

中文引用格式: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.

英文引用格式: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.

基于风险的化工园区应急物资储备库 多目标选址模型^{*}

关文玲¹副教授, 田维嘉¹, 董呈杰¹讲师, 夏跃爽¹, 廖飞²高级工程师

(1 天津理工大学 环境科学与安全工程学院, 天津 300384; 2 天津津港汇安科技有限公司, 天津 300456)

中图分类号:X937

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.10.1348

资助项目:天津市应用基础研究重点项目(22JCZDJC00840)。

【摘要】 为提高化工园区内应急救援效率,减少事故损失,综合考虑化工园区风险与应急物资供应时效的整体风险,将应急救援成本划分为应急物资储备库建设成本、物资储存成本和运输成本,建立以整体风险最小、应急救援成本最低且储备库对需求点的覆盖率最优为目标的化工园区应急物资储备库选址模型,并以天津市某化工园区为例进行验证分析,用非支配排序遗传算法 II(NSGA-II 算法)求解模型,得到该园区建设不同数量应急物资储备库时储备库位置、成本、风险及覆盖率。结果表明:该模型在 200 代内即可稳定收敛;随着储备库数量增加,投入成本持续上升、覆盖率逐步提升,风险前期降幅显著后期趋于稳定。模型可以输出多种选址方案,有效解决了化工园区应急物资储备库选址中“风险-成本-覆盖率”难以平衡的问题,帮助决策者在复杂的应急物资储备库选址问题中据不同偏好作出更加科学和合理的决策。

【关键词】 风险; 化工园区; 应急物资储备库; 多目标; 选址模型; 非支配排序遗传算法 II(NSGA-II 算法)

Multi objective site selection model for emergency material storage in chemical industry park based on risk

GUAN Wenling¹, TIAN Weijia¹, DONG Chengjie¹, XIA Yueshuang¹, LIAO Fei²

(1 School of Environmental Science and Safety Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China; 2 Tianjin Jin'gang Huian Technology Co., Ltd., Tianjin 300456, China)

Abstract: In order to improve the efficiency of emergency rescue and reduce accident losses in chemical industrial parks, this study comprehensively considered the risk of chemical parks and the overall risk of emergency supplies, divides the cost of emergency rescue into the cost of construction of emergency supplies reserve, storage cost and transportation cost, and established a model for selecting the site of emergency material reserve in chemical parks. The model aims to minimize the overall risk, minimize the cost of emergency rescue and optimize the coverage of the reserve to the demand point. Taking a chemical industrial park in Tianjin as an example for validation analysis, the model was solved using the NSGA-II algorithm. When constructing different numbers of emergency material storage within the chemical

industrial park, the optimal solutions for the location, cost, risk, and coverage of these storage facilities were obtained. The research results show that the model converges stably within 200 generations. As the amount of emergency material storage increases, investment costs continue to rise, coverage gradually improves, risks are significantly reduced in the early stages, and stabilize in the later stages. The model can generate multiple site selection schemes, effectively addressing the challenge of balancing the “risk-cost-coverage ratio” in the site selection process for emergency material storage within chemical industrial parks. This helps decision-makers make more scientific and reasonable decisions in complex emergency material storage site selection issues based on different preferences.

Keywords: risk; chemical industry park; emergency material storage; multi objectives; location models; non-dominated sorting genetic algorithm II (NSGA-II)

0 引言

化工园区内企业众多,储存、使用的危险化学品种类复杂且数量繁多,生产过程中涉及到大量的易燃易爆、毒物腐蚀的危险物质以及危险工艺,极易发生大量人员伤亡和严重财产损失的化工事故。及时有效地将应急救援物资送往事故现场是控制事故发展以及挽救生命财产损失的重要因素之一,也是事故预防与控制的一个关键环节。因此,合理布局应急物资储备库,对保障化工园区的安全生产及减少事故损失具有重要意义。

目前,研究应急物资储备库选址主要以最小运输成本、最小应急响应时间、最小灾害损失等为目标。如霍非舟等^[1]运用化学基元反应的经典模型,计算了物资储运中变质反应速率与温度的关系,在多目标选址优化模型中着重考虑储备库间的压力均衡。XU Fang等^[2]利用随机规划和稳健的优化方法提出考虑成本、运输时间以及需求和道路状况的不确定性的双目标模型。LU Jianfeng等^[3]构建了危险品仓储应急物资调配调度双层规划模型,目标是总成本和风险最小化。周磊等^[4]构建了免疫模拟退火算法求解建立的双目标混合整数规划模型,目标是最大化时间满意度和最小化选址成本。YAN Xinxin等^[5]建立了一个以最大化救援满意度和最小化仓库数量为双目标优化模型,并设计了启发式多中心聚类位置算法进行求解。WANG Hexu等^[6]提出一种基于多模因方向的多目标进化算法,以同时优化覆盖功能和综合效率功能2个目标。国内外学者在研究应急物资选址问题时主要使用的算法可分成评估方法、数学算法、启发式算法3类^[7]。如FENG Zengxi等^[8]提出基于多准则决策和地理信息系统的求解应急物流中心选址问题的方法,确定了影响选址的9个标准并计算权重,利用叠加分析得

到选址适宜性图。姜肖依等^[9]基于P中值模型构建了储备仓库选址模型,结合重心法优化了精英保留遗传算法进行求解。LI Ping等^[10]采用优化后的水母搜索算法,考虑时间满足度,构建了应急物流配送中心选址模型。ZHANG Ruochen等^[11]基于安全存量策略,提出移动应急响应的多层次选址模型,设计了优化的免疫算法(Immune Algorithm, IA)算法来求解。刘晋等^[12]根据构建的考虑覆盖满意度和经济性的选址优化模型设计了一种自适应遗传算法。GENG Jiaxin等^[13]构建了政企联合应急物资位置分配模型,并采用模拟退火算法求解该模型。已有研究大多聚焦于评估选址结果对距离和成本的影响,较少考虑化工园区内保障目标的风险。

鉴于此,笔者拟在选址研究中加入风险因素,在控制成本的同时,使物资供应过程的整体风险达到较低的水平。为避免应急资源的浪费,在选择方案时考虑每个方案的响应覆盖率以及交叉响应覆盖率,建立综合整体风险最小、成本最低及储备库覆盖率最优的多目标选址模型,并使用非支配排序遗传算法II(Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II, NSGA-II)求解模型,以期为提高应急救援效率和质量提供新的思路。

1 应急物资储备库选址模型建立

1.1 模型目标与假设

模型目标主要考虑以下因素:①运输物资的时效。②园区保障目标的风险。③应急物资供应的总成本(包含建设成本、储存成本以及运输成本)。

根据模型目标,化工园区应急物资储备库选址问题为:将地理边界条件设置为化工园区范围内,园区内危化品企业作为应急物资供应的需求点,其中,选择 n 个地点作为应急物资储备库,在事故发生后为其他需求点提供应急物资。以最小化救援整体风

险和应急救援成本为目标,并考虑储备库的覆盖率,确定最符合决策者需求的应急物资储备库选址方案。对于构建的模型,作出以下假设:

- 1) 所有需求点和候选储备点坐标位置已知。
- 2) 每个储备点有足够的应急物资储备以供需求点使用。
- 3) 每个储备点的运输车辆均采用公路运输。
- 4) 每个储备点可向多个需求点提供物资。
- 5) 每个需求点只由一个储备库提供服务。

1.2 风险系数计算

以化工园区潜在事故的重伤半径作为该事故的影响边界,化工园区内潜在事故一般包括火灾、爆炸、毒气泄漏 3 个事故类型。

1) 火灾事故主要对人体造成热辐射伤。火灾事故的重伤影响范围选取人体出现二度烧伤的概率为 50% 时,所在位置与火球中心之间的水平距离,依据 Pietersen 提出预测热辐射影响的模型计算人体二度烧伤概率。

2) 爆炸事故主要以爆炸产生的冲击波对人体造成伤害。根据《危险化学品生产装置和储存设施外部安全防护距离确定方法》^[14] 提出的距爆炸点中心某距离处的冲击波超压值计算公式,计算出不同超压阈值对应的爆源距离。

3) 毒气泄漏事故后果一般通过人们在一定时间接触一定浓度时产生影响的概率来描述。利用概率函数方程计算给定伤害程度下,不同接触时间对应的泄漏毒物浓度。出于保守考虑,选取接触时间 30 min,人员死亡概率为 50% 的范围作为重伤影响范围。

考虑到化工园区人员密度在日间工作时段与晚间休息时间段的差异性,对于影响范围内的人口密度 N_i 分时间段进行统计:

$$N_i(t) = \begin{cases} N_h, & 8:00 \leq t \leq 18:00 \\ N_e, & \text{其他时间} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $N_i(t)$ 为需求点 i 中事故所涉及区域中不同时间 t 的人员密度,人/ km^2 ; N_h 为工作时间内的人员密度; N_e 为其他时间的人员密度。

当化工园区发生事故时,暴露人员的脆弱性也关系到风险严重程度,若影响范围内涉及到脆弱程度高的易感人群,会造成更严重的事故后果。因此,在需求点的风险计算中加入暴露人员的脆弱性系数。根据 GUAN Wenling 等^[15] 提出的人口脆弱性评估指标,得到影响范围内的暴露人员脆弱性系数。

计算每个需求点可能发生的事故所造成的综合风险,公式为:

$$R_i = \sum_a P^a S_i^a N_i(t) V_i \quad (2)$$

式中: R_i 为需求点中所有事故后果叠加的综合风险系数; a 为事故类型; P^a 为 a 类事故类型发生概率; S_i^a 为需求点中 a 类事故后果所产生的影响范围, km^2 ; V_i 为暴露人员脆弱性系数。

1.3 应急物资需求量计算

根据刘宗熹等^[16] 提出的确定应急物资储备量的方法,由企业潜在最严重事故的影响范围、人口密度和人均该物资需求量决定企业的某个应急物资需求量,表示如下:

$$D = S \times \rho \times d \quad (3)$$

式中: D 为企业某个应急物资需求量,kg; S 为事故影响范围, km^2 ; ρ 为相应企业人口密度,人/ km^2 ; d 为应急物资的人均需求量,kg。

1.4 应急物资储备库覆盖率计算

在发生紧急情况时,为保障每个需求点(企业)都能得到及时的物资援助,根据《危险化学品单位应急救援物资配备要求》^[17] 的规定,尽可能使各个储备库对每个需求点的物资供应时间在 5 min 以内,以此作为模型的时间与响应边界条件。因此,通过计算选址方案中各个储备库到达需求点之间的最短时间来衡量整体选址方案的覆盖率。化工园区应急物资储备库覆盖率根据以下 2 个方面进行分析:

1) 响应覆盖率。假设该选址方案中共有 n 个需求点,接受物资供应的最短时间在 5 min 的需求点数量为 l ,则该选址方案的响应覆盖率 M_l 表示如下:

$$M_l = \frac{l}{n} \times 100\% \quad (4)$$

选址方案的响应覆盖率越大,化工园区应急物资储备站布局的安全性越高。

2) 交叉响应覆盖率。假设该选址方案中,同时处于多个供应点的物资供应最短时间覆盖区域内的需求点数为 z ,则该选址该方案中的交叉响应覆盖率 M_z 表示如下:

$$M_z = \frac{z}{n} \times 100\% \quad (5)$$

物资供应最短时间内选址方案的交叉响应覆盖率越小,应急物资储备库的布局经济性越好,应急资源利用率越大;应急物资储备库的交叉响应覆盖率越大,说明物资储备库间的增援性能越好。

1.5 应急物资储备库选址模型

根据以上分析,建立考虑应急救援成本、整体风险及覆盖率的应急物资储备库选址模型。

应急物资越快送达,该需求点所承担的风险越小,文中用应急物资到达需求点的运输时间与风险严重度指数的乘积来表示选址方案的整体风险,如下式:

$$\min R = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m R_i T_{ij} x_{ij} \tag{6}$$

式中: $i=1,2,\cdots,n$; $j=1,2,\cdots,m$; T_{ij} 为需求点 i 与物质储备点 j 之间的运输时间, $\min x_{ij}$ 为决策变量。

系统成本包括每个储备点的建设成本、储存成本以及运输成本,使系统成本最小化,如下式:

$$\min C = \sum_{j=1}^m F_j y_j + \sum_{j=1}^m D_j C_s y_j + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_k C_{ok} d_{ijk} \tag{7}$$

式中: C 为选址方案的系统总成本,元; F_j 为应急物资储备点 j 建设成本,元; y_j 为决策变量; D_j 为物资储备点 j 的物资储备量,kg; C_s 为单位数量的应急物资储存成本,元; s 为储存成本,元; C_{ok} 为运输车辆在 k 类路段上单位距离内的运输成本,元; o 为运输成本,元; d_{ijk} 为路径中第 k 类路段的长度,km。

下式限定需求点分配边界,即每个需求点有且仅有一个物资储备库对其服务。

$$\sum_{j=1}^m x_{ij} = 1, \forall j \in J \tag{8}$$

式中 J 为 m 个物资储备点的集合, $J = \{j=1,2,\cdots,m\}$ 。

下式表示通过不同路段的长度和运输速度比值总和,得到应急物资储备库 j 与需求点 i 之间的运输时间。路段类型与长度通过具体路网数据获得。

$$T_{ij} = \sum_{k \in \text{路段类型}} \frac{d_{ijk}}{v_k}, \forall i \in I, \forall j \in J \tag{9}$$

式中: K 为 5 个道路类型的集合, $K = \{k=1,2,3,4,5\}$, k_1 为高速公路, k_2 为一级公路, k_3 为二级公路, k_4 为三级公路, k_5 为四级公路; V_k 为运输车辆在 k 类路段上的行驶速度,km/s; I 为 n 个需求点的集合, $I = \{i=1,2,\cdots,n\}$ 。

下式表示每个储备点物资储备量的边界条件,限制该储备点服务所有需求点的物资需求量的最大值。

$$D_j = \max D_i x_{ij}, \forall i \in I, \forall j \in J \tag{10}$$

下式表示最终选中的物资储备库的数量为 P 。

$$\sum_{j=1}^m y_j = P \tag{11}$$

下式为决策变量, $x_{ij}=1$ 时,表示第 i 个需求点由第 j 个储备库服务,否则为 0; $y_j=1$ 时,表示第 j 个储备库启用,否则为 0。

$$x_{ij} \in \{0,1\}, \forall i \in I, \forall j \in J \tag{12}$$

$$y_j \in \{0,1\}, \forall j \in J \tag{13}$$

模型求解阶段采用 NSGA-II 算法对构建的多目标选址模型进行求解。该算法是 DEB 等^[18]在非支配排序遗传算法 (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm, NSGA) 算法的基础上提出的,是目前影响最大和应用范围最广的一种多目标遗传算法。该算法利用非支配排序使多目标变化为适应度函数的形式从而解决多目标问题。

2 应急物资储备库选址模型应用

2.1 算例概况

以天津市某化工园区为例,验证应急物资储备库选址模型。该园区规划面积 15.04 km²,注册企业 80 多家,其中,涉及危险化学品的生产储存企业 26 家。根据该园区实际情况,划分其区域内的需求点,如图 1 所示。区域内每个企业的坐标以经纬度表示,见表 1。



图 1 园区内企业分布

Fig. 1 Distribution of enterprises within the park

表 1 园区内各企业坐标

Table 1 Coordinates of various enterprises within the park

企业代号	经度/(°)	纬度/(°)
1	117.411 269	38.844 977
2	117.385 932	38.844 968
⋮	⋮	⋮
25	117.264 427	38.814 869
26	117.240 790	38.804 807

为更准确地计算各个备选点间的运输时间,使用开源地图(OpenStreetMap, OSM)获取路网数据,通过地理信息应用平台(Arc Geographic Information System, ArcGIS)计算各个备选点到需求点的实际路网距离,见表 2。根据该园区所在区域的道路情况,不涉及高速公路等特殊路段,因此,运输车辆速度基本一致, v 为 30 km/h,得到园区内各企业间的最短运输时间,见表 3。

表 2 各企业间最短路径距离

Table 2 Shortest path distance between enterprises			
d_{ij}/km	1	...	26
1	1	...	19.3
$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$
26	19.3	...	1

表 3 各企业间的最短运输距离

Table 3 Shortest transportation distance between enterprises			
T_{ij}/min	1	...	26
1	0	...	38.6
$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$
26	38.6	...	0

通过危险源辨识与分析区域内 26 家危化品企业,计算其潜在风险点的事故后果,综合收集到企业数据信息,计算相关风险源,得到各事故的重伤半径作为影响范围。化工园区事故在工作时间造成的事故后果最严重,因此,人员密度通过计算重伤影响的面积范围内人员最多时的平均分布情况得到。根据式(6)计算得到所有企业的风险系数。根据应急管理部给出的全国基础版家庭应急物资储备建议清单,假设人均所需应急物资量为 4 kg,通过式(7)得到各风险点物资需求量。具体的计算结果见表 4。

表 4 企业风险系数及物资需求量计算结果

Table 4 Calculation results of enterprise risk coefficient and material demand			
企业序号	事故类型	综合风险	应急物资量/kg
1	池火灾	39.15	26
2	池火灾	339.28	1357.13
3	池火灾	455.32	112.93
4	池火灾	11.11	11.56
5	池火灾	12.27	12
6	池火灾	5.79	14.42
7	池火灾	15.80	20.55
8	蒸气爆炸	2.83	5.66
9	池火灾	10.63	10.4
	物理爆炸		
10	池火灾	6.29	7.72

续表 4

企业序号	事故类型	综合风险	应急物资量/kg
11	物理爆炸	27.69	28.81
12	池火灾	10.66	21
13	池火灾	4.93	3.94
14	池火灾	0.77	1.03
15	物理爆炸	9.19	11.48
16	燃烧爆炸	0.18	0.18
17	池火灾	1.34	4.64
18	池火灾	52.87	53.32
	物理爆炸		
19	池火灾	78.72	14.99
20	中毒扩散	105.79	423.16
21	中毒扩散	110.13	440.53
22	中毒扩散	0.99	3.94
23	池火灾	94.83	379.3
24	中毒扩散	413.71	1 654.85
25	中毒扩散	0.89	3.56
26	池火灾	12.99	8.28

为便于计算,每个储备库固定建设成本 F_j 设为 100 000 元。采用应急物资储备建议清单中所有物资的市场均价得到单位数量的物资储存成本 C_s 为 150 元/kg。运输成本 C_t 取运输车辆运输单位距离的油费估算为 0.75 元/km。

2.2 选址模型求解结果分析

应用 NSGA-Ⅱ 算法使用 Matlab 软件求解模型,设定种群规模为 100,迭代次数为 200,交叉概率为 0.5,变异概率为 0.3。针对选定物资储备站数量不同的情况分别运行,得到不同储备库数量限制下的最优方案,系统总成本和总风险 2 个目标函数均在 200 代前达到收敛。目标函数标准差的变化趋势如图 2 所示。

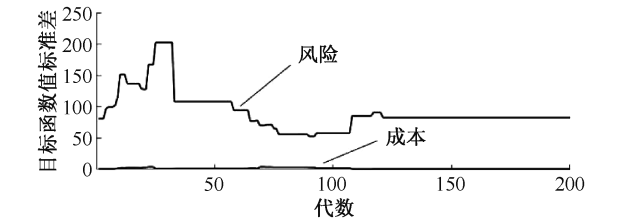


图 2 目标函数标准差的变化趋势
Fig. 2 Changing trend of the standard deviation of the objective function

应急物资储备库数量不同的情况下最优选址方案的成本、风险、覆盖率具体结果见表 5。应急物资储备库个数对应应急救援成本、整体风险以及覆盖率的影响如图 3、图 4 所示。随着储备库数量增加,选址方案的成本持续上升,选址方案的覆盖率逐渐增

加,当覆盖率达到一定程度后,需求点的风险已经降低到较低的水平,新增储备库对风险的降低作用变小,选址方案的系统风险变化趋于平稳。

表 5 选址方案

Table 5 Site selection plan

储备库数量	成本/元	风险	响应覆盖率/%	交叉响应覆盖率/%
1	6 554 039.05	26 211.99	30.77	0
2	6 653 966.17	10 077.31	42.31	0
3	6 753 961.04	6 308.71	61.54	0
4	6 853 946.3	7 598.2	73.08	19.23
5	6 953 941.06	5 763.94	88.46	11.54
6	7 053 934.91	4 067.92	92.31	19.23
7	7 153 930.83	3 294.59	96.15	26.92
8	7 253 927.07	2 341	100	7.69
9	7 353 924.52	2 028.66	100	15.38
10	7 453 923.21	1 872.38	100	23.08
11	7 553 922.3	1 776.17	100	19.23
12	7 653 921.52	1 762.73	100	53.85
13	7 753 920.85	1 595.75	100	76.92

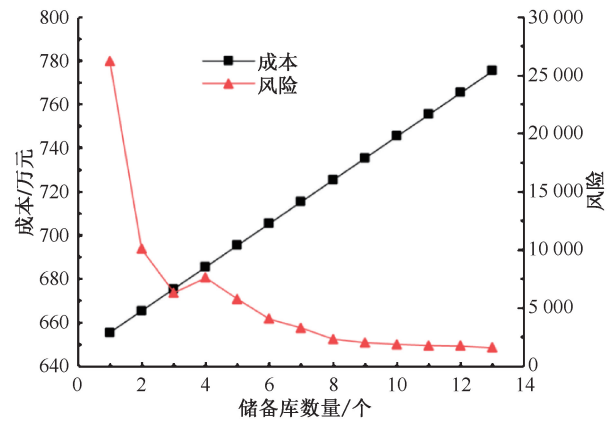


图 3 储备库个数对应急救援成本及整体风险的影响

Fig.3 Impact of the number of reserve warehouses on emergency rescue costs and overall risks

结合不同的实际要求,决策者可在成本、风险以及覆盖率之间进行权衡之后从最优的选址方案中选择满意的方案。考虑该研究区域的实际情况,在风险可接受的范围内,选取成本及覆盖率最优的方案。与其他选址方案相比,储备库个数增加到 8 个时,选址方案的覆盖率达到 100%,表示所有需求点在发生紧急事故时,都能在 5 min 内获得物资供应。同时,该选址方案的交叉响应覆盖率最低,可更有效地避免应急资源浪费。依据对模型求解结果分析,确定 8 个企业作为应急物资储备库为其他企业供应物资,其位置坐标以及分配情况见表 6。此外,根据决策者的偏好,选择次优的选址方案,如低成本低风险方案:储备库数量为 13 时,风险降至 1 595.75,但成

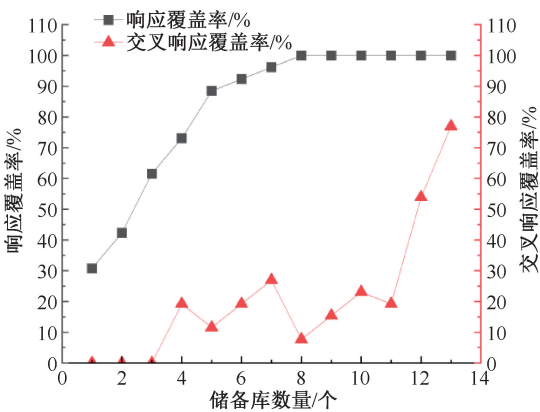


图 4 储备库个数不同时覆盖率对比

Fig.4 Comparison of coverage rates for different numbers of reserve warehouses

本增至 775.39 万元,适用于对事故容忍度极低的园区;或低成本高风险方案:储备库数量为 1 时,成本仅 655.40 万元,但覆盖率仅 30.77%,适用于预算严格受限的初期阶段。

表 6 储备库数量为 8 时的选址方案

Table 6 Site selection plan for a reserve warehouse with a quantity of 8

储备库代号	经度/(°)	纬度/(°)	需求点代号
1	117.411 269	38.844 977	1、3、4、13
2	117.385 932	38.844 968	2、5、6、7、8、9、12
11	117.422 004	38.848 755	10、11、16、17
15	117.340 165	38.845 869	14、15
19	117.391 520	38.833 093	18、19
20	117.253 917	38.797 127	20、21
23	117.260 499	38.815 113	22、23、25、26
24	117.291 831	38.815 283	24

由模型求解结果可见:目标函数在 200 代以内即可稳定收敛;随着储备库数量增加,成本呈持续上升、覆盖率逐步提升,风险前期降幅显著后期趋于平稳。这一结果不仅验证了算法具有良好收敛性,更能为不同需求场景提供适配方案,从而确保本模型科学有效地解决应急物资储备库的选址问题。

3 结 论

1) 本文建立了综合整体风险最小、成本最低及储备库覆盖率最优的多目标选址模型,并在天津市某化工园区进行验证,结果表明:该模型有效解决了化工园区应急物资储备库选址中“风险-成本-覆盖率”难以平衡的问题。并借助 NSGA-II 算法的多目标优化,输出不同决策偏好下的选址方案,可满足决策者不同需求间的科学权衡,避免应急资源浪费或救援时效不足的问题。

2) 结合 ArcGIS 和 NSGA-II 算法,可为化工园区应急物资储备库的选址提供一种科学、系统的方法,从而提高应急救援效率和降低事故损失。

参 考 文 献

[1] 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, 2022, 24(9): 3 588-3 595.

[2] 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): 3 588-3 595.

[3] XU Fang, MA Yifan, LIU Chang, et al. Emergency logistics facilities location Dual-Objective modeling in uncertain environments[J]. Sustainability, 2024, 16(4): DOI: 10. 3390/su16041361.

[4] LU Jianfeng, WANG Xiaoxia, ZHAO Jiahong. Optimization of emergency supplies scheduling for hazardous chemicals storage considering risk[J]. Sustainability, 2021, 13(19): DOI: 10. 3390/su131910718.

[5] 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.

[6] 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.

[7] YAN Xinxin, HOU Hanping, YANG Jianliang, et al. Site selection and layout of material reserve based on emergency demand graduation under large-scale earthquake [J]. Sustainability, 2021, 13(3): DOI: 10. 3390/su13031236.

[8] WANG Hexu, XIE Fei, SHEN Hai, et al. Evolutionary multiobjective site selection of Xi'an medical emergency material warehouse based on multiple memetic directions [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2022: DOI: 10. 1155/2022/1065144.

[9] 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): 8 177-8 186.

[10] LUO Zhenmin, QI Ke, CHENG Fangming. Review on site selection and transportation model of emergency material[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(19): 8 177-8 186.

[11] FENG Zengxi, LI Gangting, WANG Wenjing, et al. Emergency logistics centers site selection by multi-criteria decision-making and GIS [J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2023, 19: DOI: 10. 1016/j. ijdrr. 2023. 103921.

[12] 姜肖依, 贺可太, 靖皓生. 基于复合种群 SIR 模型的应急防疫物资仓库选址[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(4): 194-201.

[13] JIANG Xiaoyi, HE Ketai, JING Haosheng. Warehouse site selection of emergency epidemic prevention materials based on metapopulation SIR model[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(4): 194-201.

[14] LI Ping, FAN Xingqi. The application of the improved jellyfish search algorithm in a site selection model of an emergency logistics distribution center considering time satisfaction [J]. Biomimetics, 2023, 8(4): DOI: 10. 3390/biomimetics8040349.

[15] ZHANG Ruochen, LI Jianxun, SHANG Yanying. Multi-level site selection of mobile emergency logistics considering safety stocks[J]. Applied Sciences, 2023, 13(20): DOI: 10. 3390/app132011245.

[16] 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.

[17] 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.

[18] GENG Jiaxin, HOU Hanping, GENG Shaoqing. 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): DOI: 10. 3390/su131910560.

[19] GB/T 37243—2019, 危险化学品生产装置和储存设施外部安全防护距离确定方法[S].

[20] GB/T 37243—2019, Method for determining the external safety protection distance of hazardous chemical production equipment and storage facilities[S].

[21] GUAN Wenling, LIU Qingwen, DONG Chengjie. Risk assessment method for industrial accident consequences and human vulnerability in urban areas[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2022, 76: DOI: 10. 1016/j. jlp. 2022. 104745.

[22] 刘宗熹, 赵启兰. 应急物资储备指数及储备量探讨[J]. 物流技术, 2009, 28(7): 124-126.

[23] GB 30077—2023, 危险化学品单位应急救援物资配备要求[S].

[24] GB 30077—2023, Requirements on emergency rescue materials equipment for hazardous chemical enterprises [S].

[25] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2022, 6(2): 182-197.

作者简介: 关文玲 (1978—), 女, 陕西蒲城人, 博士, 副教授, 主要从事粉尘防爆、工业风险管控与应急管理等方面的研究。E-mail: hjpgwl@163.com。

