

基于物元可拓和神经网络的危化品 港口危险等级评价模型

刘翠莲, 王杰

(大连海事大学交通运输工程学院, 辽宁大连 116000)

[摘要] 为了准确且快速地评判危化品港口危险性程度, 减少港口发生风险事故的几率, 提出一种可对港口危险等级快速分类的评价模型。根据物理-事理-人理(WSR)方法论构建危险等级评价体系, 用物元可拓理论建立模型确定各危险等级的节域和经典域, 结合指标权重计算综合关联度, 得出国内10个主要危化品港口2018年和2020年的危险性等级, 并将其作为数据样本, 随机分为训练集和测试集进行BP神经网络训练。结果表明: 各危化品港口危险等级的评价结果与实际情况相符, 神经网络快速评价模型的输出结果与实际危险等级基本一致。可使用该模型对危化品港口的危险等级进行快速评价, 避免人为因素带来的随机误差。

[关键词] 港口危险等级评价; 物理-事理-人理; BP神经网络; G1法; 物元可拓理论

[中图分类号] U 698.5; F 55

Evaluation Model on Hazard Categories in Dangerous Chemical Port Based on Object Topology and BP Neural Network

LIU Cuilian, WANG Jie

(School of Traffic and Transportation Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116000, China)

Abstract: In order to accurately and quickly determine the hazard categories in dangerous chemical ports and reduce the chance of risky accidents in ports, an evaluation model for fast classification is proposed. According to the WSR methodology, the evaluation system of port hazard level is constructed, and the sectional and classical domains of each hazard level are determined by establishing the material element extension theory model, and the hazard levels of ten major domestic dangerous chemical ports in 2018 and 2020 are derived and used as data samples, which are randomly divided into training and testing sets for BP neural network training. The results show that the selected indicators can comprehensively reflect the hazard levels of the ports, and the evaluation model results after the neural network training are largely consistent with the actual levels. The model can be used to quickly evaluate the hazard level of a port, which can better avoid random errors brought by human factors.

Keywords: port hazard category evaluation; Wuli-Sshili-Renli (WSR); BP neural network; G1 method; matter-element extension theory

[收稿日期] 2022-05-05

[作者简介] 刘翠莲(1964—), 女, 教授, 硕导, 从事交通运输规划、港口经济及港口建设方向研究。

0 引言

危化品港口的危险等级是描述港口危险事故发生概率大小的一项指标,危险等级越高,表示其存在的安全隐患越多,越容易导致事故发生,因此明确危化品港口的危险等级显得尤为重要。国内外港口曾发生过许多由危化品导致的安全事故。如:2010年大连新港停靠的一艘30万t级油轮,在卸载原油的过程中,输油管线起火爆炸,且部分原油流入附近海域^[1];2020年贝鲁特港的硝酸铵存储仓库失火,发生多次爆炸,造成超过165人伤亡^[2]。有研究认为,海上运输系统的风险是航空运输系统的25倍^[3]。

近年学界开展了海上运输系统的风险研究:黄耀惊等^[4]为有效减少水域通行过程中发生事故风险,建立了航道安全评价模型;Zhang等^[5]对海上交通流量的复杂性进行数据分析,提出一种复杂度预测方法;李晶等^[6]基于突变理论对船舶运输过程中的关键节点脆弱性进行研究;Goerlandt^[7]等通过研究海上碰撞的溢油事故,对通航中的碰撞事故进行风险分析。另有学者通过研究近年来我国危化品的事故因素^[8]后,对危险货物的运输提出风险分析评估模型^[9-11]或安全运输策略方法^[12-14]。

海上运输风险领域的研究重点多在航道、海船的通行风险和危化品运输风险上,对各个港口的危险性等级分类的研究相对较少。而在现有的一些有关港口风险评价的文献中,大多只针对某个内河码头的安全风险分析,如许茂增等^[15]建立指标体系对重庆蓬威石化码头进行安全风险评估,马小龙等^[16]对内河铁矿石码头进行危险性分析。因此需要建立一个可对危化品港口的危险等级快速分类的评估模型。本文依照物理—事理—人理方法论(wuli-shili-renli, WSR)^[17]构建指标体系,借鉴国内外学者常用的物元可拓理论,对各危化品港口的危险等级进行评估分类,以期为港口企业的安全管理提供数据参考,从而减少危险事故发生。

1 港口生产危险等级评定

1.1 港口危险等级评估指标体系构建

港口危险等级评价的影响因素涉及多个方面,目前并没有统一的指标框架可供使用。危化品港口危险等级评价系统是以危化品装卸、运输、存储、管理为本质,以港口为载体,由多个行政部门共同构成的复杂系统。考虑到影响港口危险性的因素中,同时存在定性与定量因素,为将多种因素更好地耦合在同一系统下,本文以WSR为框架构建指标体系。

本研究中物理指物质运动的机理,即港口自身的状态,包括港口基础设施、港口运行状态等。选取港口危化品存储面积(W_1),危化品的货物吞吐量(W_2),原油、成品油和专业液体化工泊位数量(W_3),港口石油年设计通过能力饱和度(W_4)构成物理层。事理指系统工程和运筹理论,即危化品港口物流中人、事、物组成的各类系统,包括管理系统、监测系统等。选取危化品经营资质审核严格度(W_5),有毒有害物质控置率(W_6),腹地原油、天然气消费量(W_7),港口安全监管系统水平(W_8)构成事理层。人理指人际关系的处理,即在港口生产管理中人与人的协调、人与组织的协调,包括管理人员的行为、能力水平等。选取应急管理局监管力度(W_9)、港口安全管理人员业务能力(W_{10})构成人理层。

1.2 基于可拓学的物元理论模型

物元可拓理论模型是将多目标决策模型转换为单目标决策问题,为解决各学科领域的矛盾提供帮助。在物元分析法中,一般用三元组 $R = [N, C, V]$ 描述事物的基本物元。其中: N 表示描述事物名称, C 表示事物的特征, V 是事物特征的具体量值范围。本文使用物元可拓模型对港口的危险等级进行评定。

1) 划分指标危险等级

对上述指标划分危险等级,共分为四级,按照危险性由低至高顺序表示为:I级(极低危险性)、II级(一般危险性)、III级(高危险性)、IV级(极度危险性)。依据《港口货物危险管理规定》,以及专家和现场工程人员经验与文献,将评语集赋予相应的分值区间(见表1)。

2) 确定经典域 R_j 及节域 R_ρ

港口安全突出特征指标——经典域 R_j 及节域 R_ρ 的计算公式为: $R_j = (N_j, W_n, V_{jn})$, $R_\rho = (N_\rho, W_n, V_{\rho n})$ 。其中: N_j 表示港口安全评价指标第 j 个危险等级, 由于本文共划分 4 个危险等级, 故 $j = I, II, III, IV$; W_n 表示港口安全中的各项指标, $n = 1, 2, \dots, 10$; V_{jn} 表示指标 W_n 在第 j 个评价等级下的区间量值, 用 $(a_{j1}, b_{j1}) \sim (a_{jn}, b_{jn})$ 表示; N_ρ 表示评价指标全部危险等级; $V_{\rho n}$ 表示第 n 个指标在全部等级下的取值范围, 用 $(a_{\rho 1}, b_{\rho 1}) \sim (a_{\rho n}, b_{\rho n})$ 表示。

表 1 港口危险等级划分

Tab.1 Classification of prot hazards		
危险等级	危险等级描述	分值范围
I	极低	(7.5,10]
II	一般	(5,7.5]
III	高危	(2.5,5]
IV	极度	(0,2.5]

3) 确定危险性等级评价中的待评物元 R_0

根据各项指标的数据及参与评分的人员建议, 给出待评港口在各评价指标 W_n 下取得的分值。为确定其危险性等级隶属区间, 通过物元 R_0 来表示, 即 $R_0 = (N_0, W_n, V_n)$ 。

4) 建立物元关联函数并计算关联度

关联度表示物元符合区间量值的程度, 可借用数学中中距理论定义点与区间的关系, 构建关联度函数, 计算待测物元与各风险等级的关联度。假设 x_0 是实数域中一点, 令 $x(a, b)$ 为量值范围内的有界区间, 则 x_0 到 x 的距 $\rho(x_0, x)$ 的计算式为:

$$\rho(x_0, x) = |x_i - (a + b)/2| - (b - a)/2. \tag{1}$$

由式 (1) 同理可得, V_i 到经典域区间 $V_{jn}(a_{jn}, b_{jn})$ 的距 $\rho(v_i, v_{ji})$, 以及 V_i 到节域 $V_{\rho n}(a_{\rho n}, b_{\rho n})$ 的距 $\rho(v_i, v_{\rho i})$ 的计算式为:

$$\rho(v_i, v_{ji}) = |v_i - (a_{ji} + b_{ji})/2| + (b_{ji} - a_{ji})/2, \tag{2}$$

$$\rho(v_i, v_{\rho i}) = |v_i - (a_{\rho i} + b_{\rho i})/2| + (b_{\rho i} - a_{\rho i})/2. \tag{3}$$

由此得, 关联函数为:

$$K_j(v_i) = \begin{cases} -\rho(v_i, v_{ji})/|v_{ji}| & v_i \in v_{ji}, \\ \rho(v_i, v_{ji})/(\rho(v_i, v_{\rho i}) - \rho(v_i, v_{ji})) & v_i \notin v_{ji}. \end{cases} \tag{4}$$

其中: $\rho(v_i, v_{ji})$, $\rho(v_i, v_{\rho i})$ 为 V_i 到经典域和节域的距, $|v_{ji}|$ 为量值区间的模值, $K_j(v_i)$ 为指标 i 与等级 j 的关联度。

1.3 基于 G1 赋权法确定指标权重

在对港口危险性评价中, 由于各指标对危险性的影响程度不同, 需要合理地对每个指标赋予权重, 经过对比分析, 本文选用 G1 法对指标赋权^[18-19]。

1) 确定序关系

对于两个评价指标 W_i 与 W_j , 当评价标准为 $W_i > W_j (i, j = 1, 2, \dots, n)$ 时, 表示 i 项指标重要程度高于 j 项指标。对于上述指标集 $\{W_1, W_2, \dots, W_{10}\}$, 结合专家意见和原始数据的有效性从指标集中选出最重要的指标记为 W_1' ; 以此类推从余下的指标中逐个选取最重要的指标, 通过上述步骤确定唯一序关系: $W_1' > W_2' > \dots > W_{10}'$ 。

2) 相邻指标相对重要度

仅仅得到指标重要性顺序往往还不够, 需要准确得到各项指标的权重系数来评判其重要性程度。为表征邻近指标间的相对重要程度, 经专家理性评判商议后, 可通过参数 $r_k (1 \leq r_k \leq 1.8)$ 表示为:

$$r_k = q_{k-1}^*/q_k^*, k = 10, 9, \dots, 3, 2. \tag{5}$$

其中: q_{k-1}^* 、 q_k^* 表示相邻指标间的权重系数, r_k 取值越大, 表明相比之下前个指标的重要程度越大。

3) 权重系数计算

根据确定的 r_k 值可以得到第 n 个指标的权重系数, 即

$$q_k^* = [1 + \sum_{k=2}^n (\prod_{j=k}^n r_j)]^{-1}, q_{k-1}^* = r_k q_k^*, k = 10, 9, \dots, 3, 2. \tag{6}$$

1.4 计算危险评价综合关联度并确定港口危险等级

综合关联度计算式为:

$$K_j(\mathbf{R}_0) = \sum_{i=1}^n q_k \cdot K_j(v_i) \quad (7)$$

基于物元可拓理论, 对分属于我国五大港口群的 10 个危化品吞吐量较大的港口计算危险等级。这 10 个港口分别为: 大连港、天津港、青岛港、秦皇岛港、宁波—舟山港、上海港、厦门港、泉州港、湛江港和广州港。本文选取的定量指标来源于《中国港口年鉴》和《中国城市统计年鉴》, 定性指标来源于实地考察和专家学者商议给出的评分。由于字数限制, 以 2020 年天津港指标数据为例计算危险等级, 得: 危化品货物存储面积为 27 万 m²; 港口危化品货物吞吐量 7155 万 t; 专业化液体化工泊位 5 个; 原油、成品油泊位 7 个; 腹地原油 9.82 万 t; 天然气消费量 27.03 亿 m³; 石油、天然气及制品的年通过能力为 8100 万 t, 实际吞吐量 7329 万 t, 饱和程度为 90.5%。邀请港口方面专家, 石油公司管理人员和堆场管理者组成 10 人专家组。结合港口数据并按照表 2 中的危险等级评分标准, 去掉最大和最小值后取平均值, 作为待评物元 \mathbf{R}_0 的原始值 {6.7, 5.4, 5.3, 7.4, 5.1, 5.9, 4.4, 8.8, 7.4, 6.5}。取 I ~ IV 级港口危险性的量化区间作为经典域 \mathbf{R}_j , 危险等级的整体区间为节域 \mathbf{R}_p , 则

$$\mathbf{R}_j = \begin{pmatrix} N & I & II & III & IV \\ W_1 & (7.5, 10) & (5, 7.5) & (2.5, 5) & (0, 2.5) \\ W_2 & (7.5, 10) & (5, 7.5) & (2.5, 5) & (0, 2.5) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ W_9 & (7.5, 10) & (5, 7.5) & (2.5, 5) & (0, 2.5) \end{pmatrix}, \quad \mathbf{R}_p = \begin{pmatrix} N_p & W_1 & (0, 10) \\ & W_2 & (0, 10) \\ & \vdots & \\ & W_9 & (0, 10) \end{pmatrix}。$$

使用公式 (2)、(3) 计算各评价指标下的分值 V_i 到经典域和节域的距, 结合关联函数计算指标对应的危险等级关联度, 以指标 W_1 原始值为例, 计算出它与 I ~ IV 级的指标关联度为: $\rho(v_1, v_{11}) = 0.8$, $\rho(v_1, v_{21}) = -0.8$, $\rho(v_1, v_{31}) = 1.7$, $\rho(v_1, v_{41}) = 4.2$, $\rho(v_i, v_{pi}) = -3.3$, $K_1(v_1) = -0.195$, $K_2(v_1) = 0.320$, $K_3(v_1) = -0.340$, $K_4(v_1) = -0.560$ 。

根据计算结果可知, 指标 W_1 的危险等级关联度 $K_2 = 0.32$ 为最大值, 则评价其危险等级为 II 级。同理对剩余 9 个指标计算关联度并组成关联度矩阵 \mathbf{R} , 即

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} & I & II & III & IV \\ W_1 & -0.195 & 0.320 & -0.340 & -0.560 \\ W_2 & -0.213 & 0.210 & -0.080 & -0.167 \\ W_3 & -0.145 & 0.420 & -0.260 & -0.507 \\ W_4 & -0.372 & 0.121 & -0.080 & 0.387 \\ W_5 & -0.318 & 0.120 & -0.060 & -0.373 \\ W_6 & -0.193 & -0.120 & 0.240 & -0.301 \\ W_7 & -0.067 & -0.380 & 0.142 & -0.653 \\ W_8 & 0.420 & -0.402 & -0.413 & -0.620 \\ W_9 & 0.470 & -0.520 & -0.550 & -0.640 \\ W_{10} & -0.177 & 0.220 & -0.440 & -0.627 \end{pmatrix}。$$

邀请 5 位专家根据 G1 法原理, 对指标序关系进行确定, 在统一意见后得到优于序关系为: $W_4 > W_3 > W_1 > W_5 > W_2 > W_8 > W_{10} > W_9 > W_6 > W_7$, 记作 $W_1' > W_2' > \dots > W_{10}'$, 并对相邻指标间的重要度的参数 r_k 进行评价, 代入公式 (5) ~ (6) 求得各指标权重为 (0.1123, 0.0978, 0.1152, 0.1283, 0.1067, 0.0822, 0.0801, 0.0951, 0.0890, 0.0933)^T, 使用公式 (7) 计算港口危险等级综合关联度, 计算结果为: $K_1(v) = -0.2606$, $K_2(v) = 0.0289$, $K_3(v) = -0.1908$, $K_4(v) = -0.3792$ 。经过比

较可知 $\text{Max } K(v) = 0.0325$, 可以确定该港口的危险等级为 II 级。基于上述方法, 分别根据 2018、2020 两年的指标数据, 对上述 10 个主要港口进行危险等级评价, 共得到 20 组数据样本 (见表 2)。

表 2 港口危险等级评价
Tab.2 Prot hazard level evaluation

数据集	W_1	W_2	W_3	W_4	W_5	W_6	W_7	W_8	W_9	W_{10}	$\text{Max } K(v)$	危险等级
训练集	6.7	5.4	5.3	7.4	5.1	5.9	4.4	8.8	7.4	6.5	0.032 5	II
	6.6	6.5	6.4	5.0	7.2	8.1	5.2	6.9	4.5	9.5	0.143 1	I
	5.2	6.7	7.2	8.0	5.7	4.8	5.9	6.4	6.5	8.3	0.203 4	II
	3.4	5.1	4.8	5.5	2.3	5.4	7.0	4.8	3.8	5.0	0.074 2	III
	3.6	5.1	3.6	7.2	2.8	4.2	3.9	3.5	5.7	4.6	0.068 4	III
	1.3	4.0	2.4	5.4	3.3	2.5	1.8	1.5	6.0	2.3	0.088 1	IV
	7.7	8.8	3.6	8.3	8.0	9.3	9.8	7.2	6.4	8.3	0.156 8	I
	5.6	7.4	7.1	6.8	7.5	8.0	4.6	6.6	9.0	5.1	0.034 6	II
	6.1	5.6	5.7	6.7	5.9	6.2	7.0	4.9	5.3	6.9	0.011 4	II
	8.8	7.8	8.4	9.5	8.6	7.3	9.4	8.2	9.3	9.7	0.367 8	I
	3.2	2.8	4.7	3.7	5.7	1.3	2.3	2.7	8.0	3.5	0.068 1	III
	5.4	6.4	6.2	4.7	5.0	6.8	7.2	6.2	5.8	6.0	0.269 2	II
	8.1	7.2	9.3	6.2	7.3	8.3	9.2	8.2	6.4	7.1	0.034 6	I
	6.2	7.1	6.4	5.9	5.8	4.8	5.3	7.3	6.6	8.4	0.157 8	II
	7.2	7.3	9.4	8.3	5.3	5.8	6.7	5.6	6.4	9.6	0.047 1	I
测试集	5.3	7.2	6.1	8.2	5.2	6.5	6.8	7.1	8.2	6.4	0.0763	II
	1.2	3.4	4.4	2.2	3.1	2.7	1.3	1.8	3.1	1.1	0.5236	IV
	2.3	4.3	1.9	2.3	3.1	2.9	4.1	4.4	5.2	6.1	0.0234	III
	7.2	6.3	6.4	8.5	5.3	4.8	6.7	5.8	7.4	6.6	0.3012	II
	7.1	8.2	9.3	6.2	7.3	8.3	9.2	8.2	7.4	8.5	0.2212	I

2 基于 BP 神经网络的港口危险等级预测模型

BP 神经网络是目前使用较为广泛的一种人工神经网络, 沿着误差性能函数梯度的反方向修正权重与阈值, 经过反复循环迭代直到满足期望指标限制, 即达到对神经网络的训练效果。本文以表 2 中港口的 10 个指标数据作为数据输入样本, 危险综合评价作为输出样本进行训练, 故输入层节点数为 10 个, 输出层节点数为 1 个, 为防止出现过拟合现象, 使用经验公式^[20]得到本次训练模型的最优隐含层节点为 5 个。经验公式^[20]为: $L < n - 1$; $L < \sqrt{m + n} + a$; $L = \log_2 n$ 。其中: L 为隐藏层节点数, n 为输入节点数, m 为输出节点数, a 是 1 ~ 10 常数。

BP 神经网络对港口危险等级快速评价的具体步骤为:

1) 设输入向量 $x_i, i = 1, 2, \dots, 20$; 隐藏层向量为 $y_j, j = 1, 2, \dots, 5$; 实际输出为 y ; 期望输出值为 d ; v_{ij} 表示输入层 i 节点到隐藏层 j 节点的权值, a_j 为节点 j 到输出层权值; φ_j 代表中间层神经元阈值, $j = 1, 2, \dots, 5$ 。

2) 初始化权重值 $v_{ij}(0)$ 、 $a_j(0)$; 初始化阈值 $\varphi_k(0)$ 。其中初始值均为非零随机数。

3) 读取输入样本 $X = (x_1, x_2, \dots, x_{20})$ 及期望输出值 d , 并使用 mapminmax 函数进行归一化处理。

4) 对于隐藏层的输出 $y_i = f_i(\sum_j v_{ij}x_i - \varphi_j) = f_i(\text{net}_i)$, $f_i(*)$ 为输入节点和隐层节点间的传递函数;

输出层 $y = f(\sum_{j=1}^5 a_j y) = f(\text{net})$ 。

5) 计算各层学习误差, $\alpha = (d - y)^2 / 2$ 。

6) 不断调整修正权重值或阈值, $w_j(k + 1) = w_j(k) + \eta(d - y)y(1 - y) y_j$; $v_{ij}(k + 1) = v_{ij}(k) +$

$\eta w_j y_j (1 - y_j) x_i$ 。其中: k 为迭代次数, η 为学习系数 ($0 < \eta < 1$)。随着不断迭代, 直到输出结果与期望值误差小于设定值时, 结束训练。

3 实例验证

将表 2 中的 20 个数据随机划分为 15 个训练集和 5 个测试集作为模型的输入层, 模型中采用的传递函数为 Purelin, 训练函数为 Levenberg-Marquardt (trainlm), 这样既具有梯度下降法的全局收敛性又有更快的收敛速度, 可大幅减少训练时间。此外, 它还具有较强的容错能力、较好的预测可靠性和较高的准确性。本次训练通过 Matlab-2020b 运行, 读取输入层数据后将其归一化到 $(-1, 1)$ 之间, 设置的模型参数为: 训练次数 1000、学习速率 0.01、目标训练最小误差 0.000 01。经过循环迭代, 得到测试集的训练结果与实际相近。训练过程如图 1 所示, 模型预测结果误差如图 2 所示, 从图 1 ~ 2 中可看出经过 5 次迭代可达到预期精度且误差精度小于 10^{-5} 。

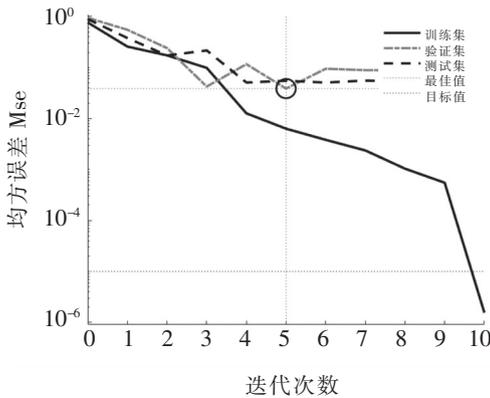


图 1 神经网络训练过程

Fig.1 Neural network training process

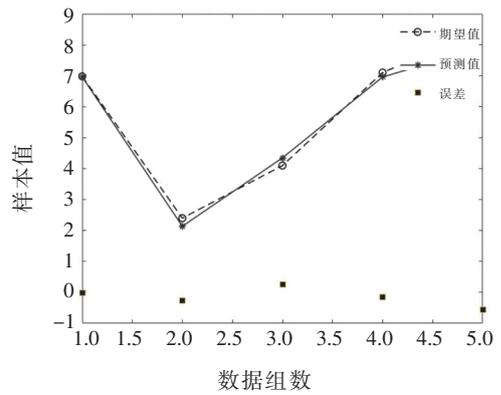


图 2 神经网络预测结果与真实值误差对比

Fig.2 Comparison of error between neural network prediction results and actual values

为直观了解模型的误差程度, 本文采用三种误差统计方法, 分别是平均绝对误差 (mean absolute error, MAE)、最大绝对误差 (mean squared error, MSE) 和均方根误差 (root mean square error, RMSE)。

具体计算公式如下: $MAE = \frac{1}{n} \sum |y_i - \hat{y}_i|$, $MSE = \frac{1}{n} \sum (y_i - \hat{y}_i)^2$, $RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (y_i - \hat{y}_i)^2}$ 。

由此求得神经网络的输出结果平均绝对误差为 0.2489; 均方误差为 0.0951; 均方根误差为 0.3084。将测试集中的 5 组数据作为输入样本代入模型, 输出的评价结果如表 3 所示。由表 3 中数据可知, BP 神经网络模型模拟输出结果与实际等级之间具有良好的一致性, 且误差完全在可接受范围内, 说明此训练模型适用于港口危险等级快速评价中。

表 3 模型评估等级

Tab.3 Malel evaluation level

序号	实际等级	结果数值	评价等级
5	II	6.963 6	II
9	IV	2.138 5	IV
11	III	4.349 6	III
18	II	6.963 6	II
20	I	7.930 9	I

4 结论

本文建立物元可拓-BP 神经网络模型, 对各港口危险等级进行评价并得出以下结论:

1) 结合 WSR 方法论, 从物理—事理—人理三方面入手构建了包含 10 个影响因素的港口危险等级评价指标体系。引入 G1 权重分析法, 根据专家打分算出每个指标的权重, 结果说明港口石油、天然气及制品的年设计通过能力饱和度 (0.1283), 原油、成品油和专业液体化工泊位数量 (0.1152), 港口危化品存储堆场面积 (0.1123) 是对港口危险等级评价影响最大的三个指标。

2) 提出基于物元可拓理论的港口危险等级评价, 对突出指标构建经典域和节域, 计算待测物元

的 10 个指标与各危险等级的综合关联度。以此方法对大连港、天津港、青岛港、秦皇岛港、宁波—舟山港、上海港、厦门港、泉州港、湛江港和广州港等 10 个我国危险货品吞吐量较大的港口进行危险等级评价。

3) 以港口指标评分数据作为 BP 神经网络数据输入, 以港口危险等级综合评分作为输出, 将数据经过多层映射, 通过学习与训练找到输入输出间的内在联系, 从而达到快速评价的目的。结果显示模型输出等级与实际危险等级基本一致, 且避开人为因素的主观影响, 减少评价结果的不确定性。在港口企业与政府监管部门获取各指标数据后, 应用该模型可快速了解待测港口危险性, 以便及时做出规划管理。

[参 考 文 献]

- [1] 徐亮. 大连油品码头生产安全性研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2019.
- [2] 于庆增, 张恒洋, 陈帅. 从黎巴嫩贝鲁特港区重大爆炸事故论港口危化品安全管理[J]. 港口科技, 2020, (11): 4-7, 14.
- [3] BERG H P. Human factors and saafety culture in maritime safety[J]. Transnav International Journal on Marine Navigation & Safety of Sea Transportation, 2013, 7(3): 343-352.
- [4] 黄耀惊, 许拴梅, 姜苗苗, 等. 基于博弈论组合赋权的航道水域通航安全评价[J]. 安全与环境学报, 2021, 21(6): 2430-2437.
- [5] ZHANG M, ZHANG D, FU S, et al. A predictive analytics method for maritime traffic flow complexity estimation in inland waterways[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2022, 220(1): 108317.
- [6] GOERLANDT F, MONTEWKA J. A framework for risk analysis of maritime transportation systems: a case study for oil spill from tankers in a ship-ship collision[J]. Safety Science, 2015, 76: 42-66.
- [7] CHEN J H, ZHENG H Y, WEI L, et al. Factor diagnosis and future governance of dangerous goods accidents in China's ports [J]. Environmental Pollution, 2020, 257: 113582(1-8). DOI: 10. 1016/j. envpol. 2019. 113582.
- [8] 周欢, 刘家国, 王晓焯, 等. 基于 WRT 方法的港口危化品物流风险评估研究[J]. 系统工程理论与实践, 2020, 40(8): 2051-2064.
- [9] WANG X F, XIE J J, LIU Y H. RFID application in dangerous chemicals safety management[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 199: 1261-1264.
- [10] 周荣义, 林金玉, 刘勇. 危险货物道路运输风险评估的集对模型及应用[J]. 中国安全科学学报, 2019, 29(1): 173-179.
- [11] MOHRI S S, MOHAMMADI M, GENDREAU M, et al. Hazardous material transportation problems: a comprehensive overview of models and solution approaches[J]. European Journal of Operational Research, 2021, 302(1): 1-38.
- [12] 李建民, 刁亚琳, 宋绍珍, 等. 海上危化品运输系统安全突变评价[J]. 上海海事大学学报, 2015, 36(4): 6-10.
- [13] SI H, JI H, ZENG X. Quantitative risk assessment model of hazardous chemicals leakage and application[J]. Safety Science, 2012, 50(7): 1452-1461.
- [14] 李丽, 周荣义, 王凌睿, 等. 基于后悔理论的危化品公路桥梁运输风险评估[J]. 安全与环境工程, 2022, 29(2): 71-77.
- [15] 许茂增, 王纪东. 内河危化品码头安全风险评估[J]. 重庆交通大学学报(社会科学版), 2014, 14(1): 27-31, 51.
- [16] 马小龙, 冷伟冬, 王志云. 内河新型铁矿石港口企业的安全风险评估[J]. 现代矿业, 2021, 37(8): 242-245.
- [17] 张鸿雁, 宋吟秋, 王德卿, 等. 基于 WSR 方法论的沿海地区环境污染治理评价体系构建研究[J]. 管理评论, 2021, 33(7): 290-300.
- [18] 王福生, 高湛翔, 董宪伟, 等. 基于物元可拓理论的化工企业风险评价[J]. 安全与环境学报, 2021, 21(6): 2401-2406.
- [19] 李茹, 马育林, 田欢, 等. 基于熵值和 G1 法的自动驾驶车辆综合智能定量评价[J]. 汽车工程, 2020, 42(10): 1327-1334.
- [20] 魏强, 刘加奇, 王景春, 等. 基于理想模糊物元的隧道施工安全韧性[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(8): 62-68.

(责任编辑 朱雪莲 英文审校 周云龙)