

基于云模型的深圳港危险化学品应急能力评价

凌笑颜¹, 邓丽娟¹

(集美大学航海学院, 福建 厦门 361021)

[摘要] 利用云模型进行数据分析和处理, 以提高港口危险化学品应急能力评价的科学性。以深圳市相关应急预案及风险评估报告为基础, 结合应急管理的四个阶段, 构建由1个一级指标, 4个二级指标, 13个三级指标和104个评估项构成的危险化学品应急能力评价指标体系。以专家打分结果为数据样本, 分别生成权重云模型、评价云模型和综合云模型, 将综合云模型在Matlab中仿真模拟, 得到云图; 然后将此云图与标尺云图进行比较, 得出应急能力水平。得到的评价结果为, 深圳港危险化学品应急能力属于中等偏上水平。

[关键词] 应急能力; 云模型; 风险评价; 深圳港; 危险化学品

[中图分类号] U 698.5

Evaluation of the Emergency Response Capability on Hazardous Chemicals in Shenzhen Port Based on Cloud Model

LING Xiaoyan¹, DENG Lijuan¹

(Navigation College, Jimei University, Xiamen 361021, China)

Abstract: In order to improve the scientificity of the evaluation of the emergency response capability on hazardous chemicals in a port, a cloud model is used for data analysis and processing. Based on the relevant emergency plans and risk assessment reports in Shenzhen city and taking into account the four stages in emergency management, an emergency capability evaluation system is established to comprise one primary indicator, four secondary indicators, 13 third-level indicators and 104 evaluations items. The scores of experts are used as data samples to generate a weighted cloud model, an evaluation cloud model and a comprehensive cloud model. The comprehensive cloud model is simulated in Matlab to obtain a cloud image, which is compared with the standard cloud image to come up with the emergency capability. The evaluation results indicate that the emergency response capability on hazardous chemicals in Shenzhen Port is above average.

Keywords: emergency capacity; cloud model; risk assessment; Shenzhen Port; hazardous chemicals

0 引言

港口是货物运输和中转的枢纽, 目前危险化学品的运输量和运输种类逐年攀升, 危险化学品若发生事故常常会造成惨烈的后果。因此, 港口的危险化学品应急能力逐渐成为人们关注的重点。

港口危险化学品应急能力是指《危险品货物分类和品名编号》(GB 6944—2012)中规定的所有

[收稿日期] 2019-07-09

[作者简介] 凌笑颜(1994—), 女, 硕士生, 从事交通运输规划与管理研究。通信作者: 邓丽娟(1973—), 女, 副教授, 博士, 研究生导师, 从事海商海事及交通运输规划与管理研究。E-mail: lindsayeng2002@sina.com

形式的危险化学品,在港区范围内发生《生产安全事故应急预案管理办法》(国家安监总局第 88 号令)所规定的事故时,相关部门的到场时间、救援速度、处置与恢复等的综合能力。

在应急能力评价时,常用的方法包括概率评估法、灰色理论、逼近理想解排序法(TOPSIS)、层次分析法(AHP)、模糊层次分析法(FAHP)等。概率评估法^[1]要求数据准确充分,难以应用于有不确定因素的系统;灰色理论常用于数据预测;TOPSIS^[2]通过对有限方案的优劣排序实现多目标决策;AHP^[3]要满足矩阵一致性和某些矩阵的非病态要求;FAHP 在指标集较大的情况下,常出现超模糊现象,导致隶属度无法区分,多线性模糊分析也存在同样的问题^[4]。以上评价方法的共同缺点是主观依赖性及数据的不确定性较高,且模糊性会带来一定的随机性^[5],而云模型可以极大地改善这些问题。

云模型是在模糊数学和概率统计的基础上,以自然语言描述为切入点,与自然语言中定性概念的模糊性、随机性有机结合,以实现它们之间的自然转换的一种评级方法^[6]。本文以深圳港为例,利用云模型,对深圳港的危险化学品应急能力进行评价。

1 深圳港危险化学品应急能力评价指标体系与模型的构建

风险分析是应急能力分析的基础^[7]。根据《深圳市突发事件应急能力评估报告(2018)》和《深圳港港口风险评估报告(2018)》及相关应急预案,深圳港危险化学品的主要风险为火灾、泄露和爆炸。本文在上述风险分析评估报告及应急预案的基础上,对影响应急能力的关键因素进行实地调研和统计分析,结合港口危险化学品事故特点,以应急管理的 4 个阶段,即预防阶段、准备阶段、响应阶段和恢复阶段,划分二级指标,将应急任务细化为三级评估指标。在三级指标的基础上,每一项能力通过 8 个基本要素(即评估项)来评估,分别是组织能力、人力资源、装备设施、系统能力、信息流动能力、应急预案、应急培训和应急演练。在问卷中根据指标实际情况,对这 8 个评估项,或者采取“0-1”式打分,或者采取阶段式打分。例如人力资源是指事故发生后,救援及处置人员的到场或就位情况,20~30 min 内就位为 10 分,1 h 以内为 6~9 分,2 h 内为 4~5 分,2 h 以上为 0~3 分;装备设施主要是依照《消防法》的规定,应急物资是否齐全,“是”为 1 分,“否”为 0 分。其他评估项以此类推,在此不再赘述。由此构建的评价指标体系包括 1 个一级指标,4 个二级指标,13 个三级指标,每个三级指标包括 8 个评估项,共 104 个评估项。

从国务院应急办专家库中随机邀请 9 位专家(以下用“专家”代指),对深圳港的各项指标权重及应急能力评价指标进行打分。权重打分包括三级指标在二级指标中的比重和二级指标在一级指标中的比重,一级指标的权重为 1;应急能力评价指标打分是对三级评价指标和二级评价指标打分。打分结果均需经过逆向云模型,根据云滴的散乱程度进行调整。

在构建评价模型时,首先根据评价指标体系形成因素集和指标集。在评价指标体系中,一级指标划分为若干二级指标,记为 $U = \{U_1, U_2, \dots, U_n\}$;二级指标 U_i 划分为若干三级指标 $U_i = \{U_{i1}, U_{i2}, \dots, U_{in}\}, i = 1, 2, \dots; n = 1, 2, \dots$ 。 U 构成的集合即为因素集,对应因素集的文字描述即为指标集。

在指标体系评价结束后, U 的评语构成的集合为评语集,记为 $V = \{V_1, V_2, \dots, V_n\}, n = 1, 2, \dots$ 。

在本研究中,将深圳港危险化学品应急能力评价,也就是一级指标记做 C ;二级指标分别记做 C_1, C_2, C_3, C_4 ;二级指标 C_i 细化为三级指标,其集合记做 $C_{ij} = \{C_{i1}, C_{i2}, \dots, C_{in}\}, i = 1, 2, 3, 4; n = 1, 2, \dots$ 。评语集记为 $V = \{V_1, V_2, \dots, V_n\}$,评价指标内容具体如图 1 所示。

设 U 是一个精确数值表示的定量论域, C 是 U 上的定性概念,如定量值 $x \in U$,且 x 是 C 上的一次随机实现, x 对 C 的隶属度 $\mu(x) \in [0, 1]$ 是有稳定倾向的随机数, $\mu: U \rightarrow [0, 1], x \in U, x \rightarrow \mu(x)$,则称 x 在论域 U 上的分布为“云”^[7],记做 $(x, \mu(x))$ 。 x 为一个云滴,是云模型的具体实现。

云滴数量即云图上的数据点的数量,记做 N ,也就是云模型实现的次数。

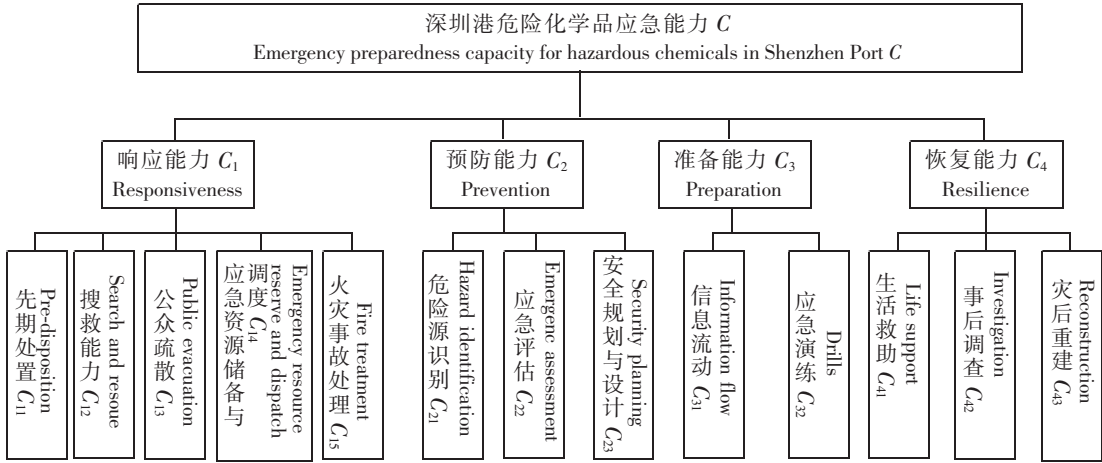


图 1 深圳港应急能力评价指标体系

Fig.1 Evaluation index system of emergency capability in port of Shenzhen

云的三个数字特征分别为期望 E_x 、熵 E_n 和超熵 H_e ，记做 $A = (E_x, E_n, H_e)$ ，主要分布区间为 $[E_x - 3E_n, E_x + 3E_n]$ 。其含义分别为：期望 E_x 是样本均值，在统计数据中是最基础的代表性数据；熵 E_n 反映数据的模糊度，也就是概念所包含的样本的取值范围；超熵 H_e 为熵 E_n 的不确定性度量，表示定性概念的随机性和模型的离散程度。

一个数字特征分别为 $(E_x = 0, E_n = 1, H_e = 0.1)$ ，云滴数量 $N = 3\,000$ 的云图，如图 2 所示。 x 轴表示集合 C 对应的数值， y 轴表示相对应的隶属度。云滴的数量对云图的准确性有较大影响，综合比较常用云滴数，本研究取 $N = 3\,000$ 。

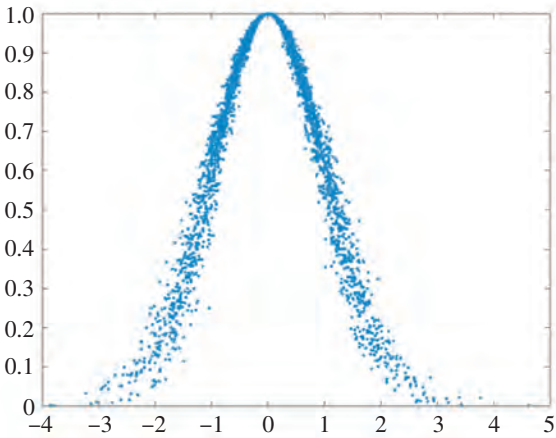


图 2 云模型的云图

Fig.2 The cloud-diagram of a cloud model

云模型发生有正向和逆向，分别通过正向云发生器和逆向云发生器生成，具体计算方法可参考文献 [8]。

多层次的综合云模型由低级云模型逐层向上计算得到，遵循的计算法则与常见的矩阵计算法则不同，以下分别从云的数字特征的基本运算法则、同一论域和概念下的虚云计算法则、不同内涵的云模型之间的计算法则三个层面描述其运算方法。

1) 基本运算法则

根据正向或逆向云处理器得到云模型后，还会涉及到不同云模型之间的运算。在计算过程中，三个数字特征的运算法则如下：

$$E_{x_1} \times E_{x_2} = E_{x_1} \times E_{x_2}; \tag{1}$$

$$E_{n_1} \times E_{n_2} = |E_{x_1} \times E_{x_2}| \sqrt{(E_{n_1}/E_{x_1})^2 + (E_{n_2}/E_{x_2})^2}; \tag{2}$$

$$H_{n_1} \times H_{n_2} = |E_{x_1} \times E_{x_2}| \sqrt{(H_{n_1}/E_{x_1})^2 + (H_{n_2}/E_{x_2})^2}. \tag{3}$$

2) 同类型云的计算法则

在同一论域上的两个或多个云模型 $C_1(E_{x_1}, E_{n_1}, H_{e_1})$ 、 $C_2(E_{x_2}, E_{n_2}, H_{e_2})$ ，经过计算得到综合了 C_1 和 C_2 的虚云 $C(E_x, E_n, H_e)$ 。在本研究中，综合云模型计算方式如下：

$$E_x = (E_{x_1}E_{n_1} + E_{x_2}E_{n_2} + \cdots + E_{x_n}E_{n_n}) / (E_{n_1} + E_{n_2} + \cdots + E_{n_n}); \tag{4}$$

$$E_n = E_{n_1} + E_{n_2} + \cdots + E_{n_n};$$
$$H_e = (H_{e_1}E_{n_1} + H_{e_2}E_{n_2} + \cdots + H_{e_n}E_{n_n}) / (E_{n_1} + E_{n_2} + \cdots + E_{n_n}).$$

3) 云矩阵的计算法则

结合权重云和综合云求更高等级的云模型时，用云矩阵的方式，计算法则如下：

$$C_1 = \begin{bmatrix} \omega_{11} \\ \omega_{12} \\ \omega_{13} \end{bmatrix}^T \circ \begin{bmatrix} C_{11} \\ C_{12} \\ C_{13} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{x\omega_{11}} & E_{n\omega_{11}} & H_{e\omega_{11}} \\ E_{x\omega_{12}} & E_{n\omega_{12}} & H_{e\omega_{12}} \\ E_{x\omega_{13}} & E_{n\omega_{13}} & H_{e\omega_{13}} \end{bmatrix}^T \circ \begin{bmatrix} E_{xc_{11}} & E_{nc_{11}} & H_{ec_{11}} \\ E_{xc_{12}} & E_{nc_{12}} & H_{ec_{12}} \\ E_{xc_{13}} & E_{nc_{13}} & H_{ec_{13}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{x\omega_{11}}E_{xc_{11}} & E_{n\omega_{11}}E_{nc_{11}} & H_{e\omega_{11}}H_{ec_{11}} \\ E_{x\omega_{12}}E_{xc_{12}} & E_{n\omega_{12}}E_{nc_{12}} & H_{e\omega_{12}}H_{ec_{12}} \\ E_{x\omega_{13}}E_{xc_{13}} & E_{n\omega_{13}}E_{nc_{13}} & H_{e\omega_{13}}H_{ec_{13}} \end{bmatrix}^T =$$
$$(E_{xc_1} \quad E_{nc_1} \quad H_{ec_1}) \circ$$

2 深圳港危险化学品应急能力评价的标尺云模型

云图是云模型的图像化体现，评价结果的对比是通过云图的对比实现的。生成的云模型需与标尺云图比较，若生成的云图落在两个标尺云图之间，或更靠近某个标尺云图，则该评价结果即在两个标尺代表的结果之间，或更接近某标尺代表的结果。因此，在进行计算前，要确定评价标准，邀请专家进行指标的等级划分，即建立标尺云模型（云标尺），生成标尺云图，这是云模型评价的第一步。

按照专家意见将指标的重要程度分为 5 类，并确定赋值区间，建立匹配的标尺云图，具体结果如表 1 所示。

表 1 云模型中的指标等级划分
Tab.1 Index ranking in cloud model

权重等级 Weight rank	很重要 Very important	重要 Important	比较重要 Less important	一般重要 Not so important	不重要 Not important
评价结果 Result	非常好 Excellent	很好 Very well	好 Good	一般 Normal	差 Bad
赋值区间 Rank set	[0.8,1]	[0.6,0.8)	[0.4,0.6)	[0.2,0.4)	[0,0.2)
云模型 Cloud model	(1,0.103,0.010)	(0.691,0.064,0.008)	(0.5,0.039,0.005)	(0.309,0.064,0.008)	(0,0.103,0.013)

经 Matlab 运算，绘制结果如图 3 所示。5 个倒钟型云图从左至右分别是：不重要、一般重要、重要、比较重要和很重要。对应评价结果中，以上 5 个分别对应差、一般、好、很好和非常好。将评价结果与综合云模型生成的云图相比较，即可得到对应的评价结果。

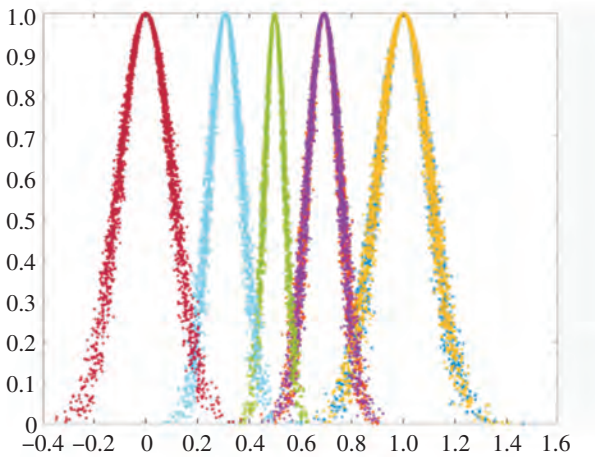


图 3 不同云标尺的云图

Fig.3 The cloud-diagram of different scales

3 深圳港危险化学品应急能力评价的权重云模型

权重云模型是由评价指标体系中的权重得分计算得到。本研究的权重云模型包括三级权重云模型和二级权重云模型，按照以下三步得到：1) 邀请专家对指标权重打分；2) 将得到的分数经逆向云发生器反馈，由打分专家进行修正；3) 将得到的数据进行归一化处理，即可得到权重云模型。以下结果由式（1）~式（3）计算得到。

1) 三级指标权重云模型

在二级指标中，响应能力（C₁）的评估项最复杂，因此以响应能力为例，说明三级指标权重的云模型建立过程。C₁ 打分结果如表 2 所示，经逆向云发生器处理，调整得到趋于稳定的云图。对打分结

果进行归一化处理，得到三级评价指标的权重云模型，即： $C_{11}(0.777\ 1,0.122\ 6,0.007\ 4)$ ； $C_{12}(0.714\ 6,0.103\ 4,0.000\ 6)$ ； $C_{13}(0.733\ 5,0.099\ 4,0.000\ 5)$ ； $C_{14}(0.711\ 6,0.133\ 1,0.000\ 8)$ ； $C_{15}(0.772\ 7,0.112\ 1,0.000\ 6)$ ； $C_{16}(0.749\ 4,0.126\ 3,0.000\ 6)$ ； $C_{17}(0.763\ 0,0.103\ 8,0.000\ 6)$ 。

表 2 响应能力权重打分
Tab.2 Weight score of responsiveness

专家 Expert	1	2	3	4	5	6	7	8	9
权重打分 Weight score	0.536 0	0.128 9	0.041 8	0.270 7	0.114 7	0.027 5	0.356 7	0.089 1	0.212 1

2) 二级指标权重云模型
同理，得到二级指标评价云模型，即： $C_1(0.268\ 4,0.253\ 9,0.005\ 1)$ ； $C_2(0.357\ 8,0.284\ 6,0.002\ 9)$ ； $C_3(0.314\ 5,0.253\ 7,0.002\ 3)$ ； $C_4(0.415\ 6,0.304\ 6,0.003\ 0)$ 。
一级指标权重为 1。

4 深圳港危险化学品应急能力评价的评价云模型

评价云模型是由评价指标体系中每项指标的得分计算得到。本研究的评价云模型包括三级权重云模型和二级权重云模型，按照以下三步得到。1) 邀请专家对每项指标打分，利用逆向云发生器生成指标评价云模型；2) 统计每项评价指标的最高得分和最低得分，利用逆向云发生器生成最高评价云模型和最低评价云模型；3) 两组云模型通过式（4）~式（6）计算得到一个广义云模型，即可得到评价云模型。
评价云模型的计算以第一个指标先期处置（ C_{11} ）为例，说明计算过程。统计该指标的最大值和最小值得分，见表 3，利用式（4）~式（6）求出最大值云模型、最小值云模型，得到评价云模型 C_{11} 。求得其他三级指标的评价云模型，结果如表 4 所示。
得到三级评价云模型后，以同样的方法，得到二级指标的评价云模型。

表 3 先期处置 C_{11} 最大值和最小值打分
Tab.3 Maximum and minimum scores of C_{11}

专家 Expert	1	2	3	4	5	6	7	8	9
最大值 Max	0.92	0.95	0.91	0.86	0.72	0.82	0.93	0.92	0.94
最小值 Min	0.85	0.89	0.62	0.60	0.56	0.55	0.83	0.88	0.87

表 4 三级指标评价云模型
Tab.4 The third of indexes evaluate cloud model

指标 Index	三级指标评价云模型 Third-level indicator cloud model	指标 Index	三级指标评价云模型 Third-level indicator cloud model
C_{11}	(0.777 1,0.122 6,0.000 7)	C_{23}	(0.819 5,0.075 4,0.000 5)
C_{12}	(0.714 6,0.103 4,0.000 6)	C_{31}	(0.733 8,0.137 9,0.000 8)
C_{13}	(0.733 5,0.099 4,0.000 5)	C_{32}	(0.757 2,0.114 3,0.000 7)
C_{14}	(0.711 6,0.133 1,0.000 8)	C_{41}	(0.788 1,0.074 9,0.000 4)
C_{15}	(0.772 7,0.112 1,0.000 6)	C_{42}	(0.7877,0.101 6,0.000 6)
C_{21}	(0.701 9,0.084 7,0.000 5)	C_{43}	(0.769 4,0.117 8,0.000 7)
C_{22}	(0.676 0,0.102 0,0.000 6)		

5 深圳港危险化学品应急能力评价的综合云模型

综合云模型是结合权重云模型和评价云模型，用式（7）计算得到，为区分以上三种模型，称为

<http://xuebaobangong.jmu.edu.cn/zkb>

综合云模型。将综合云模型输入 Matlab，即可得到最终的评价云图。

根据上述计算结果，得到深圳港应急能力评价云模型 $C = (0.747\ 2, 0.069\ 2, 0.008\ 7)$ ，输入 Matlab 中生成云图，如图 4 所示。将图 4 与图 1 标尺云图进行比较，即可得到评价结果。由于评价结果常落在两个评价区间内，因此在比对图中绘制其上下两个区间的云图，便于比较。从图 4 中得出，深圳港的应急评价结果在“很好”和“非常好”之间，更靠近“很好”，因此可认为其评价结果为“很好”。

通过二级指标的云图得到二级指标的评价结果：响应能力 C_1 位于“好”和“很好”之间，如图 5 所示，更靠近“很好”，因此可认为评级结果为“很好”；预防能力 C_2 位于“一般”和“好”之间，如图 6 所示，更靠近“好”，因此可认为评级结果为“好”；准备能力 C_3 位于“很好”和“非常好”之间，如图 7 所示，更靠近“非常好”，因此可认为评级结果为“非常好”；恢复能力 C_4 位于“好”和“很好”之间，如图 8 所示，更靠近“好”，因此可认为评级结果为“好”。

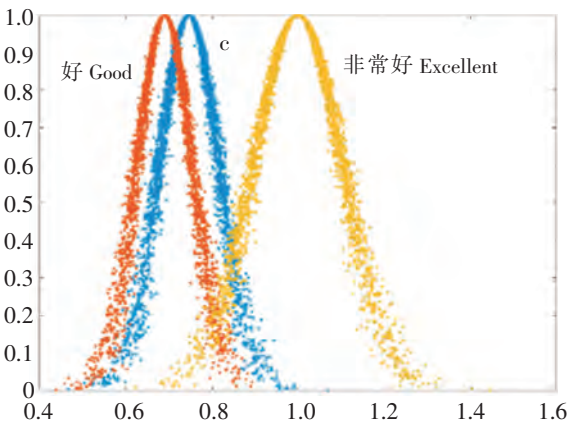


图 4 深圳港危险化学品应急能力云图

Fig.4 The cloud of emergency response capacity of hazardous chemicals in Shenzhen Port

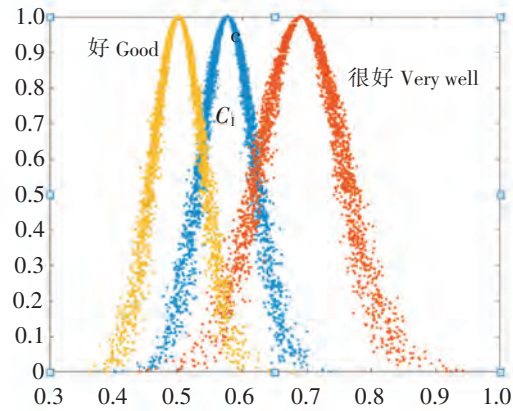


图 5 响应能力云图

Fig.5 The cloud of responsiveness

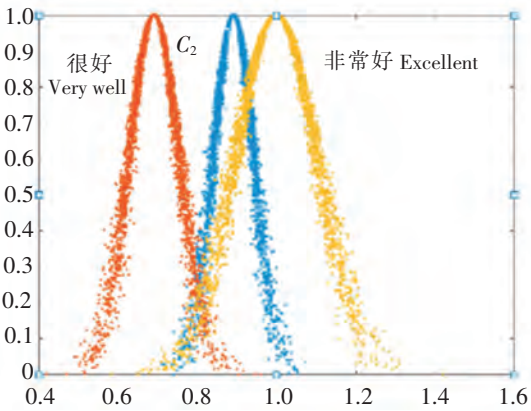


图 6 预防能力云图

Fig.6 The cloud of prevention

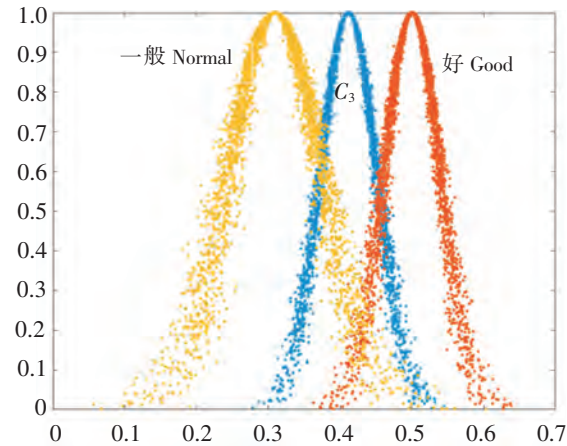


图 7 准备能力云图

Fig.7 The cloud of preparation

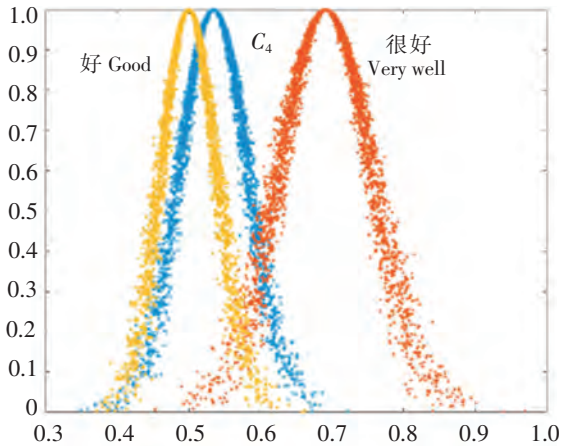


图 8 恢复能力云图

Fig.8 The cloud of resilience

6 结论

1) 云模型主要从随机性和模糊性两个方面减少评价过程中出现的不确定性。在减少随机性方面,主要从逆向云发生器出发,按照云滴的散乱程度调整打分;在减少模糊性方面,综合了最高评价值和最低评价值,并进行归一化处理。借助 Matlab 软件,将云模型实现为云图,较为直观地反应了深圳港应急能力的各级指标的评价等级。根据评价结果,结合实际调研走访情况,进行分析总结,为深圳港应急能力的提升提供理论参考。

2) 形成了深圳港应急能力评价指标体系,结合专家打分与云模型计算得出其应急能力整体较好的结论。本文评价结果与实际情况较为相符,因此可以认为本指标体系较为合理,方法较为科学。

[参考文献]

- [1] 唐颖,宁勇,杨思佳,等. 石化企业苯暴露的概率风险评估 [J]. 环境与职业医学, 2018, 35(5): 452-456.
- [2] FARHAD SAMAIE, HASSAN MEYAR-NAIMI, SHAHRAM JAVADI, et al. Comparison of sustainability models in development of electric vehicles in Tehran using fuzzy TOPSIS method [J]. Sustainable Cities and Society, 2020, 53: 10191.
- [3] JOSÉ EUGENIO LEAL. AHP-express: a simplified version of the analytical hierarchy process method [J]. MethodsX, 2019, 7: 1748.
- [4] ZHOU Y, WANG L. Multi level fuzzy comprehensive evaluation method based on cloud model theory [J]. Computer Simulation, 2016, 33(12): 390-395.
- [5] FARID AICHE, DIDIER DUBOIS. Comparing the magnitude of fuzzy intervals and fuzzy random variables from the standpoint of gradual numbers [J]. Soft Computing, 2019, 23(15): 5975-5990
- [6] 张仕元,刘德新,朱景林,等. 基于云模型的 LNG 船舶通航环境风险评价 [J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2018, 32(3): 325-331.
- [7] 熊高峰. 广州海上搜救应急管理能力评估研究 [D]. 广州:暨南大学, 2016.
- [8] 杨洁,王国胤,刘群,等. 正态云模型研究回顾与展望 [J]. 计算机学报, 2018, 41(3): 724-744.
- [9] 尹国定,卫红. 云计算——实现概念计算的方法 [J]. 东南大学学报(自然科学版), 2003(4): 502-506.

(责任编辑 陈 敏 英文审校 周云龙)