

文章编号: 2095-2163(2021)11-0107-06

中图分类号: O221.7

文献标志码: A

基于贪婪取走启发式算法的应急物资储备库选址研究

严梦凡¹, 刘 臣¹, 纪 颖²

(1 上海理工大学 管理学院, 上海 200093; 2 上海大学 管理学院, 上海 200444)

摘要: 新冠肺炎疫情下, 为保证封锁地区居民的物资供应, 建立合理的应急物资储备库具有重要的现实意义。本文考虑3种成本因素, 以系统总成本最小为目标, 构建具有容量限制和时间窗约束的选址模型, 并利用贪婪取走启发式算法求解。通过湖北黄冈市实际数据进行案例仿真实验, 验证了模型和算法的有效性。

关键词: 应急物资储备库; 选址; 贪婪取走启发式算法; 新冠肺炎疫情

Research on location of emergency supplies warehouse based on greedy take-away heuristic algorithm

YAN Mengfan¹, LIU Chen¹, JI Ying²

(1 School of Management, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2 School of Management, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

[Abstract] In the context of COVID-19, it is of great practical significance to establish a reasonable stockpile of emergency supplies in order to ensure supplies to residents in closed areas. This paper considers three cost factors and aims at minimizing the total cost of the system. A site selection model with capacity constraints and time window constraints is constructed and solved by greedy take-away heuristic algorithm. The effectiveness of the model and algorithm is verified by a case simulation experiment with real data from Huanggang city, Hubei Province.

[Key words] emergency supplies warehouse; location; greedy take-away heuristic algorithm; COVID-19

0 引言

由于新型冠状病毒(COVID-19)所带来的威胁, 让人们认识到当发生突发公共卫生事件时, 对感染地区进行隔壁封锁, 可以大幅度降低病毒传染、减少生命危害。而在封锁区域的人们无法正常购买日常所需物资, 则需要建立应急物资储备库为居民提供日常物资保障。因此, 研究应急物资储备库的选址问题就更加具有现实意义。

国内外许多学者从不同角度和不同方法对应急物资储备库的选址问题进行了深入研究。方磊等^[1]最早研究应急系统的选址问题, 在保证时间效用的基础上, 构建以系统成本最小化为目标的数学模型。肖俊华等^[2]从备用覆盖和部分覆盖角度出发, 构建应急物资储备库多级最大覆盖选址模型。王芳等^[3]通过R因子分析法, 筛选出备选储备库, 再以需求点与其最近的设施节点的距离之和最小为目标, 构建应急物资储备库选址模型。Ye等^[4]对经典P-中值模型进行扩展, 提出应急仓库选址模型,

将人口分布、经济状况、交通状况、重点区域多覆盖等特征代入模型, 并以实际数据进行算例仿真。而设施选址模型的求解往往是NP-难问题, 精确算法难以在可接受的计算时间内给出问题的求解方案。因此, 在有限计算时间内给出近似最优解的智能优化算法较受国内外学者的欢迎^[5-6]。Ai等^[7]研究海上应急系统中应急资源库配置问题, 提出一种离散非线性整数规划模型, 并设计混合启发式算法求解该模型。Pereira等^[8]以最小化距离和成本为目标, 构建最大覆盖率的应急设施选址模型, 并提出一种元启发式和精确法相结合的混合算法求解模型。孙强^[9]考虑应急救援成本最小化和救援时间满意度最大化, 建立带时间窗的突发灾害应急物流中心选址优化模型, 并利用改进人工蜂群算法求解模型。Xi等^[10]将免疫算法和蚁群算法相结合, 求解应急救援物资储备库选址问题。此外, NSGA II算法、多目标粒子群算法、自适应遗传算法等都被用来解决应急储备库的选址问题^[11-14]。

本文创新性的将贪婪取走启发式算法应用于求

作者简介: 严梦凡(1997-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 应急选址、智能优化算法; 刘 臣(1981-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向: 复杂网络、智能优化算法; 纪 颖(1981-), 女, 博士, 教授, 主要研究方向: 运筹学、决策科学。

通讯作者: 刘 臣 Email: liuchen@hotmail.com

收稿日期: 2021-09-02

解应急物资储备库的选址问题中,同时考虑容量限制和时间窗的约束,以系统总成本最小为目标,构建选址数学模型,并利用贪婪取走启发式算法求解模型。以湖北黄冈市在疫情下的实际数据进行案例分析,验证了模型和算法的可行性和有效性,为疫情下封锁区域人们的日常物资需求提供解决方案。

1 选址模型的构建

1.1 问题描述

当诸如新冠肺炎疫情这类突发公共卫生事件发生时,隔离病毒感染地区,限制人们的出行、社会活动等可以高效的避免病毒进一步传播,有效的控制疫情的蔓延。当对某地区进行封锁隔离限制时,如何保障人们的日常物资需求尤为重要。此时,如何在保证能满足封锁区域内所有居民需求的同时,以最低的成本来建设储备库需要研究。本文考虑3种成本因素,以系统总成本最小化为目标构建选址模型,求解出最优应急物资储备库的选址方案为决策者提供参考。

1.2 模型假设

为了便于构建模型,本文假设:

- (1) 区域内的需求点用离散型变量人口分布点集表示;
- (2) 区域内所建立的应急物资储备库能满足基本物资需求;
- (3) 将所有的应急物资都划归为一类产品去考虑;
- (4) 储备库的建设运营成本以其储存能力去计算。

1.3 符号说明

1.3.1 集合

I :居民区域需求点的集合 $i \in I, i = 1, 2, \dots, n$.

J :候选应急物资储备库的集合, $j \in J, j = 1, 2, \dots, m$.

1.3.2 决策变量

$$X_j = \begin{cases} 1, & \text{在 } j \text{ 处建立应急物资储备库} \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$$

$$Y_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{需求点 } i \text{ 处的物资由 } j \text{ 供应} \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$$

1.3.3 参数

P :需建立应急物资储备库的总数;

D_i :需求点 i 处的物资需求量;

C_j^{\max} :储备库 j 的最大存储量;

f_j :应急储备库 j 的建设运营成本;

c_i :储备库 j 到需求点 i 的单位运输成本;

c_p :储备库 j 到需求点 i 的物资送达时间未满足的惩罚成本;

d_{ij} :储备库 j 到需求点 i 的运输距离;

\bar{v}_j :储备库 j 到需求点 i 的车辆平均行驶速度。

1.4 选址模型构建

已知区域内的居民需求点为 i 个,可选择用来建设的应急物资储备库 j 个,本文中的选址依据为总成本最小,由此构建的数学选址模型如下:

(1) 目标函数:式(1)为表示最小化应急物资供应的总成本,由应急储备库的建设运营成本、从储备库到需求点的运输成本以及未满足最佳送达时间窗的惩罚成本组成。

$$\min Z = \sum_{j \in J} f_j X_j + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} P(t_{ij}) X_j + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c_i d_{ij} D_i Y_{ij} \quad (1)$$

(2) 时间窗约束:式(2)为本文所定义的未满足最佳送达时间窗的惩罚成本函数。

$$P(t_{ij}) = \begin{cases} 0, & 0 \leq t_{ij} < ET \\ c_p(t_{ij} - ET), & ET \leq t_{ij} < LT, \forall i \in I, j \in J \\ +\infty, & t_{ij} \geq LT \end{cases} \quad (2)$$

其中,物资送达时间 $t_{ij} = h_{ij} / \bar{v}_j, \forall i \in I, j \in J$ 。由于需求应急物资中可能会存在急需品,如药类、生鲜类产品等。这里设定最佳的送达时间为 ET ,允许送达的时间窗为 $[ET, LT]$ 。当 $0 \leq t_{ij} < ET$ 时,物资能够及时送达而不会存在惩罚成本,即 $p(t_{ij}) = 0$;当物资在 $[ET, LT]$ 时间窗内未送达时,将产生 $c_p(t_{ij} - ET)$ 的惩罚成本,且 $p(t_{ij})$ 随着送达时间 t_{ij} 的增长而增加。一旦 t_{ij} 超过最晚要求抵达时间 LT 时,应急物资送到需求点变得毫无意义,此时成本将会无限增大。

(3) 容量约束:式(3)表示从储备库送往需求点的物资数量不超过其最大储存能力。

$$\sum_{i \in I} D_i Y_{ij} \leq C_j^{\max}, \forall j \in J \quad (3)$$

(4) 其它约束:式(4)表示所选中的储备库总数为 P 个;式(5)表示每个需求点都有应急物资储备库为其服务,且仅被一个储备库服务;式(6)表示仅当应急储备库开放时,才能将物资送往需求点;式(7)为 0~1 整数决策变量。

$$\sum_{j \in J} X_j = P \quad (4)$$

$$\sum_{j \in J} Y_{ij} = 1, \forall i \in I \quad (5)$$

$$Y_{ij} \leq X_j, \forall i \in I, j \in J \quad (6)$$

$$X_j \in \{0,1\}; Y_{ij} \in \{0,1\}, \forall i \in I, j \in J \quad (7)$$

3 基于贪婪取走启发式算法求解模型

离散网络下的设施选址问题,一直以来是 NP-难问题。由于数学模型的复杂性,高效的精确算法往往无法直接求解模型,且经常因为维数灾难而导致求解时间过长,无法满足实际需求。基于此,本文所考虑的贪婪取走启发式算法可以有效的解决这一问题。

3.1 算法原理

贪婪取走启发式算法是一种智能优化算法。其优点是能够迅速、高效率并行的求解 NP 难题,达到较为满意的近似最优解。首先,需要在算法中明确求解目标,并制定合理可行的贪婪准则。然后,在不考虑各种可能的整体情况下,以当前基础为最优选择,从初始状态逐步向下搜索,直到寻得满足目标函数的最优解。利用该算法可以对选址问题进行定性分析和定量研究,且求解步骤较为简单、计算量小,能够给出满意合理的选址结果。

3.2 求解步骤

Step 1 选中所有潜在的应急物资储备库,令 $P=M$;

Step 2 为每个需求点分配与其运输距离成本最小的候选储备库;

Step 3 搜索并取走一个满足条件的储备库,即如果将其取走并将其原本所对应的需求点重新分配后,总的平均费用增加量最小;

Step 4 从候选储备库中删去上一步中被取走的点,令 $P=P-1$,转去执行 **Step 3**;

Step 5 循环执行 **Step 3** 和 **Step 4**,直至 $P=i$,其中 i 为所需要的应急储备库数量。

4 实例分析

数值实验平台为 Matlab R2016a,计算机 CPU 为 Intel(R) Core i5-8250u 1.60GHz,8 GB 内存,64 位 Windows10 操作系统。

4.1 实际数据的获取

以新冠疫情下湖北省黄冈市的应急物资储备库选址问题进行实例分析。黄冈市共有 10 个行政区划,需要选出 10 个最优储备库为居民的物资需求提供支持。以乡镇和街道为单位作为居民需求点,在每个行政区域内进行细致划分,共有 127 个需求点。

应急物资储备库的候选地址应为地势平坦、交通便利的大型空旷区域,共计 30 个。每个需求点的人口数量可由中国国家统计局截止 2017 年的统计数据得到。居民需求点、候选应急物资储备库的相关数据见表 1 和表 2,详细分布情况见图 1。

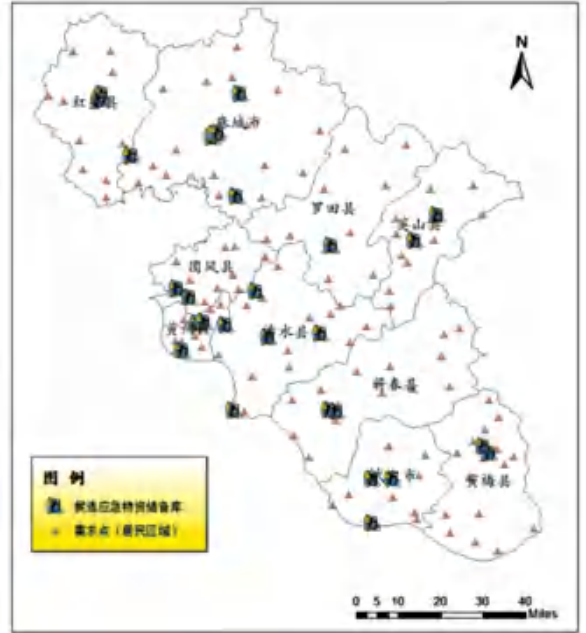


图 1 需求点和候选储备库的分布情况

Fig. 1 Distribution of demand points and candidate warehouses

为了切合实际,需求点 i 和储备库 j 间的实际行驶距离 h_{ij} 由两个节点的经纬度坐标来确定,即公式(8):

$$h_{ij} = k \frac{\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}}{180} \cdot \pi \cdot 6\,370 \quad (8)$$

其中, $(x_i, y_i), (x_j, y_j)$ 为两个节点的经度和纬度坐标,6 370 为地球半径 (km)。利用公式 $\frac{\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}}{180} \cdot \pi \cdot 6\,370$ 计算出两个节点间的线性距离。

抽取 30 组两个节点间的线性距离,将其与百度地图得到的实际行驶距离相比较,可计算误差值 k 。其余相关参数设置为: $f_j = 50$ 元/吨, $c_i = 20$ 元/km, $c_p = 12$ 元/km, $\bar{v}_j = 30$ km/h, $ET = 2$ h, $LT = 12$ h。

4.2 算法求解过程分析

基于 3.2 节的贪婪取走启发式算法分析与求解步骤可知:

第 1 步:选中 30 个潜在的应急物资储备库,即 $P=30$ 。将 127 个需求点分配给 J 中最小的潜在候选储备库,得到第一次指派结果,此时总成本为 83 824.36 万元。

表1 需求点的经纬度坐标和人口规模

Tab. 1 Latitude and longitude coordinates of demand points and population size

编号	需求点坐标	人口规模	编号	需求点坐标	人口规模	编号	需求点坐标	人口规模
1	114.661, 31.460	80 798	44	115.656, 30.765	19 731	87	115.695, 30.307	50 072
2	114.603, 31.274	119 425	45	115.635, 30.889	22 065	88	115.853, 30.515	30 936
3	114.499, 31.290	39 658	46	115.755, 30.990	32 412	89	115.821, 30.316	36 759
4	114.554, 31.156	50 883	47	115.901, 31.002	18 108	90	115.569, 29.851	161 582
5	114.566, 31.056	32 145	48	115.757, 30.887	32 279	91	115.564, 29.850	34 026
6	114.449, 31.307	35 447	49	115.768, 30.816	42 325	92	115.421, 29.913	18 948
7	114.646, 31.020	30 639	50	115.613, 30.642	25 045	93	115.700, 29.888	4 083
8	114.645, 30.963	23 432	51	115.638, 30.836	19 318	94	115.611, 30.114	113 247
9	114.702, 31.146	56 044	52	115.934, 30.906	7 477	95	115.737, 30.083	50 297
10	114.530, 31.457	43 804	53	114.870, 30.632	71 185	96	115.715, 30.013	64 690
11	114.643, 31.288	86 479	54	114.885, 30.743	57 183	97	115.625, 29.940	44 857
12	114.668, 31.388	2 049	55	115.078, 30.696	24 063	98	115.614, 29.995	35 921
13	115.011, 31.167	55 601	56	115.190, 30.760	41 226	99	115.554, 30.028	32 203
14	115.026, 31.185	68 485	57	115.100, 30.647	29 827	100	115.476, 29.949	47 311
15	115.041, 31.177	80 722	58	115.027, 30.652	19 640	101	115.707, 29.866	37 082
16	114.807, 31.068	50 109	59	114.983, 30.605	32 134	102	115.939, 30.074	141 488
17	115.129, 31.207	31 297	60	115.087, 30.794	19 117	103	115.921, 29.883	98 543
18	115.014, 31.038	61 839	61	115.055, 30.792	18 816	104	115.986, 29.756	97 956
19	114.886, 31.123	42 918	62	114.931, 30.679	22 811	105	116.009, 30.050	21 945
20	114.989, 31.357	47 632	63	115.267, 30.439	193 988	106	115.848, 30.090	59 759
21	115.094, 31.474	36 169	64	115.028, 30.426	113 356	107	115.987, 30.212	33 323
22	115.189, 31.073	36 567	65	115.341, 30.552	71 852	108	115.942, 30.170	13 971
23	115.178, 30.960	32 079	66	115.125, 30.594	66 860	109	115.890, 30.008	65 122
24	115.319, 31.047	37 066	67	115.179, 30.617	49 785	110	115.808, 29.879	71 168
25	115.233, 31.328	40 083	68	115.233, 30.727	78 925	111	115.822, 29.817	55 883
26	115.076, 31.372	34 513	69	115.446, 30.591	14 885	112	116.039, 30.078	27 127
27	114.840, 31.332	43 233	70	115.412, 30.564	35 562	113	115.908, 29.786	47 872
28	114.756, 31.012	20 520	71	115.480, 30.466	49 312	114	115.955, 30.271	12 357
29	115.031, 30.966	26 470	72	115.272, 30.383	35 922	115	115.982, 30.103	34 299
30	115.375, 31.187	37 992	73	115.119, 30.233	60 655	116	115.902, 30.131	27 634
31	114.850, 31.037	40 457	74	115.145, 30.350	48 792	117	116.110, 29.832	15 919
32	115.274, 30.832	57 980	75	115.537, 30.522	22 214	118	114.884, 30.442	156 011
33	115.463, 31.127	59 219	76	115.441, 30.251	150 600	119	114.904, 30.470	21 939
34	115.671, 31.140	30 041	77	115.340, 30.075	67 040	120	114.882, 30.473	22 977
35	115.602, 31.003	29 204	78	115.382, 30.306	68 543	121	114.973, 30.452	16 593
36	115.480, 30.841	30 825	79	115.502, 30.369	30 920	122	114.950, 30.489	21 550
37	115.195, 30.818	35 918	80	115.617, 30.385	42 447	123	114.913, 30.546	25 416
38	115.391, 30.990	50 823	81	115.791, 30.419	42 065	124	115.037, 30.596	25 856
39	115.558, 30.697	59 270	82	115.802, 30.494	19 624	125	114.981, 30.537	19 654
40	115.407, 30.682	33 132	83	115.430, 30.203	49 666	126	115.002, 30.581	4 753
41	115.396, 30.784	114 890	84	115.288, 30.149	20 547	127	114.917, 30.449	52 020
42	115.677, 30.740	121 669	85	115.281, 30.272	35 569			
43	115.619, 30.591	16 027	86	115.589, 30.296	67 756			

表2 候选储备库的坐标和最大储存量

Tab. 2 Coordinates and maximum storage of candidate warehouses

编号	候选储备库坐标	最大储存量/吨	编号	候选储备库坐标	最大储存量/吨
P_1	114.633, 31.314	27 840	P_{16}	114.891, 30.649	4 478
P_2	115.009, 31.166	17 043	P_{17}	115.703, 30.813	90 032
P_3	114.733, 31.104	9 100	P_{18}	114.960, 30.528	29 708
P_4	115.959, 30.090	118 450	P_{19}	115.417, 30.796	49 879
P_5	115.557, 30.011	6 998	P_{20}	115.781, 30.900	5 282
P_6	115.107, 31.314	10 989	P_{21}	115.381, 30.497	73 502
P_7	114.623, 31.295	104 917	P_{22}	115.202, 30.485	8 220
P_8	114.931, 30.621	73 426	P_{23}	115.627, 30.009	64 520
P_9	115.083, 30.235	30 964	P_{24}	114.981, 30.537	7 598
P_{10}	115.028, 31.180	35 097	P_{25}	115.058, 30.526	45 008
P_{11}	115.939, 30.114	9 320	P_{26}	115.028, 31.180	2 890
P_{12}	115.018, 31.178	3 233	P_{27}	115.094, 30.964	5 354
P_{13}	114.907, 30.440	52 560	P_{28}	115.411, 30.237	6 210
P_{14}	115.160, 30.640	39 088	P_{29}	114.891, 30.649	10 879
P_{15}	115.436, 30.233	8 352	P_{30}	115.557, 29.851	4 877

第 2 步: 分别对取走的候选储备库 $P_1, P_2, P_3, \dots, P_{30}$ 进行分析。若取走候选点 P_1 , 此时系统总成本为 78 837.15 万元, 费用增加了 -4 987.21 万元。同理, 若分别取走其它候选点 P_2, P_3, \dots, P_{30} , 系统总成本费用都会发生变化。此时需要计算每个需求点 i 分配的候选储备库所需的总成本, 并挑选出其中费用增量最小的候选点。

第 3 步: 重复第 2 步, 直到筛选出所需要的最优应急物资储备库, 计算结束。

4.3 算法求解结果

利用贪婪取走启发式算法筛选出了 10 个最佳的应急物资储备库, 分别为: $P_4, P_7, P_8, P_{10}, P_{13}, P_{14}, P_{17}, P_{19}, P_{21}, P_{23}$ 。每个最优储备库所服务的需求点 (即居民区域) 的服务配置如图 2 所示, 具体数据见表 3。从图表中可以看出, 黄冈市的每个行政

区域都配有应急物资储备库, 且能够满足所有居民区域在疫情下的应急物资需求。

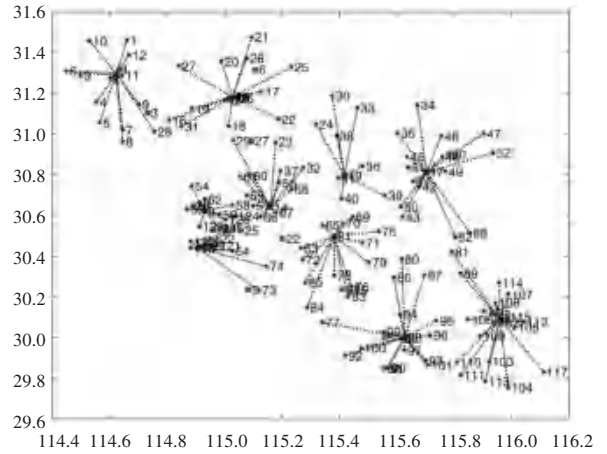


图 2 配置场景

Fig. 2 Configuration scenario

表 3 每个最优储备库所服务的需求点

Tab. 3 The demand points served by each optimal warehouse

需求点	最优储备库
81, 89, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 116, 117	P_4
1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 28	P_7
53, 54, 58, 59, 62, 123, 124, 125, 126	P_8
13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 25, 26, 27, 31	P_{10}
64, 73, 74, 118, 119, 120, 121, 122, 127	P_{13}
23, 29, 32, 37, 55, 56, 57, 60, 61, 66, 67, 68	P_{14}
34, 35, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 82, 88	P_{17}
24, 30, 33, 36, 38, 39, 40, 41	P_{19}
63, 65, 69, 70, 71, 72, 75, 76, 78, 79, 83, 84, 85	P_{21}
77, 80, 86, 87, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101	P_{23}

4 结束语

利用贪婪取走启发式算法可以得到应急物资储备库选址问题有效、合理且理想的解决方案, 对于实际的选址决策具有一定的指导意义。该应急储备库选址方法, 可为决策者选择最佳布局方案提供科学合理的参考。但由于本文仅从成本这一因素考虑应急储备库的选址决策, 具有一定局限性。为了进一步提高模型的实际应用价值, 未来研究工作应综合考虑社会影响、周边环境和运输限制等多种因素的应急储备库选址问题。

参考文献

[1] 方磊, 何建敏. 应急系统优化选址的模型及其算法[J]. 系统工程学报, 2003, 18(1): 51-56.
 [2] 肖俊华, 侯云先. 综合模糊 TOPSIS 决策的应急物资储备库多级

覆盖选址模型[J]. 工业工程, 2013, 23(1): 91-98.
 [3] 王芳, 陈浩, 王瑛, 等. 面向地震灾害的河北省救灾物资储备库选址研究[J]. 自然灾害学报, 2013, 22(2): 29-35.
 [4] YE F, ZHAO Q H, XI M H, et al. Chinese National Emergency Warehouse Location Research based on VNS Algorithm [J]. Electronic Notes in Discrete Mathematics, 2015, 47: 61-68.
 [5] 彭春, 李金林, 冉伦, 等. 需求不确定下应急医疗服务站鲁棒配置模型与算法[J]. 运筹与管理, 2017, 26(9): 21-28.
 [6] 周宇阳, 张惠珍, 马良. 求解应急医疗设施分层递进式选址问题的改进免疫算法[J]. 运筹学学报, 2021, 25(2): 15-34.
 [7] AI Y F, LU J, ZHANG L L. The optimization model for the location of maritime emergency supplies reserve bases and the configuration of salvage vessels [J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2015, 83(11): 170-188.
 [8] PEREIRA M A, COELHO, LEANDRO C, et al. A hybrid method for the Probabilistic Maximal Covering Location-Allocation Problem [J]. Computers & Operations Research, 2015, 57(5): 51-59.
 [9] 孙强. 带时间窗的突发灾害应急物流中心选址研究[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版), 2017, 39(1): 115-117.