限的等级设施选址配置模型,并设计了序贯算法加以求解;霍非舟等^[19]构建了考虑需求等级与距离损失的消防站选址模型。

在应急物资储备库优化模型方面,项寅^[20]构建了社会环境以及需求特征限制型应急物资储备模型;胡建华等^[21]、罗振敏等^[22]综述了我国应急物资储备研究主要领域及趋势;常征等^[23]基于引力模型原理改进最大覆盖模型,构建了多目标海上应急物资储备库等级选址模型,设计了蝙蝠算法进行求解。

等级设施选址和应急物资储备库优化模型相关研究已经取得了丰硕成果,但是对应急物资储备库网络中的等级多目标优化问题缺乏充分关注,实证中鲜有定量探讨城市群应急物资储备库网络等级配置合理性的成果。基于上述考虑,本研究构建了综合体现城市群纵向“府际合作”等级性、实现城市群内受灾点民众接受应急物资配置总满意度最大、使得应急物资储备库之间总关联度最高和应急物资储备库建设与储存成本最小的应急物资储备库网络等级型多目标优化模型,并以京津冀城市群为例进行实证,具体研究思路如图 1 所示。

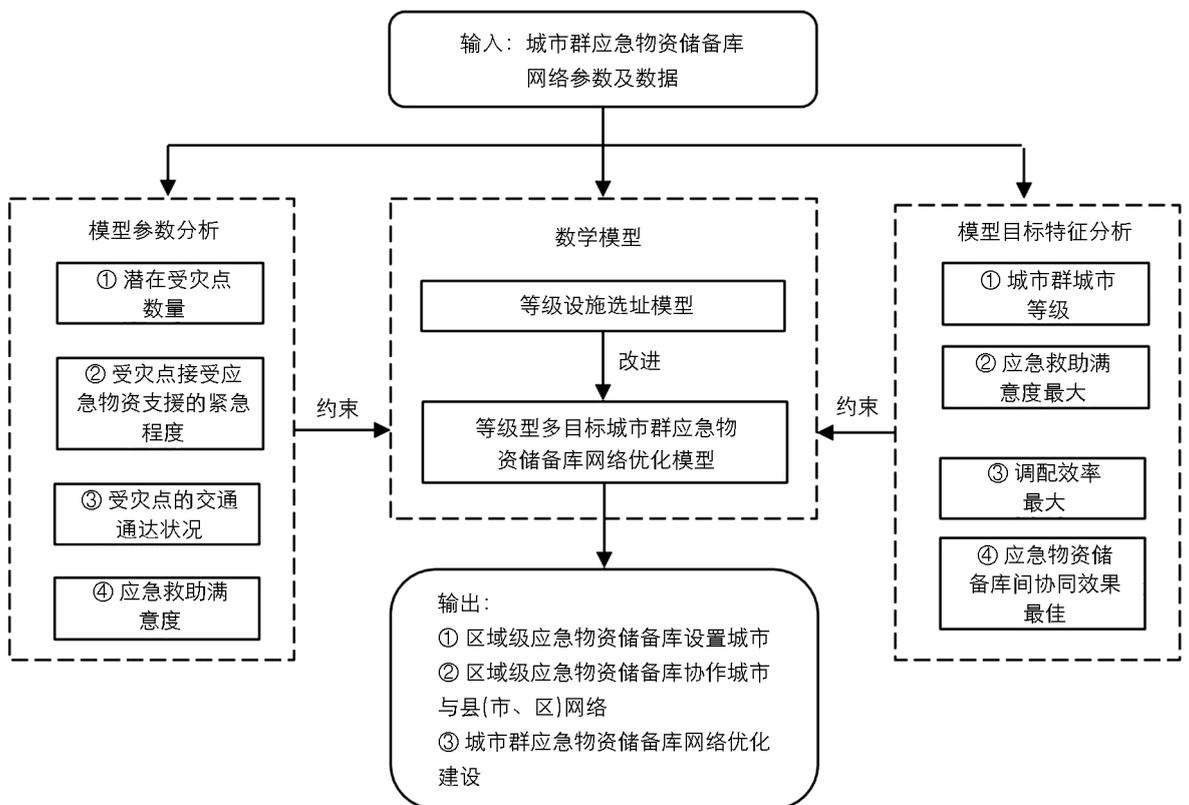


图 1 多目标城市群应急物资储备库网络等级优化问题研究思路图

2 等级型城市群应急物资储备库网络模型构建

2.1 方法选取的适用性分析

网络由节点和线组成。城市群应急物资储备库网络作为网络设施中的一种类型,其节点通常划分为 2 种类型。其中,接受应急物资服务的点定义为应急物资需求点,又称为潜在受灾点;具有应急物资储存以及供给功能的点,定义为应急物资储备库。对于等级型应急物资储备库网络而言,进一步考虑了应急物资储备库的等级性(亦称为层级性,或者多水平性等)特征。城市群应急物资储备库网络中的线,可以表现为实际的交通线,也可根据优化需要抽象为欧氏距离、交通时间等,本质体现了城市群应急物资储备库网络中各点之间的供需联系。

城市群应急物资储备库网络本质上等同于设施选址问题中的设施点与需求点所形成的等级网络,图 2 显示了等级设施选址问题与城市群应急物资储备库网络等级优化问题的相似之处。由图 2 可知,城市群应急物资储备库网络等级优化问题本质上等同于等级设施选址问题。因此可以初步判断,选用等级设施选址模型解决城市群应急物资储备库网络等级优化问题是合适的。

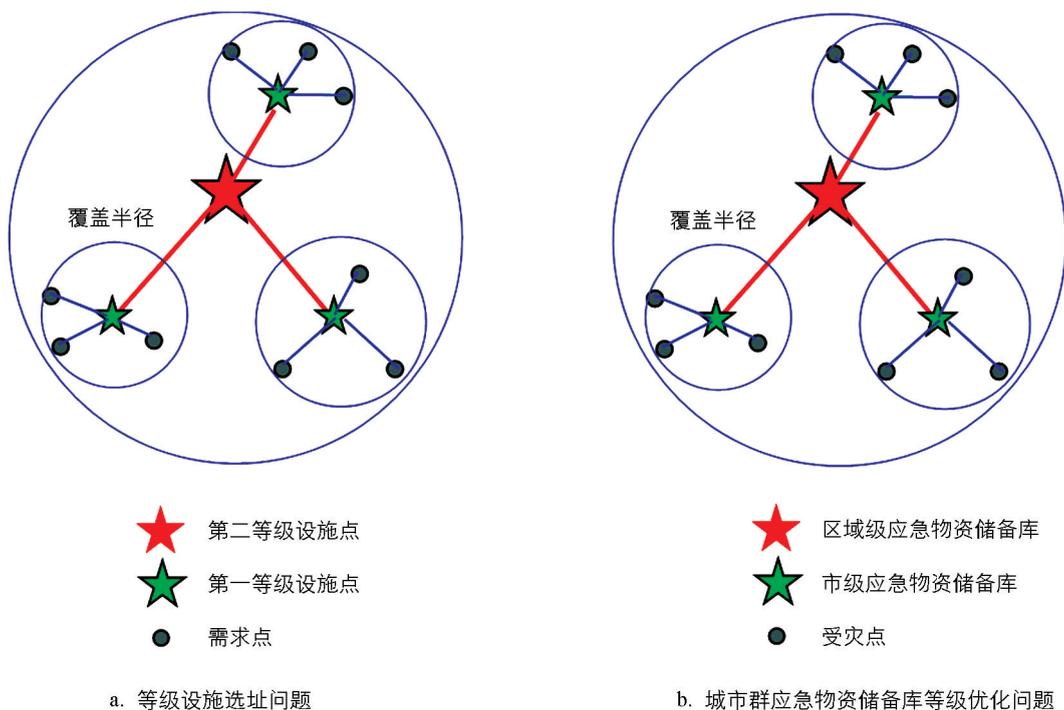


图 2 等级设施选址问题与城市群应急物资储备库网络等级优化问题对比

2.2 模型假设

本研究的假设如下: ① 依据文献[15]的方法,假设城市群应急物资储备库、潜在受灾点在网络优化分析中表现为点状特征,交通线(运输线)在网络中表现为线状特征,其中潜在受灾点的实体形态设定为县(市、区),应急物资储备库的实体形态设定为地市级以及京津 2 个直辖市。② 依据文献[16]的方法,假设将城市群应急物资储备库设定为高低 2 个等级,低级应急物资储备库标号为第一等级(在实证中对应市级应急物资储备库);高级应急物资储备库标号为第二等级(在实证中对应区域级应急物资储备库);把潜在受灾点标号为第 0 等级。③ 依据文献[15、19]的方法,用交通距离远近体现应急物资储备库与潜在受灾点的空间联系密切程度。④ 基于成本节约原理,城市群应急物资储备库数量不能无限制增加,故假设城市群应急物资储备库总数量有限。⑤ 依据文献[15]的方法,假设 1 个潜在受灾点最多接受 1 个应急物资储备库的应急物资调拨服务即能满足其需求;限定城市群应急物资储备库选址位于各地

级市以及京津 2 个直辖市市域内,其功能包括:应急物资储存、调拨以及响应区域级乃至国家级城市群应急物资储备库的指示与指导。⑥ 考虑到城市群内城市、县(市、区)人口众多,需要建设多个应急物资储备库才能够满足应急物资需求,故假设城市群应急物资储备库在多个城市内分布,以保证其应急物资调拨服务可用性的空间均衡性。⑦ 依据文献[15]的方法,假设城市群潜在受灾点接受应急救助满意度遵循距离(时间)衰减规律,即接受应急救助距离越远(所需救助时间越长),其满意度越低。⑧ 依据文献[16, 19]的方法,假设城市群高等级应急物资储备库具有嵌套性特征,除了具备低级应急物资储备库服务可用性之外,还具备其他应急服务救助功能。

2.3 符号定义

为了方便分析,本研究进行如下符号的定义。

2.3.1 模型集合符号

i 表示城市群潜在受灾点, I 表示全部城市群潜在受灾点,故存在 $i \in I$; j 表示低级城市群应急物资储备库(即第一等级应急物资储备库,也即实证中的市级应急物资储备库), J 表示低级城市群应急物资储备库的全体,故存在 $j \in J$; k 表示高级城市群应急物资储备库(即第二等级应急物资储备库,也即实证中的区域级应急物资储备库), K 表示高级城市群应急物资储备库的全体,故存在 $k \in K$ 。

2.3.2 模型参数符号

p_l 表示低级城市群应急物资储备库的建设总量; p_h 表示高级城市群应急物资储备库的建设总量; VA_i 表示城市群潜在受灾点 i 的受灾人口数量; m_j 表示第 j 个城市下辖的县(市、区)个数; R_{ij} 表示潜在受灾点 i 至低级城市群应急物资储备库 j 的交通距离; R_{jk} 表示低级城市群应急物资储备库 j 至高级应急物资储备库 k 的交通距离; R_{ijk} 表示城市群潜在受灾点 i 至低级应急物资储备库 j ,然后再至高级应急物资储备库 k 的总交通距离; E_i 表示受灾点 i 接受应急物资支援的紧急程度,取值范围设定为 $[0, 1]$,越接近于 1,需要得到应急物资支援的紧急程度越高,反之则越低; C_{jk} 表示 k 等级应急物资储备库 j 的建设成本; Q_{jk} 表示 k 等级应急物资储备库 j 的应急物资储备量; F_{jk} 表示 k 等级应急物资储备库 j 的单位存储成本。

G_i 表示受灾点 i 交通通达状况的参数,取值范围设定为 $[0, 1]$; c_i 表示受灾点 i 的平均拥堵延时指数。 G_i 的计算公式如下:

$$G_i = 1 - \frac{c_i - \min(c_i)}{\max(c_i) - \min(c_i)} = \frac{\max(c_i) - c_i}{\max(c_i) - \min(c_i)} \quad (1)$$

SD_{ij} 表示潜在受灾点 i 由低等级应急物资储备库 j 服务时的需求满意度,用下式计算:

$$SD_{ij} = 1 - \frac{R_{ij} - \min(R_{ij})}{\max(R_{ij}) - \min(R_{ij})} = \frac{\max(R_{ij}) - R_{ij}}{\max(R_{ij}) - \min(R_{ij})} \quad (2)$$

SD_{jk} 表示高级应急物资储备库 k 调拨应急物资至低级应急物资储备库 j 时的应急救助满意度,用下式计算:

$$SD_{jk} = 1 - \frac{R_{jk} - \min(R_{jk})}{\max(R_{jk}) - \min(R_{jk})} = \frac{\max(R_{jk}) - R_{jk}}{\max(R_{jk}) - \min(R_{jk})} \quad (3)$$

SD_{ijk} 表示高级应急物资储备库 k 调拨应急物资至其责任区内的低级应急物资储备库 j 并使潜在受灾点 i 的居民获得的应急救助满意度,用下式计算:

$$SD_{ijk} = 1 - \frac{R_{ijk} - \min(R_{ijk})}{\max(R_{ijk}) - \min(R_{ijk})} = \frac{\max(R_{ijk}) - R_{ijk}}{\max(R_{ijk}) - \min(R_{ijk})} \quad (4)$$

TC_{jk} 表示 k 级应急物资储备库中第 j 个储备库的对外关联指数,用下式计算:

$$TC_{jk} = G \frac{Z_j \cdot Z_k}{R_{jk}} \quad (5)$$

式中: G 为引力常数; Z_j 、 Z_k 为应急物资储备库保障能力,其评价指标体系及计算方法参见文献[24]。

2.3.3 模型决策变量符号

x_{ijk} 表示潜在受灾点变量, 当潜在受灾点 i 被高级应急物资储备库 k 职责范围内的低级应急物资储备库 j 提供应急物资调拨服务时, 令其值为 1, 反之取值为 0; y_{jk} 表示城市群应急物资储备库指派变量, 当低级应急物资储备库 j 接受高级应急物资储备库 k 应急物资调拨时, 令其值为 1, 反之取值为 0; ω_j 表示低级城市群应急物资储备库选址变量, 低级应急物资储备库选址于 j 点时, 令其值为 1, 反之取值为 0; z_k 表示高级城市群应急物资储备库选址变量, 高级应急物资储备库选址于 k 点时, 令其值为 1, 反之取值为 0。

2.4 模型构建

2.4.1 目标函数

在文献[24]的目标函数基础上, 进一步考虑了受灾人口、受灾点接受应急物资支援的紧急程度、受灾点交通通达状况对灾民应急救助整体满意度最大化的影响, 得目标函数 f_1 :

$$f_1 = \max \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} VA_i \cdot E_i \cdot G_i \cdot SD_{ijk} \cdot x_{ijk} \quad (6)$$

借鉴文献[23]、[25]的做法, 得目标函数 f_2 和 f_3 :

$$f_2 = \min \left(\sum_{j \in J} \sum_{k \in K} C_{jk} \cdot y_{jk} + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} F_{jk} \cdot Q_{jk} \cdot y_{jk} \right) \quad (7)$$

$$f_3 = \max \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} TC_{jk} \cdot y_{jk} \quad (8)$$

上述目标函数中, 式(6)用于最大化评价潜在受灾点居民接受应急物资调拨所获得的整体满意度 f_1 ; 式(7)用于实现应急物资储备库建设和存储成本 f_2 的最小化; 式(8)用于最优化城市群各应急物资储备库之间, 以及城市群各应急物资储备库至潜在受灾点的空间联系 f_3 。

2.4.2 约束条件

约束条件仍选用文献[24]模型中的约束条件, 具体如下:

$$\text{s. t. } \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} x_{ijk} \leq 1, \forall i \quad (9)$$

$$x_{ijk} \leq y_{jk}, \forall i, j, k \quad (10)$$

$$y_{jk} \leq z_k, \forall j, k \quad (11)$$

$$y_{jk} \leq \omega_j, \forall j, k \quad (12)$$

$$\sum_{k \in K} y_{jk} \leq 1, \forall j \quad (13)$$

$$\sum_{j \in J} \omega_j = p_l \quad (14)$$

$$\sum_{k \in K} z_k = p_h \quad (15)$$

$$y_{jj} = z_j, \forall j \quad (16)$$

$$x_{ijk}, \omega_j, z_k, y_{jk} = 0, 1, \forall i, j, k \quad (17)$$

约束条件中, 式(9)实现了任何 1 个潜在受灾点最多仅可由 1 个应急物资储备库提供应急物资调拨服务; 式(10)表示潜在受灾点只有接受某低级城市群各应急物资储备库应急物资调拨时, 才取值为 1, 否则取值为 0; 式(11)、式(12)用于限定低级城市群各应急物资储备库 j 只有接受其高级应急物资储备库 k 应急物资调拨指派时, 才能取值为 1, 否则取值为 0; 式(13)表示低级应急物资储备库 j 最多只能接受 1 个高级应急物资储备库 k 的应急物资调拨指派; 式(14)、式(15)依次限定了低级、高级城市群各应急物资储备库的预定建设数量; 式(16)实现了高级城市群各应急物资储备库对其职责内低级城市群各应急物资储备库指派关系的同调性; 式(17)保证了 $x_{ijk}, \omega_j, z_k, y_{jk}$ 取值为 0 或 1。

3 算法设计

等级型城市群应急物资储备库网络模型优化问题属于分层整数规划的范畴, 其求解类属于 NP-hard 问

题^[26-27], 只能通过启发式算法(近似算法等)来完成近似求解。本研究的启发式算法设计分为 3 个阶段, 包括总目标函数加权求解阶段、分目标函数求解优化阶段和分目标函数值迭代阶段。

3.1 总目标函数加权求解阶段

此阶段完成对等级型城市群应急物资储备库网络模型总目标函数的加权求解。参考文献[28]的方法,

赋予目标函数 f_1 、 f_2 、 f_3 权重, 对三者的值进行加权处理, 即有目标函数总值 $f = \sum_{i=1}^3 \varphi_i \cdot f_i$, 其中 φ_i 是第 i 个目标函数值的权重。由于目标函数 f_1 、 f_2 、 f_3 有不同计量单位, 故对原始数据进行归一化处理。

其中 f_1 、 f_3 为正目标, 处理公式为: $x'_{ij} = \frac{x''_{ij} - x''_{\min}(j)}{x''_{\max}(j) - x''_{\min}(j)}$; f_2 为负向目标, 处理公式为: $x'_{ij} =$

$\frac{x''_{\max}(j) - x''_{ij}}{x''_{\max}(j) - x''_{\min}(j)}$ 。式中: x'_{ij} 是无量纲化后的新数据; x''_{ij} 是原始数据; $x''_{\min}(j)$ 为第 j 个评价指标所有取值

中的最小值; $x''_{\max}(j)$ 为第 j 个评价指标所有取值中的最大值。

3.2 分目标函数求解优化阶段

本阶段基于 Berman 等^[29]提出的有关分层整数规划的求解思路, 利用目标函数公式计算 f_1 、 f_2 、 f_3 的值并选定应急物资储备库, 具体步骤如下:

步骤 1 模型参数初始化设置。

对 VA_i 、 E_i 、 G_i 、 C_{jk} 、 F_{jk} 、 Q_{jk} 赋初值, 并利用极差标准化对数据进行归一化处理; 根据所测得的受灾点至应急物资储备库距离矩阵, 求得 SD_{ijk} 值。

步骤 2 各分目标函数值优化求解。

① 对于目标函数值 f_1 , 通过以下过程求解: 对任一潜在受灾点 i , 计算其接受各应急物资储备库应急物资调拨服务时所有可能的 $VA_i \cdot E_i \cdot G_i \cdot SD_{ijk}$ 取值, 并由大到小降序排列。选取其最大值对应的应急物资储备库(设为 j), 验证是否满足模型约束条件, 如果满足则赋值 $x_{ijk} = 1$, 否则选取 $VA_i \cdot E_i \cdot G_i \cdot SD_{ijk}$ 值排序中位列第 2 的应急物资储备库(设为 j')。同样验证是否满足约束条件, 如果满足则赋值 $x_{ij'k} = 1$, 否则选取 $VA_i \cdot E_i \cdot G_i \cdot SD_{ijk}$ 值排序中位列第 3 的应急物资储备库, 依次完成类似操作直至目标函数值 f_1 在满足模型约束条件下达到最优。② 对于目标函数值 f_2 , 通过以下过程求解: 对任一应急物资储备库 j , 计算其所有可能的 $(C_{jk} + F_{jk} \cdot Q_{jk})$ 取值, 并由小到大升序排列。选取其最小值对应的应急物资储备库(设为 j), 验证是否满足模型约束条件, 如果满足则赋值 $y_{j'k} = 1$, 否则选取 $(C_{jk} + F_{jk} \cdot Q_{jk})$ 值排序中位列第 2 小的应急物资储备库(设为 j')。同样验证是否满足约束条件, 如果满足则赋值 $y_{j'k} = 1$, 否则选取 $(C_{jk} + F_{jk} \cdot Q_{jk})$ 值排序中位列第 3 小的应急物资储备库, 依次完成类似操作直至目标函数值 f_2 在满足模型约束条件下达到最优。③ 对于目标函数值 f_3 , 通过以下过程求解: 对任一应急物资储备库 j , 计算其所有可能的 TC_{jk} 取值, 并由大到小降序排列。选取其最大值对应的应急物资储备库(设为 j), 验证是否满足模型约束条件, 如果满足则赋值 $y_{jk} = 1$, 否则选取 TC_{jk} 值排序中位列第 2 的应急物资储备库(设为 j')。同样验证是否满足约束条件, 如果满足则赋值 $y_{j'k} = 1$, 否则依次完成类似操作直至目标函数值 f_3 在满足模型约束条件下达到最优。

步骤 3 重复执行步骤 2, 直至所有的城市群潜在受灾点和应急物资储备库都完成选定。需要说明的是, 本阶段的计算结果是总目标函数加权求解阶段求解的基础。

3.3 分目标函数值迭代阶段

考虑到模拟退火算法具有参数少、鲁棒性强、适用于求解复杂整数规划问题的优点, 因此本阶段选择模拟退火算法作为核心算法对目标函数 f_1 、 f_2 、 f_3 的取值进行迭代优化, 确定城市群应急物资储备库选址点集合 P 。模拟退火算法基本步骤如下^[24, 30-31]:

步骤 1 在候选新建应急物资储备库点中随机选择 p 个新建应急物资储备库点, 构成集合 P , 利用 Vogel 配置算法, 配置各潜在受灾点, 计算目标函数值 $F(P)$, 作为当前最优解。设置初始点温度 $T = T_0$, 初始迭代次数为 0。

步骤 2 在 P 中随机选一应急物资储备库点 $j, j \in P$, 同时在集合 P 选择一应急物资储备库点 $j', j' \notin P$, 移出 j 并移入 j' , 构成集合定义为 P' 。

步骤 3 通过前面设计的配置启发式算法, 计算目标函数 $F(P')$ 的值。

步骤 4 当 $F(P') \geq F(P)$ 时, 使 $P = P'$, 接受本次移动(move), 转至步骤 6。

步骤 5 当 $F(P') < F(P)$ 时, 计算 $\delta = (F(P) - F(P'))/T$, 若有 $\delta \geq e^{-\delta}$, 则接受移动, 令 $P = P'$, 转向步骤 6; 如不接受移动, 则保持原有 P , 转向步骤 7。

步骤 6 把当前解代入 $F(P')$, 如有必要, 更新最优解。

步骤 7 逐一增加迭代次数, 用 T 乘以 f 。如果迭代次数超过 L , 迭代终止, 以最优解作为算法的解, 否则返回步骤 2。

整个算法求解过程取 $n \leq 300, T_0 = 0.1, N = 250n\sqrt{p}, f = 1 - 5/N$ 。需要说明的是, 本阶段的计算结果是分目标函数求解优化阶段运算求解的基础。

通过启发式算法 3 个阶段的联合操作, 即可得到城市群应急物资储备库等级优化后的 x_{ijk} 和 y_{jk} 值, 明确城市群应急物资储备库应急物资调拨服务范围内的潜在受灾点与服务半径, 也即得到了等级型城市群应急物资储备库网络的优化结果。需要说明的是, 传统单目标等级设施选址优化问题只需考虑整数规划特征和等级特征即可完成启发式算法设计, 故采用两阶段启发式算法(两阶段分别对应整数规划特征和等级特征)即可求解, 如文献[29]即采用了两阶段启发式算法, 文献[25]利用 MATLAB 的 YALMIP 工具箱进行求解。由于本研究属于等级多目标设施选址优化问题, 需要在传统两阶段算法基础上进一步考虑模型的多目标特征(即需要增加一个阶段), 故设计了三阶段启发式算法(三阶段分别对应整数规划特征、等级特征和多目标特征)进行求解。

4 京津冀城市群应急物资储备库网络等级优化

4.1 研究区域概况

本研究选择京津冀城市群为例进行实证, 该城市群由北京市、天津市 2 个直辖市和河北省的 11 个地级市所构成, 总面积约占全国的 2.3%。受快速城市化进程以及地缘相接的特殊地理环境影响, 京津冀一直面临地震、极端天气、大气污染、消防等各种突发事件威胁, 且各类突发事件具有整体连锁效应。2016 年至今京津冀三地相继签署了《北京市天津市河北省应急救援协作框架协议》《京津冀救灾物资协同保障联席会议制度(试行)》《京津冀救灾物资协同应急保障预案》《京津冀毗邻地区救灾和物资保障互助合作指南》等重要合作文件, 旨在有效整合京津冀三地应急资源, 进一步提高协同处置自然灾害和事故灾难能力, 提出建立三地救灾物资协同保障组织运行机制, 为京津冀协同发展保驾护航。当前, 京津冀城市群尚无应急物资储备库网络的整体协同规划, 由“重文件”合作到“重落实”构建高效的应急物资储备库网络仍有很长的路要走。因此, 选取京津冀为实证区域, 探索在京津冀城市群内建立若干应急物资协作区, 统筹优化城市群内应急物资储备, 实现城市群内区域级、市级应急物资高效低费用联动调配具有重要现实意义。

4.2 数据收集与区域级应急物资储备库数量确定

通过收集京津冀三地统计部门的数据得到 2021 年度 13 个城市常住人口、各类灾害损失情况、发生频率等信息, 从而确定各城市可能受灾人口数量; 查询 13 个城市建安成本作为应急物资储备库单位建设成本; 通过高德地图网站的测距功能得到京津冀城市群 13 个城市两两之间的交通距离; 受灾点的平均拥堵延时指数由高德地图城市交通中的城市详情查询得到, 然后计算得到受灾点交通通达状况指数; 利用式(5)

计算得到应急物资储备库的对外关联指数。如前所述,京津冀城市群应急物资储备库划分为区域级应急物资储备库和市级应急物资储备库 2 类。其中,区域级应急物资储备库是城市群应急物资储备库网络的核心节点,其数量要有所限定以提高建设效率,依据优化模型多次测算和专家咨询意见确定为 6 个。

4.3 优化结果

利用 MATLAB R2014a 软件编写三阶段启发式算法程序,运行求得优化结果(表 2)。

表 2 考虑等级的京津冀城市群应急物资储备库网络优化结果

区域级应急物资储备库	市级应急物资储备库	服务县(市、区)/最大服务半径/ 最大服务半径对应县(市、区)
北京市	—	东城区、西城区、朝阳区、丰台区、石景山区、海淀区、房山区、通州区、顺义区、昌平区、大兴区、门头沟区、怀柔区、平谷区、密云区、延庆区/96 km/延庆区
	廊坊市	安次区、广阳区、霸州市、固安县、永清县、香河县、文安县、大厂回族自治县、三河市、大城县/91 km/大城县
	沧州市	运河区、新华区、泊头市、任丘市、黄骅市、河间市、沧县、青县、东光县、海兴县、盐山县、南皮县、吴桥县、献县、孟村回族自治县、肃宁县/93 km/肃宁县
天津市	—	和平区、河东区、河西区、南开区、河北区、红桥区、东丽区、西青区、津南区、北辰区、武清区、宝坻区、滨海新区、宁河区、静海区、蓟州区/120 km/蓟州区
	唐山市	路北区、路南区、古冶区、开平区、丰南区、丰润区、曹妃甸区、遵化市、迁安市、滦州市、滦南县、迁西县、玉田县、乐亭县/75 km/乐亭县
	秦皇岛市	海港区、山海关区、北戴河区、抚宁区、昌黎县、卢龙县、青龙满族自治县/105 km/青龙满族自治县
石家庄市	—	长安区、桥西区、新华区、裕华区、井陉矿区、井陉县、正定县、栾城区、行唐县、灵寿县、高邑县、赞皇县、无极县、平山县、元氏县、赵县、辛集市、藁城区、晋州市、新乐市、鹿泉区、深泽县/84 km/深泽县
	保定市	涿州市、定州市、安国市、高碑店市、涞水县、定兴县、唐县、高阳县、容城县、涞源县、望都县、安新县、易县、曲阳县、蠡县、顺平县、博野县、雄县、竞秀区、莲池区、满城区、清苑区、徐水区、阜平县/128 km/阜平县
	衡水市	桃城区、冀州区、深州市、枣强县、武邑县、武强县、饶阳县、故城县、景县、阜城县、安平县/72 km/安平县
邯郸市	—	丛台区、邯山区、复兴区、峰峰矿区、肥乡区、永年区、武安市、临漳县、成安县、大名县、磁县、邱县、鸡泽县、广平县、馆陶县、魏县、曲周县、涉县/105 km/涉县
	邢台市	襄都区、信都区、任泽区、南和区、南宫市、沙河市、临城县、内丘县、柏乡县、隆尧县、宁晋县、巨鹿县、新河县、广宗县、平乡县、威县、临西县、清河县/118 km/清河县
张家口市	—	桥东区、桥西区、宣化区、下花园区、万全区、崇礼区、张北县、康保县、尚义县、蔚县、阳原县、怀安县、怀来县、涿鹿县、赤城县、沽源县/156 km/沽源县
承德市	—	双桥区、双滦区、鹰手营子矿区、平泉市、围场满族蒙古族自治县、隆化县、滦平县、承德县、宽城满族自治县、兴隆县、丰宁满族自治县/171 km/丰宁满族自治县

注：“—”表示该区域级应急物资储备库服务于本城市区县应急物资调配。

由表2第1列可知,京津冀城市群6个区域级应急物资储备库的选址点分别为:北京市、天津市、石家庄市、邯郸市、张家口市、承德市,即此6个城市应当成为京津冀城市群应急物资储备库网络整体优化的关键节点,是实现京津冀城市群内潜在受灾点民众接受应急物资配置总满意度最大、应急物资储备库之间总关联度最高和应急物资储备建设与储存成本最小的关键节点。

由表2第2列可知,与6个区域级应急物资储备库形成协作的市级应急物资储备库分别为:北京市的协作城市为廊坊市、沧州市;天津市的协作城市为唐山市、秦皇岛市;石家庄市的协作城市为保定市、衡水市;邯郸市的协作城市为邢台市;而张家口市和承德市则作为独立区域级应急物资储备库服务自身所在区域。

由表2第3列可知,京津冀城市群各城市下辖县(市、区)的应急物资储备库优化配置情况为:①北京市作为区域级应急物资储备库所在地,为廊坊市、沧州市提供高等级应急物资调配服务,与2市形成“京廊沧”应急物资调配协作区;而且,北京市除了服务于廊坊市、沧州市外,也服务于其自身下辖16个县(市、区),最大服务半径为96 km,对应县(市、区)为延庆区。②天津市作为区域级应急物资储备库所在地,为唐山市、秦皇岛市提供高等级应急物资调配服务,与2市形成“津唐秦”应急物资调配协作区;而且,天津市除了服务于唐山市、秦皇岛市外,也服务于其自身下辖16个县(市、区),最大服务半径为120 km,对应县(市、区)为蓟州区。③石家庄市作为区域级应急物资储备库所在地,为保定市、衡水市提供高等级应急物资调配服务,与2市形成“石保衡”应急物资调配协作区;而且,石家庄市除了服务于保定市、衡水市外,也服务于其自身下辖22个县(市、区),最大服务半径为84 km,对应县(市、区)为深泽县。④邯郸市作为区域级应急物资储备库所在地,为邢台市提供高等级应急物资调配服务,二者形成“邯邢”应急物资调配协作区;而且,邯郸市除了服务于邢台市外,也服务于其自身下辖18个县(市、区),最大服务半径为105 km,对应县(市、区)为涉县。⑤张家口市作为独立区域级应急物资储备库服务自身所辖县(市、区),最大服务半径为156 km,对应县(市、区)为沽源县。⑥承德市作为独立区域级应急物资储备库服务自身所辖县(市、区),最大服务半径为171 km,对应县(市、区)为丰宁满族自治县。

4.4 模型稳健性检验

将模型中2021年度的实证数据,替换为2019年度和2020年度的数据,得到优化结果如表3所示。

表3 模型稳健性检验结果对比

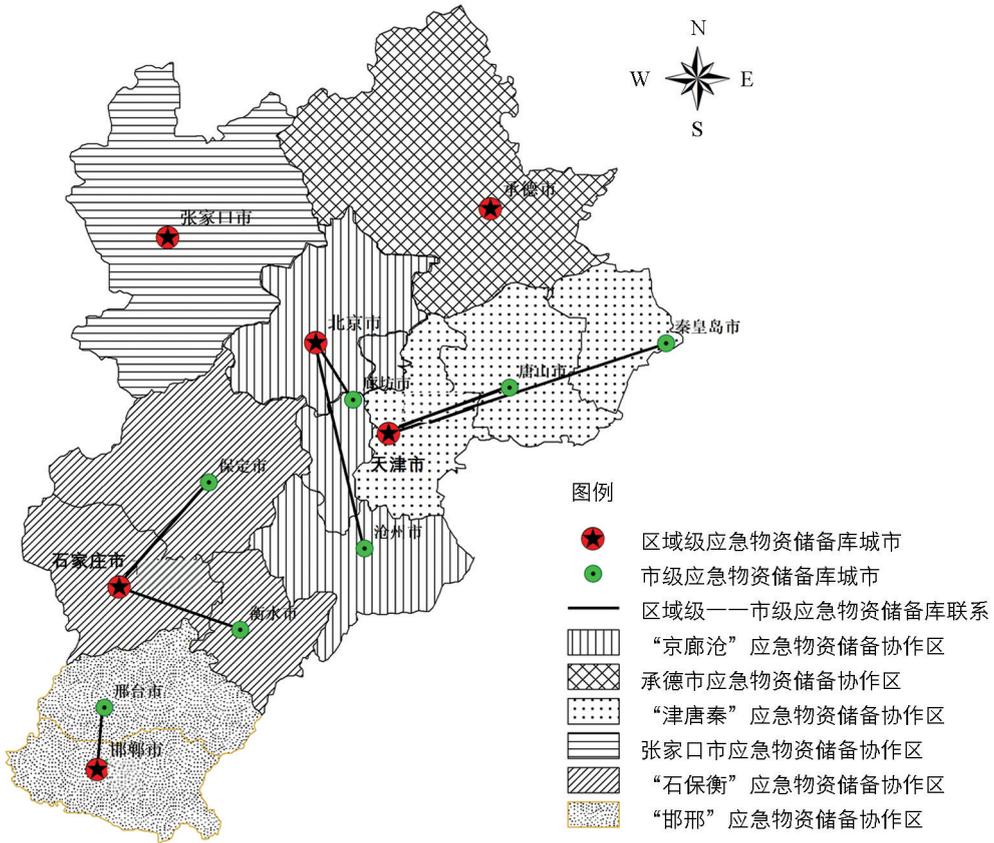
年度	区域级应急物资储备库	市级应急物资储备库	年度	区域级应急物资储备库	市级应急物资储备库
2019	北京市	沧州市、廊坊市	2021	北京市	沧州市、廊坊市
	天津市	唐山市、秦皇岛市		天津市	唐山市、秦皇岛市
	石家庄市	保定市、衡水市		石家庄市	保定市、衡水市
	邯郸市	邢台市		邯郸市	邢台市
	承德市	—		承德市	—
	张家口市	—		张家口市	—
2020	北京市	沧州市、廊坊市			
	天津市	唐山市、承德市			
	石家庄市	保定市、衡水市			
	邯郸市	邢台市			
	秦皇岛市	—			
	张家口市	—			

由表 3 对比可知, 替换为其他年度数据后, 2020 年度中秦皇岛市取代承德市成为区域级应急物资储备库选址点, 被取代的承德市成为天津市的协作城市, 其他城市及优化结果无变化; 2019 年度的模型优化结果均未产生变化, 故模型健性较强。

4.5 京津冀城市群应急物资储备库网络等级优化示意图与优化建议

4.5.1 等级优化示意图

为了更为直观地体现优化结果, 利用 ArcGIS 10.2 软件绘制京津冀城市群应急物资储备库网络等级优化示意图(图 3)。由图 3 可知, 本研究所构建的优化模型可以较好地实现京津冀城市群应急物资储备库网络的空间结构优化, 形成了以北京市、天津市、石家庄市、邯郸市、张家口市、承德市为区域级应急物资储备库, 以唐山市、保定市、廊坊市、衡水市、秦皇岛市、邢台市、沧州市为市级应急物资储备库, 以京津冀城市群所有县(市、区)为外围的 6 大应急物资调配协作区。该结构可以实现京津冀城市群整体应急物资调配满意度的最大化、建设与存储成本的最小化和空间联系的最大化, 保证京津冀城市群应急物资储备库调配网络的高效运行。



审图号: GS(2016)1601 号。

图 3 京津冀城市群应急物资储备库网络等级优化示意图

4.5.2 等级优化建议

① 成立京津冀城市群应急物资储备库网络统一管理协调机构, 要明确北京市、天津市、石家庄市、邯郸市、张家口市、承德市作为区域级应急物资储备库的核心地位, 以 6 个区域级应急物资储备库为核心节点, 构建分等级、多中心协同发展网络。② 以“京廊沧”“津唐秦”“石保衡”“邯邢”合作为重点, 实现区域级应急物资储备库协作区内部的密切联合。③ 以应急物资调配互动、共享为抓手, 优化区域级应急物资储备库——市级应急物资储备库——受灾点的链接(如交通线路), 进一步强化京津冀城市群应急物资储备库网络等级优化的效果。

5 结论

由区域级、市级、县(市、区)级应急物资储备库组成,具有等级性特征的城市群应急物资储备库网络体系,对于实现城市群应急物资调配的良性互动,以及城市群公共安全与协同发展具有重要现实意义。本研究立足于解决城市群应急物资储备库网络优化问题,基于等级设施选址理论,以受灾点民众接受应急物资配置总满意度最大、应急物资储备库之间总关联度最高和应急物资储备建设与储存成本最小为目标,对传统的等级设施选址模型加以改进,构建了适用于城市群应急物资储备库网络优化的等级型设施选址模型,设计了三阶段启发式算法加以求解,并以京津冀城市群为例进行实证,确定了京津冀城市群内6个区域级应急物资储备库的选址点,优化了由区域级、市级、县(市、区)级3个等级构成的应急物资储备库网络结构,绘制了优化示意图,提出了协同发展的对策建议。

本研究只考虑了静态特征下的城市群应急物资储备库网络等级优化问题,今后可以考虑应急物资存在动态需求、应急物资储备库建设与运营受时间的动态影响、受灾点与应急物资储备库之间联系表现为不确定性、应急物资储备库容量限制等复杂情景的等级设施选址问题,并且可以用于验证本研究模型实证结果的合理性。同时,相较于传统的 NP-hard 问题,本研究所构建模型的求解过程更为复杂,今后还可以探索更优的启发式算法。

参考文献:

- [1] 新华社. 习近平在河北唐山市考察 [EB/OL]. (2016-07-28) [2023-12-10]. <http://politics.people.com.cn/n1/2016/0728/c1024-28593193.html>.
- [2] 曹策俊,李从东,屈挺,等. 救援物资跨区域调度双层规划模型——考虑幸存者感知满意度和风险可接受度 [J]. 管理科学学报, 2019, 22(9): 113-128.
- [3] REVELLE C S, EISELT H A, DASKIN M S. A Bibliography for Some Fundamental Problem Categories in Discrete Location Science [J]. European Journal of Operational Research, 2008, 184(3): 817-848.
- [4] TORKESTANI S S, SEYEDHOSSEINI S M, MAKUI A, et al. Hierarchical Facility Location and Hub Network Problems: A Literature Review [J]. Journal of Industrial and Systems Engineering, 2016, 9(special issue on location allocation and hub modeling): 1-22.
- [5] CONTRERAS I, ORTIZ-ASTORQUIZA C. Hierarchical Facility Location Problems [M] // Location Science. Cham: Springer International Publishing, 2019: 365-389.
- [6] 陆相林,侯云先. 基于设施选址理论的中国国家级应急物资储备库配置 [J]. 经济地理, 2010, 30(7): 1091-1095.
- [7] SHAVARANI S M, NEJAD M G, RISMANCHIAN F, et al. Application of Hierarchical Facility Location Problem for Optimization of a Drone Delivery System: A Case Study of Amazon Prime Air in the City of San Francisco [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 95(9): 3141-3153.
- [8] HAN J L, XIANG Q, ZENG B, et al. A Multi-Objective Dynamic Covering Location Problem for Hierarchical Agricultural Machinery Maintenance Facilities [J]. Knowledge-Based Systems, 2022, 252: 109462.
- [9] NARULA S C. Minisum Hierarchical Location-Allocation Problems on a Network: A Survey [J]. Annals of Operations Research, 1986, 6(8): 255-272.
- [10] MARIANOV V, SERRA D. Hierarchical Location-Allocation Models for Congested Systems [J]. European Journal of Operational Research, 2001, 135(1): 195-208.
- [11] SERRA D, REVELLE C. The PQ-Median Problem: Location and Districting of Hierarchical Facilities. Part I [R/OL]. (1992-04-10) [2023-12-10]. <https://EconPapers.repec.org/RePEc:upf:upfgen:12>.
- [12] ŞAHIN G, SÜRAL H. A Review of Hierarchical Facility Location Models [J]. Computers & Operations Research, 2007, 34(8): 2310-2331.

- [13] 陈志宗. 城市防灾减灾设施选址模型与战略决策方法研究 [D]. 上海: 同济大学, 2006.
- [14] 杨珺, 卢巍. 低碳政策下多容量等级选址与配送问题研究 [J]. 中国管理科学, 2014, 22(5): 51-60.
- [15] 陆相林, 苗长虹. 小城镇应急设施选址等级优化配置模型与实证——以北京市房山区消防站点布局优化为例 [J]. 安全与环境工程, 2016, 23(2): 96-101, 116.
- [16] 常征, 齐壮, 吕靖. 带有多重能力等级选择的内陆港选址问题研究 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2017, 17(3): 184-191.
- [17] YAVARI M, MOUSAVI-SALEH M. Restructuring Hierarchical Capacitated Facility Location Problem with Extended Coverage Radius under Uncertainty [J]. *Operational Research*, 2021, 21(1): 91-138.
- [18] CHOUKSEY A, AGRAWAL A K, TANKSALE A N. A Hierarchical Capacitated Facility Location-Allocation Model for Planning Maternal Healthcare Facilities in India [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2022, 167: 107991.
- [19] 霍非舟, 董格力, 李墨潇, 等. 考虑需求等级与距离损失联动消防站选址研究 [J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(3): 183-193.
- [20] 项寅. 考虑社会环境及需求特征的应急物资储备模型 [J]. 管理工程学报, 2022, 36(6): 94-105.
- [21] 胡建华, 陈慧娟. 基于 CiteSpace 分析我国应急物资储备研究热点与演进 [J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版), 2022, 44(2): 292-299.
- [22] 罗振敏, 齐柯, 程方明. 应急物资储备库选址及调运模型研究综述 [J]. 科学技术与工程, 2022, 22(19): 8177-8186.
- [23] 常征, 范瀚文, 张聆晔. 基于引力模型的多等级海上应急物资储备库选址研究 [J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2022, 41(8): 1-7.
- [24] 陆相林, 王智新, 马飒. 城市应急物资储备库网络优化模型构建与实证研究 [M]. 北京: 人民出版社, 2021.
- [25] 蔡冬雪, 朱建明, 王国庆. 基于情景分析的应急装备多层次协同布局问题研究 [J]. 中国管理科学, 2017, 25(10): 72-79.
- [26] HAKIMI S L. Optimum Locations of Switching Centers and the Absolute Centers and Medians of a Graph [J]. *Operations Research*, 1964, 12(3): 450-459.
- [27] HAKIMI S L. Optimum Distribution of Switching Centers in a Communication Network and Some Related Graph Theoretic Problems [J]. *Operations Research*, 1965, 13(3): 462-475.
- [28] 曲冲冲, 田歆, 刘淑芹, 等. 考虑灾民恐慌心理影响的应急资源配置优化研究 [J]. 系统工程学报, 2021, 36(6): 721-730.
- [29] BERMAN O, DREZNER Z. Location of Congested Capacitated Facilities with Distance-Sensitive Demand [J]. *IIE Transactions*, 2006, 38(3): 213-221.
- [30] KIRKPATRICK S, GELATT C D Jr, VECCHI M P. Optimization by Simulated Annealing [J]. *Science*, 1983, 220(4598): 671-680.
- [31] WONG Y H B, BEASLEY J E. Restricting Weight Flexibility in Data Envelopment Analysis [J]. *Journal of the Operational Research Society*, 1990, 41(9): 829-835.

责任编辑 柳剑

崔玉洁