

中文引用格式:陈伟炯,苏子薇,秦庭荣,等. 采用云重心评判法的港口船舶溢油综合应急能力评价[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(4): 183-190.

英文引用格式:CHEN Weijiong, SU Ziwei, QIN Tingrong, et al. Evaluation of comprehensive emergency response capability for port ship oil spill with cloud gravity center evaluation method[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(4): 183-190.

采用云重心评判法的港口船舶溢油综合 应急能力评价*

陈伟炯^{1,2}教授, 苏子薇^{2,3}, 秦庭荣^{1,2}, 韩伟佳¹, 汪侃^{2,4}副教授, 康与涛^{2,4}

(1 上海海事大学 商船学院, 上海 201306; 2 上海海事大学 海洋公共安全研究中心, 上海 201306;

3 上海海事大学 物流科学与工程研究院, 上海 201306; 4 上海海事大学

海洋科学与工程学院, 上海 201306)

中图分类号: X913; U698.7

文献标志码: A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2024.04.1765

基金项目: 国家自然科学基金资助(52001196)。

【摘要】 为突破单环节评价港口船舶溢油应急能力的局限性, 合理配置资源, 采用云重心评判法全环节评估港口船舶溢油综合应急能力, 面向应急准备、预警、行动、恢复全环节, 参照人-机-环境-管理系统理论和国际国内规定, 建立综合应急能力评价指标体系; 针对传统评价指标因素未涉及模糊性和随机性的问题, 用加权偏离度确定定性指标与定量数值间的转化关系; 利用层次分析法(AHP)优化评价意见, 弥补评价样本欠充分带来的精度缺陷; 最后, 以上海港为例, 对船舶溢油综合应急能力评价作实证研究。结果表明: 云重心评判法能合理评价港口船舶溢油综合应急能力, 为健全和完备应急能力提供理论依据, 为港口船舶溢油综合应急能力评价提供了一种新思路。

【关键词】 云重心评判法; 港口船舶溢油; 综合应急能力; 指标体系; 加权偏离度; 层次分析法(AHP)

Evaluation of comprehensive emergency response capability for port ship oil spill with cloud gravity center evaluation method

CHEN Weijiong^{1,2}, SU Ziwei^{2,3}, QIN Tingrong^{1,2}, HAN Weijia¹,

WANG Kan^{2,4}, KANG Yutao^{2,4}

(1 Merchant Marine College, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China;

2 Oceanographic Public Safety Research Center, Shanghai Maritime University,

Shanghai 201306, China; 3 Institute of Logistics Science and Engineering, Shanghai

Maritime University, Shanghai 201306, China; 4 College of Ocean Science and

Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract: To address the limitations of evaluating the emergency response capability of port ships for oil spills in a single stage and reasonably allocate resources, the cloud gravity center evaluation method was adopted to evaluate the comprehensive emergency response capability of port ships for oil spill. Facing the entire process of emergency preparedness, early warning, response and recovery, and referring to the

theory of "man-machine-environment-management" system and international and domestic regulations, a comprehensive emergency response capability evaluation index system was established. To address the issue that the traditional evaluation indicators were not fuzzy and random, a weighted deviation degree was used to determine the transformation relationship between qualitative indicators and quantitative values. AHP was used to optimize evaluation opinions and compensate for accuracy deficiencies caused by insufficient evaluation samples. Finally, taking Shanghai Port as an example, an empirical study was conducted on the comprehensive emergency response capability evaluation of ship oil spills. The results show that the cloud gravity center evaluation method can reasonably evaluate the comprehensive emergency response capability of port ships for oil spills. This method provides a theoretical basis for improving and perfecting emergency response capability, and provides a new approach for the comprehensive emergency response capability evaluation of port ships for oil spills.

Keywords: cloud gravity center evaluation method; ship oil-spill in ports; comprehensive emergency response capability; index system; weighted deviation; analytic hierarchy process (AHP)

0 引言

随着社会经济的高速发展,我国海运进口石油需求量与日俱增,油轮数量和运输规模不断增长,使得港口溢油事故时有发生,导致严重的海洋生态污染损害以及渔业资源破坏^[1]。故亟需研究全环节的港口船舶溢油综合应急能力评价方法。

近年来,国内外学者对港口船舶溢油事故应急能力的研究主要集中在:①应急准备能力。包括应急预案体系的可行性评估^[2-3]、规章制度的建立^[4]以及物资人员储备点选址^[5]等。②应急预警能力。包括应急救援队伍演练和预警信息采集^[6]等。③应急行动能力。包括应急控制决策^[7]、资源优化配置以及应急资源调度^[8]等。④应急恢复能力。包括溢油回收利用、事故危害等级评价^[9]、后期防范对策研究^[10]等。上述研究均未涉及评价指标因素的模糊性和随机性问题,且都侧重于港口船舶溢油事故中某个环节的应急能力研究,未及全面考量和系统评价,难以准确评价港口船舶溢油的综合应急能力。

港口船舶溢油综合应急能力评价,因评价指标的模糊性和随机性、决策者主观性太强等因素而呈复杂性。目前常用的模糊熵权评价法^[11]、模糊灰色评价法^[12]均通过函数矩阵法将不确定权重转化为确定权重分析,而云模型^[13-15]结合概率论和模糊理论的概念,在定性、定量的转换过程中能充分考虑到结果的不确定性和模糊性。在港口船舶溢油综合应急能力评价中,运用隶属于云模型的云重心评判法建立评价指标的权重云模型,可弥补传统评价方法

未考虑指标因素模糊性和随机性的不足。

人-机-环境-管理系统(Man-Machine-Environment-Management System, MMEMS)理论源于钱学森指导建立的一门综合性科学技术——人-机-环境系统工程^[16],认为管理要素协调人-机-环境系统要素间关系,使之和谐而避免事故,且每一要素都与其他要素相互依赖,相互作用,组成整体系统 MMEMS^[17-18]。MMEMS 理论已被广泛应用于海事安全和其他领域。

鉴于此,笔者拟基于 MMEMS 理论和云重心评判法,解决评估过程中的不确定性,将港口船舶溢油各环节的应急能力评估改进为包含应急准备、应急预警、应急行动、应急恢复全环节的综合性应急能力评价,建立整体应急评价指标体系,并通过实际算例验证所提方法的可行性和有效性,以期科学评价港口船舶溢油的综合应急反应能力,为健全应急能力和补齐短板提供理论依据。

1 综合应急能力评价指标体系构建

在港口船舶溢油事故应急评价过程中,评价指标的选取需具备客观性和层次性。参照 MMEMS 理论、国际海事组织和国内防治船舶溢油污染的相关规定,分析得到具有代表性且能够真实反映船舶溢油应急能力的影响因素,建立采用云重心评判法的港口船舶溢油综合应急能力评价研究框架,如图 1 所示。

结合上海港实际,参照 MMEMS 理论,采用文献筛选法,选取针对上海港船舶溢油综合应急能力影响较大的评价指标,建立初步指标集。经专家问卷

调查进一步筛选出具有科学性、相对独立性和能够真实反映港口船舶溢油综合应急能力的评价指标,最终确定应急准备能力等4个一级指标和17个二

级指标,进而构建港口船舶溢油综合应急能力的评价指标体系,见表1。

表1 港口船舶溢油综合应急能力评价指标体系

Tab.1 Evaluation index system of comprehensive response capability for ship oil-spills in ports

目标层	一级指标	二级指标	具体说明
港口船舶溢油综合应急能力 U	应急准备能力 U_1	应急管理机制 U_{11}	指应急管理部门,指挥和管理应急事务的中枢机构
		应急预案体系 U_{12}	针对溢油事故制定的应急方案
		应急规章制度 U_{13}	针对应急制定的各项管理制度
		应急物资配置 U_{14}	即物资的配置情况,包括物资的数量、种类、布点
		应急人员储备 U_{15}	执行应急指令人员的数量与质量
	应急预警能力 U_2	应急现场监管 U_{21}	对提供预警信息的船舶进行动态监控和溢油监测
		应急值守监管 U_{22}	监管预警组织的值班安排和应急响应效率
		应急应变演练 U_{23}	指应急救援队伍培训的应急事故演练情况
		应急信息化 U_{24}	系统采集发布天气灾害预报、水上水下紧急情况
	应急行动能力 U_3	应急力量响应 U_{31}	到达指定事故水域的速度和时间
		应急联动程序 U_{32}	根据应急事故合理判断救援规模
		溢油应急指挥 U_{33}	指溢油事故预判、应急方案确定、调度救助资源、指挥应急行动等
		应急力量调配 U_{34}	按程度需求合理分配应急力量达到提高救援效率的目的
	应急恢复能力 U_4	海域油污清除 U_{41}	对从港口溢出到海上的油污实施清除作业的过程
		港口油污清除 U_{42}	对港口和码头附近溢油进行清除作业
		溢油事故损失评估 U_{43}	指对溢油事故造成的损失评估
		事故调查与评判 U_{44}	事故等级评价和原因调查

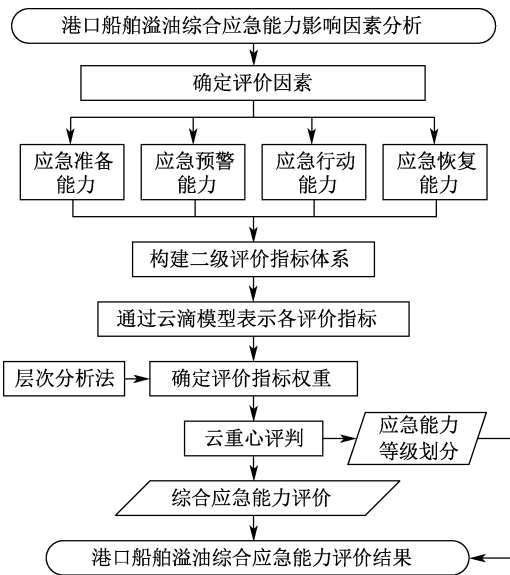


图1 港口船舶溢油综合应急能力评价研究框架

Fig.1 Framework for evaluation of comprehensive emergency response capabilities of ship oil-spill in ports

2 云重心评判法

2.1 云理论

云模型可用于表示定性概念与定量数值间的不同

确定转换关系^[19]。假设有一个可以用精准数值表示的定量论域 Y , W 是 Y 论域上的定性概念,如果存在 $x \in Y$ 且 x 是定性概念 W 上的一次随机实现,称为 x 对 W 的隶属度为 $\varphi(x)$,显然 $\varphi(x) \in [0,1]$ 。对于 $\varphi(x)$ 在定量论域 Y 上的分布则称为云,每一个 $(x, \varphi(x))$ 称为一个云滴,从而得到云模型概念。

云模型由3个数字特征构成,即期望 E_x 、熵 E_n 和超熵 H_e 。其中,期望 E_x 反映云滴 x 在论域空间 Y 内的中心值;熵 E_n 表征云滴的离散程度;超熵 H_e 表征为熵的不确定性度量,是衡量能否形成定性概念的指标。隶属云及其数字特征如图2所示,这些特征反映了定性认识对应的定量程度。

2.2 云重心评判法

云重心评判方法是在云模型基础上建立的,针对具有模糊随机性的评价指标,通过计算得到评价指标及 n 维综合系统的云重心 T 向量,表示为:

$$T = a \times b \tag{1}$$

式中: a 为云模型的期望,即云滴重心所处位置; b 为权重,即云滴重心高度,取值为0.371。

2.3 云重心评判法的具体步骤

云重心评判法将评价体系中的各指标通过云模型来表示,利用云重心的变化反映整个云滴的变化。

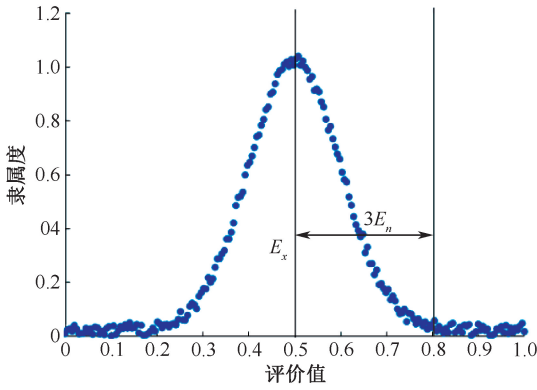


图2 隶属云及其数字特征

Fig.2 Affiliate cloud and its digital characteristics

云重心法的关键在于求解单个云滴当前状态下的云重心与理想状态下的偏离度,通过加权求和获取整体系统的偏离度,然后转换为归属度并输入云发生器,从而激活相应的云对象并获得评语。具体步骤如下:

1) 评价指标计算。在已建立的评价指标体系中,各个指标可能会是确定性的数值,也会是规范的语言值。如果在一个云滴模型中,存在 n 个确定性数值的指标,则对应的期望和熵为:

$$E_x = \frac{E_{x1} + E_{x2} + \dots + E_{xn}}{n} \quad (2)$$

$$E_n = \frac{\max(E_{x1}, E_{x2}, \dots, E_{xn}) - \min(E_{x1}, E_{x2}, \dots, E_{xn})}{6} \quad (3)$$

若在一个云滴模型中体现的 n 个评价指标是语言值型指标,可通过一维综合云表示,对应的期望和熵如下:

$$E_x = \frac{E_{x1}E_{n1} + E_{x2}E_{n2} + \dots + E_{xn}E_{nn}}{E_{n1} + E_{n2} + \dots + E_{nn}} \quad (4)$$

$$E_n = E_{n1} + E_{n2} + \dots + E_{nn} \quad (5)$$

式中: E_x 为期望,即云重心位置; E_n 为熵,即代表云滴的离散程度和可被接受的取值范围; n 为评估指标的个数。

2) 求解综合系统云模型。具有 n 个性能指标的综合系统状态可通过 n 维综合系统云来表示。依据式(1)可知: T 会随着云滴当前状态的改变而发生相应变化,因此,可以通过观察当前状态的云重心获到到系统当前状态情况。因此,如果综合系统云的重心 T 是一个 n 维向量,即 $T = (T_1, T_2, \dots, T_n)$, 则式(1)可变换为 $T_i = a_i \times b_i$ 。其中, $i = 1, 2, \dots, n$ 。

3) 确定指标的权重。在评价过程中,合理分配指标权重能够使得评估结果更加科学。运用层次分

析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP) 计算指标权重过程分为 3 个步骤进行。

①确定评判矩阵。本文采用 9 标度问卷^[3]。专家依据经验对评价指标体系中每个指标进行两两比较,给出相对重要性比值,确定评判矩阵 A 。矩阵中,元素 a_{ij} 为指标 i 与指标 j 之间重要性的比较结果,取值含义见表 2。

表 2 指标间相对重要度定义

Tab.2 Definition of relative importance between indicators

标度值	标度值取值定义
1	表示指标 i 和指标 j 同等重要
3	表示指标 i 和指标 j 稍微重要
5	表示指标 i 和指标 j 明显重要
7	表示指标 i 和指标 j 强烈重要
9	表示指标 i 和指标 j 绝对重要
2,4,6,8	介于 1,3,5,7,9 的区间值
倒数	表示指标 i 和的重要程度不及指标 j 重要,即重要程度相反

②指标权重计算。求解评判矩阵 A 中每行元素的均值 \bar{w}_i 。

$$\bar{w}_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}}, i = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

式中: \bar{w}_i 为矩阵每行全部元素的均值; a_{ij} 为要素 i 与要素 j 之间相对重要性的比较结果。

对 \bar{w}_i 进行归一化处理,并计算一级指标层中每个指标的权重 W_i 。

$$W_i = \frac{\bar{w}_i}{\sum_{i=1}^n \bar{w}_i} \quad (7)$$

式中 W_i 一级指标的权重。

根据等式 $AW_i = \lambda_{\max} W_i$, 得到评判矩阵 A 的最大特征值 λ_{\max} 。

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(AW_i)_i}{W_i} \quad (8)$$

式中 λ_{\max} 为评判矩阵的最大特征值。

③一致性检验。按照式(9)计算一致性指标 (Consistency Index, CI)。

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (9)$$

随机一致性指标 (Random Index, RI) 见表 3。

表 3 随机一致性指标

Tab.3 Stochastic consistency indicator

矩阵阶数 n	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

根据式(10)计算CI和RI的比值,得到一致性比率(Consistency, CR),由此检验评判矩阵的一致性是否符合要求。

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (10)$$

一般而言,当 $CR < 0.1$ 时,评判矩阵一致性符合计算要求,即专家的评判矩阵具有一致性。此时各因素权重即为特征向量 $W_i^* = (W_1, W_2, \dots, W_n)^T$ 。二级指标的求法同上,不再赘述。

4) 加权偏离度求解。港口船舶溢油综合应急能力的理想状态下各指标值是确定的。设定在理想条件下,综合云(n 维系统)的重心位置向量是 $a = (E_{x1}^0, E_{x2}^0, \dots, E_{xn}^0)$,云重心高度向量为 $b = (b_1, b_2, \dots, b_n)$,其中, $b_i = W_i$,则依据式(1)及其变形形式有: $T_0 = a \times b^T = (T_1^0, T_2^0, \dots, T_n^0)$,同理,某个状态下系统综合云的重心向量可以表示为 $T = (T_1, T_2, \dots, T_n)$ 。归一化当前状态下的系统综合云重心向量得到 $T^c = (T_1^c, T_2^c, \dots, T_n^c)$,计算公式为:

$$T_i^c = \begin{cases} (T_i - T_i^0)/T_i, & T_i < T_i^0 \\ (T_i - T_i^0)/T_i, & T_i \geq T_i^0 \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

式中 T^c 为综合云重心向量归一化结果。

在某一状态下,设定 n 维系统综合云的重心向量为 $T = (T_1, T_2, \dots, T_n)$,为体现不同状态下系统综合云重心之间的差异,引入加权偏离度 μ 以衡量某一状态与理想状态的差异。将各个评价指标归一化计算处理,得到加权偏离度($0 \leq \mu \leq 1$),加权偏离度结果越小,表示差异越不明显;反之则表示差异越显著。即:

$$\mu = \sum_{i=1}^n (W_i T_i^c), \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

5) 定性评测云模型的评语集。由加权偏离度得到评价结果的归属度为:

$$e = 1 - |\mu| \quad (13)$$

式中: e 为评价结果的归属度; μ 为加权偏离度。

根据相关文献^[3]做法,将港口船舶溢油综合应急能力划分为7个等级,即: $V = (V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6, V_7) = (\text{极差}, \text{很差}, \text{差}, \text{一般}, \text{好}, \text{很好}, \text{极好})$ 。将港口船舶溢油综合应急能力视为很好,即越与理想状态接近,能力越好,反之亦然。将7个评语表现在语言标尺上,并且每个评语值都可用云模型来实现,得到评语集的期望值向量为 $(0, \frac{1}{6}, \frac{2}{6}, \frac{3}{6}, \frac{4}{6}, \frac{5}{6}, 1)$,

归属度与评语集的对应关系构成定性评测的云发生器,如图3所示。

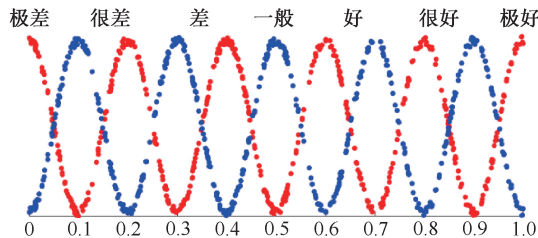


图3 云发生器展示图

Fig. 3 Cloud generator

3 船舶溢油综合应急能力评价实例

为验证文中提出的采用云重心评判法的港口船舶溢油综合应急能力评价方法,以上海港为例分析。其中,评估指标包括2级,分析应急准备能力、应急预警能力、应急行动能力、应急恢复能力4大环节。建立的指标体系,见表1。

3.1 指标的不同状态值采集

由于文中构建的指标体系均属于定性指标,难以得到具体数值,故采用AHP法由专家打分确定。选取多位资深专家分别对17项定性指标打分,为了保证评估结果的科学性和准确性,抽取5种状态用于标度各指标参数状态,从而获得一级指标的参数状态值。以应急准备能力的各指标参数状态为例,见表4。

表4 应急准备能力的指标参数状态

Tab. 4 Status of indicators and parameters of emergency preparedness capability

指标	应急管理 机制	应急预 案体系	应急规 章制度	应急物 资配置	应急人 员储备
状态1	很好	一般	一般	差	好
状态2	一般	很好	差	好	一般
状态3	很差	好	很好	差	很好
状态4	好	差	好	一般	好
状态5	一般	极好	一般	很好	差
理想状态	极好	极好	极好	极好	极好

3.2 求各评价指标云模型的期望值和熵

利用云理论模型,把语言值用期望、熵和超熵3个数字特征予以表征。以指标参数状态为基准,可得到决策矩阵 B ,然后依据式(2)和式(3),计算出期望和熵,见表5。

$$B = \begin{pmatrix} 0.833 & 0.500 & 0.500 & 0.333 & 0.667 \\ 0.500 & 0.833 & 0.333 & 0.667 & 0.500 \\ 0.167 & 0.667 & 0.833 & 0.333 & 0.833 \\ 0.667 & 0.333 & 0.667 & 0.500 & 0.667 \\ 0.500 & 1.000 & 0.500 & 0.833 & 0.333 \end{pmatrix} \quad (14)$$

式中 B 为决策矩阵。

表 5 各指标的期望值和熵

Tab. 5 Expected value and entropy of each indicator

指标	U_{11}	U_{12}	U_{13}	U_{14}	U_{15}
期望	0.533 4	0.666 6	0.566 6	0.533 2	0.6
熵	0.111	0.111	0.083	0.083	0.083

3.3 求各指标的权重分配

1) 一级指标权重获取。根据专家 1 针对 4 个一级指标的分析判断,构建评判矩阵。

$$A = \begin{pmatrix} 1.000 & 0 & 3.340 & 3 & 4.663 & 4 & 5.337 & 8 \\ 0.299 & 4 & 1.000 & 0 & 1.000 & 0 & 2.321 & 6 \\ 0.214 & 4 & 1.000 & 0 & 1.000 & 0 & 0.431 & 9 \\ 0.187 & 3 & 0.430 & 7 & 2.315 & 6 & 1.000 & 0 \end{pmatrix} \quad (15)$$

式中 A 为评判矩阵。矩阵规范化后,由式(7)得指标权重向量。

$$W_i = \begin{pmatrix} 0.5693 \\ 0.1832 \\ 0.1115 \\ 0.1360 \end{pmatrix} \quad (16)$$

根据方程 $AW_i = \lambda_{\max} W_i$, 计算评判矩阵的最大特征值 λ_{\max} 的计算结果为 42.634。

根据式(9)和式(10),评判矩阵一致性检验,因矩阵阶数 $m=4$, $RI=0.9$,计算 CR 为:

$$CR = \frac{\lambda_{\max} - m}{(m - 1)RI} = 0.0986 < 0.1 \quad (17)$$

通过一致性检验后,表示由该专家咨询数据计算出的一级指标权重值符合要求,文中依据 4 名专家咨询数据计算出的最终权重值见表 6。

表 6 计算出的一级指标权重值

Tab. 6 Weights of primary indicators

专家序号	U_1	U_2	U_3	U_4	λ_{\max}	CR	通过检验
1	0.569 3	0.183 2	0.111 5	0.136 4	4.263 4	0.098 6	是
2	0.623 7	0.204 3	0.108 6	0.063 4	4.066 8	0.025	是
3	0.151 9	0.282 1	0.510 1	0.055 9	4.209 7	0.078 5	是
4	0.110 5	0.327 3	0.509 2	0.053	4.099 2	0.037 2	是

一级指标权重为:

$$W_i = (0.3639 \quad 0.2492 \quad 0.3098 \quad 0.0771) \quad (18)$$

2) 二级指标的权重获取。计算二级指标的权重计算方法同一级指标权重计算过程。其中, U_1 的二级指标权重值为:

$$W_1 = (0.0607 \quad 0.0773 \quad 0.0429 \quad 0.0551 \quad 0.128) \quad (19)$$

U_2 的二级指标权重值为:

$$W_2 = (0.1389 \quad 0.0582 \quad 0.0290 \quad 0.0231) \quad (20)$$

U_3 的二级指标权重值为:

$$W_3 = (0.0160 \quad 0.0966 \quad 0.0904 \quad 0.0618) \quad (21)$$

U_4 的二级指标权重值为:

$$W_4 = (0.0197 \quad 0.0283 \quad 0.008 \quad 0.0210) \quad (22)$$

3) 指标体系的权重获取。计算出一级和二级指标的权重后,便可获取指标体系中所有指标的目标权重,见表 7。

表 7 各指标权重值列表

Tab. 7 Weight of each indicator

目标层	一级		二级	
	指标	权重	指标	权重
港口船舶溢油综合应急能力 U_1	应急准备能力 U_1	0.3639	应急管理机制 U_{11}	0.0607
			应急预案体系 U_{12}	0.0773
			应急规章制度 U_{13}	0.0429
			应急物资配置 U_{14}	0.0551
港口船舶溢油综合应急能力 U_2	应急预警能力 U_2	0.2492	应急人员储备 U_{15}	0.128
			应急现场监管 U_{21}	0.1389
			应急值守监管 U_{22}	0.0582
			应急应变演练 U_{23}	0.029
港口船舶溢油综合应急能力 U_3	应急行动能力 U_3	0.3098	应急信息化 U_{24}	0.0231
			应急力量响应 U_{31}	0.016
			应急联动程序 U_{32}	0.0966
			溢油应急指挥 U_{33}	0.0904
港口船舶溢油综合应急能力 U_4	应急恢复能力 U_4	0.0771	应急力量调配 U_{34}	0.0618
			海域油污清除 U_{41}	0.0197
			港口油污清除 U_{42}	0.0283
			溢油事故损失评估 U_{43}	0.008
			事故调查与评判 U_{44}	0.021

3.4 计算综合云重心向量和加权偏离度

通过云模型相关理论,由式(1)得到 U_1 的 5 维加权系统综合云的重心向量为 $T = (0.0324, 0.0515, 0.0243, 0.0294, 0.0768)$;理想状态下,加权系统综合云的重心向量为 $T^0 = (0.0607, 0.0773, 0.0429, 0.0551, 0.1280)$ 。利用式(11)对系统综合云重心向量进行归一化计算处理,得到 $T^c = (-0.4662, -0.3338, -0.4336, -0.4664,$

-0.400 0)。依据式(12)计算出 $\mu = -0.15$ 。将 μ 代入式(13)计算出归属感 $e = 0.850$ 。该值激活云发生器中的“极好”和“很好”2个云对象。其位置处于“很好”云对象和“极好”云对象之间,从而产生一个新的云对象,如图4所示。依据评估结果可知上海港口船舶溢油应急准备能力的定性评测结果介于“很好”和“极好”之间,倾向“很好”,定量评测结果为其期望值。

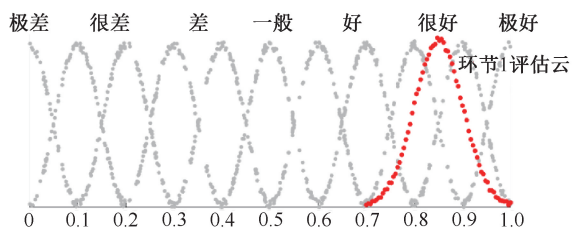


图4 应急准备能力 U_1 的评测结果

Fig. 4 Evaluation results of emergency preparedness capability U_1

同时,可求出港口船舶溢油综合应急能力中其他一级指标的定性评测结果。应急预警能力的评语介于“好”和“很好”之间,倾向于“好”,应急行动能力的评语很接近“很好”,应急恢复能力的评语是“好”。由各一级指标的评测结果进而求得总指标,即上海港现有的船舶溢油综合应急能力评价介于“好”和“很好”之间,偏向于“好”。上海港船舶溢油综合应急能力的评测结果如图5所示。

为验证其可行性和可靠性,进一步采用模糊综合评判法对上海港船舶溢油综合应急能力进行验证。计算结果显示,与云重心评判法所得结果比较,针对“应急预警能力”的评价值呈现一定偏差,模糊综合评判法结果显示为“很好”。其他结果均与云

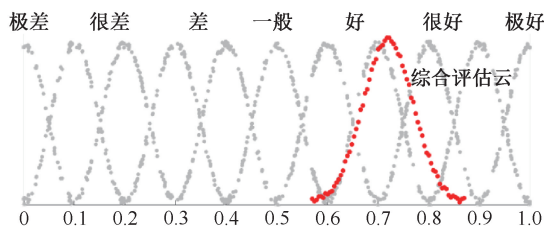


图5 上海港船舶溢油综合应急能力的评测结果

Fig. 5 Evaluation results of comprehensive response capability of ship oil spill in Shanghai Port

重心评判法所得结果较一致。该对比结果验证了采用云重心评判法对港口船舶溢油综合应急能力评估结果的可靠性。

4 结论

1) 采用云重心评判法对港口船舶溢油综合应急能力开展评价,形成了覆盖船舶溢油应急准备、预警、行动及恢复等全环节的港口船舶溢油综合应急能力评价体系,体系涵盖4个一级指标和17个二级指标,弥补了目前单环节港口溢油应急评价的不足。

2) 采用云重心评判法的港口船舶溢油综合应急能力评价方法,利用AHP法合理量化评价指标的权重值,通过云发生器实现对港口船舶溢油综合应急能力的评价,由此提出更具科学性的港口船舶溢油应对措施,完善港口综合应急能力。

3) 采用云重心评判法评价上海港船舶溢油综合应急能力,通过加权偏离度解决定性指标量化处理弥补指标因素模糊性和随机性的问题,结合AHP法有效综合专家意见和客观数据,获得应急准备能力 U_1 、应急预警能力 U_2 、应急行动能力 U_3 、应急恢复能力 U_4 等评价结果,通过对比模糊综合评判法验证了云重心评判法结果的合理性。

参考文献

- [1] ZHANG Chunchang, AN Wei, XIONG Deqi, et al. Research on the risk-based model for regional emergency resource allocation for ship-source oil spill[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2018, 37(11): 133-138.
- [2] 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. WANG Haiyan, ZHENG Xin, CHEN Huanwan. Assessment of the emergency tackling capability for oil-shipping spills in the offshore waters[J]. Journal of Safety and Environment, 2017, 17(3): 840-844.
- [3] 金浏夏. 台州港溢油应急能力评估研究[D]. 大连:大连海事大学, 2018. JIN Liuxia. Evaluation of oil spill emergency capability in Taizhou Port[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2018.
- [4] SHI Xin, WANG Ying, LUO Meifeng, et al. Assessing the feasibility of marine oil spill contingency plans from an information perspective[J]. Safety Science, 2019, 112(2): 38-47.
- [5] 陈立家,田延飞,黄立文,等. 港区船舶溢油应急联防设备库选址优化研究[J]. 中国安全科学学报, 2014, 24(7): 172-176. CHEN Lijia, TIAN Yanfei, HUANG Liwen. Optimal location of ship oil spill emergency equipment depot for port areas[J]. China Safety Science Journal, 2014, 24(7): 172-176.

- [6] 王海燕,杨家其,任军. 近岸水域溢油应急响应系统风险排序研究[J]. 中国安全科学学报, 2014, 24(11): 159-165.
WANG Haiyan, YANG Jiaqi, REN Jun. Prioritizing risks in ERS for oil spills in near-shore waters[J]. China Safety Science Journal, 2014, 24(11): 159-165.
- [7] 李新宏,张毅,韩子月,等. 基于风险与成本的海洋溢油事故应急控制决策[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(4): 184-190.
LI Xinhong, ZHANG Yi, HAN Ziyue, et al. Risk and cost based emergency control decision-making for offshore oil spills[J]. China Safety Science Journal, 2021, 31(4): 184-190.
- [8] 李晶,徐文辉,李亚东. 海上溢油应急物资调度双目标规划模型[J]. 中国安全生产科学技术, 2022, 18(1): 48-53.
LI Jing, XU Wenhui, LI Yadong. Dual-objective planning model for emergency materials dispatching of offshore oil spill[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2022, 18(1): 48-53.
- [9] ZHANG Lingye, LU Jing, YANG Zaili. Optimal scheduling of emergency resources for major maritime oil spills considering time-varying demand and transportation networks[J]. European Journal of Operational Research, 2020, 293(2): 529-546.
- [10] JIN Weiwei, AN Wei, ZHAO Yupeng, et al. Research on evaluation of emergency response capacity of oil spill emergency vessels[J]. Aquatic Procedia, 2015, 3(3): 66-73.
- [11] 欧阳武,程启超,金勇,等. 基于熵权模糊综合评价法的水润滑尾轴承性能评估[J]. 中国机械工程, 2020, 31(12): 1407-1414.
OUYANG Wu, CHENG Qichao, JIN Yong, et al. Performance evaluation of water lubricated stern bearings based on entropy weight fuzzy comprehensive evaluation method[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2020, 31(12): 1407-1414.
- [12] 李兴国. 基于灰色关联分析的犹豫模糊多属性决策模型构建及其应用[J]. 模糊系统与数学, 2019, 33(5): 127-135.
LI Xingguo. Construction and statistical test of hesitant fuzzy multi-attribute decision-making model based on grey relational analysis[J]. Fuzzy Systems and Mathematics, 2019, 33(5): 127-135.
- [13] DENG Zhenping, HUANG Darong, LIU Jinyu. An assessment method for traffic state vulnerability based on a cloud model for urban road network traffic systems[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2021, 22(11): 7155-7168.
- [14] 陈伟炯,苏俊方,张善杰,等. 基于云模型的海上船舶溢油应急管理评估方法[J]. 中国安全生产科学技术, 2020, 16(2):110-116.
CHEN Weijiong, SU Junfang, ZHANG Shanjie, et al. Assessment method for emergency management capability of marine ship-source oil spill based on cloud model[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2020, 16(2): 110-116.
- [15] 郑建辉,王天辉,张超恒. 基于云重心评判法的装备维修保障效能评估[J]. 舰船电子工程, 2016, 36(3): 115-117, 129.
ZHENG Jianhui, WANG Tianhui, ZHANG Chaoheng. Efficiency evaluation of equipment service base on cloud gravity center assessment method[J]. Ship Electronic Engineering, 2020, 16(2): 110-116.
- [16] 陈信,龙升照. 人-机-环境系统工程学概论 [J]. 自然杂志, 1985,8(1): 36-38, 80.
- [17] 陈伟炯. 海事预控的安全科学新理论探讨[J]. 中国安全科学学报, 1998, 8(6):8-12.
CHEN Weijiong. Probe into the new theory of safety science on preventive control of marine accident[J]. China Safety Science Journal, 1998, 8(6): 8-12.
- [18] 陈伟炯. 面向 21 世纪的海事控制理论探讨: 船舶营运安全的基本要素结构 [J]. 中国航海, 1999, 44(1): 34-38.
CHEN Weijiong. An exploration of marine accident control theories for the 21st century: structure of the basic elements of ship operation safety[J]. Navigation of China, 1999, 44(1): 34-38.
- [19] 张艳艳,刘晓佳,张可,等. 基于云重心评判法的海上交通安全态势评估模型[J]. 综合运输, 2018, 40(4): 22-26, 121.
ZHANG Yanyan, LIU Xiaojia, ZHANG Ke, et al. Maritime traffic safety situation assessment based on cloud gravity center evaluation method[J]. China Transportation Review, 2018, 40(4): 22-26, 121.

作者简介: 陈伟炯 (1957—),男,江苏常州人,硕士,教授,硕士生导师,主要从事安全科学技术、海运安全与管理、物流供应链风险控制等方面的研究。E-mail:wjchen57@163.com。