

DOI:10.3969/j.issn.2096-8248.2024.01.009

## 海洋应急救援站点选址和资源配置优化\*

隋福利<sup>a</sup>, 董自豪<sup>b</sup>, 孙靖<sup>b</sup>

(江苏海洋大学 a. 应用技术学院 222069; b. 理学院 222005, 江苏 连云港)

**摘要:** 应急救援站点选址与资源配置问题是海上应急站点管理领域中的一个重要研究方向。已有方法针对的是确定资源配置的选址问题或确定选址的资源配置问题,而未同时考虑这两者的结合问题。鉴于此,针对应急救援站点选址与资源配置的综合问题进行了研究。首先采用基于距离衰减函数的两步移动搜索法,以满足事故点资源需求和提高事故点资源获取效率为目标建立了多目标优化模型;然后利用蚁群算法和分布估计算法的优点,设计求解上述模型的蚁群分布估计算法,生成站点选址与资源配置方案;最后,在仿真实验上,验证了模型的可行性和算法的有效性。所提模型与算法可以解决海洋应急救援站点及其他类似领域的选址与资源配置优化问题。

**关键词:** 站点选址; 资源配置; 多目标优化; 蚁群算法; 分布估计算法

中图分类号: TP399

文献标志码: A

文章编号: 2096-8248(2024)01-0066-09

**引用格式:** 隋福利, 董自豪, 孙靖. 海洋应急救援站点选址和资源配置优化[J]. 江苏海洋大学学报(自然科学版), 2024, 33(1): 66-74.

## Optimization of Site Selection and Resource Allocation for Marine Emergency Rescue Stations

SUI Fuli<sup>a</sup>, DONG Zihao<sup>b</sup>, SUN Jing<sup>b</sup>

(a. School of Applied Technology, 222069; b. School of Science, 222005, Jiangsu Ocean University, Lianyungang, China)

**Abstract:** The selection and resource allocation of emergency rescue stations is an important research direction in the field of offshore emergency station management. The existing methods focus on the location problem of determining resource allocation or the resource allocation problem of determining location, without considering the combination of both. In view of this, a comprehensive study was conducted on the site selection and resource allocation of emergency rescue stations. Firstly, a two-step moving search method based on distance attenuation function was adopted to establish a multi-objective optimization model with the goal of meeting the resource requirements of accident points and improving the efficiency of resource acquisition. Then, utilizing the advantages of ant colony algorithm and distribution estimation algorithm, an ant colony distribution estimation algorithm was designed to solve the above model, and a site selection and resource allocation plan was generated. Finally, the feasibility of the model and the effectiveness of the algorithm were verified through simulation experiments. The proposed model and algorithm can solve the optimization problems of site selection and resource allocation for marine emergency rescue stations and other similar fields.

\* 收稿日期: 2023-09-14; 修订日期: 2023-10-24

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(62373171)

作者简介: 隋福利(1972—), 男, 吉林乾安人, 讲师, 研究方向为管理与控制, (E-mail) 1997000054@jou.edu.cn.

通信作者: 董自豪(2001—), 男, 江苏连云港人, 硕士研究生, 研究方向为优化算法及其应用, (E-mail) 1254944551@qq.com.

**Key words:** site selection; resource allocation; multi-objective optimization; ant colony algorithm; distribution estimation algorithm

## 0 引言

根据海上事故灾难的严重程度以及救援需求的不同,海上救援任务类型也各不相同,主要有以下几种<sup>[1]</sup>:海上搜救、资源补给及维修等应急援助。而开展救援任务也要注意快速到位、灵活选用救援方法等要点。所以,合理地设置应急救援站点和运用海警舰船、飞行器等救援装备进行救援非常重要。但当前海上应急救援站点的设置及其资源配置并不完善,这就导致出现海上事故时人身安全极易受到威胁,社会及自然环境也可能遭到巨大破坏。鉴于此,本文针对海上应急救援站点选址及其资源配置综合问题进行了研究。

目前,应急选址类研究主要集中于三个方面:仅考虑应急设施的选址研究;在已有应急设施基础上考虑应急资源的配置研究;综合考虑选址和资源配置的集成类研究。

仅考虑应急设施选址的研究中,首先出现以下两个模型:Toregas 等<sup>[2]</sup>将应急站点的选址问题转化为数学集合覆盖问题,即在事先给定的救援站点备选集合中,选择最少的站点来满足所有应急需求;Church 等<sup>[3]</sup>则建立了最大覆盖模型,在救援站点数目给定情况下,以最大化救援站点集合的覆盖率为目标。后来的研究也大多建立在以上两个模型的基础之上,如王成等<sup>[4]</sup>提出基于覆盖率的递归  $K$ -均值方法,该方法不需要事先给定  $K$  值,可以自动得出最佳聚类个数(即救援站点的个数与最佳位置);杨舜等<sup>[5]</sup>以站点个数为目标,以救援时间及站点位置为限制建立 0-1 规划模型并用 lingo 进行求解;王斌等<sup>[6]</sup>构建不确定需求下危化品运输事故应急资源配置选址多目标决策模型,并利用免疫算法对模型进行求解,实现最大化被覆盖事故点的收益期望和衰减型救援能力,最小化随机应急救援时间等多个目标。段晓红等<sup>[7]</sup>以应急站点数量最少和总响应时间最短为优化目标,地铁站重要程度为关键因素,建立各地铁站的多目标优化模型,并且提出了一种多目标分布估计算法。然而,这些选址模型没有考虑救援站与事故点间的资源供需关系,从而造成救助资源的过度浪费或导致站点救助能力不足。

在仅考虑应急资源配置的研究中,为科学评价

应急资源配置效率,分析现阶段配置方案存在的问题,江福才等<sup>[8]</sup>在构建水上应急资源配置评价指标体系的基础上,利用变异系数法 CV 计算各评价指标的标准差系数作为附加权重,对传统数据包络分析法 DEA 中自带的权重进行约束,得到改进的 CV-DEA 水上应急资源配置效率评价模型。该模型解决了传统 DEA 模型评价结果过度有效的问题;张昕怡等<sup>[9]</sup>考虑设施可达性会随着出行距离的改变而衰减的问题,以高斯函数作为距离衰减函数对两步移动搜索法进行改进,该模型充分考虑了救援站与事故点间的资源供需关系。这些模型仅考虑服务效率,因此选址可能无法满足海上救援需求或者不适应于海上复杂情况。

因此,综合考虑选址和资源配置的集成类研究是十分必要的。但目前该类文献数量较少,也没有高效解决应急救援站点选址和资源配置问题。Ai 等<sup>[10]</sup>以最大覆盖模型为基础,建立离散非线性整数规划模型,在资源配置中加入船型因素,以总成本最低为目标进行海上应急救援站点的选址,提高了资源利用效率。但该研究仅考虑了将救援站点设置在港口的情况,没有考虑将救援站点设置在海上的情况。娄帅等<sup>[11]</sup>建立了综合考虑救助船船型、高风险水域多重覆盖和搜救责任区需求的多重集合覆盖模型,并使用蚁群算法对模型进行求解,但其要求救援站的资源配置大于事故点的资源需求,该约束考虑过于简单,无法准确体现两种供需关系。

鉴于此,本文采用基于距离衰减函数的两步移动搜索法,以满足事故点的资源需求和提高事故点的资源获取效率为目标建立多目标优化模型,分析改进蚁群算法和改进分布估计算法求解选址及资源配置模型的优缺点,设计蚁群分布估计算法求解上述模型,最后通过仿真实验来证明本文多目标优化模型的可行性与蚁群分布估计算法的有效性。

## 1 问题描述

如图 1 海域及事故点示意图,在长宽均为  $W$  的方形水域中,记  $J = \{j_1, j_2, \dots, j_{W^2}\}$  为区域栅格化后的格点所构成集合; $I = \{i_1, i_2, \dots, i_m\}$  为该区域内  $m$  个事故点所构成的集合; $A = \{j_1, j_2, \dots, j_{i+n-1}\}$  为  $n$

个救援站点所构成的集合;  $Q = \{q_1, q_2, \dots\}$  为可供站点选择的资源配置集合。

本文的研究问题是根据事故点的严重程度和救援站与事故点的距离,合理选择建造救援站的坐标并为其分配合适的资源配置,以恰当满足各事故点的资源需求并提高事故点的资源可达性。

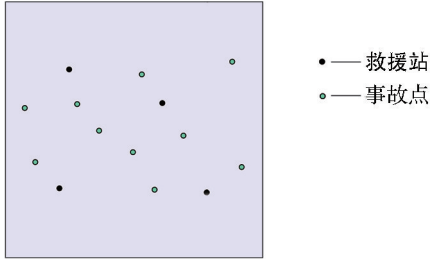


图1 海域及事故点示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sea area and accident points

## 2 站点选址与资源配置模型

为了使各事故点的资源需求都尽量被满足,首先对各个事故点的资源未满足量取绝对值,然后将每个值加1后进行累乘,以此作为救援站选址及资源配置结果的评价标准。但救援站选址与配置不能仅以事故点的资源被满足情况决定,还需要考虑到各个事故点的资源获取能力。因此需对结果再引入一个评价标准,以确保解既能使事故点的资源需求被满足,又能使事故点的资源获取能力尽可能强。

本文采用基于引入距离衰减函数的两步移动搜索法,计算救援站的资源供用能力与事故点的可达性,以可达性之和作为第二个目标函数,最后以这两个评价标准为目标函数,建立多目标优化模型。所以首先介绍改进两步移动搜索法的可达性分析,然后再介绍站点选址与资源配置的多目标优化模型。

### 2.1 问题假设

这里给出以下两个假设:

(1) 假设救援站的资源运输损耗率与运输距离成线性关系;

(2) 假设天气、海上障碍物对于救援站的资源运输损耗率无影响。

### 2.2 改进两步移动搜索法的可达性分析

目前同时考虑选址与资源配置问题的研究较少,且其模型大多仅考虑了救援站与事故点间的资源供需关系,而未涉及资源供应能力。这就会导致虽然各事故点的资源未被满足量较小,但其资源获

取能力差异较大。

两步移动搜索法最早由 Rakde 等<sup>[12]</sup>提出,该方法不仅可以反映救援站的资源供应能力,还能反映事故点的资源获取能力。在此基础上,本文考虑到距离对于资源供给的影响,引入了距离衰减函数。基于距离衰减的两步移动搜索法计算步骤如下。

第一步,计算救援站的供需比,公式为

$$G_j = \frac{S_j}{\sum_{i \in d_{ij} \leq d_0} R_i (1 + \frac{d_{ij}}{d_0})} \quad (1)$$

式中:  $S_j$  表示救援站  $j$  的资源配置量;  $d_{ij}$  表示事故点  $i$  与救援站  $j$  之间的距离;  $d_0$  表示救援站的搜索阈值;  $R_i$  表示事故点  $i$  的当前资源需求量。因为救援站的资源供应能力是随距离  $d_{ij}$  增加而减小的,反之即事故点的资源需求随距离  $d_{ij}$  增加而增加,所以分母表示在救援站  $j$  的  $d_0$  检测范围内所有事故点的资源需求总和。

一个救援站的供需比越大,则该救援站的资源供给能力越强;反之一个救援站的供需比越小,则该救援站供给资源供给能力越弱。

第二步,计算可达性。首先确定所有距离事故点  $i$  小于  $d_0$  的救援站,然后计算这些救援站供需比之和。可达性计算公式为

$$D_i = \sum_{j \in d_{ij} \leq d_0} \frac{S_j}{\sum_{i \in d_{ij} \leq d_0} R_i (1 + \frac{d_{ij}}{d_0})} \quad (2)$$

式中:  $i \in d_{ij} \leq d_0$  表示在救援站  $j$  搜索阈值  $d_0$  内的所有事故点;  $j \in d_{ij} \leq d_0$  表示在搜索阈值  $d_0$  内包含事故点  $j$  的所有救援站;  $R_i$  表示事故点  $i$  的当前资源需求量。可达性越大,表明事故点获得资源的能力就越强。

通过上述改进两步移动搜索法的可达性分析,最大化事故点获取资源能力的目标函数可表示为

$$\max_{j \in J} \sum_{i=1}^m D_i \Leftrightarrow \max_{j \in J} \sum_{i=1}^m \sum_{j \in d_{ij} \leq d_0} \frac{S_j}{\sum_{i \in d_{ij} \leq d_0} R_i (1 + \frac{d_{ij}}{d_0})} \quad (3)$$

### 2.3 事故点需求满足情况分析

首先介绍衡量事故点  $i$  需求满足情况的公式。为了使事故点  $i$  的需求被满足,事故点  $i$  的当前资源需求量  $R_i$  应尽可能接近于 0。  $R_i$  计算公式为

$$R_i = r_i - \sum_{j \in d_{ij} \leq d_0} T_{ij} \quad (4)$$

其中:  $r_i$  表示未进行救援站选址与资源配置时,事故点  $i$  的资源需求量;  $T_{ij}$  表示救援站  $j$  可为事故点

$i$  提供的实际资源供给量。由于救援站的供给能力是随与事故点的距离增加而减少的,所以  $T_{ij}$  计算公式可表示为

$$T_{ij} = S_j \cdot (1 - d_{ij}/d_0)。 \quad (5)$$

式中: $S_j$  表示救援站  $j$  的资源配置量; $d_{ij}$  表示事故点  $i$  与救援站  $j$  之间的距离; $d_0$  表示救援站的搜索阈值。

由此可以得到最小化事故点的资源未满足量的目标函数为

$$\begin{aligned} & \min \prod_{j \in J} \prod_{i=1}^m (1 + |R_i|) \Leftrightarrow \\ & \min \prod_{j \in J} \prod_{i=1}^m (1 + |R_i = r_i - \sum_{j \in d_{ij} \leq d_0} S_j \cdot (1 - d_{ij}/d_0)|)。 \end{aligned} \quad (6)$$

式中的  $m$  表示事故点的总数。此处使用  $1 + |R_i|$  累乘而不用  $|R_i|$  的原因是,在确定所有救援站选址与配置后,可能出现极接近 0 的资源未满足量,这就会导致目标函数无法反映其他资源未满足量较高的事故点。

#### 2.4 站点选址及资源配置模型

基于海域一段时间内事故发生的位置与规模,本文选取事故代表点并确定事故点的资源所需量,然后仅针对这些代表点进行救援站选址与资源配置。而对于未发生事故的区域,假设其在未来也不会发生事故。在这种情况下,为了缩小解空间的大小,本文进一步作出如下约束,每个救援站的搜索范围内都至少应该包含一个事故点。约束条件为

$$\min \{d_{1h}, \dots, d_{ih}, \dots, d_{mh}\} < d_0, h = 1, 2, \dots, n。 \quad (7)$$

其中的  $n$  表示救援站的总个数。

综上,救援站的选址与资源配置的多目标优化模型如下所示:

$$\begin{aligned} & \max \sum_{i=1}^m D_i; \\ & \min \prod_{i=1}^m (1 + |R_i|); \\ & \text{s. t. } \min \{d_{1h}, d_{2h}, \dots, d_{ih}\} < d_0, h = 1, 2, \dots, n。 \end{aligned} \quad (8)$$

### 3 蚁群分布估计算法

本节首先介绍适用于求解选址与资源配置问题的改进蚁群算法与改进分布估计算法,并分析其优

缺点;然后提出求解模型(8)的蚁群分布估计算法。

#### 3.1 改进蚁群算法

蚁群算法(ant colony optimization, ACO)由意大利学者 Colormi A 等于 1991 年提出<sup>[13]</sup>,是一种基于模拟蚁群寻找食物路径的生物启发式优化算法。蚁群算法解决优化问题的基本思路为:将蚂蚁的行走路径看作待优化问题的可行解,整个蚂蚁种群的所有路径就构成了待优化问题的解空间。因为蚂蚁在路径上释放信息素的多少与解的好坏成正比,所以随着种群迭代,较好的路径上累积的信息素浓度逐渐增高,选择该路径的蚂蚁也愈来愈多。最终,整个种群都会在正反馈的作用下收敛到最佳路径上,此时对应的便是待优化问题的最优解。

针对选址与资源配置问题,改进蚁群算法如下:首先初始化算法相关参数;然后,各蚂蚁随机选择格点作为第一个救援站选址,并且为该救援站随机选择资源配置;其次,计算各蚂蚁当前所在格点与其余格点的启发因子、转移概率和资源配置概率;最后,根据当前格点与其他格点间的转移概率选择下一个格点作为第二个救援站,并且根据格点资源配置概率,选择格点资源配置。重复上述操作,直至蚂蚁选择的总格点数与预期建立救援站的总个数相等时,种群生成完毕。接下来就是计算个体的适应度和可达性,使用适应度选取优势个体,使用可达性对位置和概率信息素进行更新。循环上述流程,直至达到最大迭代次数,输出最优结果。

改进蚁群算法的启发因子、适应值函数、信息素等算子的计算公式如下:

由当前位于格点  $k$  上的救援站,选择格点  $j$  作为下一个救援站的启发因子计算公式为

$$h_{kj} = \sum_{i \in d_{ij} \leq d_0} R_i \frac{d_0}{d_{ij} + d_0}。 \quad (9)$$

式中: $h_{kj}$  表示当前位于格点  $k$  上的救援站,选择格点  $j$  作为下一个救援站的启发因子,并且由公式可见,它与在其检测范围内事故点的需求量成正比,两者距离成反比; $R_i$  表示在根据当前已确定的救援站选址与配置,事故点  $i$  的资源所需量与救援站资源提供量的差值; $i \in d_{ij} \leq d_0$  表示在救援站  $j$  搜索阈值  $d_0$  内的所有事故点。

第  $a$  只蚂蚁所生产种群的适应值计算公式为

$$\text{fit}(a) = \prod_{i=1}^m (1 + |R_i|)。 \quad (10)$$

第  $a$  只蚂蚁所生产种群的信息素计算公式为

$$T_{kj}^a(t) = \begin{cases} \sum_{i=1}^m D_i, & \text{蚂蚁 } a \text{ 依次选择格点 } k, j \text{ 为救援站;} \\ 0, & \text{其他。} \end{cases} \quad (11)$$

$T_{kj}^a(t)$ 表示第  $a$  只蚂蚁在第  $t$  次迭代中,格点  $k$  与格点  $j$  间的信息素,即所有事故点可达性之和。

信息素更新公式为

$$T_{kj}(t+1) = (1-\rho)T_{kj}(t) + \sum_{a=1}^{\max} T_{kj}^a(t+1). \quad (12)$$

$T_{kj}(t+1)$ 表示在第  $t+1$  次迭代中,当前位于格点  $k$  上的救援站,选择格点  $j$  作为下一个救援站的信息素。

转移概率公式为

$$p_{kj}^a(t) = \begin{cases} \frac{[h_{kj}(t)]^\alpha [T_{kj}]^\beta}{\sum_{j \in J} [h_{kj}(t)]^\alpha [T_{kj}]^\beta}, & j \in J; \\ 0, & \text{其他。} \end{cases} \quad (13)$$

$p_{kj}^a(t)$ 表示在第  $t$  次迭代中,当前位于格点  $k$  上的救援站,选择格点  $j$  作为下一个救援站的概率。 $\alpha$  与  $\beta$  分别代表启发因子与信息素的重要程度。

上述改进的蚁群算法虽然能够求解选址与资源配置的多目标优化模型,但也仅适用于  $W$  极小的环境。因为在前期迭代中,算法基于启发因子能够较好地进行救援站选址及资源配置,但由于格点与格点间的信息素矩阵大小为  $W^2 \cdot W^2$  ( $W \cdot W$  的环境),所以这就导致当  $W$  过大时,算法难以收敛。

### 3.2 改进分布估计算法

分布估计算法<sup>[14]</sup>是一种新兴的基于统计学原理的随机优化算法,它通过对搜索空间采样和统计学习来预测搜索的最佳区域,进而产生优秀的个体。相较于传统智能优化算法如遗传算法采用基于个体交叉变异的微观层面进化方法,分布估计算法采用基于搜索空间的宏观层面的进化方法,具备更强的全局搜索能力和更快的收敛速度。

针对选址与资源配置问题,改进的分布估计算法为:首先初始化格点选址概率与资源配置概率模型和种群;然后计算适应值,据此选出优秀个体;根据优秀种群的可达性,以及种群中救援站的位置与资源配置,更新格点选址概率与资源配置概率;最后循环上述过程,直至达最大迭代次数。

改进分布估计算法的算子公式如下。

选址与资源配置概率的计算公式为

$$p1_j(t+1) = p1_j(t) + \sum_{A^a \ni J} \sum_{i=1}^m D_i^a, \quad (14)$$

$$p2_{jq}(t+1) = p2_{jq}(t) + \sum_{A^a \ni J} \sum_{i=1}^m 1. \quad (15)$$

式中: $A^a$ 表示个体  $a$  的坐标; $J$ 为区域栅格化后的格点所构成的集合; $D_i^a$ 表示个体  $a$  在事故点  $i$  处的可达性; $p1_j(t)$ 表示在第  $t$  次迭代中,格点  $j$  被选为站点的概率; $p2_{jq}(t)$ 表示在第  $t$  次迭代中,站点  $j$  资源配置为  $q$  的概率。此外所有格点在第一次迭代中被选为站点的概率都相等且资源配置的概率也都相等。

转移概率的计算公式为

$$P1_j(t) = \frac{p1_j}{\sum_{j \in J} p1_j}, \quad (16)$$

$$P2_{jq}(t) = \frac{p2_{jq}}{\sum_{j \in J} p2_{jq}}. \quad (17)$$

式中: $P1_j(t)$ 表示此次站点选址,选择格点  $j$  作为救援站的概率; $P2_{jq}(t)$ 表示格点  $j$  被选作救援站后,它选择资源配置为  $q$  的概率。

该算法简单易于理解,且其概率矩阵较小,例如在  $W \cdot W$  的环境中,两个概率矩阵大小均为  $W \cdot W$ ,该算法能够较快收敛,但是其格点选址与资源配置概率在每一次迭代中都是不变的,这就导致优秀的格点可能会被多次选为救援站。而无论从理论还是实际出发,当一个格点已被选为救援站后,那么其附近格点被选为救援站的概率都是应该降低的。

### 3.3 蚁群分布估计算法

蚁群算法因信息素矩阵过大,所以难以收敛;而分布估计算法因为仅根据概率矩阵选址与配置,所以会导致同一个格点被重复选择。鉴于此,本文综合考虑两者的优缺点,提出如下蚁群分布估计算法。

首先初始化种群规模、选址概率矩阵与资源配置概率矩阵等参数;然后计算启发因子,结合位置概率确定站点转移概率,根据转移概率与资源概率为每个个体确定一个站点位置及配置,并且更新此时事故点的当前需求  $R_i$ ,以及事故点可达性之和;重复上述操作至站点个数等于救援站个数时,种群生成任务完成且种群可达性也已知;接下来计算种群适应值并选取优势种群,使用优势种群的可达性对位置及资源概率模型进行更新;最后重复上述操作,直至达到最大迭代次数,输出最优结果。算法流程如图2蚁群分布估计算法流程图所示。

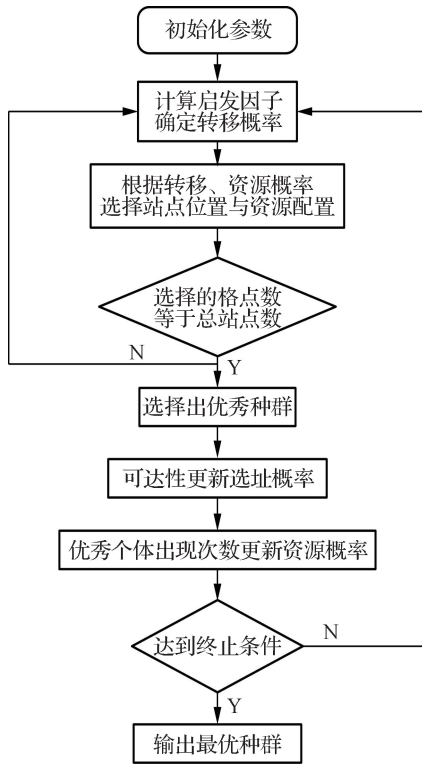


图 2 蚁群分布估计算法流程

Fig. 2 Flow chart of ant colony distribution estimation algorithm

蚁群分布估计算法算子公式如下。

启发因子的计算公式为

$$h_j = \sum_{i \in d_{ij} \leq d_0} R_i \frac{d_0}{d_{ij} + d_0} \quad (18)$$

式中:  $h_j$  表示选择格点  $R_i$  作为救援站的启发因子;  $R_i$  表示在根据当前已确定的救援站选址与配置, 事故点  $i$  的资源所需量与救援站资源提供量的差值;  $i \in d_{ij} \leq d_0$  表示在救援站  $j$  搜索阈值  $d_0$  内的所有事故点。

选址与资源配置概率的计算公式为

$$p1_j(t+1) = \alpha \cdot p1_j(t) + (1-\alpha) \sum_{A^a=j}^m D_i^a, \quad (19)$$

$$p2_{jq}(t+1) = \alpha \cdot p2_{jq}(t) + (1-\alpha) \sum_{A^a=j}^m \sum_{i=1}^m 1. \quad (20)$$

式中:  $\alpha$  表示削弱因子;  $A^a$  表示个体  $a$  的坐标;  $J$  为区域栅格化后的格点所构成的集合;  $D_i^a$  表示个体  $a$  在事故点  $i$  处的可达性;  $p1_j(t)$  表示在第  $t$  次迭代中, 格点  $j$  被选为站点的概率;  $p2_{jq}(t)$  表示在第  $t$  次迭代中, 站点  $j$  资源配置为  $q$  的概率。此外所有格点在第一次迭代中被选为站点的概率都相等且资

源配置的概率也都相等。

转移概率的计算公式为

$$P1_j(t) = \frac{h_j \cdot p1_j}{\sum_{j \in J} h_j \cdot p1_j}, \quad (21)$$

$$P2_{jq}(t) = \frac{p2_{jq}}{\sum_{j \in J} p2_{jq}}. \quad (22)$$

式中:  $P1_j(t)$  表示在此次迭代选择格点  $j$  作为救援站的概率;  $P2_{jq}(t)$  表示格点  $j$  被选作救援站后选择资源配置为  $q$  的概率。

此算法的转移概率中包含启发因子, 这保证算法前期能够较好地进行救援站选址及资源配置, 并且避免在同一区域内重复选择站点; 此算法的概率矩阵大小为  $W \cdot W$ , 这使得算法能够随迭代进行而逐渐收敛, 即随迭代而优化解空间的搜索范围。因此蚁群分布估计算法作为蚁群算法和分布估计算法的结合, 兼具两者优点, 能够出色地求解选址与资源配置的多目标优化模型。

## 4 仿真实验

分别使用蚁群分布估计算法与分布估计算法对指定实验环境下的双目标优化模型求解, 通过结果对比来验证蚁群分布估计算法的有效性。未选择蚁群算法进行对比实验的原因是: 蚁群算法信息素矩阵过于庞大, 显然是无法收敛的, 因而其结果一定是随机的、更差的。

### 4.1 实验环境

实验环境: 地图长  $W = 100$ ; 事故点个数  $m = 10$ ; 资源配置类型  $q = \{10, 20\}$ ; 选取的救援站个数  $n$  分别为 5, 10, 15。事故点坐标及资源需求见表 1, 事故点坐标如图 3 所示。

表 1 事故点坐标及需求

Table 1 Coordinates and requirements of accident points

坐标		需求
$x$	$y$	
15	20	15
20	15	10
50	50	5
20	30	10
35	60	15
75	20	12
55	70	5
90	80	10
50	40	10
65	50	3

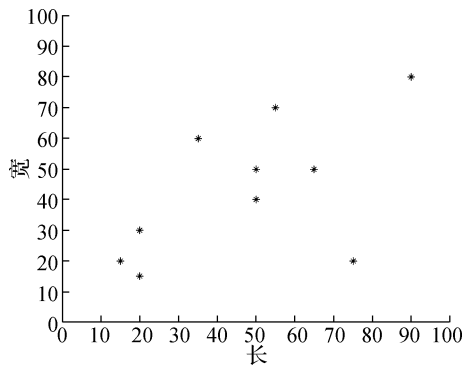


图3 实验环境坐标

Fig. 3 Coordinatemap of experimental environment

## 4.2 结果分析

在对实验结果进行分析前,必须先指出一种对救援站点设置和资源优化的错误认识:当救援站的个数大于事故点个数时,仅需将各个救援站分别建造在事故点上或事故点附近,即可满足所有事故点的救援需求。因为,即使救援站建造在事故点上或事故点附近,在该救援站的搜索范围内可能仍然含有其他事故点,并且救援站的资源供给能力是随着救援距离的增加而衰减的,因此也无法将全部配置资源仅分配给附近的一个事故点。

在图3所示实验环境下,救援站个数为5,10,15时,分别使用分布估计算法、蚁群分布估计算法对双目标优化模型进行求解。在上述情景下,使用两种算法求解双目标优化模型,表2为得到的目标函数值,表3为各个事故点的当前资源需求量与可达性,表4为各个救援站的选址与资源配置量,图4为得到的救援站位置坐标,图5为得到的救援站与事故点位置坐标图。

由表2数据可以看出,一方面,随着救援站个数的增加,事故点的资源满足情况得到明显的提升,且事故点获取资源的能力明显提高;另一方面,无论是事故点的资源满足情况还是事故点的获取资源能力,蚁群估计算法的结果在各种情况下都优于分布估计算法。

通过分析表3的数据可以发现,蚁群分布估计算法下各个事故点的资源需求量距0的偏差较小,而分布估计算法距0的偏差则较大,这也表明蚁群分布估计算法的性能更为优越。

通过分析表4数据可以发现,蚁群分布估计算法下各救援站点的资源配置要远少于分布估计算法下各救援站点的资源配置,这说明蚁群分布估计算法可以根据事故点的资源需求为救援站点选择合理

适当的资源配置,进一步证明蚁群分布估计算法优于分布估计算法。

由图4可以发现,使用蚁群分布估计算法得到的结果,在事故点密集处,救援站建造个数较多,资源配置量较大并且位置受到多个事故点共同影响;事故点单一处,救援站建造个数少,资源配置量较少并且位置靠近事故点。而图5则说明分布估计算法不具有该性能。

表2  $n$ 取不同值时的目标函数值对比Table 2 Comparison of objective function values at different values of  $n$ 

$n$	蚁群分布估计算法		分布估计算法	
	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$
5	1 131 471.03	7.55	2 230 113.82	5.21
10	785.80	13.10	28 526.24	11.83
15	44.53	23.28	1 021.54	19.13

表3 两种算法求解结果

Table 3 Solution results of two algorithms

$n$	$i$	蚁群分布估计算法		分布估计算法	
		需求	可达性	需求	可达性
5	1	0.46	1.85	13.35	0.25
	2	0.01	1.85	10.00	0
	3	2.96	0.53	1.37	1.06
	4	1.90	1.85	7.80	0.25
	5	15.00	0	1.00	1.03
	6	12.00	0	5.54	0.61
	7	0.25	0.95	5.00	0
	8	10.00	0	0.50	0.95
	9	4.86	0.53	-0.44	1.06
	10	3.00	0	3.00	0
10	1	-0.77	2.07	14.32	0.23
	2	-0.14	2.07	8.35	0.73
	3	2.14	0.82	0.57	1.73
	4	0.04	2.07	0	1.33
	5	-0.88	1.10	0.26	2.11
	6	1.07	1.44	0.54	1.17
	7	0.35	0.93	0.50	1.29
	8	0.71	0.93	10	0
	9	3.76	0.82	1.76	1.73
	10	1.81	0.82	0.43	1.52
15	1	-0.72	3.33	-0.88	2.81
	2	-0.47	3.33	-0.76	2.81
	3	0.08	2.86	0.91	2.23
	4	-0.62	3.33	1.09	2.32
	5	2.74	1.17	2.46	1.20
	6	0.52	1.59	1.45	1.61
	7	0.25	0.95	0.83	2.05
	8	0	1	1.46	1.88
	9	0.10	2.86	-0.03	1.58
	10	0.29	2.86	0.96	0.85

表 4 救援站坐标及配置结果

Table 4 Coordinates and configuration results of rescue stations

n	蚁群分布估计算法			分布估计算法		
	x	y	配置	x	y	配置
5	47	41	10	97	79	10
	20	17	20	16	25	20
	54	70	10	39	85	20
	18	27	20	63	53	20
	20	17	20	57	61	20
10	54	71	10	31	78	20
	52	43	10	88	89	20
	31	81	20	75	8	20
	76	23	10	15	22	20
	89	81	10	47	51	20
	18	22	20	16	24	20
	76	23	10	78	27	20
	55	43	10	40	86	10
	18	22	20	45	38	20
18	22	20	72	36	10	
15	55	44	10	31	77	20
	55	44	20	96	82	10
	18	22	20	63	6	10
	18	22	20	9	23	20
	54	44	20	23	83	20
	33	62	10	45	33	20
	74	20	10	5	9	10
	56	70	10	56	55	20
	33	62	10	90	73	10
	90	80	10	14	9	20
	54	44	20	55	49	20
	18	22	20	97	85	20
	74	20	10	25	4	20
	18	22	20	18	11	20
	20	23	10	20	20	10

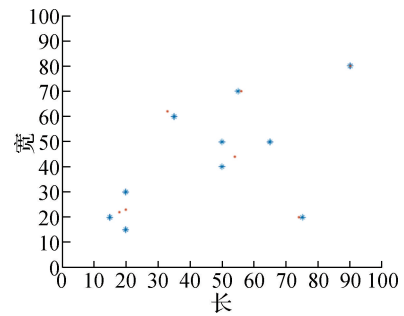
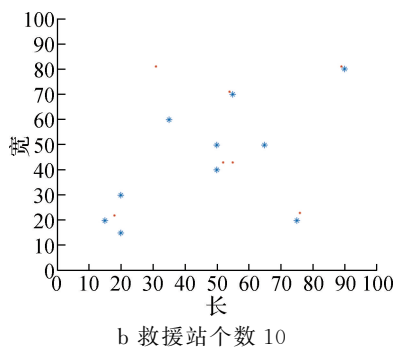
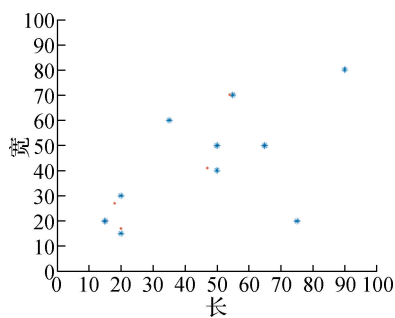


图 4 蚁群分布估计算法下救援站点位置坐标  
Fig. 4 Location coordinates of rescue stations under ant colony distribution estimation algorithm

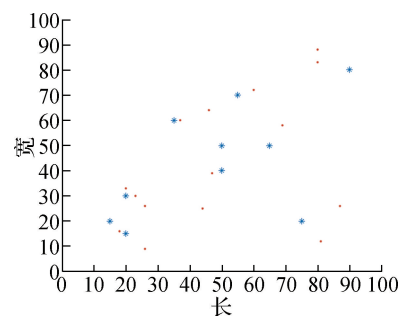
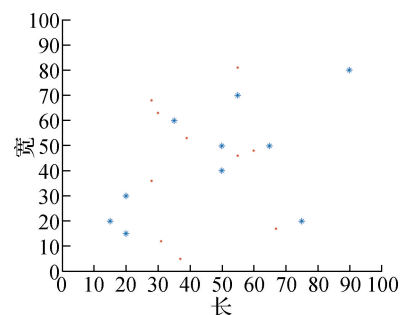
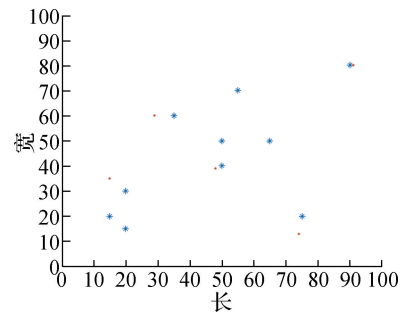


图 5 分布估计算法下救援站点位置坐标  
Fig. 5 Location coordinates of rescue stations under distribution estimation algorithm

## 5 结论

救援站的选址与资源配置结果取决于事故点的位置以及所需资源等,本文采用基于距离衰减函数的两步移动搜索法,以满足事故点资源需求和提高事故点资源可达性为目标构建多目标优化模型,该模型准确反映了事故点位置与资源需求对于救援站的影响。结合改进蚁群算法和改进分布估计算法的优点,提出了蚁群分布估计算法,该算法既解决了蚁群算法求解上述模型时难以收敛的问题,又避免了分布估计算法解决上述模型时概率矩阵不随环境改变而改变的缺点。本文提出的多目标优化模型以及蚁群分布估计算法出色地解决了站点选址与资源配置问题,不仅如此,对于其他行业如城市救援中心的布局、城市物流站点的选址等方面,该模型与算法均适用。

### 参考文献:

- [1] 沈同强,李华成,杜怀强.海警力量遂行海上救援任务初探[J].中国应急救援,2021(2):61-64.
- [2] TOREGAS C, SWAIN R, REVELLE C, et al. The location of emergency service facilities[J]. Operations Research, 1971, 19(6): 1363-1373.
- [3] CHURCH R, REVELLE C. The maximal covering location problem[J]. Papers of the Regional Science Association, 1974, 32(1): 101-118.
- [4] 王成,芙蓉,王惠文.基于覆盖率的递归K-均值方法及其在应急系统选址布局中的应用[J].数学的实践与认识,2016,46(3):69-76.
- [5] 杨舜,彭少柯,冯浩林,等.地铁消防应急救援站点选址优化研究[J].消防科学与技术,2022,41(11):1580-1585.
- [6] 王斌,周丹华,田冉.危化品运输事故应急资源配置选址多目标决策[J].中国安全科报,2022,32(S1):197-201.
- [7] 段晓红,李晓婉.基于多目标分布估计算法的地铁网络化应急站点选址[J].安全与环境学报,2019,19(3):923-930.
- [8] 江福才,彭奇,马全党,等.基于CV-DEA模型的水上应急资源配置效率评价[J].安全与环境学报,2022,22(1):323-330.
- [9] 张昕怡,安睿,刘艳芳.武汉市急救资源可达性分析及站点优化选址[J].南京师大学报(自然科学版),2022,45(1):49-54.
- [10] AI Yunfei, LU Jing, ZHANG Lili. The optimization model for the location of maritime emergency supplies reserve bases and the configuration of salvage vessels [J]. Transportation Research Part E, 2015, 83: 170-188.
- [11] 娄帅,钟铭,张益璇.海上应急救助站点选址与救助船配置集成优化[J].上海海事大学学报,2021,42(4):47-52.
- [12] RAKDE J, MU L. Spatial decompositions, modeling and mapping service regions to predict access to social programs [J]. Geographic Information Sciences, 2000, 6(2): 105-122
- [13] DORIGO M, BIRATTARI M, STUTZLE T. Ant colony optimization[J]. IEEE Computational Intelligence Magazine, 2006, 1(4): 28-39.
- [14] HAUSCHILD M, PELIKAN M. An introduction and survey of estimation of distribution algorithms [J]. Swarm and Evolutionary Computation, 2011, 1(3): 111-128.

(责任编辑:秦海明 实习编辑:张昌保)