

鲁佳慧, 周晋军, 刘家宏, 等. 大范围洪涝灾害分层协同备灾储备库选址优化研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2026, 57(8): 14-25. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.08.002

LU Jiahui, ZHOU Jinjun, LIU Jiahong, et al. Study on hierarchical and coordinated optimization of site selection for large-scale flood disaster preparedness material reserves [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2026, 57(8): 14-25. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.08.002

大范围洪涝灾害分层协同备灾储备库选址优化研究

鲁佳慧¹, 周晋军², 刘家宏³, 宁占金¹, 林金良¹, 唐新玥⁴, 赵梓同⁵

- (1. 中国消防救援学院 应急救援系, 北京 102202; 2. 北京工业大学 建筑工程学院, 北京 100124;
3. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038; 4. 水利部淮河水利委员会, 安徽 蚌埠 233001;
5. 河北消防救援机动总队, 河北 张家口 076200)

摘要:【目的】针对洪涝灾害情景下应急物资储备库选址过程中需求点空间分布复杂、异质性显著及资源配置效率不足的问题, 提出了兼顾需求特征分区与多层级配置的储备库选址优化方法。【方法】从危险度、暴露度与可达性三个维度选取指标构建需求点多维特征向量, 经标准化处理后, 利用自组织映射神经网络实现高维特征的拓扑映射, 基于神经元权重空间计算类内平方误差, 通过肘部法则获得需求簇类别。建立初级储备库选址模型, 在子区域上以需求权重与运输距离乘积最小为目标进行优化; 在全局上构建高级储备库选址模型进行优化。【结果】结果显示: 需求点最优划分类别数为 34, 基于 34 个子区域的分区结果, 初级储备库实现了分区内需求的有效覆盖; 在此基础上, 通过全局优化确定 8 个高级储备库实现资源配置的协同优化。与传统方法相比, 优化模型建设成本降低约 16.1%, 加权平均响应时间缩短约 17.1%。【结论】结果表明: 所构建方法能够在刻画洪涝灾害需求点多维异质性的基础上, 实现分区驱动的两级储备库优化配置; 通过“SOM 分区—局部优化—全局协调”的方法框架, 可显著提升应急资源配置的空间适应性与系统效率。

关键词: 大范围洪涝灾害; 储备库选址; 聚类分析; 多目标优化; 需求异质性; 自组织映射; 应急物资储备; 影响因素

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.08.002

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TV122

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2026)08-0014-12



Study on hierarchical and coordinated optimization of site selection for large-scale flood disaster preparedness material reserves

LU Jiahui¹, ZHOU Jinjun², LIU Jiahong³, NING Zhanjin¹, LIN Jinliang¹, TANG Xinyue⁴, ZHAO Zitong⁵

- (1. Department of Emergency Rescue, China Fire and Rescue Institute, Beijing 102202, China; 2. College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 3. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 4. The Huaihe River Commission of the Ministry of Water Resources, Bengbu 233001, Anhui, China; 5. Hebei Fire and Rescue Mobile Brigade, Zhangjiakou 076200, Hebei, China)

收稿日期: 2026-03-17; 修回日期: 2026-05-06; 录用日期: 2026-05-08; 网络出版日期: 2026-06-26

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFC3006504); 北京市自然科学基金项目(8242003)

作者简介: 鲁佳慧(1994—), 女, 讲师, 博士, 主要从事城市洪涝模拟、应急救援研究。E-mail: alujiahui@163.com

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

Abstract: [Objective] To address the complex spatial distribution, significant heterogeneity of demand points, and insufficient efficiency of resource allocation in emergency material reserve location under flood disaster scenarios, an optimization approach integrating demand-based zoning and hierarchical facility allocation is developed. [Methods] Multi-dimensional feature vectors of demand points were constructed from three dimensions, including hazard, exposure, and accessibility. After normalization, a self-organizing map (SOM) neural network was employed to achieve topological mapping of high-dimensional features. The within-cluster sum of squared errors was calculated based on the neuron weight space, and the optimal number of demand clusters was determined using the elbow method. At the subregional level, a primary reserve location model was established, with the objective of minimizing the product of demand weight and transportation distance. At the global level, a higher-level reserve location model was constructed for optimization. [Results] The results showed that the optimal number of demand clusters was determined to be 34. Based on the classification result of the 34 subregions, primary reserves achieved effective coverage of intra-regional demand. On this basis, eight higher-level reserves were identified through global optimization to enable coordinated resource allocation. Compared with conventional method, construction cost was reduced by approximately 16.1%, and the weighted average response time was shortened by approximately 17.1%. [Conclusion] The results indicate that the proposed method can effectively characterize the multidimensional heterogeneity of demand points under flood disaster scenarios and achieve zoning-driven two-level optimization of reserve allocation. Through the framework of “SOM-based zoning-local optimization-global coordination,” the spatial adaptability and system efficiency of emergency resource allocation can be significantly improved.

Keywords: large-scale flood disaster; reserve site selection; cluster analysis; multi-objective optimization; demand heterogeneity; self-organizing map; emergency material reserve; influencing factors

0 引 言

洪涝灾害具有发生频率高、分布范围广、损失惨重等特点^[1]。极端天气事件的降雨模式、频率和严重程度都在增加,导致应急救援难度剧增。备灾储备库的位置非常重要,它决定了应急系统能否对紧急事件做出快速反应。当洪涝灾害事件发生后,受灾群众迫切需要专业的援助和救援物资的保障,科学合理部署物资资源能够在最短时间内将受灾点所需物资配送到位,可以避免洪涝灾害事件进一步给人民群众生命和财产造成大量损失。从近年来发生的洪涝灾害事件来看,备灾储备库的位置选择在紧急救援、群众安置乃至生产恢复和灾后重建等方面的重要性和实用性日益增强。

在选址目标方面,早期研究多以时间、成本或覆盖价值为核心目标(见表1)。CHEN等^[2]以设施与灾区之间距离最小化为目标,研究灾后阶段临时设施的选址问题。周磊等^[3]和王庆荣等^[4]分别从时间满意度、总成本和运输距离等角度,提出应急物资储备库选址及选址-路径协同优化模型。随着研究的深入,逐步引入多维优化目标以满足复杂救援需求。WANG等^[5-6]兼顾救援时效性和公平性,构建应急物资选址分配模型。部分研究进一步关注应急救援类型,增加相应选址目标如人文因素,OKSUZ等^[7]提出以降低临时医疗中心建设成本和预期伤亡人数为目标的两阶段选址模型;关文玲等^[8]将风险最小引入目标函数

建立多目标选址模型。总体来看,选址目标呈现出由单一经济目标向多目标综合权衡的发展趋势。

在选址求解方法方面,评估方法如层次分析法^[9-10]、TOPSIS法^[11-13]和灰色评价法^[14]等由于操作简单,常用于选址研究,但是该类方法存在主观性较大的特点。针对选址模型规模大、约束复杂和多目标特征显著的问题,研究方法不断演进。一方面,混合整数线性规划方法被用于求解中小规模选址问题^[15];另一方面,遗传算法^[16]、粒子群算法^[17]、蚁群算法^[18]、模拟退火算法^[3]等启发式算法和超启发式算法被广泛应用于大规模选址问题,提升了模型的求解效率。

在选址影响因素方面,研究内容由单一因素向多因素综合演进。人口分布、经济水平和交通条件是最常被考虑的基础因素。郝蒙浩等^[19]从人口、经济、交通等角度分析储备设施选址问题。LI等^[20]将道路网络密度、人口密度、经济密度以及灾后响应能力作为关键指标纳入考量,提出应急物资储备库选址方法。进一步地,地理区位、物流发展程度和应急政策等因素也逐渐被纳入选址决策框架^[21]。在系统鲁棒性方面,AHMADI等^[22]在考虑设施故障情景下构建三级选址模型,以提升应急系统可靠性。特殊环境如台风情景^[23-24]、拥挤情景^[25]、道路可靠性情景^[26-30]等也逐渐在物资储备库选址过程中被重视。

尽管现有研究在多目标构建、智能算法应用及复

杂情景建模方面取得了较大进展^[31-37], 但针对大范围洪涝灾害情景仍存在不足: 一是缺乏对洪涝灾害受灾区域异质性的刻画; 二是现有模型多聚焦单层储备结构, 缺乏分层协同备灾体系的系统设计。大范围洪涝灾害往往呈现跨区域联动、流域级扩散和梯度受灾等典型特征, 决定了备灾物资储备体系必须从“单点响应”向“层级协同”转变^[38-39]。

本文提出一种面向大范围洪涝灾害的分层协同选址框架。首先构建多维需求特征空间, 引入自组织映射神经网络(Self-Organizing Map, SOM)刻画需求点空间异质性, 实现需求区域聚类; 其次建立服务半径与时间约束下的初级储备库选址模型; 最后构建以覆盖效益最大化与综合成本最小化为目标的高级储备库选址模型, 并通过加权和法实现多目标向单目标的转化, 从而提高模型的可解性与实际适用性。通过“23·7”流域性洪水情景验证模型有效性, 为大范围洪涝备灾体系优化提供支撑。

1 备灾储备库选址模型构建

1.1 模型结构

采用“分区后选址”的求解策略(见图 1), 首先, 通过 SOM 对需求点进行空间聚类, 将原始大规模选址问题划分为若干相对独立的子区域, 从而在保持需求异质性特征的同时有效降低问题规模; 其次, 在子区域内进行初级储备库选址, 并在此基础上开展全局层面的高级储备库优化(见表 1)。

1.2 局部响应单元识别

1.2.1 需求点特征空间分析

将需求特征划分为危险度、暴露度与可达性三个维度(见表 2)。其中, 暴露度不仅反映人口与经济规模, 同时在一定程度上体现区域的脆弱性特征。选取降雨量、受灾人口、地区生产总值及区位位置作为输入变量, 经标准化处理后输入 SOM。

1.2.2 SOM

SOM 被引入用于刻画需求点在多维特征空间

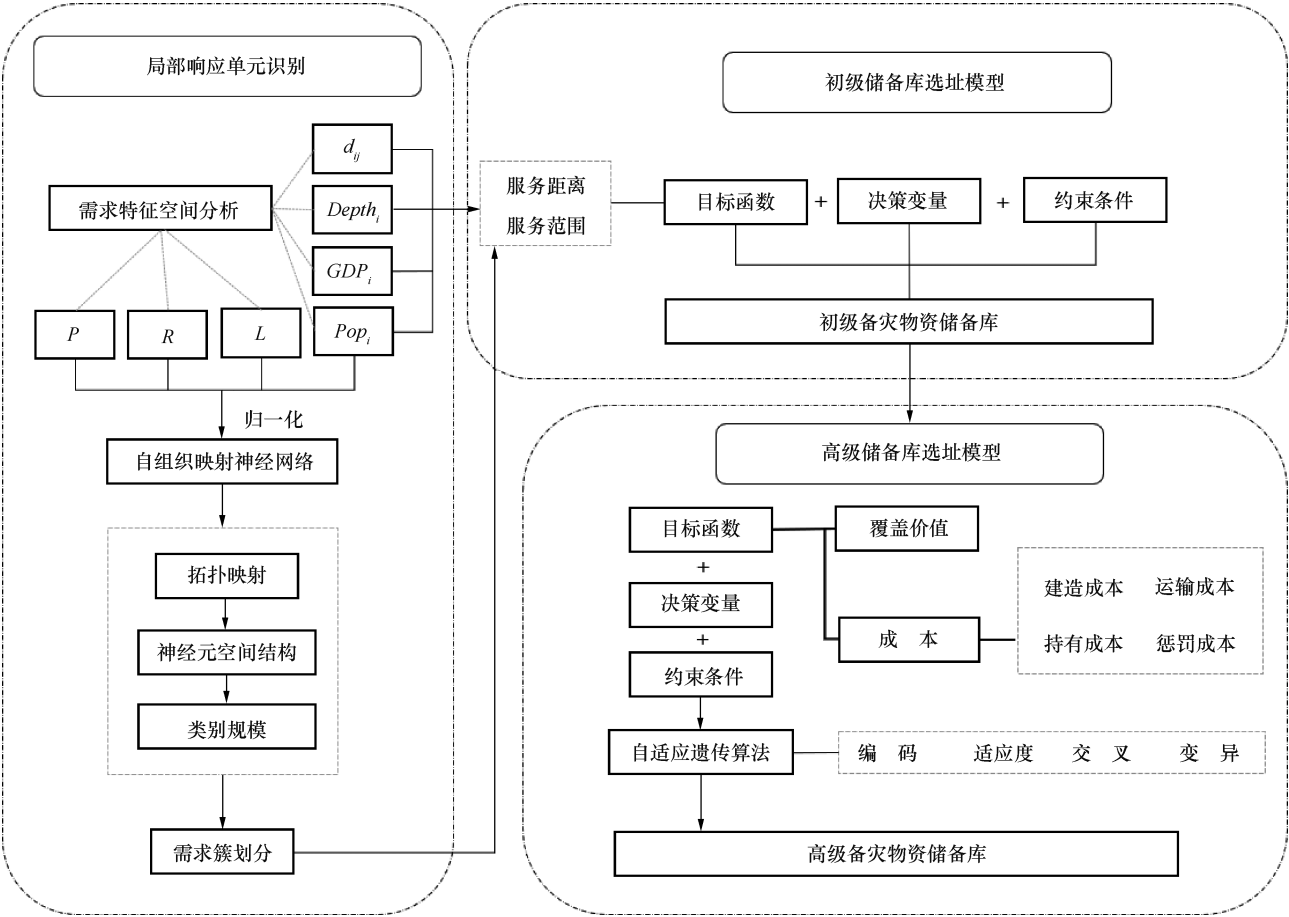


图 1 备灾储备库选址模型总体框架

Fig. 1 Overall framework of site selection model for disaster preparedness material reserves

表 1 物资储备库选址研究现状

Table 1 Current status of research on material reserve site selection

研究现状	分 类	参考文献
选址目标	时间和成本	WANG 等 ^[29] ; GENG 等 ^[31] ; CHEN 等 ^[2] ;
	覆盖价值和成本	周磊等 ^[3] ; 王庆荣等 ^[4]
	时间、成本、覆盖价值	刘晋等 ^[27]
	根据应急救援类型特点增加相应目标	WANG 等 ^[5] ; 张召冉等 ^[28] 预期伤亡人数: OKSUZ 等, ^[7] 风险最小: 关文玲等 ^[7] 损耗最小: 霍非舟等 ^[30]
求解方法	评估方法	层次分析法: 张昊等 ^[9] ; FENG 等 ^[10] TOPSIS 法: 舒智慧 ^[11] ; KONG 等 ^[12] ; PANG 等 ^[13] 灰色评价法: 李志等 ^[14]
	数学方法	混合整数线性规划: MARTA ^[15] 多目标决策方法: LUCAS ^[32]
	启发式算法	GA: SAEIDI 等 ^[16] ; 刘晋等 ^[27] NSGA-II: 霍非舟等 ^[30] NSGA-III: SAEIDI 等 ^[16] ACO: WEI 等 ^[18]
		PSO: BEIKI 等 ^[17] SA: 周磊等 ^[3]
		超启发式算法: WANG 等 ^[5] ; LÖFFLER 等 ^[6]
		K-means 和 NSGA-II: 张召冉等 ^[28] 量子算法和启发式算法: 杜一康等 ^[33]
影响因素	人口、经济、交通	郝蒙浩等 ^[19] LI 等 ^[20] 张忠义等 ^[34] ; LI 等 ^[35] 考虑故障: AHMADI 等 ^[22] 考虑失效: 姜瑶等 ^[36] ; 张敏等 ^[37] 考虑台风情景: 丛雯婧等 ^[23] ; JU 等 ^[24] 增建与公平情景: 陆相林等 ^[38]
	综合灾害场景	拥挤情景: 陆相林等 ^[25] 道路可靠性: 张玲等 ^[26]

表 2 指标与模型对应关系

Table 2 Correlation between indicators and models

类 别	指 标	符 号	含 义	用 途
危险度	降雨量	R	灾害强度	SOM 输入
	淹没深度	$Depth_i$	洪涝严重程度	需求权重计算
暴露度	人口密度	Pop_i	人口集聚性	需求权重计算
	受灾人口	P	受灾规模	SOM 输入
	GDP	GDP_i	经济损失潜力	SOM 输入/需求权重计算
可达性	区位位置	L	空间临近性	SOM 输入
	路网距离	d_{ij}	实际运输路径	选址模型

中的异质性特征。大范围洪涝灾害情景下,不同需求点在危险度、暴露度及可达性等方面存在显著差异。SOM 通过无监督竞争学习机制,将高维特征映射到低维拓扑空间,在保持样本相似性关系的同时实现数据结构的自组织表达,从而能够识别具有相似综合特征的需求点并形成空间同质子区域。SOM 计算过程如下。

(1)初始化和归一化神经元的权向量 $\hat{w}_j(j=1,2,\cdots,J)(J$ 为输出层神经元个数), 设定初始优胜邻域 $N_{j^*}(0)$ 和学习率参数 $\eta(0)$ 。

(2)输入归一化样本 $\hat{x}_p(p=1,2,\cdots,P)(P$ 为输入层神经元个数), 计算其与所有神经元权重间的距离[见式(1)], 选出与该输入距离最小的神经元 (j^*) , 其公式为

$$d_j = \sqrt{\sum_{p=1}^P (x_p - \hat{w}_{pj})^2}$$

(1)

式中, d_j 为输入样本与输出神经元权值间的距离; $\hat{w}_{pj}$ 为第 p 个输入样本的第 j 个输出神经元权值; x_p 为第 p 个输入样本。

(3) 定义优胜邻域 $N_{j*}(t)$ 。

(4) 调整优胜邻域内的节点权值, 其公式为

$$w_{ij}(t+1) = w_{ij}(t) + \eta(t, N)[x_{ip} - w_{ij}(t)] \quad (2)$$

式中, $w_{ij}(t)$ 为第 j 个神经元的权值; $\eta(t, N)$ 为 t 时刻学习率。

(5) 达到终止条件停止计算并输出结果。

1.3 初级储备库选址模型

1.3.1 需求权重

需求权重 w_i 计算公式为

$$w_i = \alpha \times Pop_i + \beta \times GDP_i + \gamma \times Depth_i \quad (3)$$

式中, α 、 β 和 γ 参考相关研究方法^[40], 利用熵权法分别赋值 0.5、0.3 和 0.2。

1.3.2 模型建立

通过 SOM 对需求点进行聚类分析, 计算储备库到各需求点的总运输距离, 并以最小化该距离为目标预选址。

(1) 目标函数。每一个需求点都有对应的储备库为其提供物资。目标函数为

$$\min \sum_I \sum_J w_i d_{ij} x_{ij} \quad (4)$$

式中, I 为需求点集合; J 为储备库集合; d_{ij} 是需求点到储备库的距离; w_i 为需求点权值; 储备库向需求点调运物资时, x_{ij} 为 1, 否则为 0。

(2) 决策变量为

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{由储备库 } j \text{ 向需求点 } i \text{ 运输物资} \\ 0, & \text{否则不成立} \end{cases} \quad (5)$$

(3) 约束条件。至少由一个储备库向需求点 i 运输物资。其公式为

$$\sum_{j=1}^J x_{ij} \geq 1, \quad i \in I, \quad j \in J \quad (6)$$

1.4 高级储备库选址模型

1.4.1 模型建立

(1) 目标函数。覆盖价值计算公式为

$$f_{\text{value}} = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J x_{ij} w_i / d_{ij} x_{ij} \alpha_{ij} \quad (7)$$

式中, α_{ij} 为储备库 j 送至需求点 i 的物资量。

总成本涵盖建造成本、库存持有成本、运输成本以及未满足需求而产生的惩罚成本, 其公式为

$$f_{\text{cost}} = f_1 + f_2 + f_3 + f_4 \quad (8)$$

式中, f_1 为建造成本; f_2 为库存持有成本; f_3 为运输成本; f_4 为惩罚成本, 当需求点未被覆盖时, 将产生相应惩罚成本, 其公式为

$$f_4 = \sum_{i=1}^I \theta \left(q_i - \sum_{j=1}^J \alpha_{ij} X_{ij} X_j \right) \quad (9)$$

式中, θ 为单位惩罚成本(参考应急物流选址研究中

对服务缺失成本的处理方法^[41], 将单位需求对应的潜在经济损失进行折算); q_i 为突发事件发生时需求点 i 的需求量。

同时考虑覆盖效益最大化与综合成本最小化, 构建多目标优化模型 ($\max f_{\text{value}}, \min f_{\text{cost}}$), 为便于求解, 采用加权和法对上述多目标模型进行转化 (λ_1 和 λ_2 根据参考文献^[42]^[43]确定)

$$\min F = \lambda_1 f_{\text{cost}} - \lambda_2 f_{\text{value}}$$

(2) 决策变量为

$$X_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{由备灾物资储备库 } j \text{ 向} \\ & \text{需求点 } i \text{ 运输物资} \\ 0, & \text{否则不成立} \end{cases} \quad (10)$$

$$X_j = \begin{cases} 1, & \text{在 } j \text{ 备选点设立储备库} \\ 0, & \text{否则不成立} \end{cases} \quad (11)$$

(3) 约束条件。库存持有量要小于库存容纳量, 其公式为

$$0 \leq Q_j \leq U_j X_j, \quad j \in J \quad (12)$$

式中, U_j 为 j 物资储备库的容纳量。

从 j 储备库运出的物资总量不超过其库存量

$$\sum_{i=0}^I \alpha_{ij} \leq Q_j, \quad i \in I, \quad j \in J \quad (13)$$

只有已建立的储备库才能向需求点调配物资

$$X_{ij} - X_j \leq 0, \quad i \in I, \quad j \in J \quad (14)$$

每个需求点至少有一个储备库向其调运物资

$$\sum_{j=0}^J X_{ij} \geq 1, \quad i \in I, \quad j \in J \quad (15)$$

各储备库向需求点的调运量不超过该需求点的需求量

$$\sum_{j=0}^J \alpha_{ij} \leq q_i, \quad i \in I, \quad j \in J \quad (16)$$

1.4.2 自适应遗传算法

遗传算法通过对选择、交叉和变异等一系列操作的迭代应用, 逐步进化产生所需要的目标个体。为避免在面临大规模计算量时容易陷入局部最优, 对遗传算法进行了改进, 可以自适应调整交叉概率和变异概率, 提高算法的效率和有效性。

(1) 采用整数编码的方式, 每条染色体代表的就是一个方案, 本研究设置的初始群体数目为 100。

(2) 将加权后的目标函数 F 转换为适应度函数

$$f = \frac{1}{F(x)}。$$

(3) 为了选择合适的变异概率和交叉概率, 引入根据适应度自适应调整的遗传参数。当适应度值较大时, 调整交叉概率和变异概率使之减小, 以保留适应

度较优的个体;当适应度值较小时,调整交叉概率和变异概率使之增大,产生新群体。其公式为

$$P_c = \begin{cases} P_{cmax} - \frac{(P_{cmax} - P_{cmin})(f - f_{min})}{f_{max} - f_{min}}, & f \geq f_{avg} \\ P_{cmax}, & f < f_{avg} \end{cases} \quad (17)$$

$$P_m = \begin{cases} P_{mmax} - \frac{(P_{mmax} - P_{mmin})(f - f_{min})}{f_{max} - f_{min}}, & f \geq f_{avg} \\ P_{mmax}, & f < f_{avg} \end{cases} \quad (18)$$

式中, P_c 为交叉概率; P_{cmax} 为最大交叉率; P_{cmin} 为最小交叉率; f_{max} 为最大适应度; f_{min} 为最小适应度; f_{avg} 为平均适应度; P_m 为变异概率; P_{mmax} 为最大变异率; P_{mmin} 为最小变异率。

(4)算法的终止条件是达到预设的迭代次数。

2 实例应用

2.1 研究区概况

京津冀地区同处海河流域,水网紧密相连,是我国人口密集且经济发达的区域。京津冀地区 92% 的面积在海河流域,海河流域范围的 67% 在京津冀地区。京津冀地区位于太行山与燕山山脉的山前地带,山区与平原间缺乏广阔的缓冲地带,河流呈扇状水系,洪水汇流速度快,易在短时间内引发洪水灾害。2023 年海河“23·7”流域性特大洪水是 1963 年以来的最强降雨事件,京津冀地区受灾人口总计超 500 万,农作物受灾面积超 46.7 万 hm^2 ,直接经济损失逾千亿元。

2.2 数据来源与需求点构建

2.2.1 数据来源

使用的数据类型及来源如表 3 所列。

2.2.2 需求点构建

基于 GEE 云平台,利用 Landsat8 影像数据,运

表 3 数据类型及来源

Table 3 Data types and sources

数据类型	数据来源
DEM 数据	地理空间数据云 https://www.gscloud.cn/home
人口数据	统计年鉴 2023
经济数据	统计年鉴 2023
降雨数据	国家地球系统科学数据中心 http://www.geodata.cn
道路数据	OpenStreetMap https://www.openstreetmap.org/
遥感影像	GEE 云平台 https://earthengine.google.com/

用 NDWI 方法提取洪涝淹没区域;获取研究区 DEM 数据构建地形高程模型;假设淹没区域水面为连续水面,通过空间插值方法确定水面高程,并与 DEM 高程进行差值计算,得到淹没深度分布。在 ArcGIS 平台中采用规则网格划分方法(Fishnet),构建 1 km×1 km 空间网格,将连续淹没区域离散化为规则分析单元(见图 2)。将人口密度数据与 GDP 空间分布数据栅格化后,使用式(3)对淹没深度数据进行空间叠加分析。计算出权重后,采用分位数法^[44]对权重进行筛选,剔除权重较低的网格单元。依据该方法得到研究区需求点如图 3 所示。

2.3 选址结果

对原始数据进行 Z-score 标准化处理,以消除不同指标量纲的影响。构建 SOM 对样本进行特征映射,输入层维数设为 4,竞争层采用二维矩形拓扑结构。依据经验公式^[45]对网络规模进行初步设定,并在不同规模下通过多次训练计算量化误差与拓扑误差,最终确定网络规模为 15×15。模型训练中初始学习率设为 0.01,最大迭代次数为 1 000,并通过多次重复训练验证结果的稳定性。在获得 SOM 映射结果后,提取竞争层神经元的权重向量作为样本的结构化表示,并据此构建神经元相似性空间。在该空间中,通过计算不同类别划分规模下的类内平方误差(Sum of Squared Errors, SSE)(计算方法参考文献[28]),分

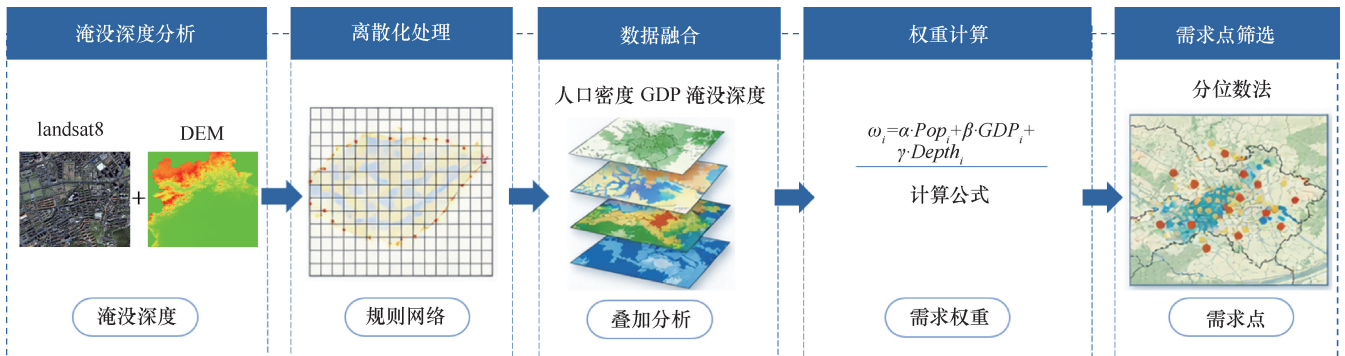


图 2 需求点生成的操作步骤

Fig. 2 Operational steps for demand point generation

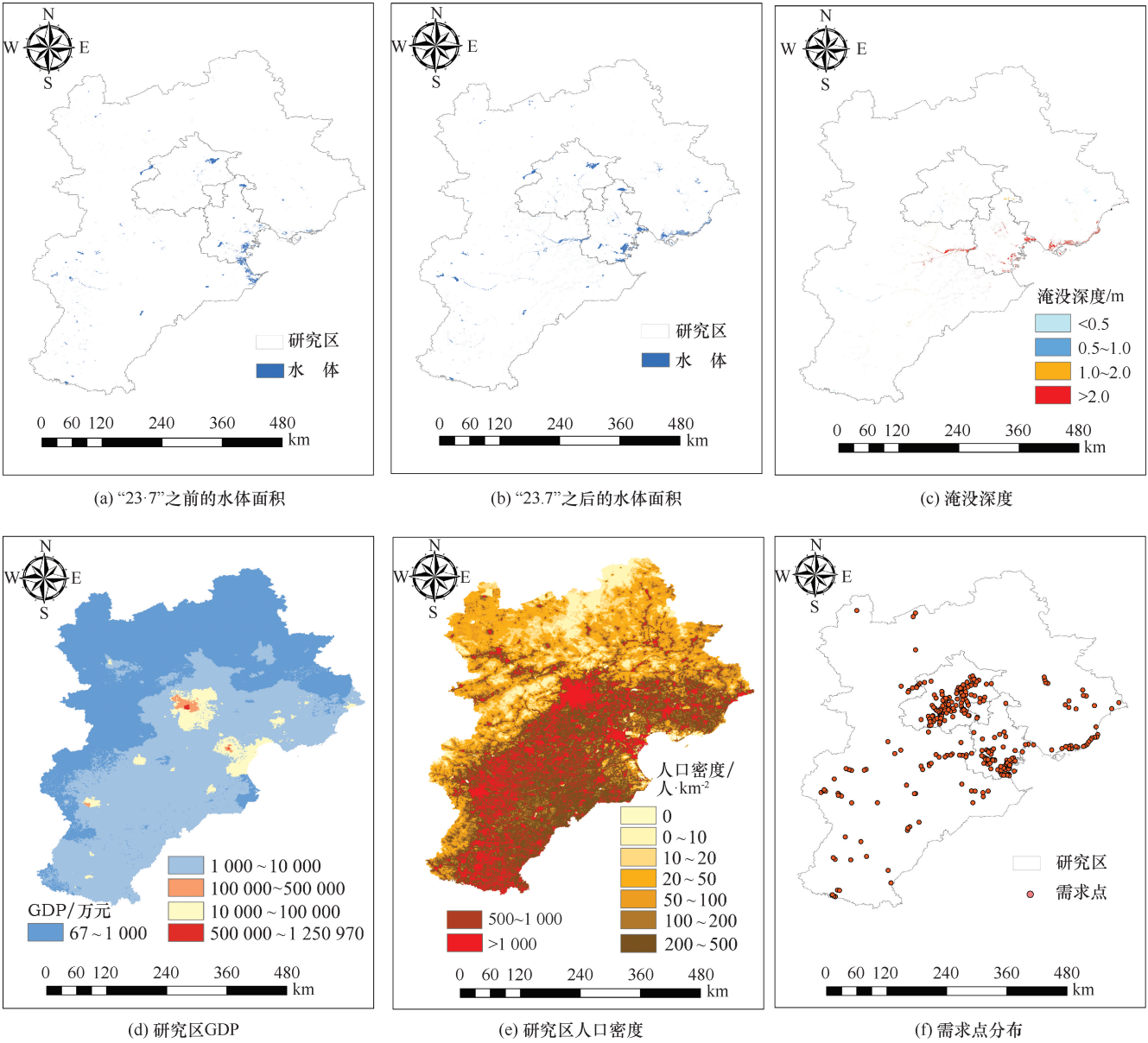


图3 需求点构建

Fig.3 Construction of demand points

析误差随类别数变化的趋势, 结合肘部法则确定最佳聚类数为 34。因此, 将研究区需求点划分为 34 个子区域(见图 4)。应用初级储备库选址模型, 在每个子区域内部求解需求权重与距离乘积的最小值, 从而确定初级储备库位置, 具体分布如图 5 所示。

自适应遗传算法参数设置如下: 种群规模为 100, 迭代次数为 200, 突变概率 0.02, 交叉概率 0.04。遗传算法迭代过程中的适应度收敛曲线如图 6 所示。迭代 100 次左右后收敛, 最优适应度为 135.36。经计算, 7 号、14 号、16 号、21 号、23 号、29 号、33 号和 34 号共计 8 个储备库成为高级储备库, 具体位置如图 5 所示。

2.4 分析与讨论

2.4.1 子区域类型划分

为进一步刻画 34 个子区域在危险度、暴露度与可达性三维空间中的分布特征, 对三类指标进行综合分析, 并采用分位数法对子区域进行等级划分。其中, 将危险度和暴露度指标位于前 25% 的子区域分别定义为高危险区和高暴露区, 将平均路网距离位于前 25% 的子区域定义为低可达区。在此基础上, 将子区域划分为四种典型类型(见表 4): 类型 I 为高危险-高暴露-低可达区域, 即救援孤岛; 类型 II 为高危险-低可达区域, 属于偏远高风险区; 类型 III 为高危险-高可达区域, 即城镇集中需求区; 其余区域归

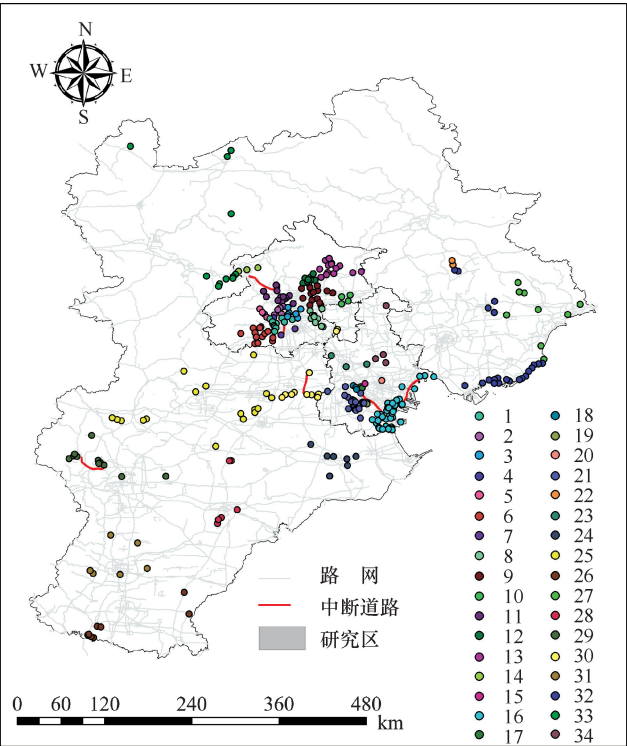


图 4 需求点聚类结果

Fig. 4 Clustering results of demand points

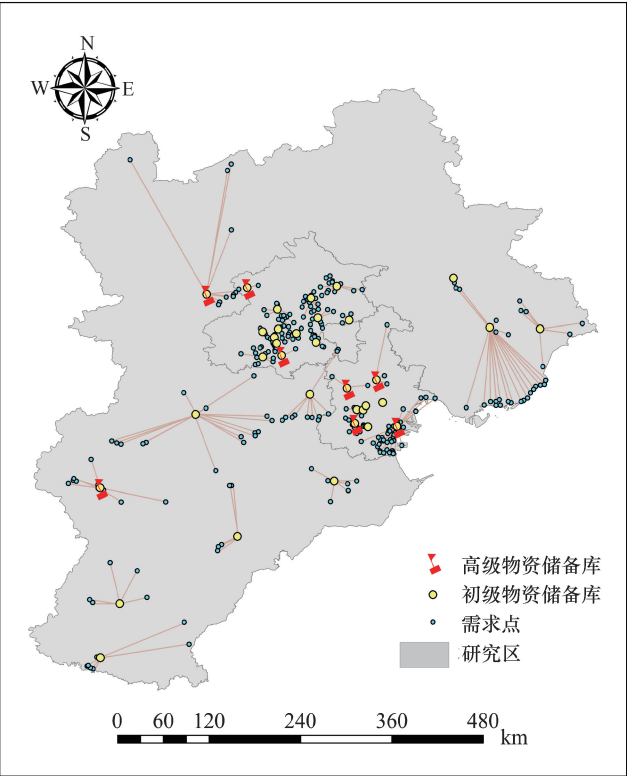


图 5 储备库选址情况

Fig. 5 Locations for site selection

为类型Ⅳ常态保障区。

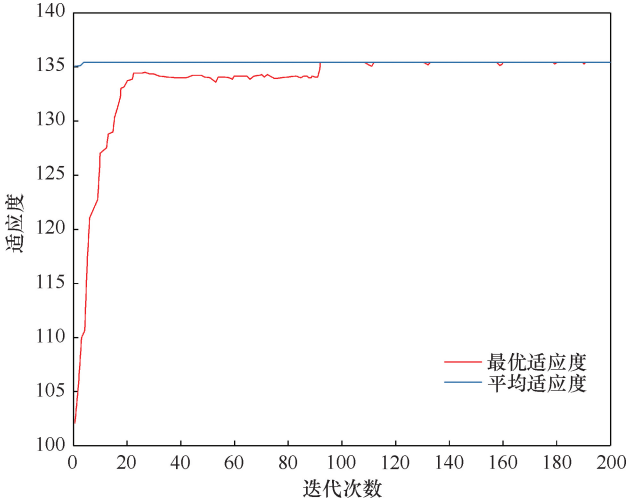


图 6 迭代结果

Fig. 6 Iteration results

统计结果表明，研究区内共识别出 2 个救援孤岛（子区域 10 和 30），该类区域淹没深度大，人口密集且离主干道较远。该类区域在需求权重计算中具有显著优势，使其在目标函数中占据更高权重；另一方面，由于其空间孤立性，在距离约束作用下更易在子区域内部形成局部最优选址解。因此，模型能够自发实现对该类区域的优先覆盖。

2.4.2 分层储备库空间布局特征分析

从空间分布来看，8 个高级储备库呈现出明显的区域均衡特征，高级储备库多位于区域中心城市或交通枢纽节点附近，这些区域具有较高的资源集聚能力和交通可达性，有利于实现跨区域快速调配。初级储备库负责局部快速响应。这与 PINHEIRO 等^[46]关于不同级别和规模仓储设施空间分布特征的研究结果相符，大型仓库往往因战略优势而聚集在主要交通干道附近，而小型仓库则在区域范围内分布更为均匀。这种布局方式既保证了高需求区域的快速响应，又避免了资源过度集中。

从分层结构机制角度分析，初级储备库与高级储备库之间在空间上形成了一定程度的服务半径重叠。初级储备库主要覆盖各子区域内部需求点，而高级储备库在全局优化过程中，其服务范围往往跨越多个子区域，从而与多个初级储备库形成交叠关系。一方面，高级储备库选址倾向于交通枢纽与区域中心位置，使其具备跨区域服务能力；另一方面，初级储备库强调局部最优响应，形成“局部-全局”叠加的多层覆盖格局。从分层结构运行角度看，在常态情景下，初级储备库承担主要配送任务；而在灾害情景下，当局部储备库受损或需求激增时，高级储备库

表 4 子区域分类表
Table 4 Subregion classification

类 型	判别条件	含 义	子区域数量	备 注
I	高危险+高暴露+低可达	救援孤岛/重点保障区	2	优先布设初级储备库
II	高危险+低可达	偏远高风险区	5	高级储备库覆盖
III	高危险+高可达	城镇集中需求区	8	常规覆盖
IV	其 他	常态保障区	19	减少重复建设

可通过其跨区域服务能力对重叠区域进行支援，提高系统整体抗冲击能力。

2.4.3 模型性能与敏感性分析

为验证本文方法的有效性，将其与传统单层选址模型及未考虑需求异质性的模型进行对比。在参数设定方面，储备库建设成本基于各地统计年鉴中的建筑安装工程单位造价数据及《救灾物资储备库建设标准》(建标 121—2009)进行估算；应急响应时间基于运输距离与运输速度计算，其中需求点与储备库之间的距离采用道路网络最短路径距离，根据文献，运输平均速度取 50 km/h^[47]。结果表明，在相同需求条件下，优化方案较对比方案建设成本降低约 16.1%，加权平均响应时间缩短约 17.1%(见表 5)。其中，加权平均响应时间由 156 h 降低至 129 h，表明分级储备体系能够显著提升应急保障效率。改进效果源于一方面通过需求分区使各子区域内的选址结果不再受远距离需求点的制约，从而避免了传统单层模型全局折中解导致的平均服务距离偏大问题，并显著降低了极端长距离服务对响应时间的影响；另一方面，通过构建初级与高级储备库的分级体系，初级储备库满足局部覆盖要求，高级储备库则全局优化空间布局，降低了为满足最不利需求条件而产生的设施过度配置。

考虑到洪涝灾害情景下道路淹没与中断具有显著不确定性，进一步对模型在路网受损条件下的表现进行分析。在现有路网基础上选取若干交通关键性强的

运输路径(见图 4)，构建“道路中断”情景，重新计算响应时间。分析结果表明，在关键路径中断情景下，加权平均响应时间较基准情景有所增加，增幅约为 8%~15%，但整体仍保持较好的服务能力，未出现大规模需求无法覆盖的情况。这表明分层选址结构在一定程度上具备应对交通网络局部失效的能力。

此外，开展需求权重扰动测试，对需求点权重进行±20%的扰动，模拟受灾人口规模波动等不确定因素，并在此基础上重新进行选址计算与性能评估。结果表明，在需求波动范围内，储备库选址整体结构保持稳定，仅个别初级储备库位置发生微小调整；加权平均响应时间变化幅度控制在 5%以内，系统整体性能未出现显著波动。这说明分层选址方法对需求不确定性具有较好的适应能力，其稳定性来源于两方面：一是 SOM 分区降低了需求空间异质性的影响，使局部结构更加稳定；二是分层体系通过多级覆盖分散了需求波动带来的冲击。

为进一步验证模型对权重参数设定的敏感性与稳定性，选取目标函数权重参数 λ₁ 进行敏感性分析，计算对应的建设成本与加权平均响应时间，结果如图 7 所示。随着 λ₁ 的增大，两项指标变化均未出现剧烈波动，其中建设成本变化约为 31.5 亿~34.5 亿元，变化幅度不超过 7%；加权平均响应时间变化约为 125~134 h，变化幅度不超过 4%，说明模型具有较好的稳定性。

表 5 传统选址模型与分层优化选址模型对比
Table 5 Comparison of traditional site selection models and hierarchical optimization site selection models

类 别	传统选址模型	分层优化选址模型
选址目标	服务范围、时间约束、成本约束	服务范围、时间约束、成本约束
求解方法	AGA	SOM-AGA
迭代次数	148	100
储备库个数	储备库 40 个	初级储备库 26 个 高级储备库 8 个
建设成本/亿元	37.5	32.3
加权平均响应时间 $T = \sum \left(\frac{wd_{ij}}{v} \right) / h$	151	129

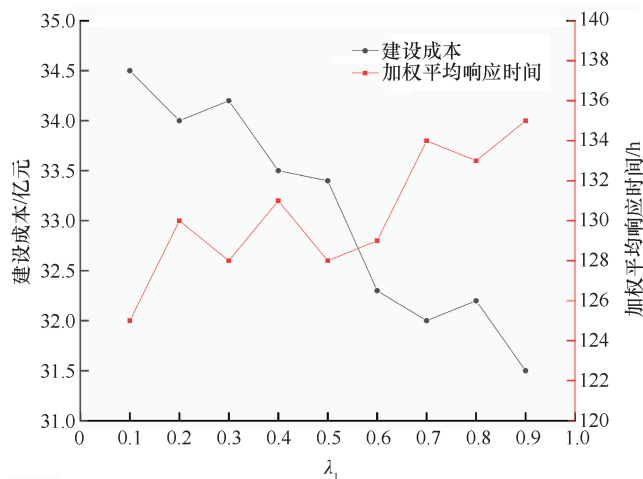


图7 目标函数权重敏感性分析结果

Fig. 7 Sensitivity analysis of objective-function weights

尽管本文方法在案例中取得了较好的效果,但仍存在一定局限性。首先,需求点特征选取仍相对有限,未来可进一步引入医疗资源、人口结构等指标,对区域脆弱性进行更精细刻画;其次,需求权重主要基于人口、经济和淹没深度等静态指标构建,尚未充分考虑交通拥堵等动态因素。未来研究可进一步引入动态交通数据与敏感性分析方法,以提升模型的适用性与鲁棒性。

3 结论

针对大范围洪涝灾害情景下备灾储备库选址优化问题,本文构建了基于需求聚类与分层协同的备灾储备库选址优化模型,并以京津冀地区为研究对象进行应用,通过模型构建与实例分析,得到以下结论。

(1)从危险度、暴露度与可达性3个维度选取需求点特征指标,利用SOM对洪涝灾害需求点进行了聚类分析,实现了灾情特征与空间临近性的综合识别,在降低问题规模的同时提高了选址的针对性和合理性。

(2)提出了面向大范围洪涝灾害的分层选址方法,构建了服务范围与时间约束相结合的初级储备库选址模型,并在高级储备库选址阶段通过加权和法将覆盖价值与综合成本进行统一度量,实现备灾储备层级覆盖以应对大范围洪涝灾害。

(3)将构建的模型应用于实例研究,在海河“23·7”流域性大洪水情景下对京津冀地区进行备灾储备库选址优化。结果表明,在保证需求覆盖的前提下,分层选址优化模型较传统模型可减少16.1%

和17.1%的建设成本和加权平均响应时间,在经济性与时效性方面具有明显优势。

参考文献 (References):

- [1] 徐宗学,唐清竹,陈浩,等. 基于精细化空间格局的城市承灾体脆弱性评估[J]. 水科学进展, 2024, 35(1): 38-47.
XU Zongxue, TANG Qingzhu, CHEN Hao, et al. Assessment on the vulnerability of urban hazard bearing body based on refined spatial patterns[J]. Advances in Water Science, 2024, 35(1): 38-47.
- [2] CHEN A Y, YU T Y. Network based temporary facility location for the Emergency Medical Services considering the disaster induced demand and the transportation infrastructure in disaster response[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2016, 91: 408-423.
- [3] 周磊,李前鹏,李法朝. 考虑时间满意度的应急物资储备库选址模型与算法[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(3): 188-194.
ZHOU Lei, LI Qianpeng, LI Fachao. Location model and algorithm of emergency material storage considering time satisfaction[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(3): 188-194.
- [4] 王庆荣,王雪娜,朱昌锋,等. 需求不确定下的两阶段应急物流选址-路径研究[J]. 灾害学, 2025, 40(1): 160-166.
WANG Qingrong, WANG Xuena, ZHU Changfeng, et al. Research on two-stage emergency logistics location-routing problem with uncertain demand[J]. Journal of Catastrophology, 2025, 40(1): 160-166.
- [5] 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.
- [6] LÖFFLER S, HOFSTEDT P. A constraint-based greedy-local-global search for the warehouse location problem[C]// MAGLOGIANNIS I. IFIP Advances in Information and Communication Technology. Corfu, GREECE; 20th International Conference on Artificial Intelligence Applications and Innovations (AIAI), 2024: 291-304.
- [7] OKSUZ M K, SATOGLU S I. A two-stage stochastic model for location planning of temporary medical centers for disaster response[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2020, 44: 101426.
- [8] 关文玲,田维嘉,董呈杰,等. 基于风险的化工园区应急物资储备库多目标选址模型[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(10): 213-219.
GUAN Wenling, TIAN Weijia, DONG Chengjie, et al. Multi objective site selection model for emergency material storage in chemical industry park based on risk[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(10): 213-219.
- [9] 张昊,陈啟南,林季彬,等. 应急医疗物资储备库选址评价:以广州市天河区为例[J]. 经济研究导刊, 2023(16): 38-41.
ZHANG Hao, CHEN Qinan, LIN Jibin, et al. Evaluation of emergency medical supply reserve site selection: A case study of Tianhe district, Guangzhou[J]. Economic research guide, 2023

- (16): 38-41.
- [10] FENG Z X, LI G T, WANG W J, et al. Emergency logistics centers site selection by multi-criteria decision-making and GIS [J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2023, 96: 103921.
 - [11] 舒智慧. 基于熵权-TOPSIS 法的应急物资储备库选址评价研究 [J]. 物流科技, 2024, 47(8): 160-164.
SHU Zhihui. Research on site selection of emergency material storage based on entropy weight-TOPSIS method [J]. Logistics Sci-Tech, 2024, 47(8): 160-164.
 - [12] KONG D, YANG W. Research on site selection of emergency material reserve based on set pair analysis and TOPSIS integration method: A case study of Hebei Province, China [J]. The Journal of Supercomputing, 2024, 81(1): 351.
 - [13] PANG X N, YANG W G, MIAO W J, et al. Study on site selection evaluation of emergency material storage based on improved TOPSIS [J]. Kybernetes, 2025, 54(9): 5181-5206.
 - [14] 李志, 江舟, 周愉峰. 基于灰色聚类评估的配送中心选址模糊多目标优化模型[J]. 工业工程, 2016, 19(5): 24-32.
LI Zhi, JIANG Zhou, ZHOU Yufeng. A fuzzy multi-objective optimization model for distribution center location based on grey clustering evaluation [J]. Industrial Engineering Journal, 2016, 19(5): 24-32.
 - [15] BALDOMERO-NARANJO M, MARTÍNEZ-MERINO L I, RODRÍGUEZ-CHÍA A M. Multi-product maximal covering second-level facility location problem [J]. Computers & Industrial Engineering, 2024, 189: 109961.
 - [16] SAEIDI M Z, TAVAKKOLI M R, NAVABAKHSH M, et al. A bi-level meta-heuristic approach for a hazardous waste management problem[J]. International Journal of Engineering, 2020, 33(7): 1304-1310.
 - [17] BEIKI H, SEYEDHOSSEINI S, GHEZAVATI V, et al. Multi-objective optimization of multi-vehicle relief logistics considering satisfaction levels under uncertainty [J]. International Journal of Engineering, 2020, 33(5): 814-824.
 - [18] WEI X W, QIU H X, WANG D J, et al. An integrated location-routing problem with post-disaster relief distribution[J]. Computers & Industrial Engineering, 2020, 147: 106632.
 - [19] 郝蒙浩, 张静, 赵秋红, 等. 基于 P-center 问题的国家级应急物资储备设施选址优化布局研究[J]. 自然灾害学报, 2019, 28(3): 123-129.
XI Menghao, ZHANG Jing, ZHAO Qiuhong, et al. The research of location problem of national emergency reserve facilities for emergency relief based on P-center problem [J]. Journal of Natural Disasters, 2019, 28(3): 123-129.
 - [20] LI L Y, BAI X, XIA H S. Study on the optimization of site selection for emergency supply reserve warehouses based on multi-attribute weighted intelligent gray target decision-making evaluation model[J]. Applied Sciences, 2024, 14(19): 8734.
 - [21] 朱莉, 丁家兰, 计梦婷. 考虑区域异质性的应急物资选址-分配优化[J]. 系统管理学报, 2018, 27(6): 1142-1149.
ZHU Li, DING Jialan, JI Mengting. Location-allocation optimization of emergency relief materials considering regional heterogeneity [J]. Journal of Systems & Management, 2018, 27(6): 1142-1149.
 - [22] AHMADI M, SEIFI A, TOOTOONI B. A humanitarian logistics model for disaster relief operation considering network failure and standard relief time: A case study on San Francisco district [J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2015, 75: 145-163.
 - [23] 丛雯婧, 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 Wenjing, YU Wuyang. Model and algorithm for location of regional emergency material reserve site in typhoon scenarios [J]. Industrial Engineering and Management, 2020, 25(5): 68-74.
 - [24] JU X, FAN Y X, NIU Y, et al. Method for selecting emergency material reserve bases in chemical industry parks under typhoon scenarios [J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2024, 111: 104703.
 - [25] 陆相林, 赵佳娜, 陈景昭. 拥挤约束型城市应急物资储备库网络功能优化模型: 以河北省石家庄市为例 [J]. 灾害学, 2024, 39(1): 75-79.
LU Xianglin, ZHAO Jiana, CHEN Jingzhao. Functional optimization model of urban emergency material reserve network considering the congestion scenario: A case study of Shijiazhuang city in Hebei province [J]. Journal of Catastrophology, 2024, 39(1): 75-79.
 - [26] 张玲, 李继昭. 基于道路可靠性的应急救灾选址-路径随机优化问题研究 [J]. 系统科学与数学, 2023, 43(10): 2480-2502.
ZHANG Ling, LI Jizhao. Research on location-routing stochastic optimization problem of emergency disaster relief based on road reliability [J]. Journal of Systems Science and Mathematical Sciences, 2023, 43(10): 2480-2502.
 - [27] 刘晋, 邹瑞, 韩琦, 等. 基于自适应遗传算法的应急物资储备库选址及物资调配优化研究 [J]. 安全与环境学报, 2021, 21(1): 295-302.
LIU Jin, ZOU Rui, HAN Qi, et al. Approach to optimizing the location & allocation of the emergency material reserve based on the adaptive genetic algorithm [J]. Journal of Safety and Environment, 2021, 21(1): 295-302.
 - [28] 张召冉, 张楠, 杨明. 基于两阶段模型的应急物资储备库选址优化 [J]. 安全与环境学报, 2025, 25(8): 3189-3197.
ZHANG Zhaoran, ZHANG Nan, YANG Ming. Optimizing the site selection of emergency material reserve warehouses using a two-stage model [J]. Journal of Safety and Environment, 2025, 25(8): 3189-3197.
 - [29] 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.
 - [30] 霍非舟, 姜淑轶, 胡宸希, 等. 考虑运输损耗的应急物资储备库选址 [J]. 安全与环境学报, 2024, 24(9): 3588-3595.
HUO Feizhou, JIANG Shuyi, HU Chenxi, et al. Selection of a site for an emergency material storage depot considering potential transportation losses [J]. Journal of Safety and Environment, 2024, 24(9): 3588-3595.
 - [31] GENG J X, HOU H P, GENG S Q. Optimization of warehouse

- location and supplies allocation for emergency rescue under joint government-enterprise cooperation considering disaster victims' distress perception[J]. *Sustainability*, 2021, 13(19): 10560.
- [32] CONDEIXA L D, LEIRAS A, OLIVEIRA F, et al. Disaster relief supply pre-positioning optimization: A risk analysis via shortage mitigation[J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2017, 25: 238-247.
- [33] 杜一康, 杨文光, 李强丽. 面向应急物资储备库选址优化的多目标量子遗传算法[J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2026, 56: 260313.
- DU Yikang, YANG Wenguang, LI Qiangli. Multi-objective quantum genetic algorithm for site selection optimization of emergency material reserves[J]. *Scientia. Sinica. Physica. Mechanica. Astronomica*, 2026, 56: 260313.
- [34] 张忠义, 宋英华, 王喆, 等. 多层次防汛应急物资储备库公私协同 LAP 模型[J]. *中国安全科学学报*, 2020, 30(5): 177-183.
- ZHANG Zhongyi, SONG Yinghua, WANG Zhe, et al. Public-private collaborative LAP model of multi-tiered flood emergency supplies repositories[J]. *China Safety Science Journal*, 2020, 30(5): 177-183.
- [35] LI H, LIU F, ZHOU Q, et al. Optimization of emergency stockpiles site selection for major disasters in the Qinghai plateau, China[J]. *Sustainability*, 2025, 17(4): 1572.
- [36] 姜瑶, 赵旭, 刘浩, 等. 失效情景下基于 Stackelberg 博弈的溢油应急物资储备库选址优化模型[J]. *上海海事大学学报*, 2023, 44(3): 26-31.
- JIANG Yao, ZHAO Xu, LIU Hao, QIN Yuqian. Stackelberg game based optimization model of oil spill emergency material reserve location in failure scenarios [J]. *Journal of Shanghai Maritime University*, 2023, 44(3): 26-31.
- [37] 张敏, 黄钧. 考虑关键交通路段失效情景的中央储备库选址评估[J]. *运筹与管理*, 2018, 27(10): 11-16.
- ZHANG Min, HUANG Jun. Evaluation of national storehouse location with failure scenarios of key traffic road[J]. *Operations Research and Management Science*, 2018, 27(10): 11-16.
- [38] 陆相林, 马飒, 杨莉虹, 等. 增建与公平情景下城市应急物资储备库网络优化模型[J]. *灾害学*, 2023, 38(3): 168-172.
- LU Xianglin, MA Sa, YANG Lihong, et al. Network optimization model of urban emergency material reserve under the scenario of expansion and equity[J]. *Journal of Catastrophology*, 2023, 38(3): 168-172.
- [39] 田巍, 陈庆伟, 吴险峰, 等. 南水北调工程水质安全保障工作实践与对策建议[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2025, 23(1): 47-58.
- TIAN W, CHEN Q W, WU X F, et al. The practices and recommendations for water quality safety assurance in the South-to-North Water Transfers Project [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2025, 23(1): 47-58.
- [40] LIN Y, XIANG Y, YIN H, et al. Selection of emergency logistics facility locations considering major natural disasters in mountainous cities based on GIS-MCDM. *Scientific Reports*, 2026, 16(1): 11634.
- [41] TANG S Q, WANG J G, XU Y H, et al. Evaluation of emergency shelter service functions and optimisation suggestions: Case study in the Songyuan City Central Area[J]. *Sustainability*, 2023, 15(9): 7283.
- [42] GOH Y M, TAN S, LAI K C. Learning from the Bhopal disaster to improve process safety management in Singapore[J]. *Process Safety Environmental Protection*, 2015, 97: 102-108.
- [43] 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.
- [44] RIAZ R, MOHIUDDIN M. Application of GIS-based multi-criteria decision analysis of hydro-geomorphological factors for flash flood susceptibility mapping in Bangladesh[J]. *Water Cycle*, 2025, 6: 13-27.
- [45] KALKHA H, KHIAT A, BAHNASSE A. et al. Enhancing warehouse efficiency with time series clustering: a hybrid storage location assignment strategy[J]. *IEEE Access*, 2024, 12: 52110-52126.
- [46] PPINHEIRO C D P, GONZALEZ F J, BERTONCINI B V. Addressing spatial heterogeneity and MAUP in urban transport geography: A multi-scale analysis of accessibility and warehouse location[J]. *Journal of Transport Geography*, 2025, 123: 104078.
- [47] 霍非舟, 胡宸希, 雷鹏, 等. 面向风险水平的多层次覆盖消防站选址优化[J]. *灾害学*, 2025, 40(2): 178-184.
- HUO Feizhou, HU Chenxi, LEI Peng, et al. Risk level-oriented optimization of multi-level coverage fire station location[J]. *Journal of Catastrophology*, 2025, 40(2): 178-184.

(责任编辑 王海锋)