

区域多层次海上船舶溢油应急设备库选址研究

白佳兴, 刘桂云, 胡超, 胡俊林

(宁波大学 海运学院, 浙江 宁波 315211;
宁波大学 东海战略研究院海洋经济研究中心, 浙江 宁波 315211)

摘要: 研究多层次海上船舶溢油应急设备库的选址问题, 对有效利用溢油应急资源, 提升区域溢油应急能力, 完善溢油应急体系具有重要指导意义。根据溢油风险点的分布和对溢油量的预测, 结合不同层级溢油应急设备库应急服务半径、综合清除控制能力等特征, 建立以不同风险水域的最佳覆盖、可靠性和时效性最强为目标的多层级海上船舶溢油应急设备库选址模型, 并利用多目标粒子群优化(MOPSO)算法和非支配排序遗传算法二(NSGA-II)对模型求解, 获得帕累托最优解集。选址模型从协同救助视角出发, 基于不同层级设备库应急服务能力, 实现对不同风险水域的最佳多重覆盖, 旨在共享应急资源, 并进一步提升区域应急处理能力。

关键词: 船舶溢油; 应急设备库; 选址; 多目标粒子群优化算法; 非支配排序遗传算法二

中图分类号: U6-9 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1000-4653.2025.01.023

Research on the location selection of regional multi-level offshore ship oil spill emergency equipment depots

BAI Jiaying, LIU Guiyun, HU Chao, HU Junlin

(Faculty of Maritime and Transportation, Ningbo University, Ningbo 315211, China;
Marine Economic Research Center, East China Sea Strategic Research Institute,
Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: Study on the location selection problem of multi-level offshore ship oil spill emergency equipment depots is of great guiding significance for the effective utilization of oil spill emergency resources, the improvement of regional oil spill emergency response capabilities, and the perfection of the oil spill emergency response system. According to the distribution of oil spill risk points and the predicted oil spill volume, combined with the characteristics of the emergency service radius and comprehensive removal and control capabilities of oil spill emergency equipment depots at different levels, a location selection model for multi-level offshore ship oil spill emergency equipment depots is established with the objectives of achieving the best coverage, the highest reliability, and the strongest timeliness for different risk waters. Then, the MOPSO algorithm and NSGA-II algorithm are used to solve the model, and the Pareto optimal solution set is obtained. Starting from the perspective of coordinated rescue and based on the emergency service capabilities of equipment depots at different levels, the location selection model realizes the best multiple coverage of different risk waters, aiming to share emergency resources and further enhance the regional emergency response capabilities.

Key words: offshore ship oil spill; emergency equipment warehouse depots; site selection; MOPSO algorithm; NSGA-II algorithm

收稿日期: 2023-12-04

基金项目: 高等学校学科创新引智计划(111计划)资助项目(D21013)

作者简介: 白佳兴(1997—), 女, 硕士研究生, 研究方向为船舶防污染。E-mail: 1002251634@qq.com

通信作者: 刘桂云(1972—), 女, 教授, 研究方向为港口物流管理。E-mail: liuguiyun@nbu.edu.cn

引用格式: 白佳兴, 刘桂云, 胡超, 等. 区域多层次海上船舶溢油应急设备库选址研究[J]. 中国航海, 2025, 48(1): 180-189.

BAI J X, LIU G Y, HU C, et al. Research on the location selection of regional multi-level offshore ship oil spill emergency equipment depots[J]. Navigation of China, 2025, 48(1): 180-189. (in Chinese)

近年来,我国海洋经济综合实力不断提升,随着海洋贸易的持续增长,海洋污染风险也在逐渐增加。研究合理的区域多层次海上船舶溢油应急设备库选址方案,对完善海上溢油应急体系建设、提升区域应急能力具有重要意义。

当前,在选址问题的研究中,齐壮等^[1]以P-中值原理建立了以距离之和最小为目标的选址模型;刘忠波等^[2]根据物资保障成本构建了选址模型;文元桥等^[3]和王雅杰等^[4]对应急响应时间结合选址背景进行了研究;高鑫宇等^[5]以救援效率最高和总成本最小为目标构建了多阶段决策选址模型;YU等^[6]以最大覆盖思想对物流选址方案进行了研究;NICKEL等^[7]基于集合覆盖对救护车基地的选址问题进行了研究;GENDREAU等^[8]提出了双重覆盖模型并将其应用于应急选址问题中;王飞飞等^[9]建立了应急物资储备库的多重覆盖两阶段选址模型;REVELLE等^[10]设计了可靠性最大的选址模型;陆梦^[11]构建了适合海上溢油应急系统的单、多点应急服务设施点的选址模型;林建新等^[12]论证了分级设施选址问题的重要意义。

现有的选址研究在目标函数的选择上大多集中在路径、时间、覆盖等方面,而对于多层次海上船舶溢油应急设备库选址的研究成果较少。本文从协同救援的角度出发,构建了多层次海上船舶溢油应急设备库的选址模型,利用MOPSO和NSGA-II算法进行求解。

1 多层次海上船舶溢油应急设备库选址特征及影响因素

1.1 选址特征

区域多层次海上船舶溢油应急设备库的选址问题应充分考虑行政区划、溢油事故需求差异^[13]、设备库救援适配性以及区域内整体应急能力和救援效率。

1.1.1 区域特征

截止到2021年末,我国港口生产用码头泊位数量已达20 867个^[14],但各省份和各港口之间的发展水平仍存在较大差距。目前,我国已建成国家船舶溢油应急设备库16座^[15],在溢油事故发生后,应急救援效率受到设备库位置所在行政区划、港口发展建设水平以及应急救援体系建设差异性的影响,同时也存在单一区域应急能力有限以及服务重叠、资源浪费等情况。因此,在选址规划和层级设定中,应考虑不同层级设备库在省市之间的合理布局,由政府主导跨越省级区划限制,调动不同省份、地域

的多层级海上船舶溢油应急设备库协调合作,共同处理区域内的溢油事故,提升应急体系的救援效率。

1.1.2 事故特征

《国家水上交通安全监管和救助系统布局规划(2005~2020年)》^[16]显示,有63.3%的水上交通险情分布在我国沿海水域,其中有94%发生在离岸50n mile以内。根据《水上交通事故统计办法》^[17],我国对于水域环境污染事故的等级划分如表1所示。

表1 水域环境污染事故等级划分

Tab.1 Grade of water pollution accidents

事故类型	溢油量/t	经济损失/亿元
特别重大事故	≥1 000	海上≥2 内河≥1
重大事故	500~1 000	海上1~2 内河0.5~1
较大事故	100~500	海上0.5~1 内河0.1~0.5
一般事故	≤100	海上≤0.5 内河≤0.1

一般事故启动小型设备库,重大、特大事故启动多个层级设备库救援。溢油事故的分布特征、事故类型以及海域溢油风险程度均会影响到海上船舶溢油应急设备库的选址,在实际研究中应与其相适应。

1.1.3 建设特征

根据《国家船舶溢油应急设备库设备配置管理规定》^[18],对沿海水域船舶溢油应急设备库的建设要求如表2所示。

表2 溢油应急设备库层级划分

Tab.2 Grade of oil spill emergency equipment depots

建设类型	应急服务半径/km	库房面积要求/m ²	综合清除控制能力/t
大型船舶溢油应急设备库	35	≥1 600	1 000
中型船舶溢油应急设备库	16	≥1 000	500
小型船舶溢油应急设备库	6	≥600	200

层次性体现的不同层级设备库之间的包含关系。大型设备库在综合清除控制能力和应急服务半径具有绝对优势,但盲目建设大型设备库会造成应急资源浪费,在选址时应应对多层次建设加以研究。

1.2 影响因素

为有效提供救援,海上船舶溢油应急设备库选址要具备高度的科学性和合理性。综合分析选址的影响因素如表3所示。

表3 海上船舶溢油应急设备库选址的影响因素
Tab.3 Factors affecting location of offshore ship oil spill emergency equipment depots

分类	影响因素
自然环境	气象、海况、地质、潮流
社会经济	交通、地价、经营环境、运输费用
港口条件	码头和泊位等级及数量、货物吞吐量、油品吞吐量、航道航线、应急队伍建设水平

海上船舶溢油应急设备库的选址需综合航运经济、港口基础设施和应急体系建设等因素,避开风口、降雨量大、潮湿等区域,选择交通便利、地价较低的位置。选址位置的有效性可提升设备库的应急救援能力,减轻海上溢油危害。

2 多层次海上船舶溢油应急设备库选址模型

本文建立以不同风险水域的最佳覆盖、可靠性和时效性最强为目标的选址模型。考虑不同层级海上船舶溢油应急设备库的救援力量与不同区域溢油风险之间的“引力关系”,应将引力值维持在合理水平。可靠性指的是在给定范围内,设备库选址方案能在需求量和应急服务半径的约束下,对溢油风险水域的覆盖能力,在满足三级覆盖时可靠性最高,以距离之和最短体现其时效性。

2.1 模型假设

1) 为方便计算,将海上溢油事故风险水域的中心点作为事故风险点(以下简称“事故点”),海上船舶溢油应急设备库的备选位置也以点状呈现(以下简称“备选点”)。

2) 主要考虑不同风险水域可能发生溢油事故的总溢油量。

3) 海上船舶溢油应急设备库的备选数量和位置已知。

4) 不同层级海上船舶溢油应急设备库的应急服务半径和综合清除控制能力已知。

5) 根据历年来溢油事故的溢油量、发生频率,区域内原油进出口量,航线密集交汇处,自然保护区等数据,统计并划分溢油事故风险水域的等级。

6) 由不同层级海上船舶溢油应急设备库对各

等级溢油事故风险水域提供多层次的覆盖服务。

7) 海上船舶溢油应急设备库超出服务半径范围将不提供应急救援。

8) 根据各事故点等级,优先为溢油量大的事故点提供应急救援。

2.2 模型构建

2.2.1 参数及变量

M_i :海上船舶溢油应急设备库的综合清除控制能力。

N_j :不同区域的溢油风险等级,即事故区域的风险程度, $N_j = \{1, 2, 3\}$, $N_j = 1$ 为一级风险等级,表示最低风险水域。

d_{ij} :事故点 j 到备选点 i 的欧式距离, $d_{ij} = \sqrt{(a_i - a_j)^2 + (b_i - b_j)^2}$ 。

e_{ij} :备选点的分配系数。

r_i :备选点的应急服务半径,当 i 取值为 m 点时应急服务半径为 r_m 。

R_{ik} :备选点 i 在 k 建设层级下的最大应急服务半径。

I :备选点集合,共有 m 个, $I = \{i | i = 1, 2, 3, \dots, m\}$ 。

J :事故点集合,共有 n 个, $J = \{j | j = 1, 2, 3, \dots, n\}$ 。

D_j :事故点 j 的需求量,单位 t 。

k :备选点的建设层级, k_i 为备选点 i 的建设层级,当 i 取值 m 时建设层级为 k_m 。

T_k :备选点建设层级集合, $T_k = \{1, 2, 3\}$ 。

B :备选点建设的最高数量。

g_{im} :第 i 个备选点与第 m 个备选点之间的距离矩阵。

$H_j = \{I | d_{ij} \leq r_{ik}\}$:备选点 i 在 k 建设层级下能够覆盖的事故点 j 集合。

$\gamma_{i,k}$:备选点选择建设为 k 层级时的可靠性。三级覆盖的可靠性为 0.95,二级覆盖的可靠性为 0.9,一级覆盖的可靠性为 0.85^[19]。

Q_{ij} :备选点 j 对事故点 i 存储的物资量,即物资的分配量,单位 t 。

S_{ik} :备选点 i 建设为 k 层级的最大服务能力。

W_j :溢油风险区域的覆盖需求和等级, $W_j = \{1, 2, 3\}$, $W_j = 1$ 为一级覆盖需求,即一级风险区域需要一层设备库覆盖。

Y_i :若备选点 i 被选中建设海上船舶溢油应急设备库则为 1,否则为 0。

Z_{ik} :决策变量,若备选点 i 被选中做 k 层级建设则为 1,否则为 0。

μ_{ijk} :决策变量,若 k 层级设备库 j 向事故点 i 提供服务则为 1,否则为 0。

2.2.2 模型建立

$$\max F_1 = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \frac{M_i N_j g_{im} \mu_{ijk}}{d_{ij}} \quad (1)$$

$$\max F_2 = \sum_{j=1}^n \left[1 - \prod_{i \in H_j} (1 - \gamma_{i,k}) \right] \quad (2)$$

$$\min F_3 = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n N_j d_{ij} \mu_{ijk} Z_{ik} e_{ij} \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{k \in T_k} Z_{ik} \leq B \quad (4)$$

$$\sum_{k \in T_k} Z_{ik} \leq 1 \quad (5)$$

$$\text{If: } d_{ij} > r_i, e_{ij} = 0 (i \in I, j \in J)$$

$$\begin{cases} \text{If: } d_{ij} > 350, & e_{ij} = 0 \\ \text{If: } d_{ij} > 160, & e_{ij} = 0 \\ \text{If: } d_{ij} > 60, & e_{ij} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^m e_{ij} = 1 \quad (7)$$

$$\sum_{j=1}^n Q_{ij} = S_{ik} Z_{ik} \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n D_j e_{ij} \leq T_k \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^n Q_{ij} \geq D_j \quad (10)$$

$$d_{ij} \leq R_{ik} \quad (11)$$

$$g_{im} = \min \{ \max \{ \|k_m - k_i\|, r_m - r_i \}, r_m + r_i \} \quad (12)$$

$$\sum_{i \in H_j} Y_i \geq 1 \quad (13)$$

$$\sum_{i \in H_j, N_j \geq W_j} Y_i \geq 2 \quad (14)$$

$$\sum_{i \in H_j, N_j \geq W_j} Y_i \geq 3 \quad (15)$$

式(1)表示不同风险水域的最佳覆盖, F_1 为最佳覆盖的目标函数;式(2)表示可靠性最强, F_2 为可靠性的目标函数;式(3)表示时效性最强, F_3 为时效性的目标函数;式(4)限制海上船舶溢油应急设备库的建设数量;式(5)表示每个设备库只能建设成为 1 个层级;式(6)表示所有设备库均在自己的应急服务半径内对事故点提供服务;式(7)表示所有事故点分配到各个备选点的需求系数之和为 1;式(8)表示 k 层级设备库所提供的物资量不能超过其层级的综合清除控制能力;式(9)表示事故点的分配需求量不高于 k 层级设备库的综合清除控制能力;式(10)表示事故点的需求量均能被满足;式(11)表示事故点 i 可以被备选点 j 覆盖;式(12)表示备选点 i

到备选点 m 之间的距离矩阵;式(13)表示每个事故点均能被不同层级设备库覆盖一次视为一级覆盖;式(14)表示当事故点的风险程度 N_j 大于等于覆盖需求等级 W_j 时,需要被两个层级设备库覆盖一次视为二级覆盖;式(15)表示当事故点的风险程度 N_j 大于等于覆盖需求等级 W_j 时,需要被三个层级设备库覆盖一次视为三级覆盖。

2.2.3 模型求解

在区域多层次海上船舶溢油应急设备库选址模型的求解中, MOPSO 和 NSGA-II 算法操作简单, 计算效率高, 具有出色的全局搜索能力, 在小规模算例分析中能够得到质量很高的解甚至是最优解。此外, 在不同溢油风险水域对应急物资的需求、海上溢油应急设备库自身综合清除服务能力以及应急服务半径等约束条件下, MOPSO 和 NSGA-II 算法对模型求解具有较高的适用性。因此, 本文采用 MOPSO 和 NSGA-II 算法对模型进行求解, 并对结果进行了对比分析, 算法流程如图 1 和图 2 所示。

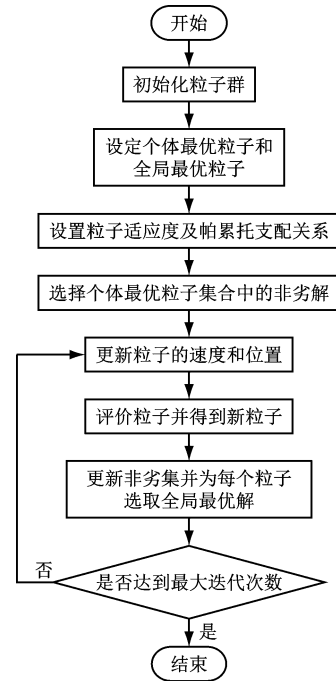


图 1 MOPSO 算法流程

Fig. 1 MOPSO algorithm flow chart

MOPSO 算法实现过程如下。

步骤一:初始化粒子群,设置算法参数和支配关系,读入 30 个溢油风险水域和 14 个备选位置的坐标数据。

步骤二:设置并更新各粒子的初始速度、初始位置。

步骤三:求得适应度函数并评价粒子。以最佳覆盖、可靠性和时效性三个目标函数为依据,求得粒

子群算法的适应度函数,评价各粒子并得到新的非劣解集粒子群。

步骤四:以此类推,直到达到设置的最大迭代次数。

步骤五:输出当前选址方案和建设层级。

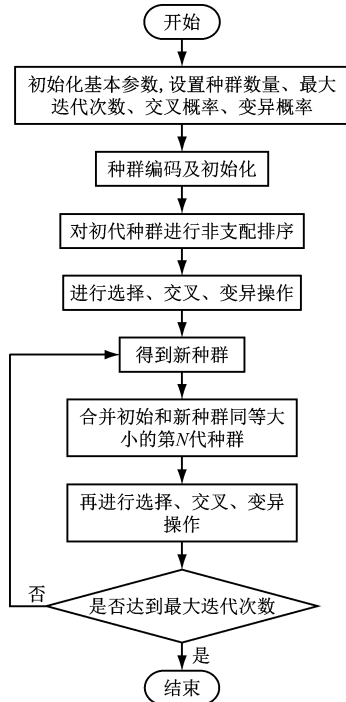


图2 NSGA-II 算法流程

Fig.2 NSGA-II algorithm flow chart

NSGA-II 算法实现过程如下。

步骤一:初始化基本参数,设置种群规模、最大迭代次数、交叉概率、变异概率,作为初代种群。

步骤二:对种群编码,生成初始种群。对备选位置和建设层级进行编码并进行遗传操作,备选位置所建设层级能满足溢油风险水域的需求则保留其精英个体作为新子代。

步骤三:生成新种群。合并初代种群和新子代种群得到新的种群。

步骤四:不断进行选择、交叉、变异操作。根据服务半径、综合清除能力、可靠性、距离等约束条件对种群进行判定,计算三个目标函数值,保留最优方案。

步骤五:达到最大迭代次数并输出选址方案和建设层级。

3 算例分析

为更好地服务长三角港口资源利用集约化、运营一体化、服务现代化等建设^[20],本文以长三角地区为例进行分析。

3.1 算例数据

根据我国《国家水上交通安全监管和救助系统布局规划(2005~2020年)》,本文整理了自1978年以来长三角区域由气象、海况、潮流等自然因素引起的溢油事故数据,结合事故水域周围交通、经营环境等社会和经济因素,以及具有规模化原油码头的港区、航线密集交汇处和水质水源自然保护区等选定条件,选取了30个溢油事故风险水域。参照《水上溢油环境风险评估技术导则》(JT/T 1143—2017)中半定量方法,统计区域内溢油事故的发生频率、溢油量、所造成的经济损失,以及原油进出口量、航线密集交汇、自然保护区等数据,确定30个溢油风险水域的等级。参照《港口码头水上污染事故应急防备能力要求》(JT/T 451—2017)中对区域建设应急防备的等级、配备要求以及JT/T 1143—2017中事故溢油量分析对船舶溢油事故溢油量确定方法,对区域内最大溢油量进行了预测,具体数据如表4所示。结合上海国际航运研究中心发布的2022年全球50大港口吞吐量排名情况、长三角区域内港口自身建设条件及发展情况,在长三角一体化区域内选取了14个港口、港域、港区作为海上船舶溢油应急设备库的备选位置,如表5所示。为方便计算所有位置均以点坐标形式呈现。

表4 溢油事故风险水域相关数据

Tab.4 Relevant data of water area oil spill pollution risk

风险水域编号	选定条件	经纬度概位	风险等级 N_j	预测最大溢油量/t
1	30万吨级原油码头	119°56'30E, 34°61'40N	2	142
2	水质水源及自然保护区	120°27'42E, 34°31'61N	1	35
3	油气化工,在建港口工程	120°81'47E, 33°28'70N	1	30
4	客运疏散,码头修缮	121°43'44E, 32°53'20N	1	39
5	一类对外开放口岸,主枢纽港	120°82'66E, 32°01'31N	2	105
6	航线密集,船舶流量大	122°53'88E, 31°52'09N	2	168
7	上海港衔接转运港,油品化工	120°32'65E, 31°68'44N	1	67

表 4(续) 溢油事故风险水域相关数据
Tab. 4(Cont.) Relevant data of water area oil spill pollution risk

风险水域编号	选定条件	经纬度概位	风险等级 N_j	预测最大溢油量/t
8	件杂货班轮航线,船舶流量大	120°14'61E,31°96'11N	2	106
9	一类开放口岸,溢油事故	118°74'13E,32°09'70N	2	136
10	重点中转港口,船舶流量大	121°44'72E,31°46'03N	2	161
11	事故多发水域,原油进出口量大	121°58'59E,31°37'33N	3	220
12	航线密集,油品进出口航道	123°62'89E,31°29'01N	2	137
13	成品油中转仓储,原油码头	122°07'76E,30°62'61N	3	200
14	浙江省海河联运枢纽港	121°09'30E,30°60'43N	1	52
15	航线密集,船舶流量大	122°47'56E,30°71'76N	2	155
16	油气储备基地,港口发展强劲	122°28'81E,30°45'24N	3	230
17	航道密集,船厂较多	122°21'20E,30°24'39N	2	116
18	国储、炼化和输油管道	121°73'10E,29°96'83N	2	151
19	国家石油战略储备基地	121°98'17E,29°94'74N	3	260
20	原油炼化,油气储备基地	122°01'20E,29°77'48N	3	210
21	航线密集	122°29'23E,29°73'37N	1	41
22	水质水源保护区	122°20'91E,29°70'69N	1	43
23	国家原油战略储备基地,商储油品库	122°11'95E,30°14'13N	3	260
24	客运疏散码头,渔船作业	122°69'48E,30°19'49N	2	110
25	航线密集,船舶流量大	123°21'52E,30°20'53N	2	112
26	自然保护区	121°64'98E,29°52'40N	1	45
27	一类开放口岸,溢油事故	121°61'76E,28°49'62N	3	193
28	船厂密集	121°63'94E,28°34'43N	1	58
29	国家重要枢纽港,溢油事故	120°85'94E,27°97'74N	2	145
30	旅游景区,旅客周转	121°15'70E,27°82'52N	1	43

表 5 备选位置的相关数据

Tab. 5 Relevant data of alternative positions

序号	港口名称	2022 年货物 吞吐量/万 t	主港区概位
1	连云港港	30 111	119°42'92E,34°76'59N
2	盐城港	13 543	120°48'03E,33°20'66N
3	太仓港	26 554	121°17'61E,31°67'47N
4	南京港	27 155	118°74'51E,32°03'50N
5	南通港	28 508	120°82'66E,32°01'31N
6	江阴港	35 062	120°15'82E,31°92'14N
7	苏州港	57 276	120°80'30E,31°30'59N
8	上海主港区		121°84'10E,30°85'36N
9	洋山港区	66 832	122°07'35E,30°62'61N

表 5(续) 备选位置的相关数据

Tab. 5(Cont) Relevant data of alternative positions

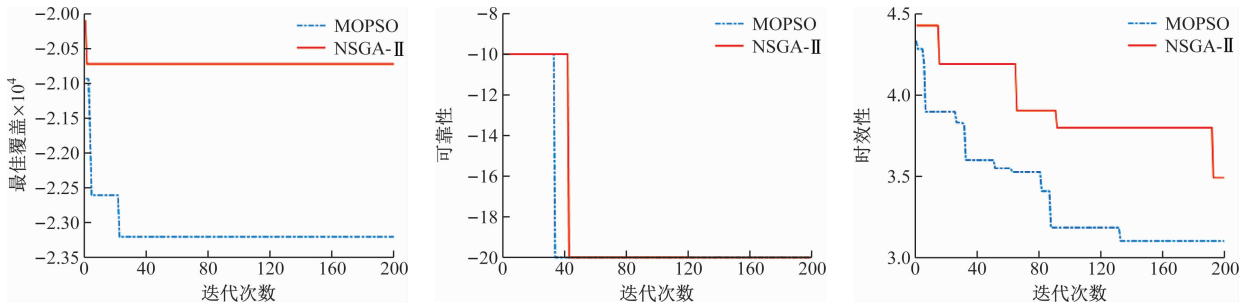
序号	港口名称	2022 年货物 吞吐量/万 t	主港区概位
10	嘉兴港	13 240	121°09'30E,30°60'43N
11	宁波港	63 722	121°98'93E,30°05'57N
12	舟山港	62 412	122°06'44E,29°88'34N
13	台州港	6 241	121°40'91E,28°67'06N
14	温州港	8 479	120°80'62E,27°96'83N

3.2 算例求解

利用 MATLAB2020 对 MOPSO 和 NSGA-II 进行编程,运行参数设置为:种群规模 50,最大迭代次数 200,交叉概率 0.8,变异概率 0.1,采用多次求解选

取最优的方法,对模型进行随机 30 次求解,汇总运行结果后选取出目标值最优且频率最高的选址方

案,对应的迭代图如图 3 所示。



(a) 最佳覆盖目标值的迭代曲线

(b) 可靠性目标值的迭代曲线

(c) 时效性目标值的迭代曲线

图3 迭代曲线

Fig. 3 Iterative curve

图 4 为两种算法的帕累托解集分布图,NSGA-II 共有 3 组,MOPSO 为 5 组且分布较为均匀。

围过度重叠或无覆盖情况而影响溢油事故处理效率。理论上,选址方案所能提供的覆盖能力最理想的可靠性目标值最高可达 30.0,而两种算法对模型求解的多个可靠性目标值均能达到 29.9 以上,体现出了选址模型求解出的选址方案在溢油事故处理时的有效性。时效性数值越低,则时效性越强。对比 MOPSO 和 NSGA-II 的迭代曲线,最佳覆盖和时效性两个目标函数在 NSGA-II 陷入局部最优之后,MOPSO 仍在寻求最优解,且两种算法在可靠性数值的求解中均能达到 29.9。所以,相较于 NSGA-II 的求解结果,MOPSO 算法对模型求解显示出较好的适用性。根据 MOPSO 得出各选址位置如表 8 所示,表 8 中各方案序号所代表的位置与表 5 对应,各方案对溢油事故点的覆盖次数如表 9 所示。

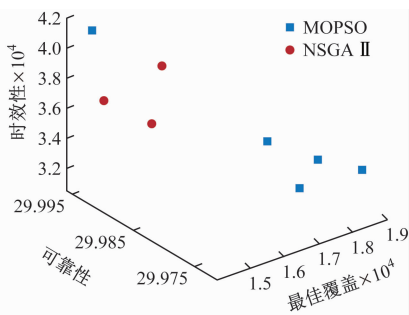


图4 帕累托解集

Fig. 4 Pareto-solution set

多次运行后筛选出三组不同目标函数值的最优方案,各最优目标值见表 6 和表 7。

表 6 MOPSO 算法选址方案目标值

Tab. 6 Location results of MOPSO algorithm

方案	F_1	F_2	F_3
1	14 593.289 3	29.995 0	40 992.683 6
2	18 801.224 9	29.974 2	33 436.118 9
3	18 231.931 7	29.981 3	30 974.914 2

表 7 NSGA-II 算法选址方案目标值

Tab. 7 Location results of NSGA-II algorithm

方案	F_1	F_2	F_3
1	13 244.764 8	29.995 7	42 342.395 9
2	20 125.390 5	29.989 8	45 793.031 1
3	15 648.274 4	29.991 2	34 847.905 0

表 8 MOPSO 算法各方案选址位置

Tab. 8 Location schemes of MOPSO algorithm

方案	1	2	3
沿海水域大型 海上船舶溢油 应急设备库	9;11	12;4;14;1	6;7;5;3;13
沿海水域中型 海上船舶溢油 应急设备库	11;12	1;4;8;9	2;3;5;6;7
沿海水域小型 海上船舶溢油 应急设备库	8;11	14;4;6;1	3;5;12;7;9

通过对选址方案目标值及各方案中的覆盖次数进行分析,最佳覆盖的数值在 18 231.931 7 时,各溢油事故点被覆盖的次数较为均匀,避免了因覆盖范

考虑到引力系统对最佳覆盖的影响,最高或最低系统引力都会导致覆盖程度有较大偏离,进而导致资源分布不均或过度覆盖,造成资源浪费,各方案的选址可靠性均能达到 29.9,在事故发生后,整个

表9 各方案中溢油事故点的覆盖次数

Tab.9 Coverage times of oil spill location in site selection schemes

溢油风险点的覆盖次数	2	3	4	5	6	7	8	9
方案1	17	3;4;5;13;14; 21;23;30	1;2;15;16;18;19;20; 24;25;26;28;29	6;7;9	22;27	8;12	10;11	
方案2	5;7;14;17; 18;24;26	3	4;6;9;13;15;16;19;20; 21;23;25;28;29;30	2;22;27	1;8	12	10;11	
方案3	5;7;17;19; 24;26	9;14;18;20; 23;29;30	4;5;15;21;22;27;28	1;2;16;25	12	11	8	10

救援的时效性是整个应急系统效率高最低有效的证明,因此本文以方案3为例对模型的有效性进行了分析。各位置使用米勒投影法将经纬度坐标换算成精简海里的笛卡尔平面坐标,方案3各层级选址位置如图5所示。

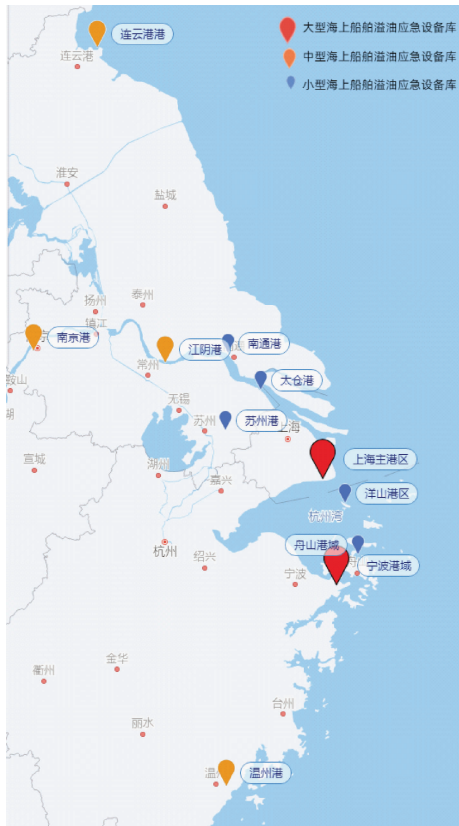


图5 各层级选址位置示意

Fig.5 Location diagram

在上海主港区和宁波港域建设大型海上船舶溢油应急设备库,契合了区域内实际建设情况。南京港和江阴港依托长江的黄金航道、“一库三点”的布局模式,建设中型库将有效整合应急资源;温州港2022年中型库已开工建设;连云港港综合协调能力显著提升,整合资源建设中型库将有效提升救援效

率;太仓港、南通港和苏州港发展迅猛,在此选址将更好地服务港口建设和发展;2020年舟山港域小型设备库已建设完成;洋山港区应急设备储备较为薄弱,新建设备库势在必行。方案3最大程度上拟合了我国现有海上船舶溢油应急设备库的建设状况,符合港口发展需求,验证了选址模型的有效性。

4 结束语

对区域海上船舶溢油应急设备库选址布局进行多层次的规划建设,是一个目标多元、约束复杂、程度较高的课题,选址的科学规划能够弱化行政区划对应急救援的影响,降低应急资源的浪费,实现区域应急救援的有效配合。同时,对设备库自身服务半径、综合清除控制能力的差异以及不同风险水域的覆盖层级综合考量,使得选址方案能够更加符合应急体系的建设。本文从不同风险水域的最佳覆盖、可靠性和时效性这三个角度出发建立了一个多目标选址模型,通过MOPSO和NSGA-II对长三角区域实例数据进行求解,结果显示MOPSO对模型求解具有较高的适配性。并依据算法结果,选出了一组最符合实际建设状况的选址方案,体现出了选址模型的有效性。本文对多层次海上船舶溢油应急设备库的选址研究,能够有效整合区域内的溢油应急资源、提高区域内溢油应急资源的使用效率,降低溢油事故对海洋环境、生态环境及人类生命安全的影响,减少溢油事故的损失。

目前的模型研究中尚未考虑溢油回收后不同层级设备库对于溢油处理的联动性,未来应进一步对联动处理效率加以研究。

参 考 文 献

- [1] 齐壮,王凤武,曹玉墀,等. 北方海区救助力量部署优化[J]. 中国航海, 2019, 42(3): 100-104.
QI Z, WANG F W, CAO Y C, et al. Optimization on

- rescue force deployment in northern China waters [J]. *Navigation of China*, 2019, 42 (3): 100-104. (in Chinese)
- [2] 刘忠波, 王淇娴, 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)
- [3] 文元桥, 宋荣鑫, 张帆, 等. 长江干线船舶事故性溢油应急处置模式与应急站点选址研究[J]. *武汉理工大学学报(交通科学与工程版)*, 2021, 45 (1): 18-22.
WEN Y Q, SONG R X, ZHANG F, et al. Study on emergency disposal mode and site selection of accident oil spill from ships in Yangtze River trunk line [J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering)*, 2021, 45 (1): 18-22. (in Chinese)
- [4] 王雅杰, 樊建春. 南海海域应急资源存储选址及调度方案研究[J]. *安全与环境学报*, 2023, 23 (1): 178-185.
WANG Y J, FAN J C. Research on storage location and scheduling of emergency resources in south China sea [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2023, 23(1): 178-185. (in Chinese)
- [5] 高鑫宇, 倪静. 带模糊需求的多阶段双目标应急选址—路径优化[J]. *计算机应用研究*, 2022, 39(2): 391-397.
GAO X Y, NI J. Multi-stage bi-objective emergency location-routing optimization with fuzzy requirement [J]. *Application Research of Computers Journal of Shanghai Maritime University*, 2022, 39 (2): 391-397. (in Chinese)
- [6] YU B, YAN W B. How to locate the cold chain logistics distribution center based on the gray comprehensive evaluation [C/OL]. 2010 International Conference on E-Product, E-Service and E-Entertainment. 2010 [2023-09-15]. <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5660971&tag=1>.
- [7] NICKEL S, OPPERMANN M R, GAMA F S D. Ambulance location under stochastic demand: a sampling approach [J]. *Operations Research for Health Care*, 2016, 8: 24-32.
- [8] GENDREAU M, LAPORTE G, SEMET F. Solving an ambulance location model by tabu search [J]. *Location Science*, 1997, 5(2): 75-88.
- [9] 王飞飞, 侯云先, 李士森. 城镇应急物资储备库动态多重覆盖模型[J]. *北京航空航天大学学报(社会科学版)*, 2019, 32(1): 57-64.
WANG F F, HOU Y X, LI S S. Dynamic multiple coverage model of urban emergency material depository [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics (Social Sciences Edition)*, 2019, 32 (1): 57-64. (in Chinese)
- [10] REVELLE C, HOGAN K. The maximum reliability location problem and α -reliable p-center problem: derivatives of the probabilistic location set covering problem [J]. *Annals of Operations Research*, 1989, 18 (1): 155-173.
- [11] 陆梦. 海上溢油应急选址与应急物资调运研究 [D]. 上海: 上海海事大学, 2007.
LU M. Research on allocation optimization for ocean oil spill emergency and emergency materials scheduling and transportation [D]. Shanghai: Shanghai Maritime University, 2007. (in Chinese)
- [12] 林建新, 林孟婷, 王皖东, 等. 分级设施选址问题研究进展与展望 [J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2022, 62(7): 1121-1131.
LIN J X, LIN M T, WANG W D, et al. Review of the hierarchical facility location problem [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2022, 62(7): 1121-1131. (in Chinese)
- [13] 苏鑫, 刘桂云, 王慈云. 基于超网络理论的海上溢油事故应急物资区域调度 [J]. *中国航海*, 2020, 43 (4): 110-115.
SU X, LIU G Y, WANG C Y. Inter-regional material support for marine oil spill emergency based on the supernet work theory [J]. *Navigation of China*, 2020, 43(4): 110-115. (in Chinese)
- [14] 交通运输部. 2021年交通运输行业发展统计公报 [R/OL]. (2022-05-25) [2023-09-14]. https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/zhghs/202205/t20220524_3656659.html.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Statistical bulletin on the development of the transportation industry in 2021 [R/OL]. (2022-05-25) [2023-09-14]. https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/zhghs/202205/t20220524_3656659.html. (in Chinese)
- [15] 智广路. 出台《国家重大海上溢油应急能力建设规划》为我国海上溢油应急能力建设做好顶层设计 [J]. *中国海事*, 2016(8): 24-26.
ZHI G L. Issue the national serious marine oil spill emergency response capacity building plan, achieve the top level design for our country's marine oil spill emergency response capacity building [J]. *China Maritime Safety*, 2016(8): 24-26. (in Chinese)

- [16] 交通运输部. 国家水上交通安全监管和救助系统布局规划(2005—2020) [R/OL]. (2007-06-27) [2023-09-14]. https://www.mot.gov.cn/zhengcejiedu/hangdaozhengzhi/xiangguanzhengce/201510/t20151015_1902622.html.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Layout plan for national water traffic safety supervision and rescue system(2005—2020) [R/OL]. (2007-06-27) [2023-09-14]. https://www.mot.gov.cn/zhengcejiedu/hangdaozhengzhi/xiangguanzhengce/201510/t20151015_1902622.html. (in Chinese)
- [17] 交通运输部. 交通运输部关于修改《水上交通事故统计办法》的决定[J]. 中华人民共和国国务院公报, 2021(33): 54-58.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Decision on amending the statistical measures for water traffic accidents of Ministry of Transport of the People's Republic of China[J]. The Bulletin of the State Council of the People's Republic of China, 2021(33): 54-58. (in Chinese)
- [18] 交通运输部综合规划司.《国家船舶溢油应急设备库设备配置管理规定》(试行)[R]. 北京: 交通运输部, 2008.
Comprehensive Planning Department of the Ministry of Transport. Regulations on equipment configuration management of national ship oil spill emergency equipment warehouse (to try out) [R]. Beijing: Ministry of Transport of the People's Republic of China, 2008.
- [19] 艾云飞, 吕靖, 张丽丽, 等. VTS 雷达站选址-雷达配置优化模型[J]. 中国航海, 2014, 37(4): 54-58.
AI Y F, LYU J, ZHANG L L, et al. Optimization model of VTS radar station allocation and radar system configuration[J]. Navigation of China, 2014, 37(4): 54-58. (in Chinese)
- [20] 童孟达. 长江三角洲区域港口一体化深化推进思考[J]. 中国港口, 2020(1): 26-30.
TONG M D. Reflections on deepening the integration of ports in the Yangtze River delta region[J]. China Ports, 2020(1): 26-30. (in Chinese)

(上接第 179 页)

- ZHAO C Y, WEI S L. International experience on carbon emission reduction of China's shipping industry in the context of "carbon peak, carbon neutrality" [R]. Shanghai: Shanghai International Shipping Institute, 2022: 1-6. (in Chinese)
- [2] 孙峰, 林正锦, 常圣岱. 欧盟一揽子气候立法与政策提案, 对航运业影响几何? [J]. 中国船检, 2021(8): 65-69.
SUN F, LIN Z J, CHANG S D. How will the EU's package of climate legislation and policy proposals affect the shipping industry? [J]. China Ship Survey, 2021(8): 65-69. (in Chinese)
- [3] 周晓, 冷瑜. 航运业碳减排和零碳发展面临的挑战与应对建议[J]. 上海船舶运输科学研究所学报, 2021, 44(4): 63-68.
ZHOU X, LENG Y. The challenges and countermeasures of developing zero-emission shipping [J]. Journal of Shanghai and Shipping Research Institute, 2021, 44(4): 63-68. (in Chinese)
- [4] 中国船级社. 航运低碳发展展望 2021 [R]. 北京, 2021: 1-23.
China Classification Society. Prospects for low-carbon development of shipping in 2021 [R]. Beijing, 2021: 1-23.
- [5] ABS. Pathways to sustainable shipping [R]. Spring, 2022: 1-107.
- [6] ERIKSEN R. Energy transition outlook [R]. Oslo, 2022: 1-19.
- [7] ABS. Energy efficiency advisory [R]. Houston, 2022: 1-76.
- [8] 中国船级社. 绿色生态船规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2020.
China Classification Society. Rules for green eco-ships [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd, 2020. (in Chinese)
- [9] 甘爱平, 真虹. 我国航运低碳减排与碳金融交易的市场引导机制[J]. 交通企业管理, 2016, 31(12): 4-7.
GAN A P, ZHEN H. Market guidance mechanism for low-carbon emission reduction and carbon finance trading in China's shipping industry [J]. Transportation Enterprise Management, 2016, 31(12): 4-7. (in Chinese)
- [10] IMO. Fourth IMO GHG study 2020 [R]. Delft, 2020: 1-524.
- [11] ABS. Methanol as marine fuel [R]. Spring, 2021: 1-28.
- [12] DNV. DNV Maritime Forecast 2050 [R]. Oslo, 2022: 1-84.
- [13] Japan Ship Technology Research Association. Roadmap to zero emission from international shipping [R]. Tokyo, 2020: 1-136.
- [14] IEA. World energy outlook 2021 [R]. Paris, 2022: 1-386.