

引用格式:韩立昌,赵瑞嘉,杨秋平.面向效能均衡的救援基地群布局与异构无人艇配置协同优化[J].大连海事大学学报,2026,52(1):99-110.

## 面向效能均衡的救援基地群布局与 异构无人艇配置协同优化

韩立昌<sup>1</sup>,赵瑞嘉<sup>\*1</sup>,杨秋平<sup>2</sup>

(1.大连海事大学 综合运输研究所,辽宁 大连 116026;2.交通运输部水运科学研究院,北京 100088)

**摘要:**为降低高程序化与高危海上搜救任务对传统人工救援模式的依赖,提升我国海上搜救响应效率,本文提出一种考虑效能均衡的救援基地群布局与异质无人艇配置协同优化方法。该方法兼顾海域响应时效性与风险等级分布特性,构建救援效能评估模型,用于量化分析基地布局与无人艇配置方案的综合性能。在此基础上,以责任海域整体救援效能最大化为目标,综合考虑投资预算约束、无人艇续航能力限制及通信覆盖半径等实际条件,建立协同优化模型,并设计基于线性转换的精确求解算法,实现复杂约束下最优配置方案的高效求解。算法验证结果表明,当海域单元边长超过1.5 km时,该算法可在十几分钟内求得精确解,且计算精度随网格细化而提升,能更准确反映实际海洋环境特征。案例分析进一步显示,优化救援基地群布局与异质无人艇的协同配置方案,可有效改善海上救援效能空间分布的不均衡问题。敏感性分析结果表明,随着目标函数调节系数的增大,优化结果更倾向于提升响应效率,所配置的无人艇船型也从混合船型逐渐转向高性能船型;相应地,覆盖的责任海域单元减少了17.8%;若要在保持救援效能不降低的前提下维持原有责任海域面积不变,每年需额外增加2.1~9.7万元的投资预算。

**关键词:**海上搜救(SAR);无人艇(USV)配置;基地群布局;效能均衡策略;协同优化

中图分类号:U691 文献标志码:A

文章编号:1006-7736(2026)01-0099-12

doi:10.16411/j.cnki.issn1006-7736.2026.01.010

### Collaborative optimization of rescue base cluster deployment and heterogeneous unmanned surface vehicle configuration for efficiency balance

HAN Lichang<sup>1</sup>, ZHAO Ruijia<sup>\*1</sup>, YANG Qiuping<sup>2</sup>

(1. Integrated Transport Institute, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China; 2. Research Institute of Water Transport, Ministry of Transport, Beijing 100088, China)

**Abstract:** To reduce the reliance of highly procedural and high-risk maritime search and rescue (SAR) tasks on traditional manual rescue modes and improve China's maritime SAR response efficiency, this paper proposed a collaborative optimization method for rescue base cluster deployment and heterogeneous unmanned surface vehicle (USV) configuration considering efficiency balance. This method accounted for both the timeliness of maritime response and the distribution characteristics of risk levels, established a rescue efficiency evaluation model, and was applied to quantitatively analyze the comprehensive performance of base cluster deployment and USV configuration schemes. On this basis, with the objective of maximizing the overall rescue efficiency of the responsible sea area, a collaborative optimization model was established by comprehensively considering practical constraints such as investment budget limits, endurance capacity of USVs, and communication coverage radius. Furthermore, an exact solution algorithm based on linear transformation was designed to achieve efficient solving of the optimal configuration scheme

收稿日期:2025-06-29;修回日期:2025-12-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(72204035; 72404050; 72574035);教育部人文社会科学研究青年基金项目(24YJC630180);辽宁省社会科学规划基金(L24CGL019)

作者简介:韩立昌(2001—),男,硕士生;赵瑞嘉\*(1993—),男,博士,副教授,硕士生导师,E-mail: zhaoruijiamail@126.com

under complex constraints. The algorithm verification results show that when the side length of the sea area unit exceeds 1.5 km, the algorithm can obtain an exact solution within ten minutes, and the calculation accuracy improves with grid refinement, which can more accurately reflect the characteristics of the actual marine environment. The case study further demonstrates that optimizing the collaborative scheme of rescue base cluster deployment and heterogeneous USV configuration can effectively alleviate the unbalanced spatial distribution of maritime rescue efficiency. The sensitivity analysis results indicate that as the objective function adjustment coefficient increases, the optimization results tend to prioritize response efficiency, and the deployed USV types gradually shift from mixed types to high-performance types. Correspondingly, the number of covered responsible sea area units decreases by 17.8%. To maintain the original area of the responsible sea area without reducing rescue efficiency, an additional annual investment budget of 21 000 to 97 000 RMB is required.

**Key words:** maritime search and rescue (SAR); unmanned surface vehicle (USV) configuration; rescue base cluster deployment; efficiency balance strategy; collaborative optimization

## 0 引 言

无人艇 (USV) 凭借其多功能性和高度自主性,可替代救援人员执行程序化、高风险及复杂环境下的海上巡航与搜救任务,因而逐渐成为近年来学术界在应用与管理领域的研究焦点之一<sup>[1]</sup>。我国在“十四五”规划中明确提出将海洋装备列为重点发展方向,强调推进无人艇在智慧海洋、应急救援等场景的规模化应用。因此,充分发挥无人艇在自主性、灵活性和环境适应性方面的优势,降低救援人员施救风险,提升海上救援效能与智能化水平,已成为提升我国海上应急救援能力亟须解决的关键问题。

将无人艇的技术优势转化为实战救援能力,关键在于实现救援体系的协同设计。其中,救援基地的选址是构建海上救援体系的首要决策环节,直接决定了无人艇的响应范围与效率,是实现无人艇在海上救援中规模化、高效化应用的核心前提。现有救援基地选址研究多基于集合覆

盖<sup>[2]</sup>、最大覆盖<sup>[3]</sup>等经典模型,旨在实现救援设施布局方案的最优覆盖效果。根据应用场景的不同,该领域可分为内陆和海上两大类,二者间在多个方面存在诸多差异<sup>[4]</sup>。其一,二者在空间维度上存在差异:内陆救援基地选址中,街区、城市或道路交叉口等需求点通过路网连接,其可达性由路径决定<sup>[5]</sup>;而在海上救援场景下,救援需求来自广阔的海面,事发位置具有随机性,且不存在预设路径<sup>[6]</sup>。受建设条件限制,海上救援基地通常需选址于沿海港口<sup>[7]</sup>,或依托天然岛屿布局,以有效克服因离岸距离过远带来的响应制约<sup>[8]</sup>。其二,在应急救援场景中,遇险人员对救援的时效性格外敏感,因为救援响应时间越长,生存概率往往越低<sup>[9-10]</sup>。不同于内陆遇险,海上遇险人员除了要应对常规风险外,还面临体力迅速衰竭、低温症等极端威胁<sup>[11]</sup>,导致其生存概率随着救援响应时间的延长而急剧下降,且下降趋势呈明显的非线性特征<sup>[12]</sup>。现有研究对该因素的考量仍显不足,学者们多以最小化总成本<sup>[13]</sup>或最大化时间满意度<sup>[14]</sup>为优化目标。因此,在开展海上应急救援基地选址问题研究时,亟须纳入空间维度差异,并将救援响应时间与遇险人员生存概率之间的非线性关联关系整合至选址模型中。

海上救援体系的救援效果高度依赖于救援基地选址与救援力量配置的协同优化。现有研究模式主要分为两类:一类为序列式分段优化,即先确定救援基地的选址方案,再基于该布局优化救援力量的配置<sup>[9]</sup>;另一类为集成式联合优化,充分考虑选址与配置之间的内在关联与协同效应,采用启发式算法实现两者的同步求解<sup>[15]</sup>。无人艇的引入拓展了海上救援力量配置的技术路径与响应能力。为提高作业效率,通常将多个无人艇组成编队,以集群形式协同行动。现有研究多聚焦于无人艇编队控制<sup>[16]</sup>、路径规划<sup>[17]</sup>及任务分配<sup>[18]</sup>等方面,且通常以编队配置既定为前提,即无人艇的船型与数量不纳入决策范畴。此外,多数研究聚焦于同船型、小规模编队场景<sup>[19-21]</sup>。因此,亟须考虑无人艇在航速、载荷能力及环境适应性等多

维度性能的异质性特征<sup>[22]</sup>,将编队结构配置纳入协同决策范畴,以充分发挥异质无人艇编队在执行多样化救援任务中的系统优势。

综上所述,当前海上救援体系构建的相关研究对救援响应时间与遇险人员生存概率之间的关联性探讨尚不充分;在救援基地选址与救援力量配置的协同优化研究中,多通过弱化二者间的耦合关系以降低模型求解难度,且研究对象多局限于传统船舶。尽管无人艇为构建海上救援体系提供了新思路,但其性能异质性带来的复杂问题尚未得到充分研究。为此,本文提出一种面向效能均衡的救援基地群布局与异构无人艇配置协同优化方法。主要工作与贡献包括:(1)针对无人艇在航速、负载能力等方面的技术异质性,设计救援效能均衡策略;(2)以遇险人员生存概率为核心,构建救援基地群布局与异构无人艇配置的协同优化模型;(3)基于模型的非线性特征,提出针对性的线性转换方法,降低求解难度。本文拓展了救援基地选址与救援力量配置协同优化的理论体系,丰富了无人艇在应急救援中的应用场景,为智能海洋装备的体系化部署提供了参考。

## 1 问题描述

相比陆上救援基地选址与应急资源配置问题,无人艇参与作业的海上救援基地选址与应急资源配置问题具有其特殊性与复杂性,主要体现在以下几个方面:(1)岸线空间非规则性。受海岸线曲折且不规则的几何形态影响,需优化救援基地群布局,以提升对非规则岸线空间的适应性。(2)救援效能非线性衰减性。恶劣的海上水文气象条件显著降低了遇险人员的生存窗口,其生存概率随救援时间延长而急剧下降,且随离岸距离增加呈非线性衰减。为提升海上应急救援能力,需部署异质无人艇编队,实现快速响应与协同覆盖。(3)运营成本双重空间关联性。一方面,无人艇运营成本与其责任海域的面积呈正相关;另

一方面,受续航能力的限制,无人艇需周期性往返于责任海域与救援基地以补充燃料和备品,而用无人艇替代救援人员执行程序化的海上巡航任务,可节省人工成本。因此,需综合考虑责任海域面积以及救援基地与责任海域之间的航行距离对运营成本的影响。

为便于划分无人艇的责任海域,将海域离散为形状相同的网格单元是一种有效的近似方法。网格单元越小,近似精度越高,可通过建立无人艇与网格单元的对应关系,实现责任海域的精细化划分。当海域内发生险情时,负责该海域救援保障任务的无人艇可立即前往事故海域,迅速发现并接近目标,展开救援工作。在无人艇无法独立完成救援的严重事故中,其可通过投放生存装备和提供浮力支撑,对遇险人员实施早期干预,减缓体力消耗与核心体温下降,有效延长生存窗口,为后续人工救援力量的抵达和成功施救创造关键条件。考虑到无人艇具有巡航和靠泊救援基地两种状态,其与事故海域之间的距离不确定性会显著影响救援效率——最不利的情形是无人艇需从基地出发赶赴事故海域,此时,遇险人员的生存概率与无人艇的航行时长密切相关。通信质量随距离增加而衰减<sup>[23]</sup>,为保障救援基地对无人艇作业的实时监控与有效指挥,必须确保两者之间的距离满足最低通信可靠性阈值要求<sup>[24]</sup>。

综上所述,本文旨在解决一个海上救援系统的协同优化问题,即在综合考虑无人艇性能异质性、续航能力限制、通信距离约束以及海域风险空间分布特征的基础上,联合优化救援基地群的空间布局、无人艇编队配置及其责任海域划分,以实现救援效能的最大化。

## 2 模型构建与求解

本文通过构建数学模型并设计求解方法解决上述问题。其中,模型涉及的变量、参数及其含义见表1。

表 1 变量及参数

Tab.1 Variables and parameters

类型	符号	含义	
集合	$\mathcal{M}$	所有海域单元集合, $ \mathcal{M} $ 表示海域单元总数	
	$\mathcal{N}$	所有救援基地备选位置集合, $ \mathcal{N} $ 表示备选位置总数	
	$\mathcal{S}$	所有无人艇备选船型集合, $ \mathcal{S} $ 表示无人艇备选船型总数	
参数	$Z$	救援效能	
	$P_{m,n,s}$	救援基地 $n$ 的 $s$ 型无人艇对海域单元 $m$ 的响应效率	
	$\beta, \gamma$	响应效率的调节参数	
	$C^U$	年总投资预算上限	
	$l_{m,n}, d_{m,n}$	分别表示海域单元 $m$ 与救援基地 $n$ 间的无人艇航行距离与欧式距离	
	$l^{\max}$	任意海域单元与救援基地备选位置之间无人艇航行距离的最大值	
	$\delta_s$	$s$ 型无人艇续航能力限制下的责任海域面积上限	
	$c_s^S$	$s$ 型无人艇的年购置成本	
	$c_s^B$	$s$ 型无人艇的年泊位建设成本及救援备品年消耗成本	
	$c_s^W$	因配置一艘 $s$ 型无人艇而产生的年人工成本节省量	
	$c_n^E$	救援基地 $n$ 的年建设成本与救助人员所驾驶救助船的年购置成本	
	$c_s^R$	$s$ 型无人艇责任海域单元的单位年运营成本	
	$\theta_m$	海域单元 $m$ 的风险等级	
	$R_s$	$s$ 型无人艇的无线信号有效通信距离阈值	
	$v_s, \alpha_s$	分别表示 $s$ 型无人艇的平均航速与负载能力系数	
	$\sigma, d$	分别表示海域单元的面积与边长	
	$\omega$	目标函数的调节系数	
	$M$	一个充分大的正数	
	决策变量	$x_n$	救援基地备选位置 $n$ 是否被选中并建设成为救援基地, 若是, 则 $x_n = 1$ , 否则, $x_n = 0$
		$y_{n,s}$	救援基地 $n$ 配置的 $s$ 型无人艇数量
$z_{m,n,s}$		海域单元 $m$ 的搜救、巡逻任务是否由救援基地 $n$ 的 $s$ 型无人艇负责, 若是, 则 $z_{m,n,s} = 1$ , 否则 $z_{m,n,s} = 0$	
$r_{n,s}^L, r_{n,s}^U$		分别表示救援基地 $n$ 的 $s$ 型无人艇责任海域的内边界与外边界	

## 2.1 救援效能均衡策略设计

海上遇险人员的救援等待时长, 定义为无人艇从海上或救援基地等出发, 航行至事故海域所需的时间。基于救援等待时长与生存概率的函数关系<sup>[25]</sup>, 构建响应效率评价指标, 用于评估救援基地  $n$  所部署的  $s$  型无人艇对海域单元  $m$  的救援速度, 其数学表达式为:

$$P_{m,n,s} = \frac{z_{m,n,s}}{1 + \exp[\beta(l_{m,n}z_{m,n,s} / v_s - \gamma)]} \quad (1)$$

为科学评估海上救援能力, 以救援效能为量化指标, 对救援基地群布局及无人艇编队配置方案的整体救援水平进行评价。救援效能的数学表达式为:

$$Z = \sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{n \in \mathcal{N}} \sum_{s \in \mathcal{S}} (\omega \sigma \alpha_s P_{m,n,s} + \theta_m z_{m,n,s}) \quad (2)$$

首先, 无人艇具备良好的救援效率, 可以提高遇险人员的生存概率, 同时, 考虑异质无人艇的性

能差异, 救援效能第一部分表示责任海域的响应效率总和。其次, 受海况、天气和交通流量等因素的影响, 不同海域的风险等级往往存在显著差异。基于历史资料和自然气象条件, 通过贝叶斯网络<sup>[26]</sup>将海域单元的险情概率量化为风险等级, 风险等级越高的海域, 其发生险情的可能性越大。在责任海域配置无人艇可提升海域救援效率, 降低事故伤亡程度, 从而降低海域风险等级。因此, 救援效能的第二部分旨在实现对责任海域风险的有效管控, 由所有责任海域的风险等级之和来表征。参数  $\omega$  实现了救援效能中对响应效率与风险等级重视程度的调节。

救援效能还考虑了海域单元的覆盖优先级。险情发生概率较高的海域单元通常具有更高的风险等级, 这类海域被无人艇覆盖时, 对救援效能的提升作用更为显著, 因此, 应优先覆盖险情发生概率高的海域单元。

遇险人员对救援时效较为敏感。当救援基地配置同质无人艇时,海域单元的救援时效性与救援基地的距离直接相关:距离救援基地近的海域单元响应效率高,而距离较远的海域单元响应效率较低。这会导致不同海域之间的响应效率存在较大差异,进而使救援效能呈现显著的不均衡性。若整体提高无人艇选型的航速要求,虽可提升对远距离海域单元的救援时效,但会显著增加配置成本,且对近岸海域易造成资源浪费。

为便于划分各型无人艇的责任海域并确保责任海域的连续性,本文提出一种基于海域与救援基地间距的海域划分方法,救援基地至海域单元内各点的距离,统一采用救援基地与海域单元中心的距离来表征。为便于建模,根据无人艇备选船型的航速由小至大按 1 型至  $|S|$  型顺序编号。当救援基地配置技术性能不同的异质无人艇时,距离救援基地较远的海域可由性能更优的无人艇负责,从而使所覆盖海域的救援效能更高、分布更均衡。因此,将救援效能均衡覆盖策略定义为:对于同一救援基地,根据无人艇性能与海域单元的空间位置,将距离救援基地较远的海域单元分配给性能更优的无人艇负责。在救援效能均衡覆盖策略下,以配置多种无人艇的救援基地  $n$  为例, $s$  型无人艇负责与救援基地  $n$  距离在  $[r_{n,s}^{LB}, r_{n,s}^{UB}]$  范围内的海域单元,其责任单元的外侧海域则由性能更优的  $s+1$  型无人艇负责,如图 1 所示。

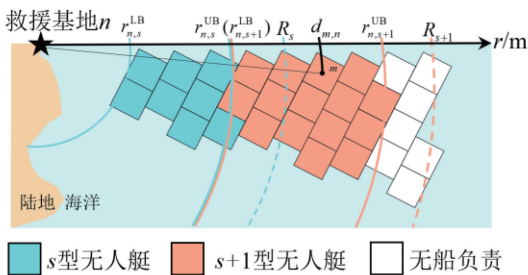


图 1 覆盖海域范围的内外边界关系

Fig.1 Relationship between inner and outer boundaries of coverage area

## 2.2 救援基地群布局与异构无人艇配置协同优化

以救援基地布局、无人艇配置及无人艇责任海域划分为决策变量,将救援效能拆解为响应效率与风险等级可控程度两部分;在救援效能均衡策略下,以所有责任海域整体救援效能最大化为

目标,构建面向效能均衡的救援基地群布局与异构无人艇配置协同优化模型(M1)。

$$[M1] \quad \max \mathcal{Z} = \sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{n \in \mathcal{N}} \sum_{s \in \mathcal{S}} (\omega \sigma \alpha_s P_{m,n,s} + \theta_m z_{m,n,s}) \quad (3)$$

s.t.

$$\sum_{n \in \mathcal{N}} \left[ c_n^E x_n + \sum_{s \in \mathcal{S}} (c_s^S + c_s^B - c_s^W) y_{n,s} \right] + \sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{n \in \mathcal{N}} \sum_{s \in \mathcal{S}} c_s^R \sigma (l_{m,n} / l^{\max}) z_{m,n,s} \leq C^U \quad (4)$$

$$\sum_{n \in \mathcal{N}} \sum_{s \in \mathcal{S}} z_{m,n,s} \leq 1, \forall m \in \mathcal{M} \quad (5)$$

$$z_{m,n,s} \leq y_{n,s}, \forall n \in \mathcal{N}, m \in \mathcal{M}, s \in \mathcal{S} \quad (6)$$

$$x_n \leq \sum_{s \in \mathcal{S}} y_{n,s} \leq M x_n, \forall n \in \mathcal{N} \quad (7)$$

$$r_{n,s}^L \leq r_{n,s}^U \leq R_s, \forall n \in \mathcal{N}, s \in \mathcal{S} \quad (8)$$

$$z_{m,n,s} r_{n,s}^L < d_{m,n}, \forall m \in \mathcal{M}, n \in \mathcal{N}, s \in \mathcal{S} \quad (9)$$

$$z_{m,n,s} d_{m,n} \leq r_{n,s}^U, \forall m \in \mathcal{M}, n \in \mathcal{N}, s \in \mathcal{S} \quad (10)$$

$$\sum_{n \in \mathcal{N}} \sum_{s \in \mathcal{S}} z_{m,n,s} = 1 \mid \exists u \in \mathcal{N}, r_{u,|S|}^U - d_{m,u} \geq 0, \forall m \in \mathcal{M} \quad (11)$$

$$r_{n,s}^U = r_{n,s+1}^L, \forall n \in \mathcal{N}, s \in \{1, 2, \dots, |S| - 1\} \quad (12)$$

$$r_{n,1}^L = 0, \forall n \in \mathcal{N} \quad (13)$$

$$\sigma \sum_{m \in \mathcal{M}} z_{m,n,s} \leq y_{n,s} \delta_s, \forall n \in \mathcal{N}, s \in \mathcal{S} \quad (14)$$

$$\begin{cases} r_{n,s}^U - r_{n,s}^L = 0 \mid y_{n,s} = 0 \\ r_{n,s}^U - r_{n,s}^L > 0 \mid y_{n,s} \neq 0 \end{cases}, \forall n \in \mathcal{N}, s \in \mathcal{S} \quad (15)$$

$$\begin{cases} z_{m,n,s} l_{m,n} / v_s \geq 0 \mid y_{u,e} = 0 \\ z_{m,n,s} l_{m,n} / v_s \leq l_{m,u} / v_e \mid y_{u,e} \neq 0 \end{cases} \forall m \in \mathcal{M}; s, e \in \mathcal{S}; n, u \in \mathcal{N} \text{ and } u \neq n \quad (16)$$

$$y_{n,s} \in \mathbb{N}^+, \forall n \in \mathcal{N}, s \in \mathcal{S} \quad (17)$$

$$r_{n,s}^L, r_{n,s}^U \in \mathbb{R}^+, \forall n \in \mathcal{N}, s \in \mathcal{S} \quad (18)$$

$$x_n, z_{m,n,s} \in \{0, 1\}, \forall m \in \mathcal{M}, n \in \mathcal{N}, s \in \mathcal{S} \quad (19)$$

式(3)为目标函数,表示救援效能最大化。救援效能由响应效率与风险等级两部分构成,目标函数对两部分的重视程度通过参数  $\omega$  进行调节。式(4)一式(19)为约束条件。其中,式(4)限制年总成本不超出年总投资预算。年总成本由两部分构成:第一部分包含救援基地年建设成本、无人艇年购置费用、配套设施建设成本及节约的人

工成本;第二部分为无人艇年运营成本。式(5)表示一个海域单元最多由一种无人艇覆盖。式(6)一式(7)为救援基地无人艇配备与责任海域单元间的约束。式(8)一式(10)用于约束救援基地  $n$  所配置的  $s$  型无人艇有效通信范围与海域单元  $m$  覆盖状态之间的关联关系,并保证无人艇责任海域的内外边界符合救援效能均衡覆盖策略。式(11)表示当海域单元  $m$  位于某救援基地的海域范围内,即存在某救援基地  $u$  的责任海域外边界可以覆盖海域单元  $m$  时,则该海域单元必须被某一救援基地的无人艇覆盖,由于可能存在多个救援基地  $u$ ,因此,只需满足  $\sum_{n \in \mathcal{N}} \sum_{s \in \mathcal{S}} z_{m,n,s} = 1$  即可。式(11)与式(10)共同作用可以确保所有位于救援基地覆盖范围内的海域单元均有相应无人艇负责,从而保证覆盖海域的连续性。式(12)保证无人艇按照救援效能均衡覆盖策略覆盖海域单元,与救援基地  $n$  的距离超出  $s$  型无人艇责任海域的外边界  $r_{n,s}^U$  的海域单元将被性能更优的  $s+1$  型无人艇覆盖。式(12)与式(13)共同作用保证了救援基地配置的多型无人艇责任海域的连续性。式(14)表示无人艇所覆盖的海域面积不应超过其续航能力限制下的最大责任海域面积。式(15)表示救援基地  $n$  所配置的  $s$  型无人艇与其责任海域范围的内、外边界之间的关系。式(16)为救援响应速度约束,表示若海域单元  $m$  由救援基地  $n$  的  $s$  型无人艇负责,则该无人艇对海域单元  $m$  的响应速度需快于其他救援基地的无人艇。式(17)一式(19)约束了各决策变量的取值范围。

### 2.3 基于线性转换的求解方法

M1 为含复杂约束的混合整数非线性模型,包含指数型、二次多项式及逻辑约束等非线性项。采用线性变换方法处理 M1 中的非线性项,将其转化为线性规划模型,可通过线性求解器直接求解。

#### (1) 对式(1)的线性化

由式(1)可知,当  $z_{m,n,s} = 1$  时,  $P_{m,n,s}$  与  $z_{m,n,s} / \tilde{p}_{m,n,s}$  等价,其中,  $\tilde{p}_{m,n,s} = 1 + \exp[\beta(l_{m,n}/v_s - \gamma)]$ ; 当  $z_{m,n,s} = 0$  时,  $P_{m,n,s} = 0$ , 同样等价于  $z_{m,n,s} / \tilde{p}_{m,n,s}$ 。因此,通过输入  $\tilde{p}_{m,n,s}$  的参数矩阵,可将式(1)转化为如下线性表达式:

$$P_{m,n,s} = z_{m,n,s} / \tilde{p}_{m,n,s}, \forall m \in \mathcal{M}, n \in \mathcal{N}, s \in \mathcal{S} \quad (20)$$

#### (2) 对式(9)的线性化

引入一个充分大的正数  $M$ , 可将式(9)改写为如下线性不等式:

$$r_{n,s}^L < d_{m,n} [M(1 - z_{m,n,s}) + z_{m,n,s}], \quad \forall m \in \mathcal{M}, n \in \mathcal{N}, s \in \mathcal{S} \quad (21)$$

式(21)为严格不等式,若直接采用线性优化求解器求解,可能出错或无法收敛。因此,引入充分小的正参数  $\varepsilon$ , 将式(21)转化为如下约束:

$$r_{n,s}^L \leq d_{m,n} [M(1 - z_{m,n,s}) + z_{m,n,s}] - \varepsilon, \quad \forall m \in \mathcal{M}, n \in \mathcal{N}, s \in \mathcal{S} \quad (22)$$

#### (3) 对式(11)的线性化

对于式(11),当  $\exists n \in \mathcal{N}$ , 使得  $r_{n,|S|}^U - d_{m,n} \geq 0$  时,限制  $\sum_{u \in \mathcal{N}} \sum_{s \in \mathcal{S}} z_{m,u,s} = 1$ 。引入一个充分大的正数  $M$ , 可将式(11)改写为如下线性不等式:

$$M \sum_{u \in \mathcal{N}} \sum_{s \in \mathcal{S}} z_{m,u,s} \geq r_{n,|S|}^U - d_{m,n}, \forall m \in \mathcal{M}, n \in \mathcal{N} \quad (23)$$

#### (4) 对式(15)一式(16)的线性化

对于式(15)一式(16),引入中间变量  $\zeta_{n,s} \in \{0, 1\}$ , 表示救援基地  $n$  是否配备  $s$  型无人艇,以此刻画式(15)一式(16)中由条件语句定义的逻辑约束。 $\zeta_{n,s}$  与  $y_{n,s}$  的关联关系如下式所示:

$$\zeta_{n,s} \leq y_{n,s} \leq M \zeta_{n,s}, \forall n \in \mathcal{N}, s \in \mathcal{S} \quad (24)$$

当救援基地  $n$  配备  $s$  型无人艇时,即  $y_{n,s} \geq 1$ , 此时,  $\zeta_{n,s} = 1$ , 通过线性约束限制  $r_{n,s}^U - r_{n,s}^L > 0$ ; 当救援基地  $n$  未配备  $s$  型无人艇时,即  $y_{n,s} = 0$ , 此时  $\zeta_{n,s} = 0$ , 通过线性约束限制  $r_{n,s}^U - r_{n,s}^L = 0$ 。由此,可将式(15)转化为如下线性约束。

$$\zeta_{n,s} / M \leq r_{n,s}^U - r_{n,s}^L \leq M \zeta_{n,s}, \forall n \in \mathcal{N}, s \in \mathcal{S} \quad (25)$$

同理,通过中间变量  $\zeta_{n,s}$  也可将式(16)转化为如下线性约束。

$$l_{m,n} z_{m,n,s} / v_s \leq l_{m,u} [M(1 - \zeta_{u,e}) + \zeta_{u,e}] / v_e, \quad \forall m \in \mathcal{M}; n, u \in \mathcal{N}; s, e \in \mathcal{S}; u \neq n \quad (26)$$

通过以上变换,可将 M1 转化为混合整数线性规划模型 M2, 再通过 CPLEX、Gurobi 等线性优化软件直接求得精确解。

$$[M2] \max \mathcal{Z} = \sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{n \in \mathcal{N}} \sum_{s \in \mathcal{S}} (\omega \sigma \alpha_s / \tilde{p}_{m,n,s} + \theta_m) z_{m,n,s} \quad (27)$$

$$\text{s.t.} \quad \zeta_{n,s} \in \{0, 1\}, \forall n \in \mathcal{N}, s \in \mathcal{S} \quad (28)$$

式(4)一式(8), 式(10), 式(12)一式(14),

式(17)一式(19), 式(22)一式(26)

### 3 案例分析

#### 3.1 基本参数

某沿海水域海上活动频繁,为提升海上应急救援能力,主管部门拟在年度总投资预算约束下,建设若干海上救援基地。以精度  $d=0.6\text{ km}$  为例,该沿海水域沿岸共设置 41 个救援基地备选位置,水域区域被离散为 525 个海域单元。根据海域单元历年险情及其发生次数、气象海况条件,评估各海域单元的险情概率,并通过贝叶斯网络将其量化为各海域单元的风险级别,具体如图 2 所示。岸线通常呈现非凸几何形态,若直接采用救援基地与海域单元间的欧氏距离表征无人艇航行距离,会存在距离低估问题,而采用曼哈顿距离则易造成距离高估。为此,本文允许相邻海域单元间沿对角线移动,并通过 A\* 算法计算救援基地  $n$  至海域单元  $m$  的航行距离  $l_{m,n}$ ,具体路径如图 2 中红色折线所示。

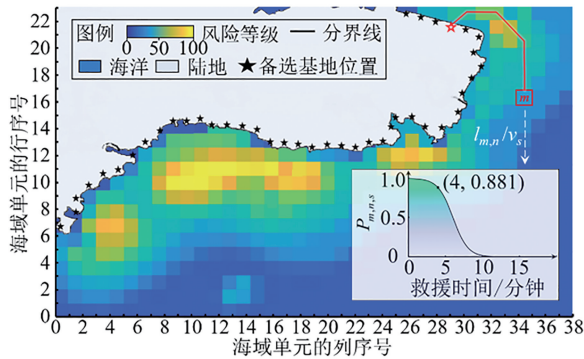


图 2 沿海海域单元风险状况与救援基地备选位置分布  
Fig.2 Risk of coastal water units and locations of candidate rescue bases

人员溺水后的黄金急救时间为 4 min,溺水时长超过 4 min,生还概率将急剧下降;若超过 10 min,生还概率极低<sup>[12]</sup>。为更好地使响应效率  $P_{m,n,s}$  符合实际情况,调节  $\beta=1, \gamma=6$ 。当海域单元  $m$  由救援基地  $n$  的  $s$  型无人艇负责时,即  $z_{m,n,s}=1, P_{m,n,s}$  与  $s$  型无人艇抵达该海域单元所需救援时间的关系如图 2 所示。通过对无人艇市场调研,选择三种无人艇作为备选船型,具体参数见表 2。各救援基地可配置一种或多种船型。

表 2 无人艇的相关参数

Tab.2 Related parameters of USV

船型	航速 $v_s$ /kn	责任海域面积 上限 $\delta_s$ /km <sup>2</sup>	年人工成本节约量 $c_s^w$ /万元	负载能力 系数 $\alpha_s$
S	25	4.0	1.0	0.8
M	30	6.0	2.5	1.0
F	35	8.0	4.0	1.2

#### 3.2 算法验证

通过线性转换将复杂非线性模型 M1 转化为线性模型 M2,可采用线性求解器直接求解 M2,有效降低了 M1 的求解难度。为验证算法的求解性能,以 0.3 km 为调节步长,设置  $d=2.4, 2.1, \dots, 0.6\text{ km}$  的 7 组不同精度的算例<sup>[27]</sup>。鉴于上节所示情景下,  $d_{m,n}$  和  $l_{m,n}$  的取值均不超过 20 km,因此,设置式 (22) 一式 (26) 中充分大的正数  $M$  取值 1000。每个算例均在 13th Gen Intel (R) Core (TM) i7-13700 2.10 GHz 的环境下使用 Gurobi 求解, Gurobi 的求解精度 GAP 值设为 0,且不设置求解时间限制,不同精度下的求解结果见表 3。

表 3 不同精度下的求解结果

Tab.3 Solution results under different precisions

算例	精度 $d/\text{km}$	算例规模 $ \mathcal{N}  \times  \mathcal{M} $	Gurobi	
			目标值	求解时间/s
1	2.4	$9 \times 38$	2.10	35.47
2	2.1	$10 \times 48$	2.52	94.20
3	1.8	$12 \times 67$	2.44	339.63
4	1.5	$14 \times 88$	2.48	809.28
5	1.2	$22 \times 135$	2.57	2579.16
6	0.9	$36 \times 238$	2.56	12260.54
7	0.6	$41 \times 525$	2.58	>43200.00

在求解时间方面,由表 3 可知,随着  $d$  取值逐渐缩小,算法的求解时间逐渐增大;即当  $d$  取值为 1.5 km 以上时,算法最多可以在 13.5 min 内实现模型求解,但当  $d$  的取值减小至 0.6 km 时, M2 的求解时间则需要 43200 s (12 h) 以上。究其原因为 M2 包含  $4|\mathcal{N}| \cdot |\mathcal{S}| + |\mathcal{N}| \cdot |\mathcal{S}| \cdot |\mathcal{M}| + |\mathcal{N}|$  个变量和  $1 + |\mathcal{M}| + 4|\mathcal{N}| \cdot |\mathcal{S}| \cdot |\mathcal{M}| + 4|\mathcal{N}| \cdot |\mathcal{S}| + |\mathcal{N}| \cdot (|\mathcal{S}| - 1) + 2|\mathcal{M}| \cdot |\mathcal{N}| + |\mathcal{N}| \cdot |\mathcal{N}| - 1 \cdot |\mathcal{S}| \cdot |\mathcal{S}|$  个约束,随着  $d$  的取值减小,模型规模剧增。当  $d=0.6\text{ km}$  时,  $|\mathcal{S}|=3, |\mathcal{N}|=41, |\mathcal{M}|=525$ , M2 将成为一个包含超过 6 万个变量、796 万个约束及超过 1875 万个非零项的复杂模型,求解需要较长时间。在求解质

量方面,由表 3 可知,算例 1~4 的小规模算例的目标值表现出较大的波动性,这是由于海域单元的网格判定条件取决于网格内海域面积是否大于陆地面积,当  $d$  取值较大时,会导致海域单元的判定存在较大偏差。然而,算例 5~7 的目标值相差较小,表明当  $d$  的取值不大于 1.2 km 时,离散化后的海域单元已能较好地反映实际海域状况。

综上,当  $d$  的取值较大时,离散精度较低,可能导致优化结果与实际情况存在较大偏差,而  $d$  取值过小,则会增加模型求解所需时间。因此,决策者需要在保证优化结果尽可能准确的前提下,设置合理的  $d$  取值范围以调控问题规模,实现对求解时间的有效控制。在上节算例情景下,  $d = 1.2$  km、0.9 km 和 0.6 km 时,均能较好地反应实际情景,为决策者提供了有益参考。

### 3.3 优化结果与分析

以表 3 中第 7 组算例为例,在通信距离、续航

能力及资源条件约束下求解 M2,可得到救援效能最优的救援基地群布局、无人艇配置及责任海域划分方案。如图 3 所示,在预算约束下,规划沿海岸线由西向东依次建设 I、II 和 III 共 3 个救援基地,分别对应原 6 号、20 号和 33 号备选基地位置,救援基地群沿海岸线呈均匀分布。其中,救援基地 I 配置 6 艘 M 型无人艇,负责距救援基地 3 n mile 内的海域;救援基地 II 配置 1 艘 S 型无人艇和 5 艘 M 型无人艇,S 型无人艇负责距救援基地 1.1 n mile 内的海域,M 型无人艇负责距救援基地 1.1 n mile~2.8 n mile 范围内的海域;救援基地 III 配置 1 艘 S 型无人艇和 5 艘 F 型无人艇,S 型无人艇负责距救援基地 1.1 n mile 内的海域,F 型无人艇负责距救援基地 1.1 n mile~2.9 n mile 范围内的海域。最终,形成具有“一轴两翼,梯次联动”特征的救援基地群布局与异质无人艇配置方案。

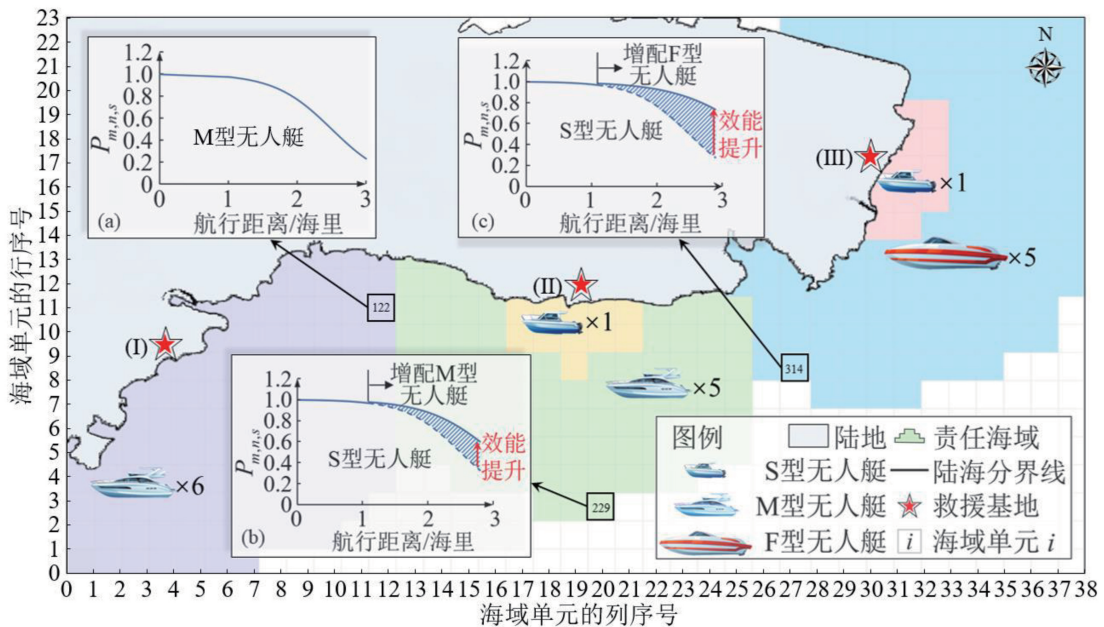


图 3 救援基地群布局与异质无人艇配置协同优化结果

Fig.3 Optimization results of collaborative deployment for base clusters and heterogeneous USV allocation

从风险等级重视程度来看,对比图 2 和图 3 可知:图 2 中风险等级较高的黄色部分海域均在图 3 中得到有效覆盖;对于部分风险等级较低的海域单元(如海域单元 314 下方海域单元),在资源有限条件下,依据其与救援基地的航行距离进行优先覆盖。

从响应效率均衡性来看,离岸较远的海域单

元响应效率大幅提升,有效缩小了责任海域内不同离岸距离单元间的响应效率差距。如图 3(b)和 3(c)所示,均衡策略下救援基地 II 和 III 配置了异质无人艇,海域单元 229 由 M 型无人艇负责,海域单元 314 由 F 型无人艇负责。相较于配置同质无人艇,两海域单元的  $P_{m,n,s}$  由 0.32 和 0.28 分别提升至 0.59 和 0.74。由此可见,在均衡

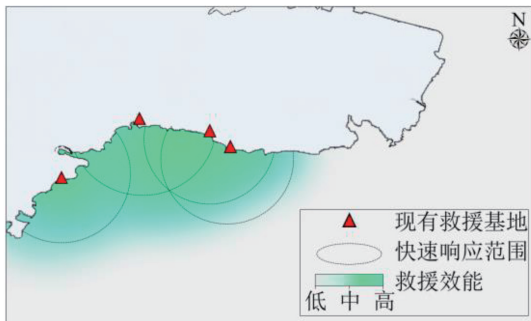
策略下,将高速无人艇优先服务离岸距离远的海域,能够有效缩短远距离海域的救援响应时间,提高救援响应速度,显著提升责任海域响应效率的均衡性。

目前,案例海域现有救援基地所配置的救援船舶仍为传统救助船,险情发生时,救助船需要较长的前置准备时间。在式(1)行驶时间的基础上增加前置准备时间  $t$ ,则在现有传统救助船配置情况下,响应效率  $P_{m,n,s}$  的计算公式为:

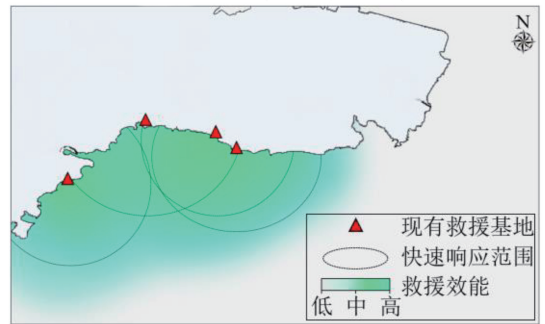
$$P_{m,n,s} = \frac{z_{m,n,s}}{1 + \exp[\beta(l_{m,n}z_{m,n,s} / v_s + t - \gamma)]} \quad (29)$$

设置前置准备时间  $t = 3 \text{ min}$ , 计算响应效率  $P_{m,n,s}$ , 并定义  $P_{m,n,s} > 0.7$  的海域为快速响应范围,如图 4 (a) 所示。若将现有救援基地位置固定,在相同年总投资条件下为其配备无人艇,可得到基于现有基地优化的无人艇配置方案为 7 艘 S 型、12 艘 M 型和 1 艘 F 型,对应的快速响应范围如图 4 (b) 所示。在本文优化方法下得到的救援基地布局优化方案如图 4 (c) 所示。

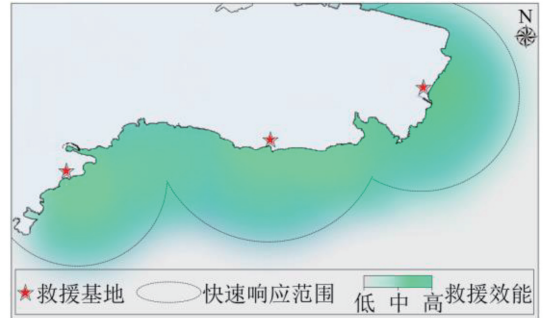
由图 4 (a) 可知,现有救援基地布局主要集中于西部沿岸区域,空间分布较为集聚,导致东部海域成为海上救援薄弱区域。若在年总投资预算约束下为现有救援基地配备无人艇,得益于无人艇更短的前置准备时间,海域快速响应范围将有所扩大,如图 4 (b) 所示。此外,现有救援基地布局较为紧凑,不利于有限救援资源充分发挥救援效能,且快速响应范围存在较多重叠区域。相比之下,图 4 (c) 中本文均衡策略下优化得到的异质性无人艇配置方案,有效拓展了快速响应范围。图 4 (b) 和图 4 (c) 两种方案下海域单元覆盖数量详细对比见表 4。



(a) 现有救援基地布局方案



(b) 基于现有救援基地优化的无人艇配置布局方案



(c) 本文救援基地布局优化方案

图 4 不同救援基地群布局下救援效能对比

Fig.4 Rescue efficiency comparison under different base cluster deployment schemes

表 4 方案对比

Tab.4 Scheme comparison

方案	总覆盖/个	重复覆盖/个	快速响应范围/个
基于现有救援基地 优化无人艇配置 布局方案	297	73	155
本文的救援基地 布局优化方案	316	0	287
提高比例/%	6.4	—	85.2

由表 4 可知,在本文的救援基地布局优化方案下,更多海域单元得以被覆盖。这是因为救援基地数量减少所节省的 20 万元建设成本,被用于配置无人艇以扩展覆盖范围。此外,本文的救援基地布局优化方案避免了海域单元的重复覆盖,使得重复覆盖海域占比由 24.6% 降至 0%,且满足快速响应需求的海域面积扩大了 85.2%。当重复覆盖海域单元的救援效能仅按最大值计算时,现有救援基地无人艇布局方案的目标值为 1.40,而本文提出的救援基地布局优化方案可达 2.58,效能提升幅度达 84.7%。由此可见,本文设计的面向效能均衡的救援基地群布局与异构无人艇配置协同优化方法,能够有效提升救援基地群

的布局合理性与无人艇资源配置效率,可为相关部门在救援基地选址、资源统筹配置及任务协同调度等方面提供科学决策支撑。

### 3.4 响应效率与风险等级的权重分配对优化结果的影响

为探究目标函数中响应效率与风险等级的权重分配对优化结果的影响,本文以 10 为步长,设置权重系数  $\omega = 0, 10, 20, \dots, 200$ , 共 21 个梯度值。通过动态调整目标函数中响应效率与风险等级的权重比例,同时保持其他参数与第 3.1 节设置一致。对于每一个  $\omega$ , 均通过求解相应的 M2 模型得到最优解。为方便表述,记目标函数  $Z = \omega Z_1 + Z_2$ 。其中,  $Z_1 = \sum_{m \in M} \sum_{n \in N} \sum_{s \in S} \sigma \alpha_s P_{m,n,s}$ ,  $Z_2 = \sum_{m \in M} \sum_{n \in N} \sum_{s \in S} \theta_m z_{m,n,s}$ 。为更加清晰地刻画  $Z_1$ 、 $Z_2$  的变化趋势,采用归一化方法,利用  $\varphi(Z_i)$  消除两者间量纲差异。

$$\varphi(Z_i) = (Z_i - Z_i^L) / (Z_i^U - Z_i^L), \forall i \in \{1, 2\} \quad (30)$$

式中:  $Z_i^L$ 、 $Z_i^U$  分别为各  $\omega$  取值下求得的  $Z_i$  最小值和最大值。 $\varphi(Z_i)$  以及责任海域划分、无人艇配置随  $\omega$  的变化如图 5 所示。

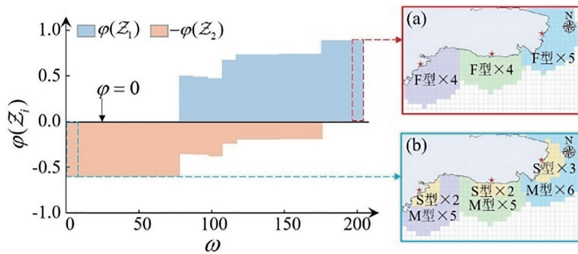


图 5 救援响应效率与风险等级的权重对优化结果的影响

Fig.5 Impact of the weights of rescue response efficiency and risk level on the optimization results

由图 5 可知,从整体趋势来看,随着响应效率权重的增大,  $Z_1$  总体呈现不断增长的趋势,而  $Z_2$  总体呈现不断下降的趋势,表明目标函数中  $Z_1$  与  $Z_2$  存在冲突关系。此外,  $Z_1$ 、 $Z_2$  变化趋势中出现了多次断崖式波动。当  $\omega$  增至 80 时,  $Z_1$  由 96.4 突变至 105.9,  $Z_2$  由 15 955 突变至 15 235。这是由无人艇配置方案调整与海域覆盖范围变化共同导致的: M 型无人艇数量从 16 艘减少至 5 艘, F 型无人艇从 0 艘增加至 7 艘,同时,海域单元总数减少 29 个。

随着响应效率权重的增大,决策者将面临责任海域范围拓展的困境。由图 5(a) 和 5(b) 可知,当  $\omega = 0$  时,无人艇配置方案为 7 艘 S 型、16 艘 M 型;当  $\omega = 200$  时,无人艇配置方案调整为 13 艘 F 型。这表明,随着决策者对风险等级重视程度的提升,其更趋向于配置航速和负载能力等性能更优的 F 型无人艇。然而,由于高性能无人艇的购置与营运成本较高,在相同预算约束下,无法覆盖同等规模的海域单元,导致覆盖总数从 343 个逐步缩减至 282 个,降幅达 17.8%。若要在救援效能不降低的前提下,保持海域单元覆盖数量不变,则需每年追加 2.1 万~9.7 万元的投资预算,且追加额度随决策者对响应效率的重视程度提升而相应增加。图 6 为海域单元覆盖总数随权重的变化。图中,黑色折线表示海域单元数量的变化趋势,黄色条形表示投资预算的增加额。

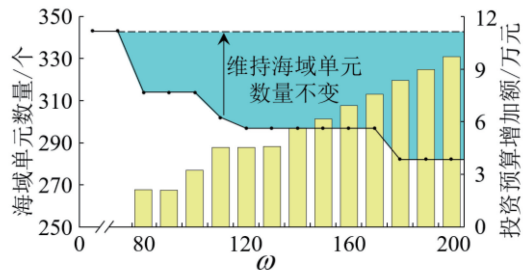


图 6 海域单元覆盖总数随权重的变化

Fig.6 The total number of sea area units covered varies with the change in weight

综上,通过调整目标函数中响应效率与风险等级的权重分配,可为决策者提供多样化的基地群布局与无人艇配置方案。需注意的是,当过度侧重响应效率时,在投资预算约束下可能引发责任海域范围拓展的困境。此时,决策者可通过适度增加投资预算来维持责任海域规模。

## 4 结 语

为解决传统操作范式下程序化与高危险性海上救援活动对救援人员高度依赖的问题,提升我国海上救援效能,本文提出面向效能均衡的救援基地群布局与异构无人艇配置协同优化方法。首先,将生存概率引入海上救援体系,提出基于该指标的海上救援水平度量方法。其次,考虑无人艇技术性能的异质性,设计了救援效能均衡覆盖策略,以提升海上救援水平,缓解空间距离因素导致

的救援效能分布不均衡问题。在此基础上,建立面向效能均衡的救援基地群布局与异构无人艇配置协同优化模型。最后,针对模型的非线性特征,设计了基于线性转化的精确求解算法。

案例的优化结果表明,采用均衡策略的异质无人艇配置能够有效提升远距离海域救援单元的效能,显著增强责任海域救援效能的系统均衡性。该策略通过优化资源配置,有效拓展了快速响应范围,同时大幅降低了各救援基地责任海域划分的重叠度。在过度关注响应效率时,受投资预算限制,容易陷入责任海域范围难以拓展的困境,可通过适度增加投资预算来维持现有责任海域的覆盖规模。本文设计方法可为相关部门在无人艇船型择优、救援基地群布局及救援资源协同配置方面提供决策支持。

#### 参考文献 (References):

- [1] 郭兴海,李紫萌,计明军,等. 基于强化学习算法的两阶段无人船协同调度方法[J]. 系统工程理论与实践, 2024, 44(10): 3434-3450.  
GUO X H, LI Z M, JI M J, et al. Two-stage unmanned vessels co-scheduling method based on the reinforcement learning algorithm[J]. Systems Engineering - Theory & Practice, 2024, 44(10): 3434-3450. (in Chinese)
- [2] 李欢欢,刘奕,刘文,等. 渤海海域应急救援基地选址优化方法[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2017, 38(1): 98-104.  
LI H H, LIU Y, LIU W, et al. Optimization method of emergency rescue base site selection in Bohai sea[J]. Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science), 2017, 38(1): 98-104. (in Chinese)
- [3] OLGAC T, TOZ A C. Determining the optimum location of ground control stations (GCSs) for unmanned aerial vehicles (UAVs) in marine search and rescue (MSAR) operations[J]. International Journal of Aeronautical and Space Sciences, 2022, 23(5): 1021-1032.
- [4] 郭兴海,张之倩,余乐安,等. 基于异构无人系统海上多目标任务规划方法研究[J]. 系统工程理论与实践, 2025, 45(5): 1687-1700.  
GUO X H, ZHANG Z Q, YU L A, et al. Research on maritime multi-objective mission planning method based on heterogeneous unmanned system[J]. Systems Engineering - Theory & Practice, 2025, 45(5): 1687-1700. (in Chinese)
- [5] 郭冰,靖可,龚逢能. 灾后初期考虑需求及时间不确定的应急物资配送中心选址-分配优化[J]. 大连海事大学学报, 2023, 49(2): 121-130.  
GUO B, JING K, GONG F N. Location-allocation optimization of emergency material distribution center considering demand and time uncertainty in the initial stage of post-disaster[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2023, 49(2): 121-130. (in Chinese)
- [6] XIE J J, ZHOU R, LOU J, et al. Hybrid partition-based patrolling scheme for maritime area patrol with multiple cooperative unmanned surface vehicles [J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2020, 8(11): 936.
- [7] SHAN Y L, ZHANG R. Study on the allocation of a rescue base in the Arctic[J]. Symmetry, 2019, 11(9): 1073.
- [8] 吴迪,王诺,宋南奇,等. 边远群岛物流体系的选址-库存-路径优化[J]. 系统工程理论与实践, 2016, 36(12): 3175-3187.  
WU D, WANG N, SONG N Q, et al. The optimization for location inventory routing problem of remote islands logistics system [J]. Systems Engineering - Theory & Practice, 2016, 36(12): 3175-3187. (in Chinese)
- [9] 张晨晓,祝蕊,刘海月,等. 考虑伤员心理状况的应急医疗救护问题研究[J]. 中国管理科学, 2017, 25(10): 187-196.  
ZHANG C X, ZHU R, LIU H Y, et al. The emergency victims rescue problem considering psychological condition[J]. Chinese Journal of Management Science, 2017, 25(10): 187-196. (in Chinese)
- [10] 陈刚,付江月. 灾后不确定需求下应急医疗移动医院鲁棒选址问题研究[J]. 中国管理科学, 2021, 29(9): 213-223.  
CHEN G, FU J Y. Emergency medical mobile hospital robust location problem in post-disaster under demand uncertainty [J]. Chinese Journal of Management Science, 2021, 29(9): 213-223. (in Chinese)
- [11] ZHU J X, ZHANG W D, YU L A, et al. A novel multi-attention reinforcement learning for the scheduling of unmanned shipment vessels (USV) in automated container terminals[J]. Omega, 2024, 129: 103152.
- [12] TIPTON M J, GOLDEN F S C. A proposed decision-making guide for the search, rescue and resuscitation of submersion (head under) victims based on expert opinion[J]. Resuscitation, 2011, 82(7): 819-824.
- [13] 张伟航,钟铭,朱彦锦,等. 海上救援基地选址及救

- 助船配置优化研究[J]. 中国航海, 2023, 46(4): 61-68.
- ZHANG W H, ZHONG M, ZHU Y J, et al. On location selection for maritime rescue base and configuration optimization of rescue ship [J]. Navigation of China, 2023, 46(4): 61-68. (in Chinese)
- [14] 喻刚, 赵秋红, 郝蒙浩. 考虑时间满意度的海上应急救援航空基地选址方法[J]. 数学的实践与认识, 2020, 50(23): 82-92.
- YU G, ZHAO Q H, XI M H. Site selection method of marine emergency rescue aviation base on considering time satisfaction[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2020, 50(23): 82-92. (in Chinese)
- [15] JIN Y J, WANG N, SONG Y T, et al. Optimization model and algorithm to locate rescue bases and allocate rescue vessels in remote oceans[J]. Soft Computing, 2021, 25: 3317-3334.
- [16] 王义轩, 李擎, 姚其家, 等. 多无人艇固定时间自适应分布式协同编队控制[J]. 工程科学学报, 2024, 46(10): 1880-1888.
- WANG Y X, LI Q, YAO Q J, et al. Fixed-time adaptive distributed cooperative formation control for multiple unmanned surface vessels[J]. Chinese Journal of Engineering, 2024, 46(10): 1880-1888. (in Chinese)
- [17] 詹小飞, 赵红, 王宁, 等. 基于多策略改进麻雀搜索算法的无人艇路径规划[J]. 大连海事大学学报, 2024, 50(1): 1-10.
- ZHAN X F, ZHAO H, WANG N, et al. Multi-strategy improved sparrow search algorithm-based path planning of unmanned surface vehicle[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2024, 50(1): 1-10. (in Chinese)
- [18] DU B, LU Y, CHENG X T, et al. The object-oriented dynamic task assignment for unmanned surface vessels [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2021, 106: 104476.
- [19] WU W, ZUO Y, TONG S C. Adaptive fuzzy finite-time event-triggered formation control for unmanned surface vehicle systems [J]. Ocean Engineering, 2024, 292: 116567.
- [20] LIU Y C, BUCKNALL R. Path planning algorithm for unmanned surface vehicle formations in a practical maritime environment [J]. Ocean Engineering, 2015, 97: 126-144.
- [21] LIU Y C, SONG R, BUCKNALL R, et al. Intelligent multi-task allocation and planning for multiple unmanned surface vehicles (USVs) using self-organising maps and fast marching method [J]. Information Sciences, 2019, 496: 180-197.
- [22] TAN G G, ZHUANG J Y, ZOU J, et al. Adaptive adjustable fast marching square method based path planning for the swarm of heterogeneous unmanned surface vehicles (USVs) [J]. Ocean Engineering, 2023, 268: 113432.
- [23] WEI T, FENG W, CHEN Y F, et al. Hybrid satellite-terrestrial communication networks for the maritime Internet of Things: key technologies, opportunities, and challenges [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(11): 8910-8934.
- [24] YANG T T, GUO Y J, ZHOU Y, et al. Joint communication and control for small underactuated USV based on mobile computing technology [J]. IEEE Access, 2019, 7: 160610-160622.
- [25] ERKUT E, INGOLFSSIN A, ERDOGAN G. Ambulance location for maximum survival [J]. Naval Research Logistics (NRL), 2008, 55(1): 42-58.
- [26] QU X T, WANG C B, ZHAO R J, et al. Multi-source data-driven Bayesian network for risk analysis of maritime accidents in the high sea [J]. Frontiers in Marine Science, 2025, 12: 1631650.
- [27] ZHANG J L, DAI M H, SU Z. Task allocation with unmanned surface vehicles in smart ocean IoT [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7(10): 9702-9713.