

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2024.05.011

# 考虑洪涝灾害强度的城市应急物流配送中心选址研究

别昊田, 黄国平

(湖南工业大学 商学院, 湖南 株洲 412007)

**摘要:** 当前应急物流领域中, 应急物流配送中心存在网络布局不合理、应急物资配送效率不佳等问题亟待解决。为了解决上述问题, 针对洪涝灾害发生后城市应急物流配送中心选址问题提出了一个优化模型。首先, 通过灰色关联评价法对各地区洪涝灾害的相对强度进行评估, 得到各地区的洪涝灾害强度系数; 其次, 在考虑各地不同的洪涝灾害强度系数、应急物资不同需求量和配送成本等多个因素下, 构建满足多个约束条件的应急物流配送中心选址优化模型; 再次, 根据模型特点设计免疫算法对其进行求解; 最后, 以上海市突发大范围洪涝灾害为假设案例进行分析。结果表明: 在考虑洪涝灾害强度的情况下, 利用该选址方法可较快获得合理的应急物流配送中心选址方案。

**关键词:** 应急物流; 配送中心; 洪涝灾害; 灰色关联法; 免疫算法

**中图分类号:** F259.27

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-9833(2024)05-0076-08

**引文格式:** 别昊田, 黄国平. 考虑洪涝灾害强度的城市应急物流配送中心选址研究[J]. 湖南工业大学学报, 2024, 38(5): 76-83.

## A Study on Urban Emergency Logistics Distribution Center Location Selection Considering Flood Disaster Intensity

BIE Haotian, HUANG Guoping

(College of Business, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

**Abstract:** Due to the fact that there are problems requiring an urgent solution in the current emergency logistics, such as unreasonable network layout and inefficiency distribution of emergency supplies in emergency logistics distribution centers, an optimization model is proposed for the location selection of urban emergency logistics distribution centers after flood disasters to solve the above problems. Firstly, the grey correlation evaluation method is adopted for an evaluation of the relative intensity of flood disasters in various regions, thus obtaining the flood disaster intensity coefficients for each region. Secondly, a site selection optimization model is constructed for emergency logistics distribution centers that meets multiple constraints, with multiple factors taken into consideration, i.e. different flood disaster intensity coefficients in different regions, different demands for emergency supplies, and distribution costs. Next, based on the characteristics of the model, an immune algorithm is designed to solve the problem. Finally, an analysis is conducted by using Shanghai's sudden large-scale flood disaster as a hypothetical case. The results indicate that, considering the intensity of flood disasters, a reasonable emergency logistics distribution center location scheme can be obtained quickly by using this proposed location selection method.

**Keywords:** emergency logistics; distribution center; flood disaster; grey correlation method; immune algorithm

收稿日期: 2023-02-18

作者简介: 别昊田, 男, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为应急物流管理, E-mail: 804190683@qq.com

通信作者: 黄国平, 男, 湖南工业大学副教授, 博士, 主要研究方向为应急物流管理, 公共管理, E-mail: 348858677@qq.com

## 1 研究背景

随着社会经济的持续增长,突发性自然灾害对人类社会的威胁逐渐加剧,其中洪涝灾害尤为突出。面对洪涝灾害,及时有效的应急救援行动能够极大地减少人员伤亡和财产损失,因此,构建一个高效、迅速的应急物资配送体系,特别是确定应急物流配送中心的最佳选址,成为救援工作成功的关键环节。

城市应急物流配送中心是应急物流体系内不可或缺的枢纽,除了执行一般的物流运输任务外,还承担着指挥调度、信息处理等高级职能,是开展应急救援工作的重要保障。2018年,国家应急管理部成立,展现了国家对应急管理领域的高度重视<sup>[1]</sup>。2022年国家发展与改革委员会发布《“十四五”现代流通体系建设规划》,强调了要加快发展现代物流体系,特别是要加强应急物流体系建设,提升灾害高风险区域交通运输设施、物流站点等设防水平和承灾能力。从应急物流的角度看,为了在洪涝灾害发生后尽可能减少伤亡与损失,确定城市应急物流配送中心的选址尤为重要。只有在综合考虑各受灾点受灾程度、各受灾点物资需求量等因素的情况下才可能实现应急物流配送中心的最佳选址,进而实现救援效率的最大化。由于应急物流配送中心通常具有长期性和固定性,一旦选址确定,很难进行大规模调整,因此选址的合理性和科学性显得尤为重要。

近年来,众多学者围绕应急物流配送中心的选址问题进行了深入研究,提出了多种模型和算法。倪卫红等<sup>[2]</sup>基于聚类-重心法建立了应急物流配送中心选址模型;席月等<sup>[3]</sup>基于层次分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP),对应急物资中心的选址进行了实例分析;生力军<sup>[4]</sup>使用量子粒子群算法对物流配送中心选址问题进行了研究,并且证明了该算法相比于经典粒子群算法具有一定的优越性;商丽媛等<sup>[5]</sup>探讨了如何使用免疫量子粒子群算法对应急物流中心选址进行研究,并通过算例验证了该算法的可靠性;闫森等<sup>[6]</sup>构建了一个考虑需求不确定性的应急物流设施选址模型,并使用遗传算法对实际算例进行求解,证明了模型与算法的有效性;马丽荣等<sup>[7]</sup>使用免疫算法对应急物流中心选址进行了研究,结果表明该算法对解决选址问题效果良好。

然而,这些研究仍存在一些局限性,如聚类-重心法不适用于密度差异很大的情形;AHP方法主观性太强,并且选址范围仅限于预先确定的几个对象内;粒子群算法容易陷入局部最优解;遗传算法相较于其他传统算法,减少了陷入局部最优解的风险,

但有时会过早收敛。免疫算法与遗传算法有一定的相似性,但免疫算法具有更大的随机性,同时基于亲和度和浓度计算得出激励度选择方法,更容易达到全局最优解。因此,本文选择使用免疫算法来解决应急物流配送中心选址问题。

目前,免疫算法已被广泛应用于物流基地和配送中心的选址问题研究。平环等<sup>[8]</sup>使用自适应免疫算法对中等规模物流配送中心的选址问题进行了研究;张超等<sup>[9]</sup>使用免疫算法研究了工程物资储备基地的选址问题;陈美花等<sup>[10]</sup>使用免疫算法研究了双层级物流设施选址问题;李伟斌等<sup>[11]</sup>使用免疫算法研究了共享电动汽车网点选址问题;周宇阳等<sup>[12]</sup>使用免疫算法研究了应急医疗设施分层递进式选址的问题。尽管在许多领域都有学者使用免疫算法来解决选址问题,但是针对应急物流配送中心选址问题的研究仍然较少。此外,考虑到目前有关使用免疫算法对应急物流配送中心选址问题进行研究的文献中,鲜有针对洪涝灾害应急场景进行研究的文献,因此本文借鉴一些学者针对洪涝灾害场景的研究成果,包括M. J. Alam等<sup>[13]</sup>提出的多准则评估模型, Hu S. S.等<sup>[14]</sup>研究北京地区洪涝灾害提出的评估体系模型,刘媛媛等<sup>[15]</sup>对孟印地区洪水灾害风险进行分析评估的AHP法与熵权法结合的模型。在这些研究成果的基础上,本文设计了一个洪涝灾害强度指数评估体系和物流中心选址模型,并采用免疫算法进行模型求解。

鉴于城市在应对极端气候条件下的自然灾害方面具有独特的需求,本文拟改进上述研究成果,以获得更科学可靠的应急物流配送中心选址方案。首先,通过建立洪涝灾害强度系数评估体系,对具体应急场景进行客观、全面地评估;其次,根据应急物流配送中心的特点和需求,构建选址优化模型;最后,利用免疫算法对模型进行求解,得到最佳选址方案。

本研究的边际贡献在于:一方面,针对洪涝灾害背景下的应急物流配送中心选址问题进行了深入研究,提高了选址决策的针对性和有效性;另一方面,通过引入灰色关联评价法确定洪涝灾害强度评估指标权重,增强了权重确定的客观性和可靠性;同时,构建的选址优化模型和设计的免疫算法求解方法,为类似问题的研究提供了新的思路和方法。

综上所述,本研究对于提升我国应对洪涝灾害等自然灾害的应急救援能力,减少灾害损失,保障人民群众生命财产安全具有重要意义。

## 2 洪涝灾害强度指数评估体系

为了合理评估不同地区洪涝灾害强度差异,本文

将影响洪涝灾害强度的多个因素进行分类,包括致灾因子危险性 $\alpha$ 、孕灾环境敏感性 $\beta$ 、承灾体脆弱性 $\gamma$ ,以及医疗救援能力 $\delta$ <sup>[16]</sup>。其中,致灾因子危险性主要指降雨的时长。孕灾环境敏感性主要考虑当地自然环境条件,如地形和河流等。承灾体脆弱性主要关注人口数量和经济产出强度等因素。医疗救援能力主要考虑地区灾后医疗救援能力和经济发展水平。地区医疗救援能力作为指标选用,是考虑到灾害发生后可能会出现溺水、受伤或被困等情况,需要紧急医疗救援。综上所述,本文将涉及洪涝灾害强度评估的4类因素细化为14个二级指标,其中前11个指标为正向指标,后3个指标为负向指标。具体的指标及其含义描述如表1所示。

表1 洪涝灾害强度评价体系指标及其含义

Table 1 Index and description of flood disaster intensity evaluation system

一级指标	二级指标	含 义
致灾因子危险性 $\alpha$	极端日降雨量 $\alpha_1$	极端情况下的日降雨量
	年降雨量 $\alpha_2$	全年的降雨量之和
	最大连续降雨天数 $\alpha_3$	全年连续降雨天数的最大值
	年降雨天数 $\alpha_4$	全年降雨的总天数
孕灾环境敏感性 $\beta$	地势 $\beta_1$	地表坡度的平缓程度
	河网密度 $\beta_2$	单位面积内河道的总长度
	绿化未覆盖率 $\beta_3$	绿化未覆盖的面积与总面积之比
承灾体脆弱性 $\gamma$	人口密度 $\gamma_1$	单位面积的土地上居住的人口数量
	老年人口比例 $\gamma_2$	老年人口与总人口数量之比
医疗救援能力 $\delta$	居住建筑密度 $\gamma_3$	居住房屋总面积与地区总面积之比
	地均GDP $\gamma_4$	平均每单位面积土地创造的GDP 可代表洪涝灾害对地区的潜在损失程度
医疗救援能力 $\delta$	卫生技术人员数量 $\delta_1$	卫生技术人员总数
	医疗机构数量 $\delta_2$	医疗机构数量
	人均GDP $\delta_3$	平均每人创造的GDP,可代表救援的潜在经济支撑能力

完成各地区的二级指标数据收集后,本文采用灰色关联法对数据进行处理。与其他利用灰色关联评价法进行灾害评估的文献不同,本文并非仅将各指标数据与初始值或平均值进行灰色关联分析来获得意义不明显的灰色关联度。而是根据灰色关联评价法的本质意义,即通过比较各因素之间的相似程度来判断它们之间的关联程度,在两个维度上考虑和计算灰色关联度和权重:一是考虑各受灾地区实际情况与一个假想的受灾最严重地区(该地区的各项指标数据来源于所有受灾地区各项指标的最值)之间的关联程度,

从而得出各受灾地区的灰色关联度,并经过归一化处理得到其权重,表示各地区受灾严重程度的不同;二是考虑各受灾地区二级指标数据和各受灾地区权重之间的关联程度,从而得出各二级指标的灰色关联度,并经过归一化处理得到其权重,表示二级指标和地区受灾强度之间的关联性。前者是对各受灾点的所有指标数据进行分析,其权重反映了各受灾点的所有指标数据与假想的受灾最严重地区所有指标之间的关联程度;而后者则是将各受灾点的每一项指标数据与各受灾点的权重进行分析,其权重反映了单个指标与地区受灾严重程度之间的关联程度。综上所述,本文综合考虑灰色关联度和权重的特性,定义洪涝灾害强度系数FDI(flood disaster intensity)的表达式为

$$FDI = \alpha + \beta + \gamma - \delta. \quad (1)$$

$$\text{式中: } \alpha = \sum_{n=1}^4 A_{\alpha_n} \omega_{\alpha_n}; \quad (2)$$

$$\beta = \sum_{n=1}^3 A_{\beta_n} \omega_{\beta_n}; \quad (3)$$

$$\gamma = \sum_{n=1}^4 A_{\gamma_n} \omega_{\gamma_n}; \quad (4)$$

$$\delta = \sum_{n=1}^3 A_{\delta_n} \omega_{\delta_n}. \quad (5)$$

式(2)~(5)中: $\omega$ 为灰色关联度经过归一化处理求得的权重; $A$ 为二级指标数据经过无量纲化处理后的结果。

### 3 应急物流配送中心选址模型

在洪涝灾害救援中,应急物流配送中心的选址是救援工作的基础,直接影响后续救援效率。只有确保该项工作的顺利进行,才能高效、迅速地完成任务。如图1所示,应急物流行为可简化为从制造厂到配送中心,再从配送中心到受灾点的过程。本文的研究重点是虚线部分内的从配送中心到受灾点的物流活动。此外,如果仅以物流效率的高低作为唯一的评判标准,那么显然需要建立尽可能多的物流配送中心来保障受灾点的物资供应,但在实际应用中还应适当考虑救援成本。因此在灾害发生后,应同时结合物流效率与经济效益,在某处受灾点建立物流配送中心。这样,物流配送中心既可以满足当地的物资需求,也可以承担为周围受灾地区提供物资配送的任务;既能充分完成洪灾灾害救援任务,又将救援成本控制到最低水平<sup>[17]</sup>。综上所述,对于应急物流配送中心选址的问题,首先应当统计出所有受灾点的分布情况以及各自需求,再从所有受灾点中选出若干个作为配送

中心, 在这一过程中, 需要保证配送中心的选址能够满足附近所有受灾点预设的各项基本条件与假设。应急物流配送中心选址问题实质上就是一个在众多约束条件下取得最优解的问题。

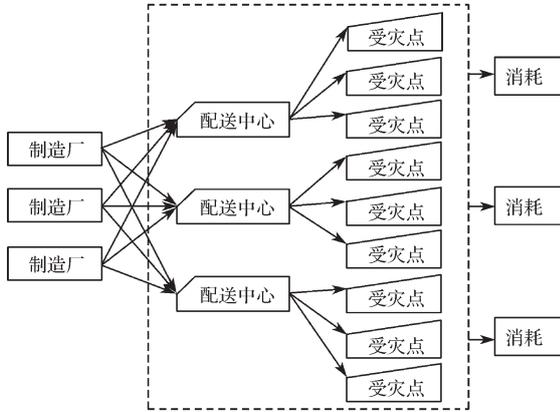


图1 应急物资物流流程图

Fig. 1 Emergency supplies logistics flow chart

在实际的应急物流配送中心选址问题中, 需要考虑到社会、经济、政治等诸多因素, 例如: 洪涝灾害的发生可能影响道路交通的通畅、当地通讯设备的损坏可能影响物流配送效率等, 诸多难以量化的问题为应急物流配送中心的选址带来了极大的困难。因此, 本文对应急物流配送中心的选址研究作如下假设:

- 1) 忽略道路运输条件的影响, 寻求理想状况下救援效率尽可能高的物流配送中心地址。
- 2) 应急物流配送中心的规模由其辐射范围内受灾点的总需求量决定, 并且每个配送中心总能满足辐射范围内所有受灾点的需求。
- 3) 每个受灾点仅能接受一个配送中心的应急物资, 这样既能有效降低成本, 也能防止重复配送。
- 4) 不考虑配送路径的其他网络结构, 即从应急配送中心到受灾点的配送车辆只会负责一个受灾点的配送活动。
- 5) 不考虑应急物资从制造厂运输到配送中心的成本。

综上所述, 可以构建各个配送中心到其辐射范围内受灾点的数学模型, 运输量与运输距离乘积之和的最小值为

$$\min F = \sum_{i \in N} \sum_{j \in S_i} b_i d_{ij} Z_{ij} FDI_i; \quad (6)$$

$$\text{s. t. } \sum_{j \in S_i} Z_{ij} = 1, i \in N; \quad (7)$$

$$Z_{ij} \leq X_j, i \in N, j \in S_i; \quad (8)$$

$$\sum_{j \in S_i} X_j = a; \quad (9)$$

$$Z_{ij}, X_j \in \{0, 1\}, i \in N, j \in S_i; \quad (10)$$

$$d_{ij} \leq r. \quad (11)$$

式(6)~(11)中:  $FDI_i$ 为受灾点*i*的洪涝灾害强度系数;  $N=\{1, 2, \dots, n\}$ 为所有受灾点的集合;  $S_i$ 为满足与受灾点*i*的距离在*r*以内的备选配送中心的集合;  $b_i$ 为受灾点*i*的需求量;  $d_{ij}$ 为受灾点*i*到最近的配送中心*j*的距离;  $Z_{ij}$ 为0~1变量, 代表受灾点*i*与配送中心*j*之间的配送关系;  $X_j$ 为0~1变量, 代表*j*点是否为配送中心;  $a$ 为被选为配送中心的受灾点的数量;  $r$ 为配送中心可配送的最大距离。

式(6)为目标函数; 式(7)表示每个受灾点都只由一个配送中心负责配送; 式(8)表示受灾点的需求量由其对应的配送中心负责配送; 式(9)表示一共选择了*a*个受灾点作为配送中心; 式(10)中  $Z_{ij}$ 表示受灾点*i*与配送中心*j*之间的配送关系,  $Z_{ij}=1$ 时表示存在配送关系,  $Z_{ij}=0$ 时表示不存在配送关系,  $X_j$ 表示*j*点是否为配送中心,  $X_j=1$ 时表示*j*点为配送中心,  $X_j=0$ 时表示*j*点不为配送中心; 式(11)表示受灾点必须在配送中心的配送范围之内。

#### 4 应急物流配送中心选址的免疫算法

为了科学有效地对应急物流配送中心选址模型进行求解, 本文引入免疫算法对模型进行运算。免疫算法是一种新型的智能优化算法, 能够在模拟生物免疫机制的同时仿照生物进化的模式对目标进行寻优求解。免疫算法通过生成与检测的迭代运算不断获取目标解, 相比其他算法能够较快地获得目标的最优解。

免疫算法的求解过程如图2所示, 一共包含7个步骤。

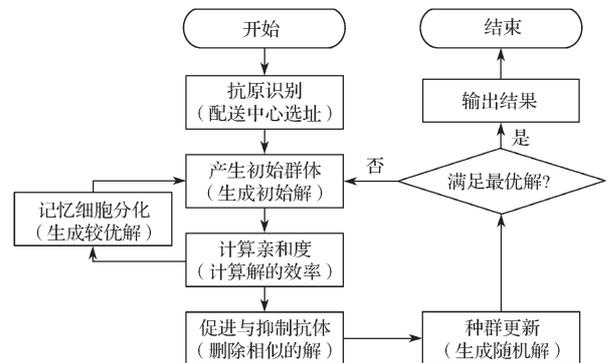


图2 免疫算法流程图

Fig. 2 Immune algorithm flow chart

第一步, 抗原识别。抗原是生物免疫学概念, 原意为会在生物体内激发免疫反应的物质, 如细菌、病毒、过敏物等。在免疫算法中, 抗原指的是求解的问题, 在本文中为应急物流配送中心的选址。

第二步,产生初始群体。当生物体遭到抗原入侵后,B细胞受到刺激将分化为浆细胞与记忆细胞,浆细胞会分泌抗体消灭抗原,记忆细胞会在以后受到同样的抗原入侵时再分化为浆细胞消灭抗原。在免疫算法中,产生的初始群体类似于首次分化而产生的浆细胞,即为随机生成的初始解,在本文中为各种可能的配送中心选择方案。

第三步,计算亲和力。亲和度的计算包含两个部分:一部分是抗体与抗原之间亲和度的计算,另一部分是抗体与其他抗体之间亲和度的计算。

在抗体与抗原之间亲和度的计算中,亲和力可以理解为抗体消灭抗原的效率。在式(1)中,目标函数为 $\min F$ ,即求 $F$ 的最小值,因此在应急物流配送中心选址模型中,某个抗体与抗原之间亲和力越高就代表该方案计算的数值越小,说明该方案较优。由于亲和力与所得解的数值之间具有倒数关系,因此可以设立如下抗体与抗原之间的亲和力函数:

$$A_v = \frac{1}{F} = \frac{1}{\sum_{i \in N} \sum_{j \in S_i} b_i d_{ij} Z_{ij} - \Delta}; \quad (12)$$

$$\Delta = C \sum_{i \in N} \min \left\{ \left( \sum_{j \in S_i} Z_{ij} \right) - 1, 0 \right\}. \quad (13)$$

式(12)(13)中: $\Delta$ 为对违反式(6)距离约束的解予以惩罚,即剔除配送范围之外的解; $C$ 为可以取一个较大的常数。

亲和力表示抗体之间的相似程度,即各个可行解之间的相似性,可以用抗体间相同元素的比例 $S_{v,s}$ 来表示:

$$S_{v,s} = K_{v,s} / L, \quad (14)$$

式中: $K_{v,s}$ 为抗体 $v$ 与抗体 $s$ 之间相同的基因数; $L$ 为抗体的长度。

由此可以得到抗体浓度 $C_v$ 为

$$C_v = \frac{1}{N} \sum_{j \in N} G_{v,s}. \quad (15)$$

式中: $N$ 为抗体总数; $G_{v,s}$ 为

$$G_{v,s} = \begin{cases} 1, & S_{v,s} > T; \\ 0, & \text{其他} \end{cases}. \quad (16)$$

其中 $T$ 为预先设置的阈值,本研究按一般惯例取值为0.7。

抗体浓度的本质是一个解与集合中其他解中较为相似的解在集合所有解中所占的比例,而判断两个解是否相似就是利用阈值 $T$ 作为标准。这样做的目的是为了配合之后的步骤获取最优解,即最优的应急

物流配送中心选址方案。

第四步,记忆细胞分化。生物体在遭受抗原入侵后便会产生相应的记忆细胞,以便在此种抗原的下一次入侵中更方便地消灭抗原。在使用免疫算法求解应急物流配送中心选址问题的过程中,为了在求得最优解的同时防止陷入局部最优,需要抑制高浓度的抗体,即剔除部分比较相似的物流配送中心选址方案。然而在此过程中存在丢失最优解导致效率降低的可能性。为了防止这种情况发生,可以将与抗原亲和力较高的一些抗体(接近最优解的一些配送中心选址方案)存入记忆库,之后再按照期望繁殖率将新的抗体加入其中继续迭代。

第五步,促进与抑制抗体。为了获得最优解,需要促进与抗原亲和力较高而与其他抗体亲和力较低的抗体,也就是促进可行解中较为接近最优选址的一些方案。为了防止陷入局部最优,又需要抑制密度较高的抗体,也就是删除可行解中相似的选址方案。在每次经历过迭代后,都会剔除一部分抗体并留下记忆库中一部分最优的抗体。为了引入全局范围内新的抗体,可以构建如下繁殖期望率 $P$ :

$$P = \alpha \frac{A_v}{\sum_{v \in N} A_v} + (1-\alpha) \frac{C_v}{\sum_{v \in N} C_v}, \quad (17)$$

式中 $\alpha$ 为(0,1)间的常数。

第六步,生成新抗体。在选址问题中,可用轮盘赌选择机制随机选择个体,再通过交叉、变异等操作生成新的抗体,与之前记忆库中余留的抗体组成新群体。通过这种方式可以引入新的选址方案,从而在更大程度上搜寻到最优的物流配送中心选址方案。

第七步,输出结果。当抗体满足抗原时结束运算,最终获得的抗体即为最优抗体,也就是问题的最优解,即应急物流配送中心的最优选址方案。

## 5 算例分析:上海市应急物流配送中心选址

为了验证本文模型的有效性与可靠性,引入上海市的数据进行仿真模拟与结果分析。上海市位于长江下游的河口三角洲冲击平原,地势平坦,地处亚热带季风气候区,气候温和潮湿,降雨充沛,近年偶有洪涝灾害产生。作为一个经济发达、人口密集的城市,如果在城区内出现突发性的洪涝灾害,将对当地居民的生产生活乃至全国经济产生巨大影响。上海市一共下辖16个区,本研究将以上海市16个区作为数据采集与研究对象。主要采集上海市各区2016—2020年间各二级指标相关数据,其中,致灾因子危险性中的

降雨相关数据来源于上海市各区气象站数据; 孕灾环境敏感性中的地势数据来源于 DEM 数字高程模型数据, 河网密度数据来源于 ArcGIS 软件统计计算, 绿化未覆盖率数据来源于上海市年鉴; 承灾体脆弱性和医疗救援能力中的各项数据均来源于上海市年鉴。将收集数据进行处理之后利用灰色关联法求得各受灾地区与假想的受灾最严重地区(这一地区的各项指标数据来源与所有受灾地区各项指标的最值)之间的灰色关联度与权重如表 2 所示。

表 2 各受灾点的灰色关联度与权重  
Table 2 Grey relational degree and weight of each stricken area

编号	区域	灰色关联度	权重	编号	区域	灰色关联度	权重
1	黄浦	0.852	0.067	9	宝山	0.795	0.063
2	徐汇	0.784	0.062	10	嘉定	0.766	0.060
3	长宁	0.806	0.063	11	浦东	0.715	0.056
4	静安	0.815	0.064	12	金山	0.781	0.061
5	普陀	0.832	0.065	13	松江	0.776	0.061
6	虹口	0.866	0.068	14	青浦	0.785	0.062
7	杨浦	0.799	0.063	15	奉贤	0.773	0.061
8	闵行	0.774	0.061	16	崇明	0.799	0.063

通过计算得到各受灾区域权重, 但该数据只可粗略表示各受灾区域的受灾程度。为了更精确地表示出各区域所受灾害的强烈程度, 还应对可能导致灾害的每项因素进行灰色关联分析, 其结果如表 3 所示。

表 3 各指标的灰色关联度与权重  
Table 3 Grey relational degree and weight of each index

一级指标	二级指标	灰色关联度	权重
致灾因子危险性	极端日降雨量	0.931	0.244
	年降雨量	0.974	0.255
	最大连续降雨天数	0.930	0.244
	年降雨天数	0.984	0.257
孕灾环境敏感性	地势	0.888	0.333
	河网密度	0.847	0.318
	绿化未覆盖率	0.928	0.349
承灾体脆弱性	人口密度	0.724	0.236
	老少人口比例	0.924	0.301
	居住建筑密度	0.718	0.234
	地均 GDP	0.703	0.229
医疗救灾能力	卫生技术人员数量	0.814	0.323
	卫生机构数量	0.877	0.347
	人均 GDP	0.831	0.330

在对初始数据进行处理后, 可对各受灾地区与假想的受灾最严重地区进行灰色关联分析, 从而粗略地

获得各受灾地区受灾程度, 然后继续对可能影响灾害强弱程度的各项因素与各受灾地区粗略的受灾程度进行灰色关联分析, 从而获得各项因素与灾害强弱程度之间的关联程度。将上述计算步骤获得的结果代入式(1)中, 各受灾区域的灾害强度可通过指数化的方式表现, 如表 4 所示。

表 4 各受灾区域洪涝灾害强度系数  
Table 4 Intensity coefficient of flood disaster in each stricken area

编号	区域	洪涝灾害强度系数 $FDI_i$	编号	区域	洪涝灾害强度系数 $FDI_i$
1	黄浦	2.861	9	宝山	2.025
2	徐汇	1.995	10	嘉定	1.530
3	长宁	2.433	11	浦东	0.164
4	静安	2.583	12	金山	1.613
5	普陀	2.775	13	松江	1.662
6	虹口	3.266	14	青浦	1.678
7	杨浦	2.354	15	奉贤	1.590
8	闵行	1.621	16	崇明	1.854

洪涝灾害发生后, 为了保障当地居民安全, 有关政府部门需迅速响应, 高效进行救援工作。应急管理部门为了综合权衡救援成本与救援效率, 预计为灾民每人分发 1 单位应急物资, 并从上海市各受灾区域中选出 3 处设置大型应急物流配送中心, 利用大型应急物流配送中心辐射相邻地区, 提高救援效率, 降低运输成本, 减少人员伤亡。

通过 Matlab 软件, 利用免疫算法有关计算步骤对案例进行求解。算法基本参数设置种群规模为 40, 记忆库容量为 10, 迭代次数为 100, 交叉概率为 0.5, 变异概率为 0.4, 多样性评价参数为 0.95, 配送中心数为 3。运算结果如图 3、图 4 所示。

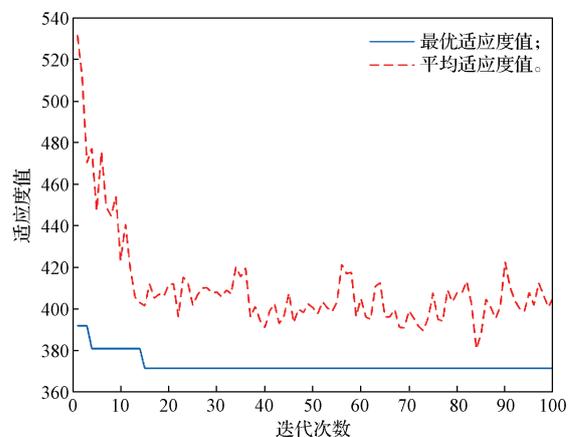


图 3 免疫算法收敛曲线图

Fig. 3 Convergence curve diagram of the immune algorithm

由图 3 可知, 在第 3 次迭代时出现了十分接近最

优解的结果,在迭代15次之后出现了最优解并开始收敛,免疫算法寻优效果良好,效率较高。

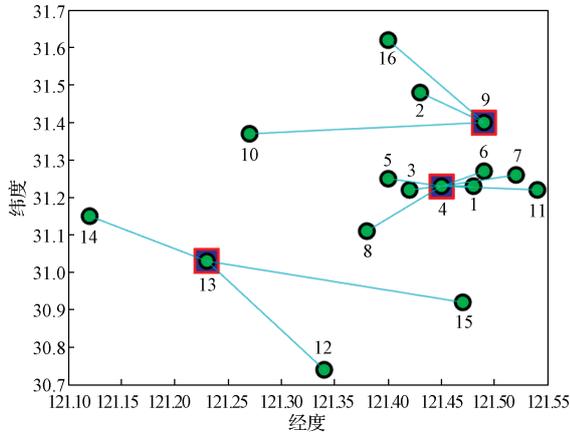


图4 应急物流配送中心选址图

Fig. 4 Location map of emergency logistics distribution center

由图4可知(图4中各点的编号与表2、表4中各区域的编号相对应),选择松江区、静安区和宝山区作为应急物流配送中心负责周边地区的应急物资配送工作较优,松江区应急物流配送中心负责青浦区、金山区、奉贤区的物资配送工作,静安区应急物流配送中心负责长宁区、徐汇区、闵行区、虹口区、黄浦区、杨浦区、浦东区的物资配送工作,宝山区应急物流配送中心负责普陀区、嘉定区、崇明区的物资配送工作。需要注意的是,该结论并非表示在上海市区域范围内仅需要设置3处配送中心,而是表示在全市范围内只设置3处大型应急物流配送中心的情况下,可以优先考虑在这3处设置配送中心,并且根据各地区实际情况的不同,可能需要在在这3处大型应急物流配送中心之下再设置次级或更次级的应急物流配送中心以满足不同地区的需求。同时,本文的选址方法不仅适用于解决灾后救援的应急物流配送中心选址问题,也可用于解决灾前搭建应急储备物资库的选址问题。

## 6 结语

面对影响范围广泛、具有强致灾性的洪涝灾害,应急救援工作的效率尤为关键。当自然灾害冲击人类社会的日常运转时,除了人们众志成城的顽强抵抗精神外,唯有合理的救援决策才能有效提高应急救援工作效率,而应急物流配送中心的选址策略便是其中之一。本研究首先通过搜集地区有关数据合理评估洪涝灾害的相对强度;然后在考虑各地不同洪涝灾害强度的前提下,综合考虑物流成本、物流效率等因素构建应急物流配送中心选址模型;最后通过免疫优化算法对上海市算例进行求解,验证了该方法的合理性与有

效性。值得指出的是,本文针对单个城市研究考虑洪涝灾害强度下应急物流配送中心的选址问题,存在着各区域间致灾因子危险性差异较小的问题,但当研究范围扩大到更广阔的地区,如一个省或多个市时,该因素会变得更加重要。在实际的应急物流中心选址中,可能还会遇到更加复杂的情形,可以考虑去掉本文中的一些假设做进一步的分析,还可考虑将应急管理的其它环节与选址问题相结合进行集成优化,进一步提高应急救援的效率和经济性。

## 参考文献:

- [1] 张杏雯,倪静.公平约束下的应急物资配送模型及算法[J].统计与决策,2020,36(7):179-182.  
ZHANG Xingwen, NI Jing. Model and Algorithm of Emergency Material Distribution Under Fair Constraints[J]. Statistics & Decision, 2020, 36(7): 179-182.
- [2] 倪卫红,陈太.基于聚类-重心法的应急物流配送中心选址[J].南京工业大学学报(自然科学版),2021,43(2):255-263.  
NI Weihong, CHEN Tai. Location Selection of Emergency Logistics Distribution Center Based on Clustering-Center of Gravity Method[J]. Journal of Nanjing Tech University (Natural Science Edition), 2021, 43(2): 255-263.
- [3] 席月,魏麟苏.基于AHP模型的应急物资储备库选址研究:以南京市为例[J].物流工程与管理,2021,43(8):29-31,54.  
XI Yue, WEI Linsu. Research on Location Selection of Emergency Material Storage Based on AHP Model: A Case Study of Nanjing City[J]. Logistics Engineering and Management, 2021, 43(8): 29-31, 54.
- [4] 生力军.基于量子粒子群算法的物流配送中心选址[J].科学技术与工程,2019,19(11):183-187.  
SHENG Lijun. Location of Logistics Distribution Center Based on Quantum Particle Swarm Optimization[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(11): 183-187.
- [5] 商丽媛,谭清美.不确定应急物流中心选址模型及算法研究[J].计算机应用研究,2013,30(12):3603-3605.  
SHANG Liyuan, TAN Qingmei. Research of Model and Algorithm for Uncertain Emergency Logistics Center Location[J]. Application Research of Computers, 2013, 30(12): 3603-3605.
- [6] 闫森,齐金平.考虑需求不确定的多级应急物流设施选址研究[J].运筹与管理,2022,31(9):7-13.  
YAN Sen, QI Jinping. Research on Location Selection of Multi-Level Emergency Logistics Facilities Under

- Uncertain Conditions[J]. *Operations Research and Management Science*, 2022, 31(9): 7-13.
- [7] 马丽荣, 张变亚. 甘肃省应急物流配送中心选址问题研究[J]. *物流科技*, 2021, 44(12): 41-43.  
MA Lirong, ZHANG Bianya. Research on Location of Distribution Center About Emergency Logistics in Gansu Province[J]. *Logistics Sci-Tech*, 2021, 44(12): 41-43.
- [8] 平环, 宋初一, 姜静清. 自适应免疫算法在物流配送中心选址中的应用[J]. *内蒙古民族大学学报(自然科学版)*, 2017, 32(5): 406-411.  
PING Huan, SONG Chuyi, JIANG Jingqing. Application of Self-Adaptive Mutation Immune Algorithm in Logistics Distribution[J]. *Journal of Inner Mongolia University for Nationalities (Natural Sciences)*, 2017, 32(5): 406-411.
- [9] 张超, 吴奎, 钱昊, 等. 考虑川藏铁路特长隧道的工程物资储备基地选址问题研究[J]. *铁道标准设计*, 2021, 65(7): 143-148.  
ZHANG Chao, WU Kui, QIAN Hao, et al. Study on Site Selection of Engineering Material Reserve Base for the Extra Long Tunnel of Sichuan-Tibet Railway[J]. *Railway Standard Design*, 2021, 65(7): 143-148.
- [10] 陈美花, 张惠珍. 双层级设施选址问题及其混合免疫优化算法[J/OL]. [2023-03-21]. *控制工程*. <https://doi.org/10.14107/j.cnki.kzgc.20220113>.  
CHEN Meihua, ZHANG Huizhen. Two-Level Facility Location Problem and Hybrid Immune Optimization[J], [2023-03-21]. *Control Engineering of China*. <https://doi.org/10.14107/j.cnki.kzgc.20220113>.
- [11] 李伟斌, 吴芳, 张燕. 基于免疫算法的共享电动汽车网点选址研究[J]. *兰州交通大学学报*, 2022, 41(1): 34-39, 51.  
LI Weibin, WU Fang, ZHANG Yan. A Research on Location of Shared Electric Vehicle Stations Based on Immune Algorithm[J]. *Journal of Lanzhou Jiaotong University*, 2022, 41(1): 34-39, 51.
- [12] 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.  
ZHOU Yuyang, ZHANG Huizhen, MA Liang. An Improved Immune Algorithm for Solving Hierarchical and Progressive Location Problem of Emergency Medical Facilities[J]. *Operations Research Transactions*, 2021, 25(2): 15-34.
- [13] ALAM M J, HABIB M A, POTHIER E. Shelter Locations in Evacuation: A Multiple Criteria Evaluation Combined with Flood Risk and Traffic Microsimulation Modeling[J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2021, 53: 102016.
- [14] HU S S, CHENG X J, ZHOU D M, et al. GIS-Based Flood Risk Assessment in Suburban Areas: A Case Study of the Fangshan District, Beijing[J]. *Natural Hazards*, 2017, 87(3): 1525-1543.
- [15] 刘媛媛, 王绍强, 王小博, 等. 基于AHP\_熵权法的孟印缅地区洪水灾害风险评估[J]. *地理研究*, 2020, 39(8): 1892-1906.  
LIU Yuanyuan, WANG Shaoqiang, WANG Xiaobo, et al. Flood Risk Assessment in Bangladesh, India and Myanmar Based on the AHP Weight Method and Entropy Weight Method[J]. *Geographical Research*, 2020, 39(8): 1892-1906.
- [16] 宋英华, 高晓茜, 霍非舟, 等. 考虑洪涝灾害风险的城市应急避难场所选址研究[J]. *中国安全生产科学技术*, 2022, 18(6): 31-37.  
SONG Yinghua, GAO Xiaoxi, HUO Feizhou, et al. Study on Site Selection of Urban Emergency Shelters Consider Risk of Flood Disaster[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2022, 18(6): 31-37.
- [17] 程玉龙, 黄莹莹, 任园园, 等. 基于免疫算法的物流配送中心的选址优化: 以新疆兵团第一师为例[J]. *现代农业装备*, 2022, 43(4): 22-28.  
CHENG Yulong, HUANG Yingying, REN Yuanyuan, et al. Location Optimization of Logistics Distribution Center Based on Immune Algorithm: Take the First Division of Xinjiang Corps As an Example[J]. *Modern Agricultural Equipment*, 2022, 43(4): 22-28.

(责任编辑: 姜利民)