Doi:10.11840/j.issn.1001-6392.2023.05.009

渤海海域搜救困难度研究

尹杰[1]，虞兰兰[1,2]，杨丽芬[1]，张玉强[1]，张海宁[1]，田天[1]
（1. 自然资源部北海海域海岛中心（北海信息中心），山东 青岛 266061；
2. 山东省海洋生态环境与防灾减灾重点实验室，山东 青岛 266061）

摘 要：为优化海上搜救资源部署、提高救助成功率，结合层次分析法与模糊综合评价法，从海上搜救的自然环境、辖区信息和行动评估3个方面选取11个指标构建海上搜救困难度评价模型，在验证模型可靠性的基础上，首次对渤海海域开展二维搜救困难度评价和研究。使用成功率来表征搜救困难度并进行时空分布特征分析，成功率越低则困难度越高。结果表明：渤海海上搜救成功率全年分布趋势为海岸线周边海域相对较低，渤海中部海域相对较高。整体来看，夏季成功率远高于其他季节，春、秋季次之，冬季最低。冬季辽东湾及秦皇岛沿岸海域成功率为全年和全海域最低。对渤海沿岸港口海域及中部海域各选1个长期观测的站点开展年变化特征分析，发现同一地点的搜救成功率年变化主要受水温影响，证实了冬季是搜救困难度最高的季节。综上所述，冬季渤海沿岸海域，尤其是辽东湾及秦皇岛沿岸海域为高困难度搜救区，需要加大日常巡逻管理，改善搜救系统部署。

关键词：渤海；搜救困难度；层次分析法；模糊综合评价法；时空分布特征；成功率
中图分类号：P751；X951 **文献识别码：**A **文章编号：**1001-6932(2023)05-0574-11

Evaluation and analysis of maritime search and rescue difficulty in the Bohai Sea

YIN Jie[1], YU Lanlan[1,2], YANG Lifen[1], ZHANG Yuqiang[1], ZHANG Haining[1], TIAN Tian[1]
（1. The North China Sea Area & Island Center, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China;
2. Shandong Provincial Key Laboratory of Marine Ecology and Environment & Disaster Prevention and Mitigation, Qingdao 266061, China）

Abstract: To optimize resource deployment and improve the success rate of maritime search and rescue, this study carries out a two-dimensional evaluation and analysis of maritime search and rescue difficulty for the first time in the Bohai Sea. It combined the AHP method with fuzzy comprehensive evaluation method. Eleven factors related to the natural environment, district information and action assessment are selected to build a maritime search and rescue difficulty evaluation model. Success rate is used to characterize the difficulty, while the low success rate is associated with high difficulty and vice versa. The spatial and temporal distribution of success rate is analyzed based on the model verification. The results show that: the success rate is lower in the coastal waters and higher in the central Bohai Sea all the year round. Throughout the year, the success rate in the Bohai Sea is the highest in summer and the lowest in winter, while it′s similar in spring and autumn. In addition, the success rate in Liaodong Bay and the coastal waters along Qinhuangdao city in winter is the lowest during the whole year and in whole sea areas. Five long-term observation stations are chosen from four major ports in coastal waters and one buoy station in the central Bohai Sea, to analyze the annual variation. The annual variation of success rate is mainly affected by sea surface temperature in the same place, which confirms that the highest difficulty in the Bohai Sea appears in winter. In summary, the Liaodong Bay and the coastal waters along Qinhuangdao city are the most difficult search and rescue areas in winter, so daily patrols should be increased and the search and rescue resource should be optimized accordingly.

Keywords: Bohai Sea; maritime search and rescue difficulty; AHP method; fuzzy comprehensive evaluation method; temporal and spatial distribution; success rate

收稿日期：2023-01-04；修订日期：2023-03-06
基金项目：山东省海洋生态环境与防灾减灾重点实验室开放基金（201904）；自然资源部北海局海洋科技项目（202109）
作者简介：尹杰（1968—），硕士，高级工程师，主要从事海洋资料分析与应用研究，电子邮箱：yinjie@ncs.mnr.gov.cn
通信作者：虞兰兰，博士，高级工程师，主要从事海洋水文气象资料分析研究，电子邮箱：229857443@qq.com

近年来，我国海洋资源开发利用规模不断增长，海上活动亦随之增多，导致海难事故频发。海上搜救作为生命财产安全的最后屏障，通常面临任务紧迫、水文气象环境复杂等情况，是多学科交叉的系统性工程[1-3]。国外对海上搜救的研究主要集中在国际公约、搜救规划和部署[4-5]、搜救行动评价[6-7]，以及如何最大化发现目标概率的搜寻理论和搜寻资源分配方法等方面[8-12]。国内学者也将搜寻理论应用至海上搜救行动，进行了海上最优搜寻区域确定[13-15]、响应能力评估及搜寻能力评价[16-18]、搜救资源分配[19]、利用无线传感器网络或无人机进行目标搜寻[2,20]等一系列研究。

我国不同海域的水文气象环境分布特征并不相同，因此各海域搜救环境不同，搜救困难度的分布特征也不相同。对不同海域的搜救环境进行定量研究，从而进一步评价海域搜救困难度，具有重要意义[21-23]。若缺乏搜救环境依据，我国的搜救行动/规划可能出现反应过度或不足、资源配置不合理等现象；通过评价找出搜救困难度高的海域，有助于实现资源配置优化、提高海上搜救有效率[21,24]。海域搜救困难度定量评价目前主要使用层次分析与模糊综合评价相结合的方法，选取对海区搜救有明显影响的搜救环境因素作为评价指标，确定指标权重值，建立搜救困难度的综合评价指标体系[25-29]。

以往的研究均将目标海域视为一个点，运用综合评价指标体系，计算出该海域点的搜救困难度。对于面积较大的目标海域，将其简化为点则无法获取海域搜救困难度的空间分布特征。目前已有学者在南海进行了二维层面的搜救困难度评价[24]，但在进行评价时并未考虑水温的影响，而水温是影响落水人员存活时间长短的决定性因素[30]。本文选取水温、风、波浪、能见度、搜救辖区离岸距离、到达现场时间等指标，运用层次分析与模糊综合评价相结合的方法在渤海海域首次开展二维搜救困难度评价及研究。

1　目标海域和数据来源

1.1　目标海域概况

选取渤海（37°07′N—41°00′N、117°35′E—121°10′E）作为目标海域。渤海是我国唯一的内海，位于中国近海的最北端，海岸线全长约3 800 km，平均水深约18 m（图1），面积约7.7万 km²，毗邻

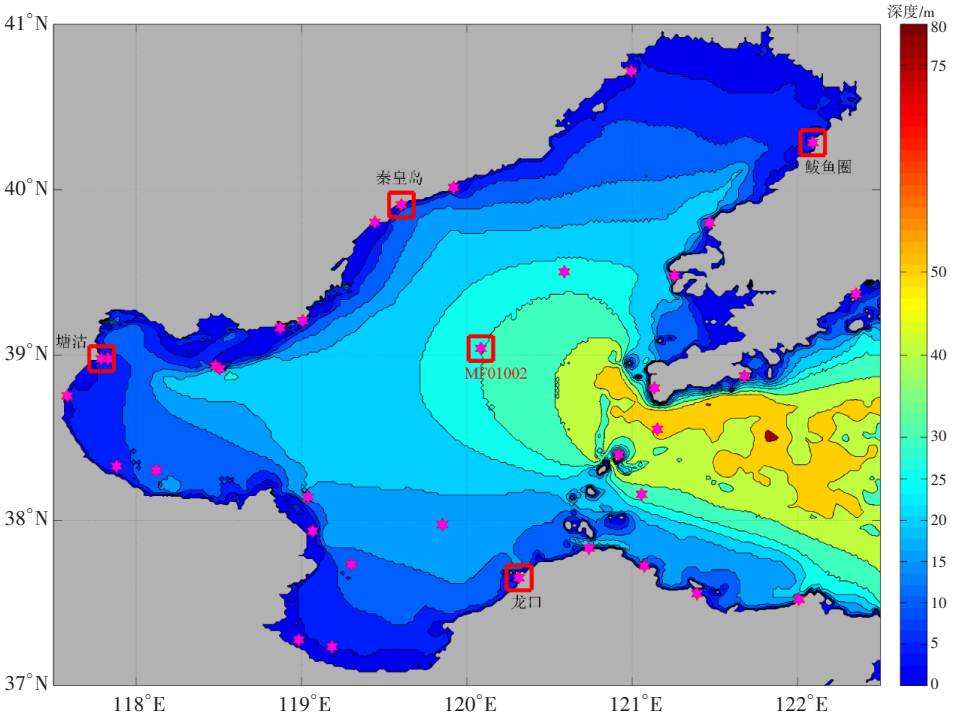

图1　渤海水深及实测站位分布图

注：六角星表示海洋站和浮标观测站位，方框表示渤海中部海域及四个主要沿岸港口海域。

辽宁、河北、山东、天津三省一市，沿岸人口密集、港口众多，海上活动比较频繁。以渤海为研究海域进行搜救困难度评价，对提高渤海海上搜救能力、保障海上安全十分重要。

1.2 数据来源

本文研究所用水文气象要素包括水温、风、波浪和能见度，其来源包括两部分：一是渤海海域沿岸海洋站、浮标实测逐时数据，站位分布见图1六角星标识；二是欧洲中期天气预报中心（ECMWF）的ERA-Interim水文气象再分析数据集，数据空间分辨率为0.125°（波浪数据为0.25°），时间分辨率为6 h。以上数据时间范围均选取2019年全年，对渤海海域实测和再分析数据进行数据融合形成新的水文气象数据集，再将其应用到搜救困难度的计算中。在数据融合过程中使用了黄海部分观测站位的实测数据，以提高渤黄海边界处水文气象数据集的准确性。

对渤海进行网格划分（1′×1′），各网格点水深值来自美国国家地球物理数据中心（NGDC）发布的ETOPO1数据（图1）。将实测—再分析数据集的站点分散到相应网格后，计算其离陆地或岛屿最近的距离，作为离岸距离；网格水深值为对应站点的水深数据。搜救行动评估、通航自然环境等模块参考专家意见及已有文献中困难度评价实例的输入参数[25-29,31-32]：当不受极端天气影响时，到达现场时间为110分钟；反应时间为32分钟；搜救辖区的形状介于正方形与沿岸长方形之间，形状系数取3~7；搜救辖区面积设定为500~8 000 km^2。由于风力超过8级时，搜救船舶与搜救直升机的航行和飞行安全无法得到保障，超过9级时客船不得离港[27]，因此，风力过大将延长到达现场时间，本文将平均风速8级时的到达时间设定为130分钟，9级时为150分钟。浅滩、暗礁易引起搜救船只搁浅或触礁，由于水深超过20 m时搜救船只航行不受影响[31-32]，故设定站点水深大于20 m时浅滩、暗礁比例为3%以下，低于20 m（含）时为3%~10%；养殖区主要分布于距离近岸40 km以内，设定站点离岸距离大于40 km（含）时养殖区比例为3%以下，小于40 km时为3%~10%。

2 海上搜救困难度评价指标模型

本文通过建立海上搜救困难度评价指标模型，对渤海海域搜救困难度开展分析研究。评价模型的运行包括四个步骤：（1）从搜救的自然环境、辖区信息、行动评估三方面选取关键指标，构建海上搜救困难度评价指标体系；（2）构造判断矩阵，使用层次分析法确定各级指标权重并进行一致性检验；（3）确立各指标隶属度向量，构建困难度模糊评价集；（4）对海域各站点的模糊评价集进行清晰化，最终获得搜救困难度的二维评价结果。

2.1 海上搜救困难度评价指标体系

在搜集事故调查报告、相关文献和专家咨询的基础上，从搜救自然环境、搜救辖区信息、搜救行动评估3个方面分析渤海海上搜救困难度影响因素，共选取11个重要评价指标（表1）。其中，水温是决定落水人员存活时间长短的决定性因素，水温达到0 ℃时最长存活时间不超过12 min[30]。风和波浪对搜救行动影响较大，大风、大浪会分别导致船舶漂移和船身剧烈晃动，增加搜救困难度[33]。能见度低时视野差，养殖区的设备和浅滩暗礁会影响搜救船舶的航行，从而阻碍搜救行动的开展。而搜救辖区信息及搜救行动评估的5个指标都会影响搜救时间而产生困难度。

2.2 评价指标权重计算

通过调查问卷的形式咨询海事院校老师、海事局工作人员、资深船长等航运界相关专家，由专家对各指标按照1~9标度法进行两两比较判断、打分，挖掘不同指标间的相互影响程度，构建判断矩阵[25-29]。计算判断矩阵的最大特征值和对应特征向量，得出某一层次各要素相对于上一层元素的局部权重，依此类推逐层分析，最终得到最低层次相对最高层次的全局权重。权重统计过程中应同时求出一致性检验指标CR（公式1、2），CR的数值必须小于0.1才能通过判断矩阵的一致性检验。

$$CR = \frac{CI}{RI} \tag{1}$$

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \tag{2}$$

式中：CI为矩阵的一致性指标；RI为随机一致性指标；$\lambda_{\max}$是矩阵的最大特征根，当$\lambda_{\max}=n$时，矩阵具有完全一致性。

采用海上搜救困难度的11个评价指标共生成6个判断矩阵，分别计算出对应的6个CR值，数值范围为0.004~0.06，即所有矩阵均符合一致性要求，证明评价指标选取适宜，权重数据（表1）

表1 海上搜救困难度评价指标表

指标类别	困难度指标	权重计算（全局）	隶属度向量计算	
搜救自然环境（水文气象环境）	水温	0.15	(0.9, 0.1, 0, 0, 0)；水温0.3 ℃以下 (0.4, 0.5, 0.1, 0, 0)；水温0.3~10 ℃ (0.2, 0.3, 0.4, 0.1, 0)；水温10~15.6 ℃ (0.1, 0.2, 0.2, 0.4, 0.1)；水温15.6~21 ℃ (0, 0.1, 0.2, 0.2, 0.5)；水温21 ℃以上	
搜救自然环境（水文气象环境）	风	0.07	(0.7, 0.2, 0.1, 0, 0)；风9级以上 (0.2, 0.6, 0.1, 0.1, 0)；风7~9级 (0, 0.1, 0.5, 0.3, 0.1)；风4~7级 (0, 0, 0.1, 0.4, 0.5)；风4级以下	
搜救自然环境（水文气象环境）	波浪	0.12	(0.8, 0.1, 0.1, 0, 0)；狂涛 （8级以上） (0.2, 0.5, 0.2, 0.1, 0)；大浪 （6~8级） (0, 0.1, 0.4, 0.3, 0.2)；中浪 （3~6级） (0, 0, 0.1, 0.5, 0.4)；轻浪 （3级以下）	
搜救自然环境（水文气象环境）	能见度	0.03	(0.8, 0.2, 0, 0, 0)；能见度0~3级 (0.4, 0.4, 0.2, 0, 0)；能见度3~5级 (0, 0.2, 0.6, 0.1, 0.1)；能见度5~7级 (0, 0, 0.1, 0.3, 0.6)；能见度7级以上	
搜救自然环境（通航自然环境）	浅滩、暗礁	0.04	(0, 0, 0, 0.2, 0.8)；密集度3%以下 (0, 0.2, 0.2, 0.5, 0.1)；密集度3%~10% (0.1, 0.3, 0.4, 0.2, 0)；密集度10%~20% (0.3, 0.3, 0.3, 0.1, 0)；密集度20%以上	
搜救自然环境（通航自然环境）	养殖区	0.14	(0, 0, 0.1, 0.1, 0.8)；密集程度3%以下 (0, 0.1, 0.3, 0.5, 0.1)；密集程度3%~10% (0.2, 0.2, 0.4, 0.2, 0)；密集程度10%~20% (0.4, 0.3, 0.2, 0.1, 0)；密集程度20%以上	
搜救辖区信息	辖区面积	0.16	(0, 0, 0, 0.2, 0.8)；面积500 km^2以下 (0, 0.1, 0.5, 0.3, 0.1)；面积500~8 000 km^2 (0.2, 0.6, 0.2, 0, 0)；面积8 000~50 000 km^2 (0.7, 0.2, 0.1, 0, 0)；面积50 000 km^2以上	
搜救辖区信息	辖区形状	0.03	(0, 0, 0.1, 0.5, 0.4)；形状系数7~10 (0, 0, 0.6, 0.3, 0.1)；形状系数3~7 (0.1, 0.6, 0.3, 0, 0)；形状系数0~3	
搜救辖区信息	辖区离岸距离	0.05	(0, 0, 0, 0.2, 0.8)；离岸距离: 13.89 km以下 (0, 0, 0.1, 0.7, 0.2)；13.89~55.56 km (0, 0.1, 0.5, 0.3, 0.1)；55.56~138.9 km (0.2, 0.4, 0.3, 0.1, 0)；138.9 km以上	
搜救行动评估	到达现场时间	0.16	极端恶劣	0，x≤135；(x−135)/15，135＜x≤150； 1，x＞150。
			恶劣	0，x≤120或x≥150；(x−120)/15，120＜x≤135； (150−x)/15，135＜x＜150。
			困难	0，x≤105或x≥135；(x−105)/15，105＜x≤120； (135−x)/15，120＜x＜135。
			一般	0，x≤90或x≥120；(x−90)/15，90＜x≤105； (120−x)/15，105＜x＜120。
			良好	1，x≤90；(105−x)/15，90＜x＜105； 0，x≥105。
搜救行动评估	反应时间	0.05	极端恶劣	0，x≤65；(x−65)/55，65＜x＜120； 1，x≥120。
			恶劣	0，x≤35或x≥120；(x−35)/30，35＜x＜65； (120−x)/55，65＜x＜120。
			困难	0，x≤20或x≥65；(x−20)/15，20＜x＜35； (65−x)/30，35＜x＜65。
			一般	0，x≤15或x≥35；(20−x)/5，15＜x＜20； (35−x)/15，20＜x＜35。
			良好	1，x≤15；(x−15)/5，15＜x＜20； 0，x≥20。

可信度较高。

2.3 确立各指标隶属度向量与评价集

模糊综合评价法的目标是求解模糊评价集Q，其向量形式为（$q_1,q_2,\cdots,q_n$），Q表示搜救困难度相对于评价集各等级的隶属度。分别对每个站位进行模糊变换（公式3），以获得各站的评价隶属度。

$$Q=A\cdot R \tag{3}$$

式中：A为各指标权重组成的权重向量，R为由各指标隶属度向量（计算方法见表1）组成的评价矩阵。将评价集分为5个等级：{极端恶劣,恶劣,困难,一般,良好}，各等级对应评价值范围分别为[0，40)、[40，60)、[60，75)、[75，90)、[90，100)[27]，隶属度向量的5个要素分别对应评价集从极端恶劣到良好的5个等级。要量化各站位的搜救困难度，就必须通过评价矩阵和权重向量进行模糊变换：当指标分为多个层级时，首先对某站位由层级1开始进行模糊变换，从而获得层级2的隶属度向量，此时权重向量A采用层级1相对层级2的局部权重；依次按层级从低到高的顺序推进，最终获得该站位的搜救困难度评价隶属度，即模糊评价集。

2.4 海域搜救困难度评价

对模糊评价集Q进行清晰化，可以获得困难度的确定值，从而实现困难度评价。选用能反映模糊集整体信息的质心法（公式4）进行搜救困难度的清晰化。

$$v=\frac{\sum_{j=1}^{n}q_jv_j}{\sum_{j=1}^{n}q_j} \tag{4}$$

式中：v表示某站位的搜救困难度，q_j为模糊评价集Q第j个等级的元素，v_j为第j个等级的评价值，本文根据评价值范围将v_j的5个等级分别取值为0、50、67.5、82.5、100。v的数值确定后可根据2.3中各等级评价值范围判断该站位所属困难度等级。由于搜救困难度等级与评价值成反比，且评价值数值范围为0~100，因此，本文在后续成果分析中将困难度评价值定义为搜救成功率（单位为%）。成功率在[0，40)、[40，60)、[60，75)、[75，90)、[90，100)范围时对应的搜救困难度分别为“极端恶劣”“恶劣”“困难”“一般”及“良好”。

3 海上搜救困难度评价结果及分析

为研究渤海海上搜救成功率大面分布的冬、春、夏、秋四季变化特征，困难度评价指标体系中的水文气象环境要素分别选取2、5、8、11月这4个代表月份各站位的月平均数据。同时，针对有长期实测站位的渤海中部海域及4个主要沿岸港口海域——分别为天津港、秦皇岛港、营口港和龙口港海域（图1红色方框部分），进行成功率年变化特征分析，此时水文气象要素使用日平均数据。

3.1 渤海海域搜救困难度评价指标模型验证

为验证渤海搜救困难度评价指标模型的可靠性，选取近年来对渤海影响较大的极端天气过程：1909“利奇马”台风和2212“梅花”台风（图2(a)），分别评估渤海4个沿岸港口海域及渤海中部海域在

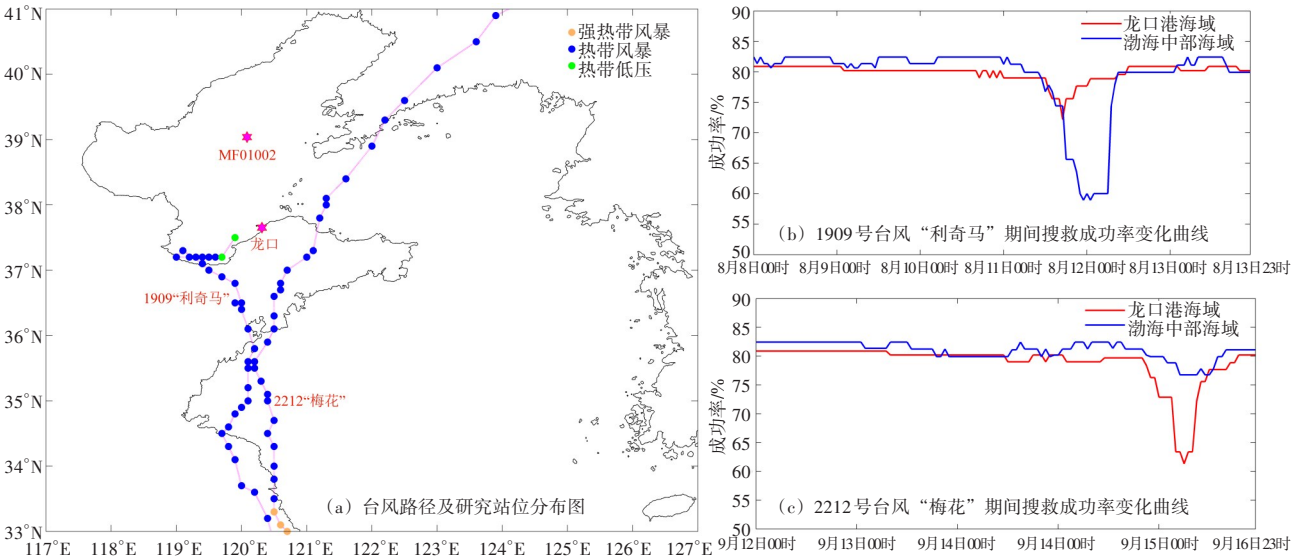

图2 渤海海上搜救困难度评价指标模型验证

两次台风期间的逐时搜救成功率变化趋势。将评估结果及台风路径图进行比对发现，由于天津港（塘沽站）、秦皇岛港（秦皇岛站）及营口港（鲅鱼圈站）距离两次台风路径均较远，故台风过程中其搜救成功率变化并不显著，仅发生轻微波动（图略），而龙口港海域（龙口站）及渤海中部海域（MF01002站）离台风路径相对比较近，受台风影响较大。由于这两次台风发生在夏末秋初，渤海海域整体水温较高，均在21 ℃以上，故分析成功率的变化原因时可忽略水温的影响。

1909号台风“利奇马”过程期间，渤海中部海域搜救成功率所受影响比龙口港海域更大（图2(b)），主要由于中部海域的逐时平均风速最大可达9级，持续时间长达10 h，且同一时段有效波高为3.6~4.8 m；此时龙口港海域最大平均风速为8级且持续时间较短,其有效波高最大值为2 m。2212号台风“梅花”过境时离龙口港海域更近，导致龙口港海域搜救成功率降低较多（图2(c)）。在台风“梅花”影响下，龙口港海域的逐时平均风速最大可达8~9级，且持续11 h，最大波高为3 m；而渤海中部海域最大平均风速为7级，其最大有效波高为3.4 m，推测中部海域主要受涌浪影响。由此可见，评价指标模型可以较好地评估台风过程对海域搜救困难度的影响，模型计算结果是可靠的，可以使用其进行后续分析研究。

3.2　渤海海域搜救成功率大面分布

参数设置时，将渤海搜救辖区面积和形状、到达现场时间、反应时间指标均近似设定为常数，对成功率空间变化特征不产生影响，在进一步工作中应细化这四个指标的空间分布，以获得更精确的二维搜救成功率。渤海海域月平均有效波高值变化相对较低，其隶属度向量对搜救成功率空间分布影响较小。如图3所示，渤海海上搜救成功率全年分布趋势为海岸线周边海域相对较低，渤海中部海域相对较高。经分析，渤海中部海域水温和能见度相对较高且浅滩暗礁、养殖区密集度低，故其全年成功率均较高。与中部海域相比，渤海海岸线周边海域的水温、风速、离岸距离、

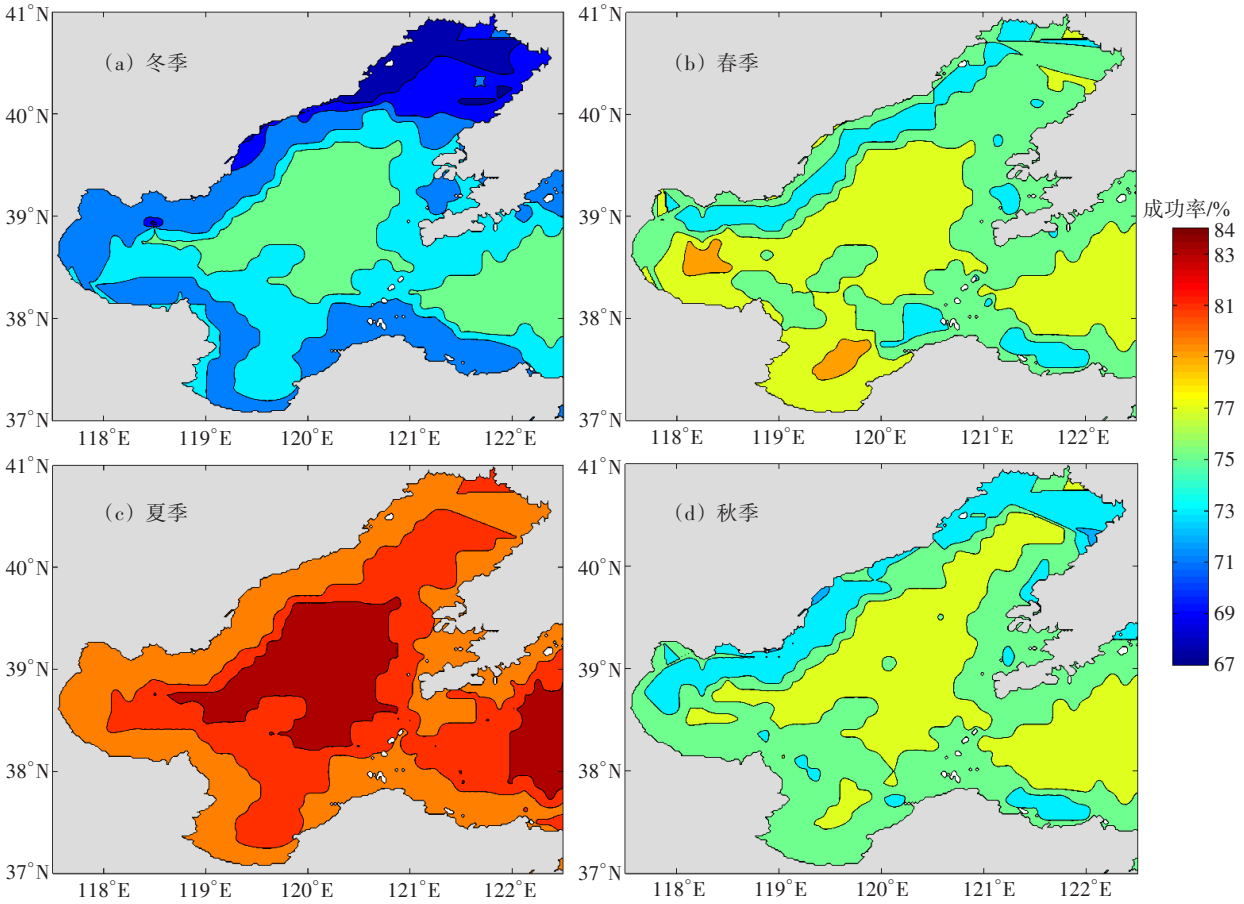

图3　渤海海上搜救成功率分布图

能见度偏低，浅滩暗礁、养殖区密集度偏高。其中，水温和能见度低、浅滩暗礁和养殖区密集度高均会导致搜救成功率偏低，而风速、离岸距离低则导致成功率偏高。由此可见，水温、能见度、浅滩暗礁和养殖区密集度对渤海搜救成功率空间分布的影响较大。

渤海海域搜救成功率季节分布特征（图3）为：整体来看，夏季成功率远高于其他季节，春、秋季次之，冬季最低。从不同季节成功率的空间分布来看，冬季辽东湾及秦皇岛沿岸海域成功率全年最低，其对应搜救困难度为“困难”，主要因为该海域水温最低且能见度也较低；渤海湾、莱州湾虽然为近岸海域，但春季时这两个海湾相对于渤海中部海域，能见度偏高、风速偏低、水温也偏高，导致这两个海湾成功率几乎与渤海中部海域持平；渤海湾、莱州湾的中央海域由于受浅滩、暗礁等影响更小，其搜救成功率甚至大于渤海中部海域。

从中华人民共和国海事局官方网站（https://www.msa.gov.cn）下载渤海海域（辽宁、河北、山东、天津）2015—2022年度历次海上事故调查报告，从中检索和统计出有人员落水的事故，共计41起，把死亡、失踪人员统一归类于死亡/失踪人员，按季节进行救助情况统计（表2）。表2显示，近7年渤海海上人员落水事故的整体救助情况受季节影响较大：夏季人命救助成功率最高，为38.4%，共落水39人，获救15人；冬季最低，落水36人，仅1人获救，成功率为2.8%；春、秋季成功率介于冬季和夏季之间，分别为13%、21.4%，这与搜救困难度模型计算结果的季节分布特征（图3）基本一致。

表2 渤海海域人员落水事故统计表

季节	落水总人数	死亡/失踪人数	获救人数	人命救助成功率/%
春季	23	20	3	13.0
夏季	39	24	15	38.4
秋季	42	33	9	21.4
冬季	36	35	1	2.8

统计2015—2022年度历次人员落水事故的发生地点及每次事故的人命救助成功率（图4），可以看出事故主要发生在渤海近岸海域，渤海中部海域相对较少，同时沿岸海域的人命救助成功率较中部海域低，验证了模型结果的空间分布特征。如图4(a)所示，冬季落水事故基本发生在近岸海域，人命救助成功率几乎为0，与模型冬季渤海沿岸海域搜救困难度最高的结论一致。综上所述，结合近7年海上人员落水事故的时间和空间分布，渤海海上搜救成功率模型结果的可信度得到了进一步验证。

3.3 海上搜救成功率年变化特征

为更好地分析渤海中部海域和沿岸海域搜救成功率的时空分布特征，在沿岸和中部海域选择有代表性的实测站位，使用其日平均水文气象数据进行海上搜救成功率年变化评价，数据长度为1年。随着港口经济的发展，货物吞吐量和船舶进出港数量日益增加，海上交通运输频繁，导致港口海域安全风险增大，故选择渤海的4个主要港口作为沿岸海域，其水文气象要素使用离港口最近的海洋站观测数据；渤海中部海域使用浮标观测数据。

对于所有固定的观测站点，由于通航自然环境、搜救辖区信息、搜救行动评估指标均保持不变，因此，其搜救成功率年变化曲线主要受水文气象环境指标的影响。如图5所示，渤海沿岸4个港口海域搜救成功率的年变化特征均为夏季（6—8月）最高，春（3—5月）、秋季（9—11月）次之，冬季（12月、1—2月）最低，且春、秋季成功率数值较为接近，与大面分布特征基本一致。整体来看，各港口搜救成功率（图5的总体成功率）与水温引起的成功率分量(图5的成功率分量_水温)，两者年变化曲线形状极为相似，可见成功率年变化特征主要受水温影响，但在部分月份成功率的数值波动也受风、海浪及能见度的干扰。由于某些月份部分水文气象要素变化较小，对搜救成功率的年变化曲线几乎不造成扰动：营口港冬、夏季风速（除2月和12月的部分日期）和全年波浪；龙口港夏季风速和波浪；天津港和秦皇岛港全年波浪（除7月和9月的部分日期）及全年风速。

由上述分析可知，沿岸港口海域搜救成功率年变化特征主要受水温影响，因此分别对各港口的成功率和水温日平均数据进行相关性分析（图6）：渤海四个港口的搜救成功率与日平均水温之间相关性较高，相关系数R^2均能达到0.9以上（均通过95%的显著性检验）。其中，营口港相关性最高，

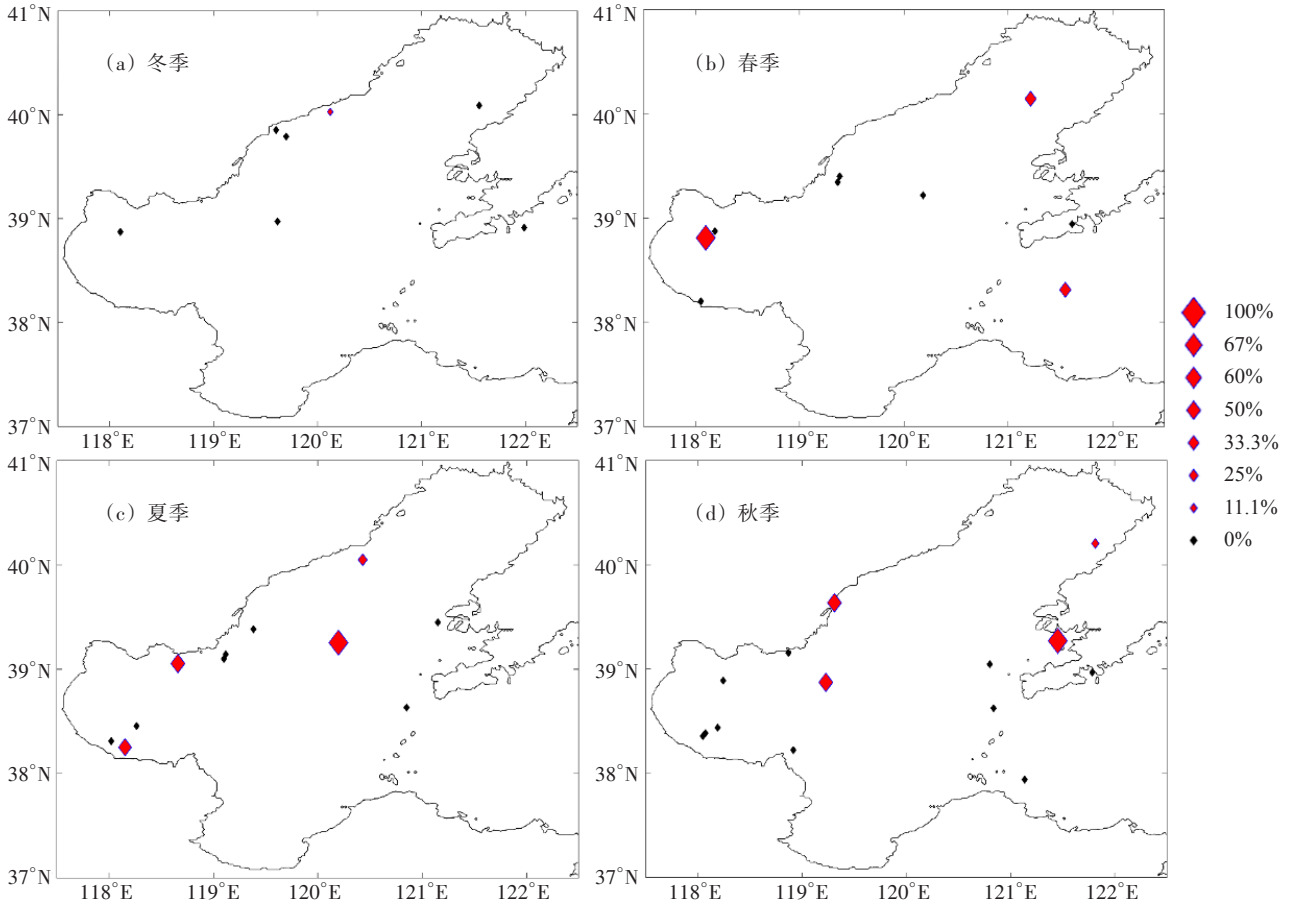

图4　渤海落水人员事故发生地点及人命救助成功率分布图

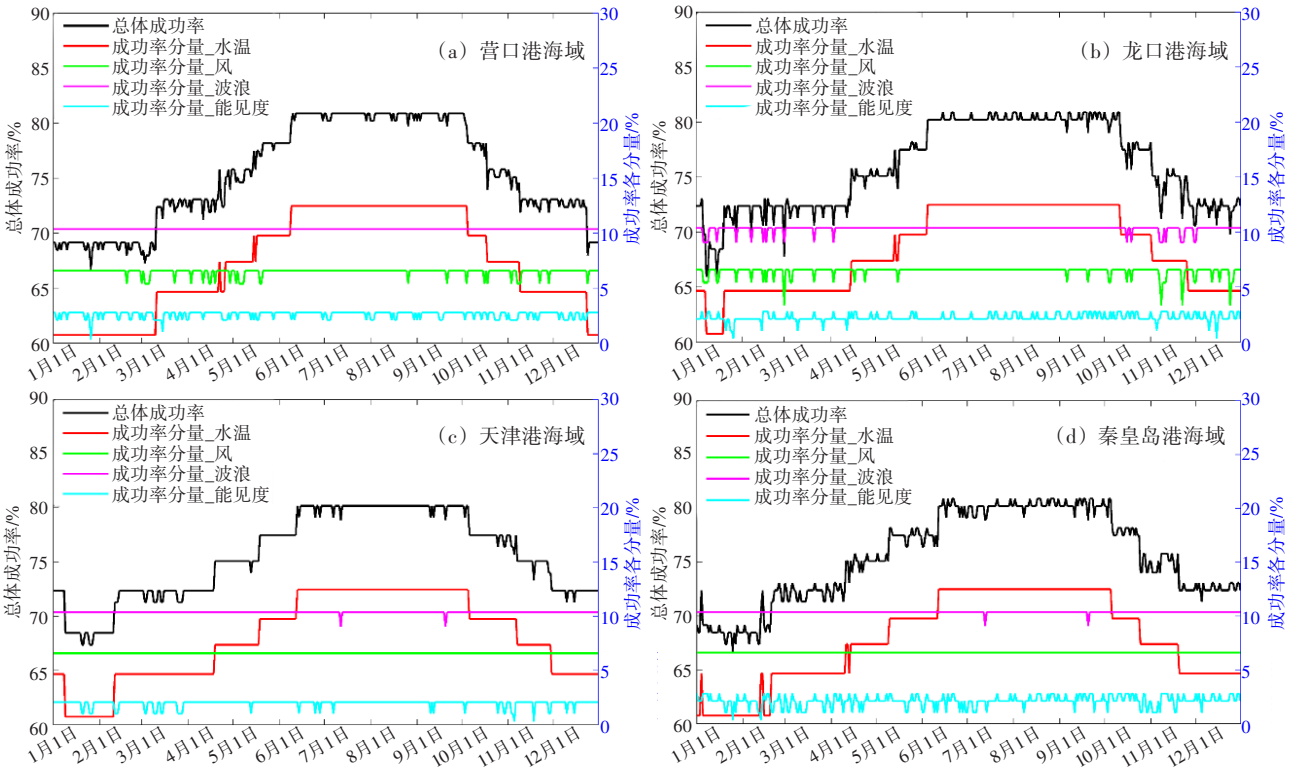

图5　渤海沿岸海域搜救成功率年变化曲线

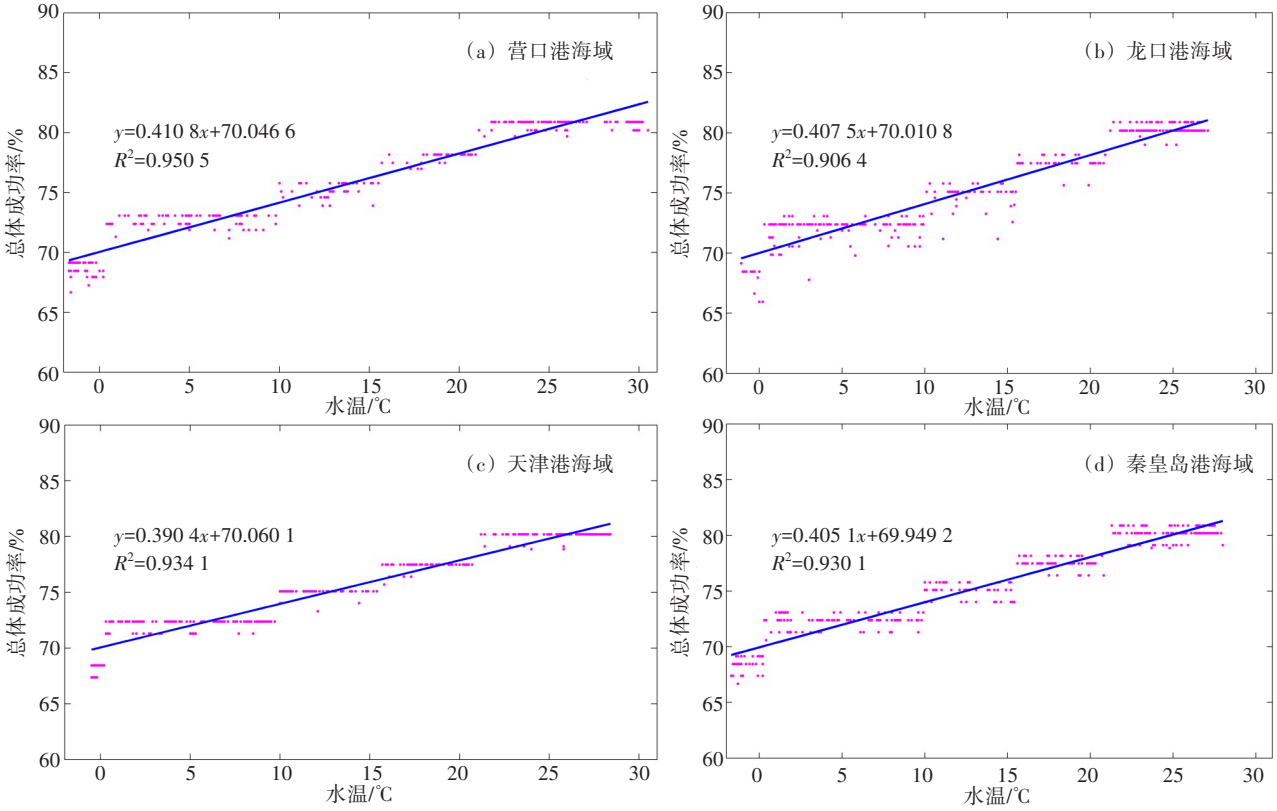

图6 渤海沿岸海域搜救成功率与日平均水温相关性分析

相关系数能达到0.950 5，龙口港相关系数最低，为0.906 4，天津港和秦皇岛港的相关系数比较相近，分别为0.934 1和0.930 1。综上所述，渤海沿岸四个港口海域的水温对搜救成功率年变化曲线影响最大，其他水文气象要素影响较小。

渤海中部海域搜救成功率年变化特征为夏季最高，秋季次之，春季明显低于秋季，冬季最低（图7），其春、秋季搜救成功率变化情况与沿岸港口海域不同，其余特征较为一致。整体来看，渤海中部海域搜救成功率（图7(a)的总体成功率）与水温引起的成功率分量（图7(a)的成功率分量_水温）的年变化曲线极为相似，由此可见中部海域成功率年变化特征主要受水温影响。另外，成功率的数值在1—4月和9—12月受风和波浪的影响产生波动，部分时间也受到能见度的零星扰动。

由于渤海中部海域搜救成功率年变化特征主要受水温影响，因此对中部海域的成功率和水温日平均数据进行相关性分析（图7(b)）：渤海中部海域搜救成功率与水温之间的相关性较沿岸港口海域低，相关系数R^2为0.853 1（已通过95%的显著性检验）。由此可见，渤海中部海域水温对搜救成功率年变化的影响低于沿岸港口，风和波浪在1—4月、9—12月对中部海域成功率年变化曲线的影响较大。

4 讨论和结论

基于层次分析与模糊综合评价相结合的方法，选取水温、风、波浪、能见度、搜救辖区离岸距离等因素作为指标，构建搜救困难度评价指标体系。在验证模型可靠性的基础上，对渤海海域首次开展二维搜救困难度的评价与研究。本文使用成功率来表征搜救困难度，成功率越低则困难度越高。结果表明，渤海海上搜救成功率全年分布趋势为海岸线周边海域相对较低，渤海中部海域相对较高。其季节分布特征为夏季成功率远高于其他季节，春、秋季次之，冬季最低。冬季辽东湾及秦皇岛沿岸海域成功率全年最低；春季渤海湾、莱州湾搜救成功率与渤海中部海域持平，湾中央海域甚至略高于中部海域。对渤海沿岸4个港口海域及中部海域各选取1个长期观测站点开展年变化特征分析，发现同一固定地点的搜救成

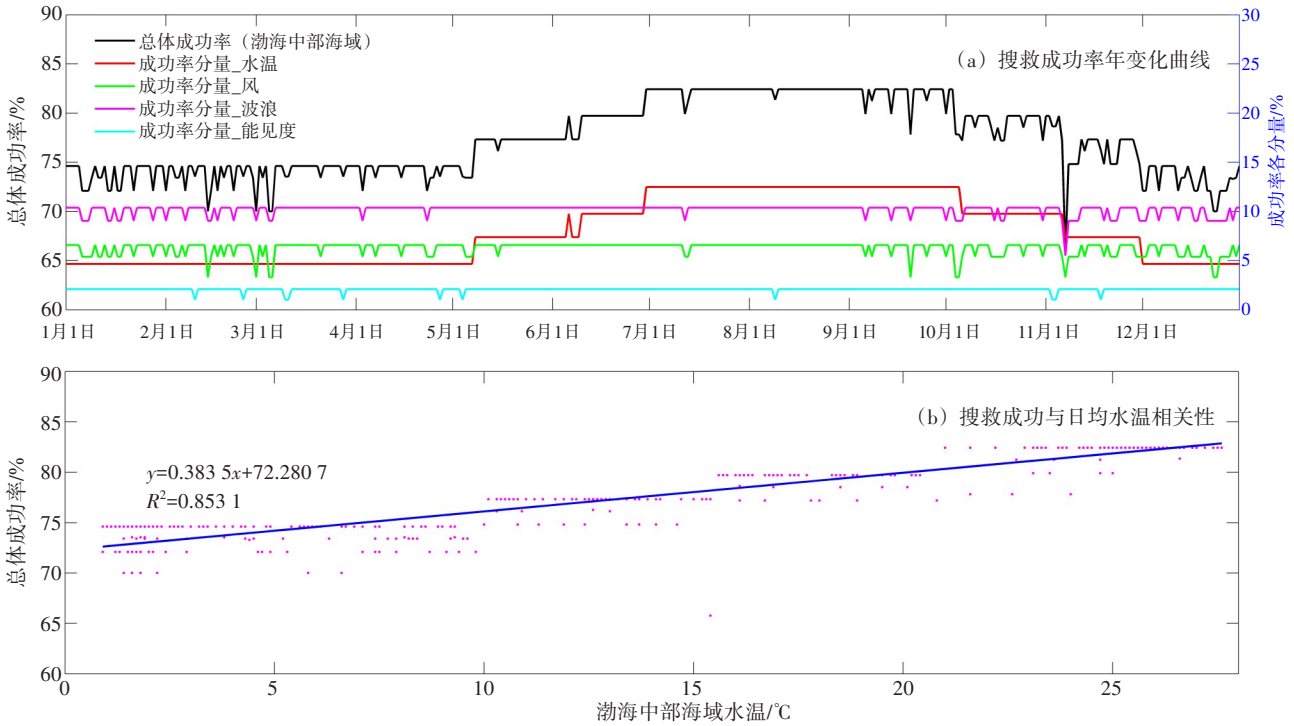

图7　渤海中部海域搜救成功率分析

功率年变化主要受水温影响，证实了冬季是搜救困难度最高的季节。因此，冬季渤海沿岸海域，尤其是辽东湾及秦皇岛沿岸海域为高困难度搜救区，需要加大日常巡逻管理，优化搜救资源部署。

以往的搜救困难度评价研究将目标海域简化为1个点，无法获取海域困难度的空间分布特征[25-29]，目前已有学者在南海进行了二维层面的搜救困难度评价[24]，但在进行评价时并未考虑水温这一重要因素的影响。当前海洋资源开发利用规模不断增长，海上活动随之增多，海难事故频发，本文研究分析了渤海海上搜救困难度的时空分布特征，对提高救助成功率、改善渤海海域搜救系统有重要意义。本研究的指标体系中未细化搜救辖区面积和形状、到达现场时间、反应时间这四个指标的空间分布，同时未在评价体系中考虑搜寻技术、救捞设备等指标，在未来的研究中需要在指标和数据等方面进一步优化评价模型。

参　考　文　献

[1] 慕凌飞. 海上搜救部门协作研究—以东疆海上搜救分中心为例[D]. 济南: 山东大学, 2021.

[2] 杨克巍, 梁笑天, 郭玙, 等. 海上搜寻理论方法与搜救决策支持系统现状及发展[J]. 海岸工程, 2021, 40(4): 291-302.

[3] 王威, 沙小进. 海上搜救体系存在的问题与对策研究[J]. 南通航运职业技术学院学报, 2012, 11(1): 43-45.

[4] 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, 2017, 68(11): 1335-1351.

[5] ABI-ZEID I, FROST J R. SARPlan: A decision support system for Canadian Search and Rescue Operations[J]. European Journal of Operational Research, 2005, 162(3): 630-653.

[6] NGUYEN B U, NG K Y. Modeling Canadian Search and Rescue Operations[J]. Military Operations Research, 2011, 5(1): 5-16.

[7] 黄智明. 福建省海上搜救问题与对策研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2016.

[8] KOOPMAN B O. The theory of search: Ⅱ. target detection[J]. Operations Research, 1956, 4(5): 503-531.

[9] KOOPMAN B O. The theory of search: Ⅲ. the optimum distribution of searching effort[J]. Operations Research, 1957, 5(5): 613-626.

[10] HOHZAKI R, IIDA K. An optimal search for a disappearing target with a random lifetime[J]. Journal of the Operations Research, 1994, 37(1):64-79.

[11] GUITOUNI A, MASRI H. An orienteering model for the search and rescue problem[J]. Computational Management Science, 2014, 11(4): 459-473.

[12] RAZI N, KARATAS M. A multi-objective model for locating search and rescue boats[J]. European Journal of Operational Research, 2016, 254(1): 279-293.
[13] OTOTE D, LI B, AI B, et al. A Decision-Making Algorithm for Maritime Search and Rescue Plan[J]. Sustainability, 2019, 11(7): 1-16.
[14] 王博研. 海上搜寻最佳区域研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2016.
[15] XIAO W J, DU P J, GONG M X, et al. An operational search and rescue model system for Shanghai coast and adjacent seas[J]. Marine Forecast, 2013, 30: 80-86.
[16] ZHANG K, HAO G, TIAN Y, et al. Evaluation Model of Maritime Search and Rescue Response capability[C]// 5th International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS). Liverpool: IEEE, 2019: 155-160.
[17] LIANG Y, BAO J, HU X, et al. A heuristic project scheduling approach for quick response to maritime disaster rescue[J]. International Journal of Project Management, 2009, 27(6): 620-628.
[18] 谭朝阳. 海上搜救管理及其能力评价—广州救捞局搜救问题研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2003.
[19] GUO Y, YE Y, YANG Q, et al. A Multi-Objective INLP Model of Sustainable Resource Allocation for Long-Range Maritime Search and Rescue[J]. Sustainability, 2019, 11(3): 1-25.
[20] WU H, XIAN J, MEI X, et al. Efficient target detection in maritime search and rescue wireless sensor network using data fusion[J]. Computer Communications, 2019, 136: 53-62.
[21] 徐圣豪. 福建省海上搜救力量配置研究[D]. 厦门: 集美大学, 2015.
[22] 王晓宁. 青岛海上搜救应急能力评价与提升对策研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2015.
[23] 郭为民. 台湾海峡海上专业搜救能力评价[D]. 大连: 大连海事大学, 2008.
[24] 左潇懿, 程亮, 楚森森, 等. 南海海上搜救困难性评价[J]. 热带地理, 2022, 42(7): 1138-1147.
[25] 王晶. 海区搜救系统运行评价研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2018.
[26] 朱玉柱. 海上搜寻与救助[M]. 大连: 大连海事大学出版社, 2017.
[27] 范希伟. 海上搜救环境研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2013.
[28] 裴建锋. 青岛海上搜救应急管理能力研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2014.
[29] 许志远. 国家海上搜救能力评价及对策研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2007.
[30] 袁书泽. 海难人命救助的有效时限初步探讨[J]. 中国医药科学, 2011, 1(11): 146+149.
[31] WANG J, LI M, LIU Y, et al. Safety Assessment of Shipping Routes in the South China Sea Based on the Fuzzy Analytic Hierarchy Process[J]. Safety Science, 2014, 62: 46-57.
[32] HUANG J C, NIEH C Y, KUO H C. Risk Assessment of Ships Maneuvering in an Approaching Channel Based on AIS Data[J]. Ocean Engineering, 2019, 173: 399-414.
[33] BRIGGS M J, BORGMAN L E, BRATTELAND E. Probability Assessment for Deep-Draft Navigation Channel Design[J]. Coastal Engineering, 2003, 48(1): 29-50.

（本文编辑：袁泽轶）