

基于模糊综合评判的海洋溢油污染评估模型研究

张倩¹, 柳林^{1,2}, 潘宝玉³, 董水峰¹, 董景利³, 范存国³

(1. 山东科技大学 测绘科学与工程学院, 山东 青岛 266590; 2. 海岛(礁)测绘技术国家测绘地理信息局重点实验室, 山东 青岛 266590; 3. 山东省地质测绘院, 山东 济南 250002)

摘要: 在分析总结相关研究成果的基础上, 利用模糊综合评估方法, 对溢油污染程度相关影响因素进行深入分析研究, 对溢油污染程度评估指标体系进行改进和完善, 提出溢油量和离岸距离两个影响因子新的隶属度函数, 构建新的海域敏感区隶属度子集表并计算各指标的权重。最后, 应用此模型对2002年渤海绥中36-1油田中心平台溢油事故进行评估, 结果显示污染程度评估等级有明显提高, 期为海洋溢油污染评估提供科学依据, 并通过提高污染评估等级引起人们对海洋环境的重视。

关键词: 溢油污染; 等级评估; 隶属度函数; 模糊综合评估

中图分类号: X55 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2016)05-0097-06

doi: 10.11759/hyxx20150517001

溢油事故一旦发生, 海洋生态必然会受到严重危害, 造成自然经济和社会经济双重损失。2011年和2012两年间, 我国沿海以及内陆水域共发生船舶溢油污染事故55起, 溢油总量约194.5 t^[1]。目前, 我国是世界上最大石油进口国, 进口石油主要通过油轮运输。海洋溢油事件频繁发生, 已得到国家相关部门的高度重视, 国内外学者对溢油污染评估也做出了大量深入的研究, 如Zhou^[2]基于人工神经网络模型对溢油事故损害进行评估; 杨建强^[3]构建了适用于渤海海域的溢油生态损害快速预评估模式, 并应用于“塔斯曼海”号油轮溢油事故进行验证, 显示结果较为符合实际情况; 刘洁^[4]初次建立了基于海上石油平台的溢油污染程度评估指标体系。本文则通过对影响溢油污染程度的相关因素进行综合全面的分析, 构建更加完善的海洋溢油污染评估指标体系, 并提出新的影响因子隶属度函数, 为海洋溢油污染等级评估提供支持。

1 污染评估指标体系的建立

1.1 污染程度相关因素分析

1.1.1 溢油量因素

在海洋溢油事故中, 溢油量直接关系到污染程度的等级。通常情况下, 溢油量增大, 溢油事故的污染等级就会升高, 危害程度也就越大。确定溢油量的大小是进行溢油损失评估的首要任务。

1.1.2 油品特性因素

具有不同性质的油污对海域资源造成的损害也存在较大差异, 这就涉及油品特性。溢油对海洋环境及海洋生物的毒害程度取决于油污中有毒成分的含量。石油含有上百种化合物, 烷烃、环烷烃、芳香烃含量占50%以上, 不同的烃类其毒性不同。一般来说, 油污的密度越大, 油品的持久性就越强, 从而石油留存的时间就越长, 对海洋生态环境造成的损害越大。黏度是反映石油流体的内摩擦力(或流动能力)的一个参数, 是决定油污在水中运动行为的重要因素之一。高黏度的石油不易扩散也不利于清除, 还可能对海洋生物造成更大的危害。石油的易燃性是油品重要的安全指标, 通常用闪点值来衡量, 闪点越

收稿日期: 2015-05-17; 修回日期: 2015-09-29

基金项目: 山东省自然科学基金(ZR2012FM015); 山东省“泰山学者”建设工程专项经费; 青岛经济技术开发区重点科技计划项目(2013-1-27); 海岛(礁)测绘技术国家测绘地理信息局重点实验室资助项目(2013B08); 卫星测绘技术与应用国家测绘地理信息局重点实验室经费资助项目(KLAMTA-201407)

[Foundation: Supported by Shandong Provincial Natural Science Foundation, No.ZR2012FM015; Supported by Special Project Fund of TaiShan Scholars of Shandong Province; Supported by the Key Science and Technology Project of Qingdao Economic and Technological Development Zone, No.2013-1-27; Supported by the Key Laboratory of Surveying and Mapping Technology on Island and Reed, State Bureau of Surveying, Mapping and Geoinformation, No.2013B08; Funded by Key Laboratory of Satellite Mapping Technology and Application, National Administration of Surveying, Mapping and Geoinformation, No. KLAMTA-201407]

作者简介: 张倩(1992-), 女, 山东临朐人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为地理信息系统, 电话: 18765929573, E-mail: 279604315@qq.com

低, 易燃性越强而危险性就会越大, 这种特性给油污处理工作带来潜在的危险。

1.1.3 溢油位置因素

从海洋生态角度考虑, 参考杨建强^[5]对海洋生态敏感区域的划分, 基于功能区将海区分为海洋生态环境敏感区、亚敏感区、非敏感区, 溢油位置离敏感区越近, 造成的损害会越大。而且人类活动和生物分布大都集中在近海岸区域, 因此离岸距离是影响溢油污染程度的一个重要因素。另外, 油污接触不同类型的岸线, 清除的难易程度和经波浪冲刷后残留情况不同, 由此对岸线进行分类, 不同类型的岸线对溢油污染程度等级有一定的影响。

1.1.4 气象环境因素

风一般会与波浪、海流共同作用于油污, 风在很大程度上影响油污的漂移、扩散行为, 进而增大污染面积, 而且在风速较大的情况下, 很难对油污进行回收; 在有雾的天气, 能见度过低则不利于实施溢油应急计划。

1.1.5 水文环境因素

溢油发生后, 油污会经历复杂的物理、化学以及生物过程, 包括蒸发、漂移、扩散、乳化和沉降等。油污在海面上蒸发会受表层水温影响, 温度越高, 蒸发就会越快, 对海洋产生的危害相对会减少。波浪, 一方面, 海面波浪作用于油膜, 油膜破裂产生的油滴会与水混合, 因此波浪直接控制油污的入水率; 另一方面, 油污的漂移运动主要受海面紊流的作用。波浪大小常用波高来表示, 波高越大说明波浪对海水面扰动越剧烈, 就会导致更多的油污进入海水。油污受到表层海流的推动作用会发生漂移, 表层流速越大, 油污的漂移和扩散现象就越明显。表层流向决定油污漂移的方向, 若油污朝敏感资源区漂移, 则造成的损失就会更大。

1.1.6 应急系统

溢油应急系统在一定程度上控制油污的运动行为, 降低污染程度, 相关部门应制定海上溢油应急计划并进行备案。该海域是否属于海域敏感区, 是否可使用分散剂或消油剂以及使用量的限制, 这些信息可以为溢油应急计划的实施提供支持。建立海区通讯和远程通讯保障系统, 以保证各单位之间联络畅通, 确保海上溢油事故的报警讯息以及溢油应急的各类信息数据能够及时、准确、可靠地传输, 为防污、清污工作提供便利^[6]。

1.2 污染评估指标体系的建立

海洋溢油污染随时间和环境动态变化, 溢油对海洋生态环境及生物的伤害程度受到多种因素的影

响。通过综合分析海洋溢油污染程度相关影响因素, 总结主要影响因素, 构建评估指标体系。溢油污染评估指标体系如表 1 所示。

表 1 溢油污染评估指标体系
Tab. 1 Oil-spill pollution assessment index system

一级指标	一级指标权重	二级指标	二级指标权重
溢油量	0.343	溢油量	1
油品特性	0.107	毒性	0.363
		持久性	0.303
		黏性	0.122
		易燃性	0.212
溢油位置	0.105	岸线类型	0.2
		离岸距离	0.4
		海域敏感区	0.4
气象环境	0.172	能见度	0.833
		风速	0.167
水文环境	0.152	波高	0.319
		表层水温	0.226
		表层流向	0.129
		表层流速	0.326
应急系统	0.121	清污设备	0.226
		应急计划	0.326
		人员素质	0.319
		通讯设备	0.129

2 影响因子隶属度确定

本文通过画出隶属度函数曲线图来确定溢油量、离岸距离两个影响因子的隶属度, 构造隶属度函数; 其他影响因子隶属度的确定则通过构造隶属度子集表。将溢油污染程度划分为 5 个等级, 构建评语集 $V = \{V_1 \text{ 极轻污染}, V_2 \text{ 轻度污染}, V_3 \text{ 中度污染}, V_4 \text{ 重度污染}, V_5 \text{ 严重污染}\}$ 。本文将列出溢油量和离岸距离的隶属度函数, 以及海域敏感区和溢油清污设备的隶属度子集表。

2.1 溢油量隶属度函数构建

在突发性海洋油污事故处理方面, 英国具有较完善的油污处理及防治体系^[7]。在其应急体制中, 溢油量作为溢油事故污染等级划分最主要的参考指标, 并将溢油对环境可能造成的影响划分为 6 个等级, 每个等级对应于不同的响应措施^[8], 具体划分如表 2 所示。

本研究参考英国对于溢油事故评估 5 个分界点的划分, 采用三角形和梯形相结合绘制隶属度曲线的方法提出一种新的溢油量隶属度函数曲线, 如图 1 所示。与我国现有的水上交通事故定级方法相比, 该方法能够从一定程度上提高溢油污染的评估等级,

并且避免主观判断, 提高评估的科学性和准确性。

表 2 英国溢油事故等级划分标准

Tab. 2 Oil-spill accident grading standards of England

分级	溢油量	影响程度	相应措施
1	0~45 L	极小的	可不要求处理
2	45~450 L	小的	可能要喷洒溢油分散剂, 特别是在封闭水域内
3	450 L~1 t	中等的	可能要采取处理措施, 取决于面积的大小
4	1~50 t	大的	要求处理, 可能要出动若干艘船艇
5	50~250 t	严重的	要求全面出动船艇和清污设备
6	>250 t	重大的	可能要求地区或国家参与消污

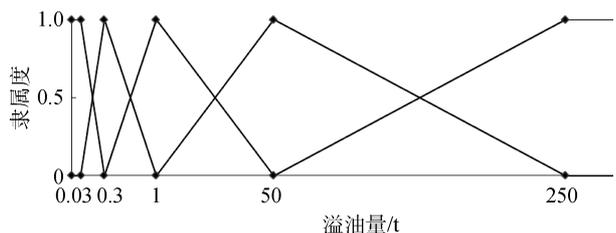


图 1 溢油量隶属度函数曲线

Fig. 1 Membership functions curve of oil spill inventory

由曲线图得到溢油量 t 对于极轻污染的隶属度函数为:

$$U_{1(t)} = \begin{cases} 1 & , t \leq 0.03 \\ 1 - \frac{t-0.03}{0.27} & , 0.03 < t \leq 0.3 \\ 0 & , 0.3 < t \end{cases}$$

t 对于轻度污染的隶属度函数为:

$$U_{2(t)} = \begin{cases} 0 & , t \leq 0.03 \\ \frac{t-0.03}{0.27} & , 0.03 < t \leq 0.3 \\ 1 - \frac{t-0.3}{0.7} & , 0.3 < t \leq 1 \\ 0 & , 1 < t \end{cases}$$

t 对于中度污染的隶属度函数为:

$$U_{3(t)} = \begin{cases} 0 & , t \leq 0.3 \\ \frac{t-0.3}{0.7} & , 0.3 < t \leq 1 \\ 1 - \frac{t-1}{49} & , 1 < t \leq 50 \\ 0 & , 50 < t \end{cases}$$

t 对于重度污染的隶属度函数为:

$$U_{4(t)} = \begin{cases} 0 & , t \leq 1 \\ \frac{t-1}{49} & , 1 < t \leq 50 \\ 1 + \frac{50-t}{200} & , 50 < t \leq 250 \\ 0 & , 250 < t \end{cases}$$

t 对于严重污染的隶属度函数为:

$$U_{5(t)} = \begin{cases} 0 & , t \leq 50 \\ \frac{t-50}{200} & , 50 < t \leq 250 \\ 1 & , 250 < t \end{cases}$$

2.2 离岸距离隶属度函数构建

一般情况下, 溢油位置离海岸越近, 造成的损害就会越大, 污染等级也越高。本文参考李伟^[9]、刘洁^[10]等学者对离岸距离这一影响因素的研究, 确定 5 个分界点值, 并首次提出离岸距离隶属度函数曲线, 如图 2 所示, 更加准确地体现出离岸距离与其隶属度之间的关系。

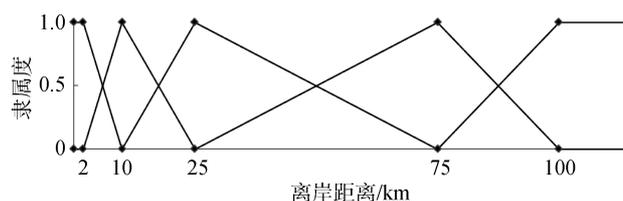


图 2 离岸距离隶属度函数曲线

Fig. 2 Membership functions curve of offshore distance

离岸距离 d 对于极轻污染的隶属度函数为:

$$U_{1(d)} = \begin{cases} 0 & , d \leq 75 \\ \frac{d-75}{25} & , 75 < d \leq 100 \\ 1 & , 100 < d \end{cases}$$

d 对于轻度污染的隶属度函数为:

$$U_{2(d)} = \begin{cases} 0 & , d \leq 25 \\ \frac{d-25}{49} & , 25 < d \leq 75 \\ 1 + \frac{75-d}{25} & , 75 < d \leq 100 \\ 0 & , 100 < d \end{cases}$$

d 对于中度污染的隶属度函数为:

$$U_{3(d)} = \begin{cases} 0 & , d \leq 10 \\ \frac{d-10}{15} & , 10 < d \leq 25 \\ 1 + \frac{25-d}{50} & , 25 < d \leq 75 \\ 0 & , 75 < d \end{cases}$$

d 对于重度污染的隶属度函数为:

$$U_{4(d)} = \begin{cases} 0 & , d \leq 2 \\ \frac{d-2}{8} & , 2 < d \leq 10 \\ 1 + \frac{10-d}{25} & , 10 < d \leq 25 \\ 0 & , 25 < d \end{cases}$$

d 对于严重污染的隶属度函数为:

$$U_{5(d)} = \begin{cases} 1 & , d \leq 2 \\ 1 + \frac{2-d}{8} & , 2 < d \leq 10 \\ 0 & , 10 < d \end{cases}$$

2.3 海域敏感区隶属度确定

参考翁跃宗^[11]确定隶属度模糊子集表的相关研究,采用专家打分的评价方法,客观地综合多数专家经验与主观判断并参考历史数据,对难以进行定量分析的影响因素做出合理估算,来确定本文涉及的隶属度子集表。

不同类型的海域受到溢油污染的影响程度是有差异的。本研究对海域敏感区进行认真分析,从保护生态环境的角度出发,将海域敏感区分为4类,第一类包括典型海洋生态、海洋自然保护区;第二类包括渔业用水区;第三类包括旅游区、工业用水区、工程用海区;第四类包括港口区及其他海区。构造海域敏感区隶属度子集表,如表3所示,可以得到不同海区对于不同污染等级的隶属度。

表3 海域敏感区隶属度子集表

海域敏感区	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5
典型海洋生态、海洋自然保护区	0	0	0	0.2	0.8
渔业用水区	0	0	0.2	0.6	0.2
旅游区、工业用水区、工程用海区	0	0.2	0.6	0.2	0
港口区及其他海区	0.8	0.2	0	0	0

2.4 溢油清污设备隶属度确定

常见的海洋溢油处理技术有物理方法、化学方法和生物方法,溢油应急中经常用到的清污设备包括围油栏、溢油回收船和吸油材料等。种类齐全的溢油清理设备以及数量充足的化学制剂,能够快速有效的清理和回收泄漏的油污,控制或减少油污的损失^[12]。溢油清污设备在一定程度上影响了溢油污染的程度,因此建立其隶属度子集表如表4所示。

表4 清污设备隶属度子集表

清污设备	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5
设备非常齐全	0.8	0.2	0	0	0
设备较齐全	0.2	0.6	0.2	0	0
设备不全	0	0.2	0.6	0.2	0
设备严重缺乏	0	0	0	0.2	0.8

3 基于权重的模糊综合评估

3.1 评估指标权重确定

权重确定是模糊综合评估中一个重要环节,权重分配表示评估指标相对重要性大小。能否恰当地确定指标权重,直接影响到综合评估结果的准确性。研究中常用的模糊子集权重确定方法包括:层次分析法(AHP)、德尔斐(Delphi)法、专家调查法等。在本研究中,溢油污染原始数据定量程度不高,相关影响因素多为定性因素,而且建立的溢油污染评估指标体系是多层次的指标体系,因此,在确定各模糊子集指标的权重时,采用定性和定量相结合的层次分析法,基本步骤如下:(1)通过两两指标相互比较,建立判断矩阵。判断矩阵是进行各要素优先级权重计算的重要依据,是使用层次分析法时重要的基本信息。(2)计算权重和最大特征根。(3)一致性检验。由于客观世界具有复杂性,人们认识问题的方法具有多样性,对各指标之间进行两两对比后,可能会产生不一致的结论。这需要计算一致性指标和检验系数,防止出现有矛盾的结论。

在此仅列出应急系统中4个子指标的权重计算,如表5所示。

表5 应急系统子指标权重

	溢油清理设备	通讯设备	人员素质	应急计划	W_6
溢油清理设备	1	2	1	1/2	0.226
通讯设备	1/2	1	1/2	1/2	0.129
人员素质	1	2	1	2	0.319
应急计划	2	2	1/2	1	0.326

注: W_6 代表应急系统4个子指标的权重, $\lambda_{\max}=4.221$, 一致性检验 $CR=0.082 < 0.1$, 符合要求。

3.2 模糊综合评估

在模糊综合评估中, $B=A \circ R$, 其中 A 代表权重; R 代表隶属度; “ \circ ”代表模糊矩阵合成算子, 其主要分类有: 有界和取小算子、取大取小算子、取大取小乘积

算子、有界和乘积算子等。为确保利用各评估指标的全部信息，体现出各个指标在评估中的协同作用，能够更准确地表明评估对象的综合情况，在本研究中，使用有界和乘积算子 (\bullet, \oplus) 。

3.2.1 一级评估

海洋溢油事故一旦发生，采集溢油量、离岸距离、表层流速、表层水温等数据，从基础资料数据库中获得海域类型、油污的主要成分、油污闪点、应急计划等信息。利用二级指标的权重和对应的一级指标隶属度矩阵，得到一级模糊综合评估结果为：

$$R = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \\ B_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 \\ W_2 \circ R_2 \\ W_3 \circ R_3 \\ W_4 \circ R_4 \\ W_5 \circ R_5 \\ W_6 \circ R_6 \end{bmatrix}$$

3.2.2 二级评估

二级模糊综合评估结果为： $B=A \circ R$ ，式中 A 为评估指标体系中一级指标的权重， R 为一级模糊综合评估结果。二级综合评估结果，就是溢油污染程度的总体评估结果。根据模糊综合评估经常使用的最大隶属度原则，基于对溢油污染五类等级的划分，判断溢油污染所属等级。

3.2.3 实例分析

利用刘洁^[10]实例二中原始数据，使用本研究提出的溢油评估模型，对2002年渤海绥中36-1油田中心平台溢油事故进行评估。

3.2.3.1 一级评估

$$\begin{aligned} B_1 &= R_1 = (0 \ 0 \ 0.967 \ 0.033 \ 0) \\ B_2 &= W_2 \circ R_2 = (0.363 \ 0.303 \ 0.122 \ 0.212) \circ \\ &\begin{bmatrix} 0.8 & 0.2 & 0 & 0 & 0 \\ 0.8 & 0.2 & 0 & 0 & 0 \\ 0.8 & 0.2 & 0 & 0 & 0 \\ 0.2 & 0.6 & 0.2 & 0 & 0 \end{bmatrix} = (0.673 \ 0.285 \ 0.042 \ 0 \ 0) \end{aligned}$$

同理，得到 B_3, B_4, B_5, B_6 。

3.2.3.2 二级评估

$$B = A \circ R = (0.343 \ 0.107 \ 0.105 \ 0.172 \ 0.152 \ 0.121) \circ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.967 & 0.033 & 0 \\ 0.673 & 0.285 & 0.042 & 0 & 0 \\ 0.37 & 0.23 & 0.304 & 0.096 & 0 \\ 0.2 & 0.6 & 0.2 & 0 & 0 \\ 0.31 & 0.432 & 0.155 & 0.077 & 0.026 \\ 0 & 0.2 & 0.6 & 0.2 & 0 \end{bmatrix} = (0.192 \ 0.248 \ 0.499 \ 0.057 \ 0.004)$$

可见对于中度污染的隶属度为 0.499，由最大隶属度原则可以判断，渤海绥中 36-1 溢油事故污染等级为中度污染。而之前学者得到的二级评估 $B=(0.185 \ 0.704 \ 0.096 \ 0.011 \ 0)$ ，评估结果为轻度污染。

4 结语

海洋溢油事故频繁发生，给海洋生态环境和人类活动带来了巨大的威胁，对溢油污染等级进行科学的判断可以在一定程度上降低事故带来的损害。

1) 本研究利用模糊综合评估的方法，对影响溢油污染程度的因素进行认真分析，在以往研究的基础上，增加了溢油应急系统这一因素，完善了溢油污染评估指标体系。

2) 提出新的影响因子隶属度函数和子集表，应用此模型进行实例分析，与之前研究进行对比，提高了溢油污染评估等级。

3) 利用模糊综合评估模型对溢油污染程度进行综合评判，将相关影响因素系统化、具体化，能够增加评估的可信度，提高评估的效率。利用基础数据库和在线监测系统，可快速获取海洋溢油各类相关参数，及时对污染等级进行评估，为溢油应急计划提供科学依据，减少溢油造成的污染和损失。

参考文献：

- [1] 新华网海南频道. 全国两年发生船舶污染事故 55 起溢油 194.5 吨[EB/OL]. [2015-05-10]. http://www.hq.xinhuanet.com/news/2012-12/08/c_113953577.htm. Xinhua Hainan channel. Ship pollution accidents occurred in the country for two years 55 194.5 tons of oil spill[EB/OL]. [2015-05-10]. http://www.hq.xinhuanet.com/news/2012-12/08/c_113953577.htm.
- [2] Zhou Junfeng, Xu Leping. The damage assessment of marine oil spill pollution using Back-Propagation neural network[J]. Energy Procedia, 2011, 11: 3116-3121.
- [3] 杨建强, 张秋艳, 罗先香. 海洋溢油生态损害快速预评估模式研究[J]. 海洋通报, 2011, 06: 702-706, 712. Yang Jianqiang, Zhang Qiuyan, Luo Xianxiang. Study on the ecological damage rapid assessment model of the marine oil spill[J]. Marine Science Bulletin, 2011, 6: 702-706, 712.
- [4] 刘洁, 郎印海, 贾永刚, 等. 海上石油平台溢油污染等级评估研究[J]. 环境科学与技术, 2010, 11: 197-200. Liu Jie, Lang Yinhai, Jia Yonggang, et al. Pollution level assessment of oil spill on offshore platform[J]. Environmental Science & Technology, 2010, 11: 197-200.
- [5] 杨建强. 海洋溢油生态损害快速预评估技术研究[M]. 北京: 海洋出版社, 2011: 80-85.

- Yang Jianqiang. Study on rapid pre assessment of marine oil spill ecological damage[M]. Beijing: China Ocean Press, 2011: 80-85.
- [6] 国家海洋局. 海洋石油勘探开发溢油事故应急预案[EB/OL]. [2015-05-10].<http://wenku.baidu.com/link?url=CfNJ9V2d8zaJLMNZ32YjUmItYIsD0XCcuZMq9hTd1L7PLf9xFHimjIt2pja70sZe2ITCjUiteTbruiXI4lpa8NSYyF1jdaJKtYnnXwTwTy>.
- State Oceanic Administration People's Republic of China. Oil spill accident emergency plan for offshore oil exploration and development[EB/OL].[2015-05-10].<http://wenku.baidu.com/link?url=CfNJ9V2d8zaJLMNZ32YjUmItYIsD0XCcuZMq9hTd1L7PLf9xFHimjIt2pja70Sz e2ITCjUiteTbruiXI4lpa8NSYyF1jdaJKtYnnXwTwTy>.
- [7] 白佳玉. 浅谈英国海上溢油事故应急处理机制[J]. 海洋开发与管理, 2010, 10: 62-65.
- Bai Jiayu. A brief discussion on the emergency treatment mechanism of oil spill in Britain[J]. Ocean Development and Management, 2010, 10: 62-65.
- [8] 高丹, 寿建敏. 船舶溢油事故等级的模糊综合评价[J]. 珠江水运, 2007, 2: 25-28.
- Gao Dan, Shou Jianmin. Fuzzy comprehensive evaluation of ship oil spill accidents[J]. Pearl River Water Transport, 2007, 2: 25-28.
- [9] 李伟. 海上船舶溢油后危害程度评价研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2008.
- Li Wei. The study on harm grade evaluation of oil spill from ships at sea[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2008.
- [10] 刘洁. 渤海海域海上石油平台溢油污染等级评估方法研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010.
- Liu Jie. Research on the method of the level assessment of oil spill pollution on Bohai offshore platform[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2010.
- [11] 翁跃宗. 厦门港及附近水域船舶交通安全评价[D]. 大连: 大连海事大学, 2000.
- Weng Yuezhong. Assessment of marine traffic safety of Xiamen Port and its adjoining waters[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2000.
- [12] 张吉廷. 海上溢油事故危害评估及其防范措施探讨[D]. 大连: 大连海事大学, 2012.
- Zhang Jiting. Marine oil spill hazard risk assessment and its preventive measures[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2012.

Marine oil-spill pollution assessment model based on fuzzy comprehensive evaluation

ZHANG Qian¹, LIU Lin^{1, 2}, PAN Bao-yu³, DONG Shui-feng¹, DONG Jing-li³, FAN Cun-guo³

(1. Geomatics College, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 2. Key Laboratory of Surveying and Mapping Technology on Island and Reef, National Administration of Surveying, Mapping and Geoinformation, Qingdao 266590, China; 3. Geological Surveying and Mapping Institute of Shandong Province, Jinan 250002, China)

Received: May 17, 2015

Key words: oil-spill pollution; grade evaluation; membership function; fuzzy synthetic evaluation

Abstract: Based on previously published research from studies using the fuzzy comprehensive evaluation method, we make an in-depth analysis of the impact factors related to oil spills, improve the oil-spill pollution degree evaluation index system, propose new membership functions for the oil spill inventory and offshore distance, construct a new subset table of the ocean-sensitive area degree of membership, and calculate the weight of each index. Lastly, to validate the scientific bases of our oil-spill pollution evaluation, we validate the proposed model using a case-study instance; the results show that the pollution grade is higher than in previous measurements.

(本文编辑: 刘珊珊)