

文章编号:1000-4653(2026)02-0025-09

考虑危险区域的救助基地选址与规模配置优化

董雅欣, 任鸿翔*, 陶瑞, 杨晓

(大连海事大学 航海学院, 辽宁 大连 116026)

摘要:随着海运事业的快速发展,海上突发事故呈现频次增加与影响范围扩大的趋势。仅依赖事后的救援调度,会出现响应时间过长与调度成本高昂等问题。为提升海上应急能力,提出一种基于危险区域的海上救助基地选址与规模优化方法。考虑水域风险因素对航行安全的影响,建立基于地理信息系统和随机森林的事故分析框架,以确定危险区域;引入模糊综合评价方法计算外部干扰因素对备选点的影响权重;以最大化海域覆盖率和最小化配置成本为目标,建立考虑岛礁支撑作用的救助基地选址与配置模型,并基于衍生策略和共享机制设计了改进的多目标粒子群算法求解模型。以南海为例的数值试验结果表明,相较于 NSGA-II 与标准多目标粒子群算法,所提算法在 Pareto 解集均匀性、多样性、非劣解数量及求解时间等指标上表现更优,综合提升幅度为 28.88% ~ 84.82%。敏感性分析显示,覆盖率与成本目标均对响应时间和备选点数量具有显著敏感性,决策者需在救援时效与建设投入之间进行权衡。与南海现有配置方案对比,优化方案可将配置成本降低 13.22%,海域覆盖率提高 11.98%,验证了所提方法的有效性工程适用性。

关键词:航行安全;海上搜救;多目标优化;风险预测

中图分类号:U491.5+9

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.1000-4653.2026.02.003

Optimization of rescue base location and scale configuration in high-risk area

Dong Yaxin, Ren Hongxiang*, Tao Rui, Yang Xiao

(Navigation College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: With the rapid development of the maritime shipping industry, maritime emergencies show an increasing frequency and an expanding impact range. When only post-incident rescue dispatching is relied on, excessive response time and high dispatching cost are caused. To enhance maritime emergency capability, an optimization method for rescue-base location and scale configuration in high-risk areas was proposed. First, the impact of maritime risk factors on navigation safety was considered, and an accident analysis framework based on Geographic Information Systems (GIS) and random forest was established to determine high-risk areas; then, the Fuzzy Comprehensive Evaluation Method (FCEM) was introduced to calculate the comprehensive impact index of interference factors on candidate locations for rescue bases. Finally, considering the supportive role of islands, a rescue equipment location and configuration model was developed with the objective of maximizing area coverage while minimizing configuration cost, and an improved multi-objective particle swarm optimization (IMOPSO) algorithm incorporating a derivation strategy and a sharing mechanism was designed to solve the model. Numerical experiment results for the South China Sea show that, compared with NSGA-II and the standard multi-objective particle swarm optimization (MPOSO) algorithm, the proposed algorithm performs better in the uniformity and diversity of the Pareto solution set, the number of non-dominated solutions, and the solution time, with an overall improvement of 28.88% ~ 84.82%. Sensitivity analysis shows that both the coverage objective and the cost objective are significantly sensitive to response time and the number of candidate sites, and a trade-off between rescue timeliness and

收稿日期:2025-02-21

基金项目:辽宁省应用基础研究计划资助项目(2023JH2/101300144);广西重点研发计划(AB22080106);大连市科技创新基金资助项目(2022JJ12GX035)资助

作者简介:董雅欣(1995—),女,博士研究生,研究方向为交通信息系统及控制。*通信作者:dong_yaxin@dlnu.edu.cn。

引用格式:董雅欣,任鸿翔,陶瑞,等.考虑危险区域的救助基地选址与规模配置优化研究[J].中国航海,2026,49(2):25-33.

Dong Y X, Ren H X, Tao R, et al. Optimization of rescue base location and scale configuration in high-risk area[J]. Navigation of China, 2026, 49(2): 25-33. (in Chinese)

construction investment is required. Compared with the existing configuration scheme in the South China Sea, the optimized scheme reduces configuration cost by 13.22% and increases sea-area coverage by 11.98%, and the effectiveness and engineering applicability of the proposed method is validated.

Key words: navigation safety; maritime search and rescue; multi-objective optimization; risk prediction

海运因其运量大、成本低和便捷等优点,承担了全球80%以上的贸易^[1]。然而,随着海运事业的快速发展,海上突发事件的频率和规模逐年上升,对海上应急响应能力提出更高的要求。仅依赖事故发生后的救援调度,会出现响应时间过长、调度成本高昂的问题。因此,在事故发生前确定救助基地的建设地点及其规模配置对保障海上航行安全,以及提升我国的海上应急响应能力至关重要。

近年来,国内外学者围绕海上救助基地的选址与规模配置展开广泛研究。Wagner等^[2]分析季节与事故发生的关系,优化船舶配置以提升利用率和港口效率,但未考虑响应效率与需求不确定性;Karatas等^[3]引入事故类型权重,建立多类型船舶配置模型。Akbari等^[4]则关注船舶公平性与招募弹性,构建最小运营成本的鲁棒模型;Ma等^[5]利用LSTM和 k -mean预测事故热点,以运营成本和响应时间最小为目标建立船舶配置模型;Zhou^[1]融合地理信息系统、模糊层次分析和博弈方法相结合,提出综合考虑环境因素的配置策略;Wu等^[6]将遗传算法(Genetic Algorithm, GA)与强化学习相结合,用于应对紧急搜救情境下的资源分配问题。

在配置建模之前,本文基于历史事故数据,识别海域危险区域以实现精细化配置。相关研究包括:Ma等^[7]基于密度和热点分析识别道路事故高发区域;Zhou等^[8]进一步引入船舶分布提升海域风险识别精度;随着机器学习和神经网络等技术的引入,风险预测的研究方法得到进一步拓展;Yang等^[9]基于中国交通事故数据,构建一种深度神经网络模型来准确预测事故严重程度。

在求解配置模型方面,多数研究采用元启发式算法,如GA、模拟退火和可变邻域搜索等。近年来,多目标优化问题受到关注。张国富等^[10]结合NSGA-II算法和启发式策略以平衡危化品应急问题中的时效性和物资的消耗性;刘忠波等^[11]利用改进的GA解决南海战时物资供给问题。尽管已有研究取得进展,但仍存在不足:

- 1) 多数研究未充分考虑外部环境因素对候选点适宜性的影响,导致模型与实际需求存在偏差。
- 2) 优化对象多局限于现有基地,忽略岛屿在救援网络中的支撑潜力。
- 3) 服务水平、响应效率和成本控制等方面难以

兼顾,已有研究对服务水平关注不足。

4) 危险区域识别以频度为主,未能综合考虑动态风险因数。

5) 现有方法应对复杂搜救场景的适应性不足。针对上述存在的问题,本文构建“危险区域识别—备选点评估—资源配置优化”三阶段研究框架,并提出如下创新点:

① 提出融合事故等级与交通流特征的危险区域识别方法,有效识别高风险海域。

② 构建集环境、经济、需求和社会因素于一体的多维适宜性评价模型,使优化目标更贴合实际。

③ 在模型构建中充分考虑危险海域的全覆盖要求、外部扰动影响和岛礁对设备部署的支撑作用,以提升模型的现实适用性。

④ 设计带衍生策略与共享机制的改进型多目标粒子群优化算法,为科学选址与配置提供理论与方法支持。

1 问题描述与建模

某海域存在 I 个事故点,已知每个事故点对 K 种救助设备的预计需求和 J 个救助基地的候选位置。考虑外部因素对基地选址和设备配置的影响,通过合理选择救助基地的建设位置以及 K 种救助设备的合理配置,在满足所有事故点应急需求的同时,实现对危险海域的全面覆盖。为此,本文构建一个多目标优化模型,以平衡救援服务水平与资源配置成本。

1.1 风险海域确定

传统方法多以历史事故频率划定风险海域,但忽视了对低频高后果区域和潜在风险区的识别。为提升风险刻画精度,本文基于事故等级采用核密度分析提取事故分布特征,识别事故点 I ;同时,结合船舶自动识别系统(Automatic Identification System, AIS)数据分析交通流特征,将相关变量输入随机森林模型,综合判定危险海域。在模型中,确保所有事故点与风险海域均被有效覆盖,以提升整体救援响应能力。

1.1.1 核密度分析

核密度分析能评估事故点及其周围的聚集趋势,从而反映该区域内事故的密度分布情况^[12]。本文引入事故严重程度作为权重,构建加权核密度分

布模型,以更准确地刻画风险强度和空间分布。其计算为

$$D_q = \sum_{l=1}^{N_q(h)} x_{q,l} / \pi h^2 \quad (1)$$

式(1)中: D_q 为海域等分后的第 q 个正方形元胞的事故密度; $N_q(h)$ 为以 q 的中心点为原点 h 为半径的范围内事故数量; $x_{q,l}$ 为 q 中第 l 起事故的事故等级。

1.1.2 随机森林模型

随机森林模型是一种基于自助聚集策略的集成学习方法,在空间分布、稀有事件预测等领域表现出色^[9]。本文将影响海上安全的多个因素作为特征因数,以划分后的子海域危险系数为预测目标,构建随机森林模型。具体步骤如下:

- 1) 海域等分后的每个正方形元胞对应一个样本。
- 2) 输入数据集 X ,每个样本有 M 个特征因数。
- 3) 使用 Bootstrap 自助抽样法,从原始数据集中随机抽取 r 个样本,形成新的训练样本集 X^* 。
- 4) 随机选择 m 个特征子集($m < M$),在当前特征子集上构建决策树。
- 5) 基于训练样本 X^* 和特征子集,利用递归分裂算法构建无剪枝完全决策树。
- 6) 重复步骤3)~步骤5),最终生成含有 L 棵相互独立的决策树,森林输出为所有树预测结果的平均值。

1.2 备选点适宜性评价方法

救助基地的选址与规模配置不仅受事故分布影响,还受到多种外部因素的制约。基于海上搜救的实际需求,本文在查阅相关文献并调研南海救助局实践经验的基础上,构建备选点适宜性评价指标体系,见表1。使用模糊综合评价方法^[13]对备选点 J 受到外部因素影响的权重进行量化评估,以得到备选点的适宜性 P_j 。最后,将得到的 P_j 加入优化模型,增强模型对现实条件的响应能力与决策参考价值。

1.3 模型建立

1.3.1 模型假设

在建立救助基地选址与规模配置优化模型之前,先对模型做以下假设:

- 1) 救助基地的备选点被认为是可靠的。
- 2) 救助设备执行搜救任务时,只能从救助基地出发。
- 3) 在执行搜救任务过程中,救助设备性能良好。

表1 备选点适宜性评价指标

Tab.1 Adaptability evaluation index of candidate location

一级指标	二级指标	指标含义
环境因素	气旋等级	强台风可能损坏设施,影响运行安全
	气旋频次	台风频繁影响出动效率,不适宜选址
	雾	不利于船舶作业,影响救援的稳定性
经济因素	浪高	影响能见度与航行安全,增加搜救风险
	存储成本	衡量基地可持续运营能力
功能因素	运输成本	衡量物资调配的经济性
	港口	是否具备船舶作业条件
社会环境	机坪	是否支持空中搜救装备起降
	地理位置	可建设性取决于其所处辖区及地理位置
	航运交通流	应急响应时间受到航运密度的影响

1.3.2 参数说明

I 为事故点集合; J 为救助基地备选点集合; J' 为现有救助基地集合, $J' \subseteq J$; K 为救助设备种类集合; S 为海域网格化后的子海域集合; η_i 为事故点的重要程度,等于其所在子海域的危险系数,若 $\eta_i \geq \eta$ (η 为重要程度阈值),则事故点 i 需要被双重覆盖; P_j 为备选点 j 的适宜性; G_j 为在备选点 j 建立基地的成本,若 $j \in J'$ 则 $G_j = 0$; T 为最大可接受的应急响应时间; N_i 为在 T 内可覆盖事故点 i 的所有备选点集合; D_{ij} 为备选点 j 与事故点 i 之间的距离; w_s 为子海域 s 的风险系数,若 $w_s \geq W$ (W 为水域风险阈值),则 s 为危险海域; α_j 为0-1变量,若在响应时间 T 内备选点 j 能够覆盖子海域 s 则为1,否则为0; v_k 、 c_k 和 a_k 分别为第 k 种设备的单位航速、单位运输成本和配置成本; $F_{i,k}$ 为事故点 i 所需的第 k 种设备数量; $R_{j,k}$ 为备选点 j 能够最大容纳第 k 种设备的数量; U_k 为海域拥有第 k 种设备的最大数量; M 为较大的正数; φ_j 为0-1变量,若选择备选点 j 建设救助基地则为1,否则为0; B_{jk} 为0-1变量,若备选点 j 有 k 种救助设备,则 $B_{jk} = 1$,否则为0; Q_{jk} 为备选点 j 实际拥有 k 种救助设备的数量,若 $Q_{jk} > 0$,则 $\beta_{jk} = 1$,若 $Q_{jk} = 0$ 则 $\beta_{jk} = 0$; $H_{ijk,ct}$ 为备选点 j 为事故点 i 提供第 k 种设备数量。

1.3.3 模型建立

基于以上变量解释,本文建立的数学模型的目标函数为

$$\min f_1 = \sum_{i=1}^I \varphi_j \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K P_j \frac{D_{ij} c_k}{v_k} H_{ijk,ct} +$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K a_k Q_{jk} + \sum_{j=1}^J \varphi_j G_j \quad (2)$$

$$\max f_2 = \frac{\sum_{s=1}^S (S_s \min \{1, \sum_{j=1}^J \alpha_{sj} \cdot (1 - \varphi_j)\})}{S} \quad (3)$$

约束条件:

$$\frac{\sum_{s=1}^S \left(S_s \min \left\{ 1, \sum_{j=1}^J \alpha_{sj} \cdot (1 - \varphi_j) \right\} \right)}{S} \geq 90\%, \quad w_s < W \quad (4)$$

$$\frac{\sum_{s=1}^S \left(S_s \min \left\{ 1, \sum_{j=1}^J \alpha \cdot (1 - \varphi_j) \right\} \right)}{S} = 1, w_s \geq W \quad (5)$$

$$N_i = \left\{ j \mid D_{ij} \leq \max_{k=1}^K \beta_{jk} V_k T \right\} \quad (6)$$

$$\sum_{j \in N_i} \varphi_j \geq 1, i \in I; \eta_i < \eta \quad (7)$$

$$\sum_{j \in N_i} \varphi_j \geq 2, i \in I; \eta_i \geq \eta \quad (8)$$

$$0 \leq H_{ijk,ct} \leq Q_{jk} \leq R_{j,k} \quad (9)$$

$$0 \leq \sum_{j=1}^J Q_{jk} \leq U_k \quad (10)$$

$$\sum_{j \in N_i} \sum_{k \in K} H_{ijk,ct} \geq F_{ik,c} \quad (11)$$

$$H_{ijk,ct} \leq M(B_{jk} V_k t - D_{ij}) \quad (12)$$

$$\beta_{jk}, \varphi_j, \alpha_{lj} \in \{0, 1\}, Q_{jk}, H_{ijk,ct} \in Z^+ \quad (13)$$

目标函数(2)为最小化配置成本,包括搜救设备的运输成本、配置成本和基地建设成本;目标函数(3)为最大化海域覆盖率,目的是提升整体救援服务水平,避免因资源配置不足而产生的服务盲区;约束条件(4)为普通水域的覆盖率不低于90%;约束条件(5)为全面覆盖危险海域;约束条件(6)定义 N_i 的计算方式;约束条件(7)保证每个事故点在 T 内至少有1个设备前往;约束条件(8)为对重要事故点要求至少双重响应支持;约束条件(9)和约束条件(10)限制救助设备的配置量不超过基地容量和系统总体资源上限;约束条件(11)为限制每个事故点获得的设备数量不得低于其实际需求;约束条件(12)为若备选点无法在响应时间内覆盖需求点,两者间无需求分配关系;约束条件(13)为变量取值范围。

2 求解算法设计

本文所构建的救助基地选址与规模配置优化模型属于典型的NP-Hard问题。随着备选点、事故点

和设备种类的增加,解空间呈指数增长,传统方法难以高效求解^[11]。因此,本文设计了基于衍生策略和共享机制的改进多目标粒子群算法(Improved Multi-Objective Particle Swarm Optimization, IMOPSO)求解模型。

2.1 粒子的编码与解码

本文将每个候选配置方案视为一个粒子,并采用实数向量编码。每个粒子 x_h 由两部分组成,构成一个 $2n$ 维向量。有

$$x_h = \{ (x_{h1}^1, x_{h1}^2, \dots, x_{h1}^n), (x_{h2}^1, x_{h2}^2, \dots, x_{h2}^n) \} \quad (14)$$

式(14)中: n 为可配置的设备数量,每个编码值均为 $(0, 1)$ 区间的随机数。

在解码时,将子序列 $x_{h1} = (x_{h1}^1, x_{h1}^2, \dots, x_{h1}^n)$ 与候选备选点的数量 $|J|$ 相乘并取整,以确定每个救助设备配置的备选点。同样,将子序列 $x_{h2} = (x_{h2}^1, x_{h2}^2, \dots, x_{h2}^n)$ 与事故点的数量 $|I|$ 相乘并取整,得到每个救助设备前往救援的事故点。

2.2 IMOPSO 算法总体设计

本文提出的IMOPSO算法是MOPSO算法的一种改进。MOPSO通过粒子间的协作探索覆盖整个解空间,其搜索过程受个体 i 的最优解 p_i 和全局最优解 g 的共同影响^[6]。第 i 个粒子在第 t 次迭代的速度 v_i^t 和位置 x_i^t 的更新函数为

$$\begin{cases} v_i^{t+1} = w \cdot v_i^t + c_1 \cdot r_1 \cdot (p_i - x_i^t) + c_2 \cdot r_2 \cdot (g - x_i^t) \\ x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{t+1} \end{cases} \quad (15)$$

式(15)中: w 为惯性权重; c_1 和 c_2 为学习因数; r_1 和 r_2 为 $[0, 1]$ 之间的随机数。

应用MOPSO算法的关键是 p_i 和 g 的选择。传统的随机选择方法可能导致MOPSO算法陷入局部最优、收敛速度较慢和后期搜索能力不足等问题。因此,本文提出IMOPSO算法,以改善上述问题并提升算法性能。

2.2.1 个体最优 $p_{b,i}$ 的更新机制

针对标准MOPSO在粒子移动后生成的新解 $p_{n,i}$ 与当前的 p_i 互不支配时,更新不稳定的问题,在 p_i 更新机制中引入衍生策略,其主要思路为:如果 $p_{n,i} > p_i$,则更新 $p_i \leftarrow p_{n,i}$;若 $p_{n,i} < p_i$,表明该粒子没有学习和进化,则保持 p_i 不变;当 p_i 与 $p_{n,i}$ 互不支配的时候,由以下3个步骤更新 p_i 。

1) 生成 $N(t)$ 个衍生候选解为

$$N(t) =$$

$$\begin{cases} (N_{\max} - N_{\min}) \times \left(1 - 2 \times \left(\frac{t}{R}\right)^2 + \frac{N_{\min}}{N_{\max} - N_{\min}}\right), \\ 0 \leq t \leq \frac{R}{2} \\ (N_{\max} - N_{\min}) \times \left(2 \times \left(\frac{(R-t)}{R}\right)^2 + \frac{N_{\min}}{N_{\max} - N_{\min}}\right), \\ \frac{R}{2} < t \leq R \end{cases} \quad (16)$$

式(16)中: N_{\max} 和 N_{\min} 分别为最大和最小候选数量; R 为最大迭代次数。

2) 确定 $N(t)$ 后,生成新的候选解 $Z_i(t)$ 为 $Z_i(t) =$

$$\begin{cases} p_i - (d_{\max} - d_{\min}) \times \left(2r^2 + \frac{d_{\min}}{(d_{\max} - d_{\min})}\right), \\ 0 \leq r \leq 0.5 \\ p_i - (d_{\max} - d_{\min}) \times \left(1 - 2(r-1)^2 + \frac{d_{\min}}{(d_{\max} - d_{\min})}\right), \\ 0.5 < r \leq 1.0 \end{cases} \quad (17)$$

式(17)中: d_{\max} 和 d_{\min} 分别为最大和最小的衍生距离; r 为高斯随机数的绝对值,向候选解引入随机性,从而使生成的候选解具有多样性。

3) 选取衍生粒子 $Z_i(t)$ 中能够支配 p_i 的候选解取代 p_i 成为个体最优解。

2.2.2 全局最优解 g_b 的选择机制

为防止种群早熟,本文引入生态位共享机制来

优化 g 的选择过程。通过衡量解的共享程度,优先选择分布在外部档案稀疏区域的粒子作为 g ,以确保解的多样性和分布的均匀性,从而提升算法的全局搜索能力。

1) 计算外部档案中 x_i 和 x_j 2个粒子的欧氏距离 d_{ij} ,以衡量2个解的相似性。

$$d_{ij} = \|x_i - x_j\| = \sqrt{\sum_{l=1}^{2n} (x_{il} - x_{jl})^2} \quad (18)$$

式(18)中: x_i 为第 i 个粒子的位置向量; x_{il} 为粒子 x_i 在第 l 维上的取值。

2) 计算 x_i 的共享程度 U_i 。

$$U_i = \begin{cases} \sum_{j=1}^{N_a} e^{-\left(\frac{d_{ij}}{\sigma_u}\right)^2}, & d_{ij} \leq \sigma_u \\ 0, & d_{ij} > \sigma_u \end{cases} \quad (19)$$

式(19)中: N_a 为外部档案现有的粒子个数; σ_u 为共享半径,表示共享作用范围的阈值。

3) 基于粒子的共享程度 U_i 调整粒子适应值 $F_i = \frac{1}{U_i}$ 。 U_i 越大, F_i 越小,以此降低该粒子被选为全局最优解的可能性。

4) 根据调整后的 F_i 使用轮盘赌选择法确定 g 。

2.3 算法步骤

求解多目标救助基地选址与配置优化问题的IMOPSO算法流程见图1。

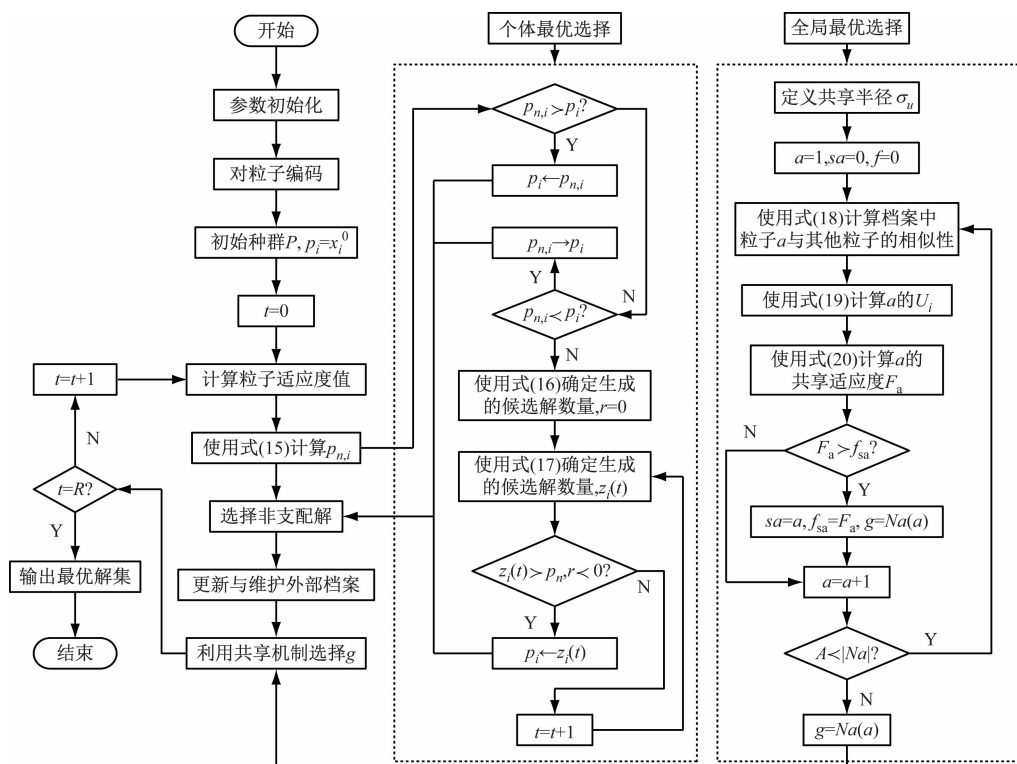


图1 IMOPSO算法流程

Fig.1 The flowchart of the IMOPSO

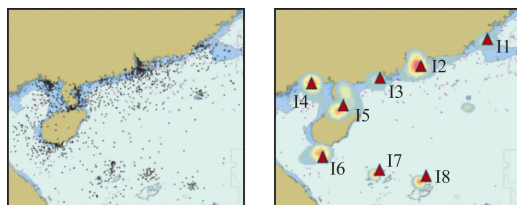
3 算例分析

3.1 确定高风险海域

本文以中国南海为研究区域,评估所提方法的有效性。研究数据来自南海救助局,涵盖2010年1月—2023年1月的2 846条海上事故记录,包括事故位置、时间、类型和等级等信息。先将事故数据导入 ArcGIS 进行空间定位,生成事故分布图见图2a,图2a中:灰色点表示事故点。

基于式(1)计算考虑事故等级的密度分布图,得到加权密度分布图见图2b。图2b中:色块越深表示事故越集中,风险越高。最终选取聚集度较高区域的中心作为事故点,以三角形标记。

为进一步识别高风险区域,本文基于随机森林模型对南海区域进行危险系数预测。将海域划分为



(a) 历史事故分布 (b) 密度分布
图2 2010—2022南海历史事故和密度空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of historical maritime accidents and density in the South China Sea from 2010 to 2022

100 × 100 网格后,提取每个单元的历史事故和 AIS 特征,包括:事故数量、事故等级、船舶流量、平均船长与船宽、航向与速度的标准差和平均速度等。随机森林模型中训练映射关系构建见图3。

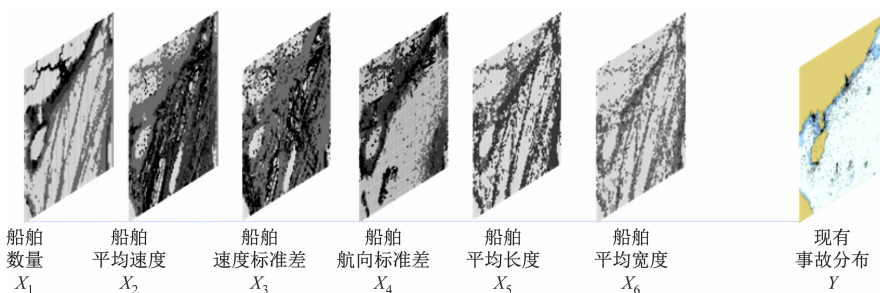


图3 随机森林模型中训练集映射关系构建

Fig. 3 Construction of mapping relationship in the Random Forest model for training set

数据按8:2划分为训练集和测试集,并从测试集中再抽取20%构建验证集。评估指标包括准确率(76.81%)、精准率(76.28%)、召回率(76.42%)与 F_1 分数,受试者工作特征曲线(Receiver Operating Characteristic Curve, ROC)见图4。图4中:平均ROC的面积为0.77,表明模型性能良好。

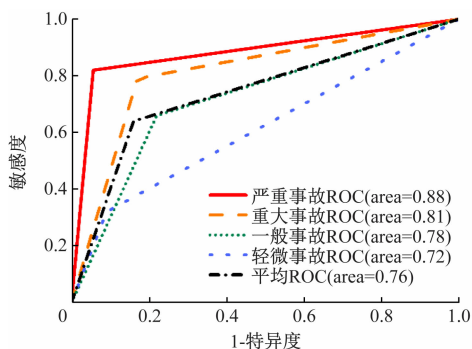


图4 ROC曲线

Fig. 4 ROC curve

南海子海域危险系数网格图见图5。图5中:灰度的递增代表风险递增;黑色网格集中分布于沿海和岛礁周边,提示为重点危险区域。

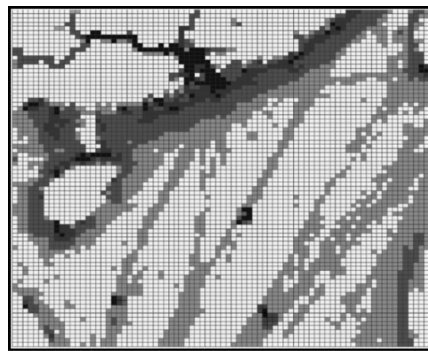


图5 南海子海域危险系数网格图

Fig. 5 High-risk factor grid map of subarea in the South China Sea

3.2 案例分析

3.2.1 数据收集

经过筛选,南海共有12个救助基地备选点,见图6。本文邀请来自救助局、海事院校和主管机构的8位专家,对各点的二级指标进行评分,结合他们对备选点二级指标的评分结果,采用第1.2节所介绍的模糊综合评价方法,对各指标进行加权计算,最终得出12个备选点的适宜性为

$$P_j = [0.63, 0.72, 0.66, 0.52, 0.42, 0.61, \dots]$$

$$0.64, 0.41, 0.49, 0.61, 0.59, 0.51] \quad (20)$$

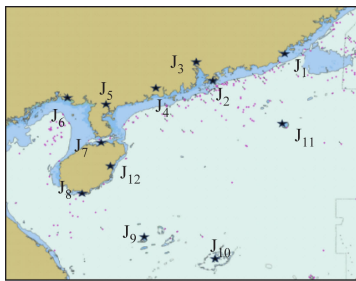


图6 南海海域救助基地备选点

Fig. 6 Candidate locations in the South China Sea

可分配的救助设有对应海洋救助船、快速救助船、高速救助船、EC225 直升机和 S-76D 直升机等 5 种,对应设备集合 $K = \{K_1, K_2, K_3, K_4, K_5\}$, 数量分别为 10, 4, 19, 2 和 3; 参考文献 [14] 和南海救助局的调研数据, 得到设备单位航速分别为 34.26 km/h、51.39 km/h、59.62 km/h、275.00 km/h 和 287.00 km/h (1 km/h = 5/18 m/s; 单位运输成本 c_k 分别为 0.5、1.0、1.0、1.8 和 1.6 万元/h; 配置成本 a_k 取 [0.68, 4.00] 万元之间的随机数; 响应时间 T 为 12 h。基地的建设成本 G_j 取 [2 000, 4 000] 万元之间的随机数。

3.2.2 算例结果分析

将所得数据带入模型, 使用 MATLAB 2022b 对算法进行编程。为验证 IMOPSO 算法的性能, 选取 MOPSO 和 NSGA-II 作为对比算法。在 IMOPSO 和 MOPSO 中, 设置粒子数为 50, 最大迭代次数为 500, 粒子最大速度为 0.15, 2 个学习加速因数均为 2.0,

惯性权重的最大值和最小值分别为 0.9 和 0.4。在 NSGA-II 算法中设置染色体数目为 50, 最大迭代次数为 500, 交叉概率为 0.9, 变异概率为 0.1。所有的测试实例在 Intel 10-core 3.0 GHz CPU、16 GB 内存、RTX 3060 显卡和 Windows 11 操作系统的计算机上独立运行 10 次, 每组结果合并后去除支配与重复解, 得到最终的 Pareto 前沿分布见图 7。

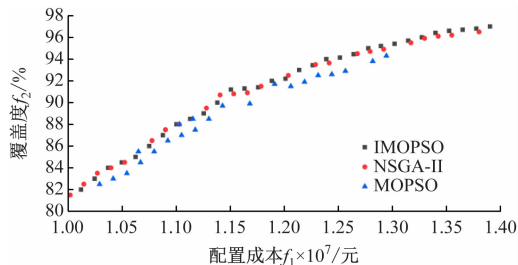


图7 3种算法得到的 Pareto 前沿

Fig. 7 Pareto fronts obtained by three algorithms

由图 7 可知: IMOPSO 在解的质量与 Pareto 前沿分布方面优于 MOPSO 与 NSGA-II。为进一步比较 3 种算法的性能, 本文选择经典的容量值 (Quantity Metric, QM) τ 、反世代距离 (Inverted Generational Distance, IGD) κ 和计算时间 t 作为评价指标, 对 3 种算法在 10 次试验中求得的 Pareto 解集的质量进行评估, 结果见表 2。表 2 中: τ 反映了算法的探索能力; κ 用于衡量最优参考集与每个 Pareto 解集之间的平均距离, 体现了算法的综合性能。 κ 值越小, 算法的综合性能越好。 κ 计算为

表2 IMOPSO、MOPSO 和 NSGA-II 算法的性能比较

Tab. 2 Performance comparison of IMOPSO, MOPSO, and NSGA-II algorithms

序号	IMOPSO			MOPSO			NSGA-II		
	τ	κ	$t(s)$	τ	κ	$t(s)$	τ	κ	$t(s)$
1	28.0	2.86×10^{-3}	645.26	22.00	1.99×10^{-2}	923.16	21.00	1.03×10^{-2}	1 068.68
2	30.0	2.96×10^{-3}	659.75	21.00	2.03×10^{-2}	950.46	24.00	1.04×10^{-2}	1 060.85
3	27.0	3.01×10^{-3}	670.12	23.00	2.10×10^{-2}	965.34	19.00	1.05×10^{-2}	1 080.25
4	32.0	3.06×10^{-3}	677.94	21.00	2.14×10^{-2}	1 010.25	22.00	1.04×10^{-2}	1 110.54
5	31.0	3.11×10^{-3}	680.50	25.00	2.16×10^{-2}	990.10	23.00	1.05×10^{-2}	1 125.71
6	29.0	3.16×10^{-3}	700.72	24.00	2.18×10^{-2}	975.80	20.00	1.04×10^{-2}	1 115.75
7	33.0	2.91×10^{-3}	710.25	27.00	2.20×10^{-2}	1 005.73	22.00	1.02×10^{-2}	1 100.26
8	28.0	2.96×10^{-3}	668.94	20.00	2.24×10^{-2}	940.50	19.00	1.06×10^{-2}	1 040.38
9	30.0	3.16×10^{-3}	682.31	28.00	2.28×10^{-2}	935.82	21.00	1.04×10^{-2}	1 053.92
10	31.0	2.84×10^{-3}	655.47	21.00	2.32×10^{-2}	1 013.16	24.00	1.01×10^{-2}	1 108.68
平均值	29.9	3.00×10^{-3}	675.13	23.20	1.99×10^{-2}	971.03	21.50	1.04×10^{-2}	1 086.50
改进幅度/%	-	-	-	28.88	84.82	30.47	39.07	72.15	37.86

注: - 为基准算法, 改进幅度 1% 为其他算法相对于 IMOPSO 计算得到。

$$\kappa = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{|P_f^*|} d^2(i, P_f)}}{|P_f^*|} \quad (21)$$

式(21)中:最优参考集 P_f^* 由所有算法运行结果的非支配解组成; $d(i, P_f)$ 为 P_f^* 中第 i 解与算法得到的 Pareto 解集 P_f 之间的距离。

由表 2 可知:IMOPSO 在更短时间内获得更多非支配解,能为决策者提供更丰富的选择,适用于多偏好应急场景。其 IGD 值最小,表明 IMOPSO 具有更优的收敛性与解集质量。

基于 MATLAB 程序随机选出的代表性方案,总配置成本为 13 920.42 万元,在实现对高风险海域全面覆盖的基础上,整体水域覆盖率达 95.88%,折中解所对应的搜救基地选址与规模配置方案见表 3。与南海 2023 年实际配置方案对比见表 4,优化方案在设备数量减少的同时使覆盖率提升 13.31%,配置成本下降 13.28%,验证了本文方法的有效性,同时相比其他算法得到的方案,本文所得到的方案能更好地兼顾效率目标和成本目标,为海上搜救设备配置提供更有有效的决策支持。

表 3 折中解所对应的搜救基地选址与配置方案

Tab.3 Rescue base location and configuration scheme

	J_1	J_2	J_3	J_4	J_5	J_6	J_7	J_8	J_9	J_{10}	J_{11}	J_{12}
K_1	0	0	2	0	2	3	2	0	1	0	0	0
K_2	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1
K_3	1	2	2	2	3	1	0	2	1	1	1	1
K_4	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
K_5	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0

注:表中 $K_1 \sim K_5$ 表示搜救设备的类型;每个数值表示该设备类型在对应备选点($J_1 \sim J_{12}$)的配置数量。

表 4 优化前后比较

Tab.4 Comparison before and after optimization

比较指标	优化后	优化前	优化前后差异	不考虑风险海域
海域覆盖度	95.88%	85.62%	-11.98%	88.49%
配置成本	13 920.42 万元	15 877.84 万元	-12.33%	15 247.87 万元
救助设备数量	27 个	32 个	-18.52%	30 个

为进一步验证危险区域识别方法的实际作用,本文在相同算例下构建对比试验,取消危险海域相

关约束,仅在普通区域内进行优化,并保持算法及参数一致。IMOPSO 独立运行 10 次后选取最优结果,如表 4 所示。由表 4 可知:未考虑风险区域时,海域覆盖率下降至 88.49%,设备数量增至 30 个,配置成本升至 15 247.87 万元。结果表明:在未对高风险区域进行重点约束的情况下,资源配置更为分散、效率更低,既未提升关键区域服务水平,也未带来成本优势,说明引入风险识别机制有助于提升资源配置的有效性和针对性。

3.2.3 灵敏度分析

海上救助基地选址与规模配置的优化会受到多个参数变化的影响。为探讨参数变化对优化性能的影响,本文对响应时间 t 和备选点的数量 J 进行了敏感性分析见图 8。图 8 中:黑色实线为所有参数不改变时运行一次得到的 Pareto 前沿;“...”线和“.....”线分别表示当其他参数保持不变时, t 和 J 取不同值时运行一次得到的 Pareto 前沿。

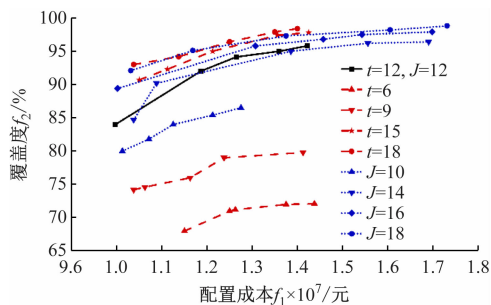


图 8 响应时间和备选点数量的灵敏度分析图

Fig.8 Sensitivity analysis of response time and number of candidate location

由图 8 可知:

1) 随着响应时间的延长,可提升海域覆盖率并降低配置成本,但当覆盖趋于饱和后,继续延长响应时间对覆盖效果的提升有限。因此,决策者可据此设定响应时限,权衡成本与服务水平。

2) 备选点数量增加有助于缩短运输路径、提升覆盖效率,但也可能带来更多基地建设成本。因此,决策者需权衡救援时间和建设成本,以实现两者之间的最佳平衡。

4 结语

本文围绕救助基地选址与规模配置问题,构建以最大化海域覆盖度与最小化配置成本为目标的多目标优化模型,考虑岛礁支撑作用,并设计融合衍生策略与共享机制的 IMOPSO 算法进行求解。主要结论如下:

1) 基于历史事故与 AIS 数据,构建基于 GIS 与

随机森林的风险识别框架,有效刻画高风险海域特征。

2) 提出多维适宜性评价体系,综合考虑环境、地理、经济和功能等因素,提升选址科学性。

3) 算例结果显示,IMOPSO 在解质量与运行效率方面优于 MOPSO 与 NSGA-II,验证模型与算法的有效性。

4) 模型结果具有良好的管理启发性,决策者可根据偏好在服务水平与运营成本之间进行权衡,并通过调整响应时间和资源分布策略优化配置方案。

尽管取得一定成果,本文仍存在局限。未来可从3方面拓展研究:引入多源预警数据,构建融合事故概率与后果的动态风险评估机制;结合实际海洋环境对设备性能的影响,增强模型的适应性;开发仿真平台,进一步验证配置方案的调度可行性和运行稳定性,提升模型的实用推广价值。

参 考 文 献

[1] Zhou X. A comprehensive framework for assessing navigation risk and deploying maritime emergency resources in the South China Sea [J]. *Ocean Engineering*, 2022, 248: 248-256.

[2] Wagner M R, Radovilsky Z. Optimizing boat resources at the U. S. coast guard: deterministic and stochastic models [J]. *Operations Research*, 2012, 60 (5): 1035-1049.

[3] Karatas M, Razi N, Gunal M. An ILP and simulation model to optimize search and rescue helicopter operations [J]. *Journal of the Operational Research Society*, 68 (1): 1335-1351.

[4] Akbari A, Pelot R, Eiselt H A. A modular capacitated multi-objective model for locating maritime search and rescue vessels [J]. *Annals of Operations Research*, 2018, 267(1-2):3-28.

[5] Ma Q D, Zhang D Z, Wang C P, et al. Multi-objective emergency resources allocation optimization for maritime search and rescue considering accident black-spots[J]. *Ocean Engineering*,2022,261:1-12.

[6] Wu J, Wang Z, Song Y, et al. A reinforcement learning-assisted search and rescue resource allocation decision-making approach for maritime emergencies[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2025,210: 1-24.

[7] Ma Q L, Hyang G H, Tang X Y. GIS-based analysis of spatial-temporal correlations of urban traffic accidents [J]. *European Transport Research Review*, 2021, 13 (1): 112-124.

[8] Zhou X, Cheng L, Min K F, et al. A framework for assessing the capability of maritime search and rescue in the South China Sea [J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2020, 47: 1-11.

[9] Yang Z K, Zhang W P, Feng J. Predicting multiple types of traffic accident severity with explanations: a multi-task deep learning framework[J]. *Safety Science*, 2022, 146: 123-145.

[10] 张国富,陆淑君,苏兆品,等.化工园区应急物资多目标分配问题建模与求解[J]. *控制与决策*,2022,37(4):962-972.
Zhang G F, Lu S J, Su Z P, et al. Modeling and solving multi-objective emergency resource allocation in chemical industrial parks [J]. *Control and Decision*, 2022,37(4):962-972. (in Chinese)

[11] 刘忠波,王淇烟,郑红星.海空协同的远海岛礁战储物资供给优化模型与算法[J]. *交通运输系统工程与信息*,2022,22(2):268-279.
Liu Z B, Wang Q X, Zheng H X. Optimization model and algorithm for supply of war storage materials on distant islands and reefs based on sea air cooperation [J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2022, 22 (2): 268-279. (in Chinese)

[12] 杨继起,庄应点,常鹏,等.优化层次分析法的航标效能评估信息系统设计与应用实践[J]. *中国航海*, 2024, 47(增刊1): 137-142.
Yang J Q, Zhuang Y D, Chang P, et al. AtoN efficacy assessment information system based on analytic hierarchy process and fuzzy comprehensive evaluation and successful application practice [J]. *Navigation of China*, 2024, 47(Suppl.1): 137-142. (in Chinese)

[13] 陆后军,张淞博,陆肖.考虑碳排放的潮汐港泊位与岸桥联合分配方法研究[J]. *中国航海*, 2024, 47(4): 97-104.
Lu H J, Zhang S B, Lu X. Study on the joint allocation method of berths and shore bridges in tidal harbors considering carbon emissions[J]. *Navigation of China*, 2024, 47(4): 97-104. (in Chinese)

[14] 吴迪,韩欣丽,石帅杰,等.需求不确定下边远群岛海运物流网络选址一库存一路径优化[J]. *交通运输系统工程与信息*,2024,24(5):268-282.
Wu D, Han X L, Shi S J, et al. Location-inventory-routing optimization of maritime logistics network in remote islands under demand uncertainty[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2024, 24(5): 268-282. (in Chinese)