

# 海上溢油应急物资可达能力研究\*

彭鑫<sup>1)</sup> 文元桥<sup>2,3,4)</sup> 肖长诗<sup>1)</sup> 黄亮<sup>2,3,4)</sup> \*  
周春辉<sup>1)</sup> 张帆<sup>1)</sup> 元海文<sup>1)</sup> 张义萌<sup>1)</sup>

(武汉理工大学航运学院<sup>1)</sup> 武汉 430063) (武汉理工大学智能交通系统研究中心<sup>2)</sup> 武汉 430063)  
(武汉理工大学国家水运安全工程技术研究中心<sup>3)</sup> 武汉 430063)  
(武汉理工大学内河航运技术湖北省重点实验室<sup>4)</sup> 武汉 430063)

**摘要:**为了降低海上溢油事故对近岸海域通航安全和环境的影响,提高海事部门的近岸海域溢油应急响应能力,文中提出一种海上溢油应急响应评估与可视化模型.在构建多维海上溢油应急物资应急能力评价指标体系基础上,结合应急物资调配最优路径分析,建立了研究海域范围内任意位置应急物资可达能力和码头(应急设备库)可获取应急物资应急能力的计算与可视化模型.以深圳水域为研究水域进行实验验证,结果表明,模型评估结果与实际相符,能够提供海上溢油应急物资应急能力的直观展示.

**关键词:**溢油应急;应急物资;应急能力;评估;可视化

**中图分类号:**U698.7

**doi:**10.3963/j.issn.2095-3844.2020.01.017

## 0 引 言

海上溢油是严重的海洋生态灾害之一,在世界各地,由于船舶造成的溢油灾害时有发生.2018年1月,“桑吉”号游船与“长峰水晶”号货船在长江口相撞<sup>[1]</sup>,导致11.13万t凝析油和船用燃油泄漏,造成了严重的人员伤亡、财产损失和海洋环境污染.2002年11月,巴哈马籍油船“威望”号在西班牙海域内搁浅后断裂沉没,数万吨重油入海,对于西班牙、葡萄牙及法国的海域、海岸线产生严重污染.在1996—2016年间,深圳水域共发生37起海上溢油污染事故.为了更好应对日益增加的海上溢油风险,各国学者们越来越关注如何缩短海上溢油应急救援时间,如何合理评估海域溢油应急能力,以及如何提高海上溢油应急资源管理能力.海域内溢油应急救援能力的高低直接关系到海上溢油事件的处理成效,因此,对海上溢油应急能力作出准确客观评价是十分有必要的.

发达国家,尤其是美国和日本在应急力量评

价方面取得了较为丰硕的成果.美国是世界上第一个实施政府应急能力评价的国家,Wilson等<sup>[2-4]</sup>对56个州、地方和海岛都完成了应急能力状况的评估工作,并对应急管理的四个阶段(减缓、准备、响应、恢复)作了详细论述,并提出了相应的评价指标.在应急评价方面,常见的方法有层次分析法和模糊层次分析法.其中,模糊层次分析法(F-AHP)<sup>[5-6]</sup>结合了层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)和三角模糊分析数原理,基于这两种方法建立的应急能力评价指标体系和评价模型,减少了个人主观臆断所带来的弊端,更加符合客观实际情况.海上溢油应急能力评估多从风险识别与控制能力、应急资源保障能力、应急处置能力、应急预案准备能力以及应急恢复能力五个应急能力评价指标体系进行<sup>[7-9]</sup>.

海上溢油应急物资是进行海上溢油处置工作的基础,传统的对于海上溢油应急物资保障和处置能力评估方法,多是从应急物资的数量、类型、海域溢油风险等方面进行评估<sup>[10-12]</sup>.本文综合分

收稿日期:2019-12-14

彭鑫(1993—),女,博士生,主要研究领域为交通信息工程及控制

\*国家自然科学基金青年项目(51709218)、国家自然科学基金项目(51679180)资助

析应急物资的配置规模、覆盖范围、响应速度这三个方面,将溢油应急物资分为溢油围控物资、溢油回收物资、溢油分散物资、溢油吸附物资和溢油清除物资,建立各类溢油应急物资应急能力评价计算模型.为海事管理部门对于应急物资的合理配置提供依据.

## 1 海上溢油应急物资应急能力评估模型

### 1.1 海上溢油应急物资

海上溢油应急物资主要包含三大类,分别是溢油应急现场处置设备物资类、溢油应急物资运输设备物资类及其他设备物资类.其中,海上溢油应急现场处置设备包括四类物资:溢油围控物资、溢油回收物资、溢油卸载物资和溢油消油物资.应急物资的运输设备包括两类物资:汽车和应急船舶,见表1.

表1 海上溢油应急物资类别列表

设备类型	应急物资	物资作用
海上溢油应急处理设备	围油栏	围控物资
	围油栏布放艇	围控物资
	收油机	回收物资
	溢油回收船	回收物资
	卸载泵	卸载物资
	吸油材料	消油物资
	溢油分散剂喷洒装置	消油物资
	消油剂	消油物资
	物资运输设备其他设备	应急辅助船、汽车

溢油围控物资主要是指不同性能的围油栏,利用围油栏等围控设备可将溢油控制在有效的范围内.溢油回收主要是通过机械回收的方法对中高黏度或油膜较厚的油品进行回收,溢油回收物资主要包括不同性能的收油机,如刷式收油机、真空式收油机、盘式收油机等.卸载物资包括卸载泵等,可用于将临时储油设备中的回收油输送到油罐车中.溢油消油是采用化学试剂对油层较薄的油品进行处理,消油物资主要包括化学分散剂、吸油毡等.

### 1.2 海上溢油应急物资应急能力评估模型

依据海上溢油应急物资应急能力计算方法,对应急物资中可量化的物资建立相应的应急能力评估模型,包括溢油围控能力及溢油清除能力两大部分,从而建立应急物资综合应急能力评估模型.其中,溢油清除能力涉及到了溢油回收能力、溢油分散能力和溢油吸附能力三个维度的能力计

算.详细描述各维度的海上溢油应急物资应急能力评估计算方法,对于各个维度应急物资应急能力的计算,建立数学方程来定量描述不同变量之间的相互关系.其中,各个维度的海上溢油应急物资应急能力计算方程如下.

1) 海上溢油围控能力计算 采用如下公式计算海上溢油应急围控能力.

$$W = \frac{(B - 1\ 000)/3}{1.25} \quad (1)$$

式中:W为溢油围控能力,t;B为围油栏总长度,m.

2) 海上溢油回收能力计算 溢油回收能力评估计算综合了溢油机械回收能力、溢油储运能力两个围度.

其中,对于溢油机械回收能力可表示为:

$$M = E \times \rho \times \alpha \times Y \times H \times \rho_2$$

式中:M为机械实际回收油量,t;E为收油机标定收油速率,m<sup>3</sup>/h; $\rho$ 为油污水的含油量,本计算模型取值为5%; $\alpha$ 为溢油回收设备的完备率;Y为收油机作业天数,d;H为设备每天可工作时间,本计算模型取平均值为6h; $\rho_2$ 为油水混合物密度,t/m<sup>3</sup>.

海上溢油储运能力的具体计算公式为

$$C = [C_1 + C_2 \times (n + 1) \times \rho \times \rho_2] \quad (2)$$

式中:C为储运能力,t;C<sub>1</sub>为溢油储运设备的储运容量,m<sup>3</sup>;C<sub>2</sub>为设备可重复使用的储运装备储运容积,m<sup>3</sup>;n为设备的转运次数; $\rho$ 为油污水含油率,在本模型中将其取定值为5%; $\rho_2$ 为海上溢油的油品密度,t/m<sup>3</sup>.

基于上述对溢油机械回收能力和溢油储运能力的计算,则区域内总溢油应急回收能力为

$$T_1 = \min(M, C) \quad (3)$$

式中:T<sub>1</sub>为区域总溢油回收能力,t;M为机械回收能力,t;C为溢油储运能力,t.

3) 海上溢油分散能力计算 对于海上溢油分散能力计算时,按喷洒装置喷洒速率来计算溢油分散剂实际处理的溢油量;再依据区域实际配备的溢油分散剂数量来计算区域的实际溢油分散能力;取两个值的最小值为最后所得海上溢油分散能力.对于按喷洒装置喷洒速率计算的溢油分散剂实际处理的溢油量为

$$T_{21} = \frac{V \times \rho_1 \times 60}{R \times 1\ 000} \times Y \times H \times n \quad (4)$$

式中:T<sub>21</sub>为分散剂实际处理的溢油量,t;V为溢油分散剂喷洒装置喷洒速率,L/min; $\rho_1$ 为溢油分散剂密度,kg/L;R为分散剂与溢油量的用量比,根据

查阅资料,常规型分散剂用量比例为 0.3:1,对于浓缩型分散剂用量比例为 0.1:0.2;Y 为溢油喷洒装置的作业天数,d;H 为喷洒装置每天工作的时间,h/d;n 为研究区域内分散剂喷洒装置总数量.

按区域实际配备的溢油分散剂数量,计算的区域溢油分散能力为

$$T_{22} = \frac{G}{R} \quad (5)$$

式中:G 为研究区域内实际配备的溢油分散剂总数量,t;R 同式(4).

对  $T_{21}$  和  $T_{22}$  取最小值,最终研究区域海上溢油分散能力为

$$T_2 = \min(T_{21}, T_{22}) \quad (6)$$

4) 海上溢油吸附能力计算 溢油吸附能力可表示为

$$T_3 = Q_1 \times J_1 \times Q_2 \times J_2 \quad (7)$$

式中: $T_3$  为溢油吸附材料总吸油量,t; $Q_1$  为吸油毡的总重量,t; $J_1$  为吸油毡吸附油污量与吸油毡自身重量的倍数关系,在本计算模型中,取平均倍数:5; $Q_2$  为吸油拖栏的重量,t; $J_2$  为吸油拖栏吸附油污量与吸油拖栏自身重量的倍数关系,在本

计算模型中,取平均值为 10.

5) 海上溢油清除能力计算 海上溢油清除能力评估计算,依据溢油回收能力、溢油分散能力和溢油吸附能力三个维度计算,为

$$Z = \frac{(T_1 + T_2 + T_3)}{1.4} \quad (8)$$

6) 海上溢油应急物资综合应急能力计算 溢油应急物资综合应急能力的计算,依据溢油围控能力和溢油清除能力两个维度,取溢油围控能力和溢油清除能力较小的值,作为应急物资综合应急能力评估计算结果,为

$$S = \min(W, Z) \quad (9)$$

### 1.3 溢油应急物资的可达能力评估可视化

在海上溢油物资管理和溢油应急响应处置过程中,需要掌握应急物资的储量及应急物资可辐射的水域范围.与此同时,海上溢油应急物资到达事故发生水域的时间也是影响溢油应急处置效果的重要因素.基于以上问题,针对研究区域内特殊码头和溢油事件高发危险水域,建立水域范围内任意目标位置的各维度溢油应急物资可达应急能力可视化模型.具体建模流程见图 1.

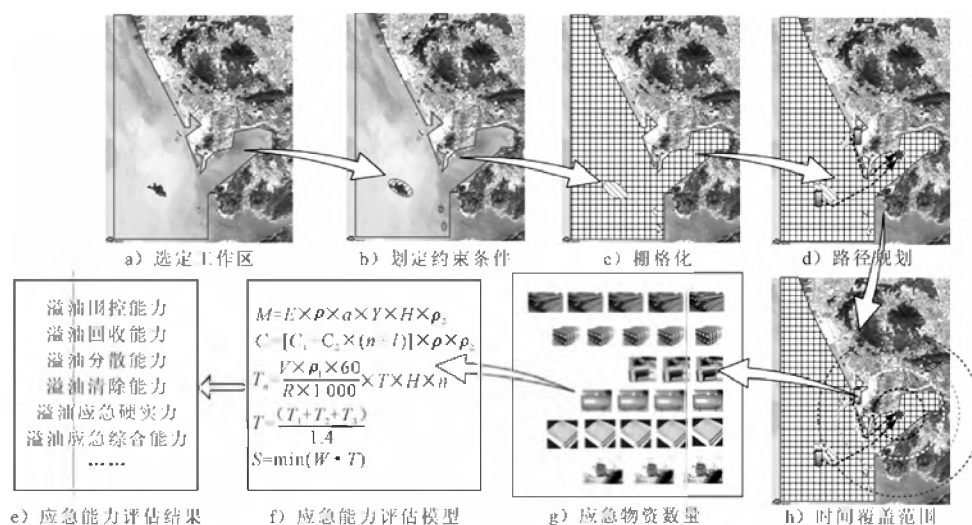


图 1 溢油应急物资可达能力评估可视化建模流程

研究水域范围内任目标位置在约束时间范围内,可获取的各维度海上溢油应急物资可达能力评估模型的建模过程如下.

**步骤 1** 划定研究区域边界,确定水域范围作为研究对象.

**步骤 2** 将研究区域中的岛屿、障碍物等地理信息从研究区域中剔除,以作为研究区域的约束条件.

**步骤 3** 按照 GIS 四叉树的方法,对研究区域进行网格化处理,确定划定网格的数量和各个

网格的大小.

**步骤 4** 计算各个网格中心点在约束时间范围内可达到的应急设备库或码头的最短路径.该模型中的最短路径水域内任意网格中心点到各码头的水上可达最短路径与码头至各设备库间陆上最短路径之和,即  $S = S_1 + S_2, n \text{ mile}$ .其中水上最短路径规划问题,采用了经典的 A\* 路径规划算法,遍历搜索区域范围内各网格中心点,规划出研究区域范围内各个格网中心点分别到达各个码头的最短路径,即  $S_1$ .海上最短路径规划问题,调用百

度地图 API,实时规划陆上溢油应急物资运输最短路径,即  $S_2$ .

**步骤 5** 依据步骤 4 中计算所得最短路径距离  $S$ ,计算各应急设备库到达研究水域各中心点的时间  $T$ ,即  $T=S_1/V_1+S_2/V_2, \min$ . 其中,  $V_1$  为船舶行驶平均速度, n mile/min;  $V_2$  为陆上交通工具行驶的平均速度, n mile/min.

**步骤 6** 依据步骤 5 中的  $T$  值,搜索出各个格网点在 30,60,90,120 min 时间范围内,可到达的码头或应急设备库,并依据 1.2 中对于各项溢油应急能力计算方程式中的对于溢油应急物资这一变量的要求,获取在各个设备库和码头对于各个维度的溢油应急资源数量.

**步骤 7** 基于 1.2 中海上溢油应急物资应急能力评估计算方法,计算研究水域内各个格网中心点在约束范围内的溢油围控能力、溢油回收能力、溢油分散能力、溢油吸附能力、溢油清除能力以及溢油应急物资综合应急能力.

**步骤 8** 基于 MapV,对步骤 7 的各维度应急物资可达能力计算结果可视化显示.

对海上溢油应急物资可达能力评估分析,可实时获取任意位置的应急物资可达能力,为海上溢油应急资源的配置提供科学的数据支持,并提醒相关海事部门对于应急能力薄弱的海域予以重点监控.

### 1.4 应急设备库可达物资应急能力评估可视化模型

在海上溢油应急响应处置过程中,各个应急设备库的互联、互通的进行应急物资的相互协调调配是不可或缺的环节.海上发生溢油事故时,应急物资多从码头运往事故发生水域,应当对各重点码头在规定的时间内可获取的各类溢油应急物资应急能力实时掌握.因此,基于各维度的海上溢油应急物资应急能力评估计算模型,建立各个码头在规定时间(30,60,90,120,150 min)范围内可获取的总的溢油围控物资、溢油回收物资、溢油分散物资、溢油吸附物资、溢油清除物资(包括应急设备库和周边到达的应急设备库)的应急能力评估模型.建模流程见图 2.

任意码头或应急设备库在约束时间范围内,可获取的各维度海上溢油应急物资应急能力评估模型的建模过程如下:

**步骤 1** 划定研究区域边界,显示码头及应急设备库的地理位置信息.

**步骤 2** 将研究区域中的岛屿、障碍物等地

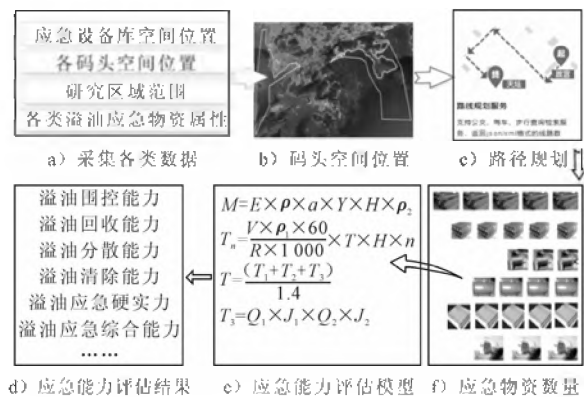


图 2 溢油应急物资应急能力评估建模流程  
理信息从研究区域中剔除,作为研究区域的约束条件.

**步骤 3** 基于百度地图 Web 服务 API 中的路径规划服务模块,实时规划各个码头、设备库间的最优可达路径,并记录最优路径的距离  $S$ , km.

**步骤 4** 依据所选交通工具的行驶速度  $V$ , km/min,及步骤 3 中的数据集  $S$ ,确定各个码头、设备库之间的可达时间  $T$ , min.

**步骤 5** 判断任意单一码头,在 30,60,90,120 min 这四个约束时间范围内,可到达的周边码头以及设备库这一数据集,并搜索此数据集中可获取的相应各个维度的应急物资数量.

**步骤 6** 依据各个维度的海上溢油应急物资应急能力计算方法,确定单一码头在规定时间节点范围内可获取的各类应急资源的应急能力,其中包括溢油围控能力、溢油回收能力、溢油分散能力、溢油吸附能力、应急清除能力以及溢油应急物资综合应急能力.

**步骤 7** 对步骤 6 中码头可获取的各维度的应急物资应急能力的计算结果可视化显示.

## 2 实验和分析

### 2.1 实验区域和实验数据

以深圳港作为实验区域.深圳港位于珠江口东岸,是中国重要的海上运输大通道,深圳港由东部和西部两大港口群组成,以集装箱运输为主.其中,西部港区重要的码头有蛇口码头、赤湾码头和大铲湾码头,东部港区主要以盐田港为主.从深圳港区内历史海上溢油事故发生地理位置统计分析,深圳港海上溢油事故主要集中在西部水域,赤湾码头和大铲湾辐射水域范围为溢油事故多发区域.其中,深圳港的水域范围及港区内重要码头见图 3.

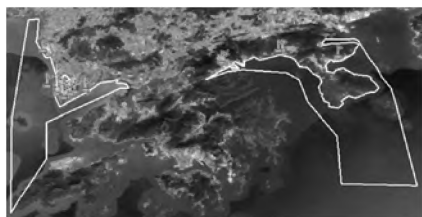


图 3 研究区域范围

### 2.2 码头可获取应急物资的应急能力评估结果

基于 1.3 中,任意单一码头在规定时间内区域范围内可获取应急物资应急能力评估计算模型,对深圳港区 13 个重要码头在五个约束时间范围内(30,60,90,120,150 min),可从周边溢油应急设备库以及码头内存储的各类溢油应急物资综合应急能力评估计算与可视化,见图 4. 由图 4 可知,研究区域内的各个码头可获取的溢油应急物资的综合应急能力具有明显的差异性. 大部分的码头在 90,120,150 min 内可获取的应急资源数量的差异性并不大,在 30,60,90 min 内有明显的差异性,有些码头在 5 个时间区域内可获得的应急资源具有明显的差异性,这是由于码头到达其他码头或设备库的可达时间有阶梯性差异.

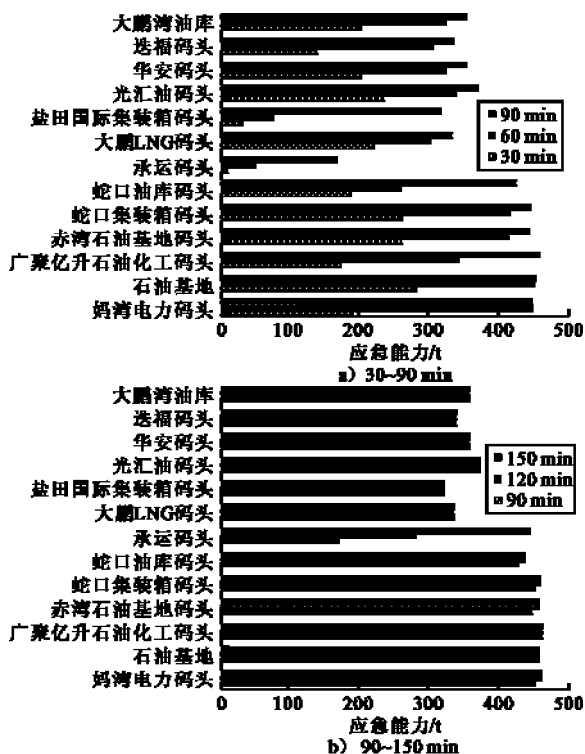


图 4 深圳港区重点码头 30~150 min 应急能力

### 2.3 应急物资可达能力评估及可视化结果

对于研究水域内任意位置的海上应急物资可达能力进行计算及可视化. 依据对于海上溢油围控能力的计算方法,对于深圳港水域任意位置,在 30,60,90 min 内的可获取的溢油围控应急资源

的溢油围控能力的评估计算及可视化结果见图 5.

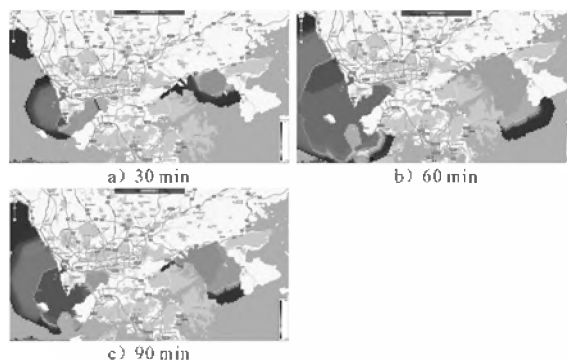


图 5 海上溢油围控物资 30~90 min 可达能力可视化

当任意水域发生溢油事故后,溢油应急响应指挥及协调人员充分掌握该水域可获取的各类应急物资的数量,对于应急预案的制定和应急响应行动的开展起着至关重要的作用.

图 5 中由深到浅色温变化代表的是溢油围控设备可达能力从高至低的变化. 纵向的比较三幅热度图,可以看出随着容许可达时间范围增大,溢油应急物资的可达海域范围明显增加,而且海域内任意位置的溢油应急围控物资可达能力明显增加. 横向比较可视化图中所包含的信息,可看出深圳港区的西部水域的溢油应急围控物资可达能力明显大于东部水域,这是由于西部水域可获取的溢油围控物资数量要明显大于东部水域. 从以上可视化图中得出的结论与深圳港的实际情况相符合,因此,海上溢油应急响应云平台能够很好的实现对于区域应急物资可达能力评估可视化研究.

## 3 结束语

建立了对于研究水域范围内任意位置的海上溢油应急物资可达能力评估计算模型,以及各码头可获取溢油应急物资能力评估模型,设计了能力评估模型计算结果的可视化分析步骤及方法. 为溢油应急决策的制定和溢油应急物资的配置及管理提供了更为科学、直观的参考依据.

以深圳港作为研究区域,进行了溢油应急可达能力评估和可视化应用示例,示例结果与深圳港的实际情况相符合,

### 参考文献

[1] 李陈峰,任慧龙,周学谦,等.“桑吉”号油轮沉没原因推测与分析[J]. 哈尔滨工程大学学报,2018,39(7): 1123-1131.

- [2] WILSON J, OYOLA-YEMAIEL A. The evolution of emergency management and the advancement towards a profession in the United States and Florida [J]. *Safety Science*, 2001, 39(1): 117-131.
- [3] DRABEK T E. Emergency management and homeland security curricula: contexts, cultures, and constraints [J]. *Journal of Emergency Management*, 2007, 5(5): 33-41.
- [4] SAHIN B, SENOL Y E. A novel process model for marine accident analysis by using generic fuzzy-AHP algorithm [J]. *The Journal of Navigation*, 2015, 68(1): 162-183.
- [5] 马茂冬, 韩尧, 张倩. 基于模糊层次分析法的应急能力评估方法探讨 [J]. *中国安全生产科学技术*, 2009, 5(2): 98-102.
- [6] 张江华, 郑小平, 彭建文. 基于模糊层次分析法的应急能力指标权重确定 [J]. *安全与环境工程*, 2007(3): 80-82.
- [7] JU Y, WANG A, LIU X. Evaluating emergency response capacity by fuzzy AHP and 2-tuple fuzzy linguistic approach [J]. *Expert Systems with Applications*, 2012, 39(8): 6972-6981.
- [8] 田依林, 杨青. 突发事件应急能力评价指标体系建模研究 [J]. *应用基础与工程科学学报*, 2008(2): 200-208.
- [9] 潘红磊, 王祖纲. 国外海上溢油应急反应与治理技术分析 [J]. *中国安全生产科学技术*, 2010(S1): 65-67.
- [10] WANG X, SUGUMARAN V, ZHANG H, et al. A capability assessment model for emergency management organizations [J]. *Information Systems Frontiers*, 2018, 20(4): 653-667.
- [11] 王海燕, 郑鑫, 陈焕婉. 近岸水域船舶溢油应急保障能力评估 [J]. *安全与环境学报*, 2017, 17(3): 840-844.
- [12] 熊善高. 海域船舶溢油风险评估及应急管理体系的研究 [D]. 天津: 南开大学, 2014.

## Research on Reachable Capability of Marine Oil Spill Emergency Supplies

PENG Xin<sup>1)</sup> WEN Yuanqiao<sup>2,3,4)</sup> XIAO Changshi<sup>1)</sup> HUANG Liang<sup>2,3,4)</sup>

ZHOU Chunhui<sup>1)</sup> ZHANG Fan<sup>1)</sup> YUAN Haiwen<sup>1)</sup> ZHANG Yimeng<sup>1)</sup>

(School of Navigation, Wuhan University of Technology, Wuhan 43006, China)<sup>1)</sup>

(Intelligent Transport Systems Center, Wuhan University of Technology, Wuhan 43006, China)<sup>2)</sup>

(National Engineering Research Center for Water Transport Safety, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China)<sup>3)</sup>

(Hubei Key Laboratory of Inland Shipping Technology, Wuhan 430063, China)<sup>4)</sup>

**Abstract:** In order to reduce the impact of marine oil spill accidents on navigation safety and the environment in offshore waters and improve the offshore oil spill emergency response capability of maritime departments, this paper proposed an offshore oil spill emergency response evaluation and visualization model. Based on the establishment of a multi-dimensional evaluation index system for the emergency response capability of marine oil spill emergency materials, and combined with the analysis of the optimal allocation path of emergency materials, a calculation and visualization model was established to study the reachable capability of emergency materials at any position within the sea area and the emergency response capability of emergency materials that can be obtained by docks (emergency equipment warehouse). Shenzhen waters were taken as research waters for experimental verification. The results show that the evaluation results of the model proposed in this paper are consistent with the actual situation and can provide visual demonstration of the emergency response capability of marine oil spill emergency materials.

**Key words:** oil spill emergency response; emergency supplies; emergency capability; assessment; visualization