



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2406095

引用格式:伍佳妮,侯晶,石家豪,等.基于云模型的危险品跨境多式联运风险评价[J].科学技术与工程,2024,24(36):15736-15742.

Wu Jiani, Hou Jing, Shi Jiahao, et al. Risk assessment of cross-border multimodal transportation of dangerous goods based on cloud model [J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(36): 15736-15742.

# 基于云模型的危险品跨境多式联运风险评价

伍佳妮<sup>1</sup>, 侯晶<sup>1</sup>, 石家豪<sup>1</sup>, 杨磊<sup>2</sup>

(1. 长安大学经济与管理学院, 西安 710064; 2. 长安大学运输工程学院, 西安 710064)

**摘要** 跨境运输与多式联运为风险程度本就居高的危险品运输带来了更为复杂的风险环境。为有效地评价危险品跨境多式联运风险,在“人、机、管、环”4M因素(变量)的基础上,将跨境多式联运中的“转运”和“国际关系”两个因素考虑进去,并将这6个因素作为决策问题中的属性;在指标因素具有随机性和模糊性的基础上,运用云模型实现定性概念与定量数据之间的相互转换,从而对危险品跨境多式联运的风险进行综合评价,并进行实例验证。仿真实验结果表明:对危险品跨境多式联运安全影响较大的风险因素有安全规则明确程度、操作规范程度、气象环境、国际政治和经济等因素,需采取相应的措施防患于未然;同时验证了提出的定量评价方法能够全面地剖析事故发生因素。

**关键词** 云模型; 危险品运输; 跨境多式联运; 风险评价

中图分类号 X951;

文献标志码 A

## Risk Assessment of Cross-border Multimodal Transportation of Dangerous Goods Based on Cloud Model

WU Jia-ni<sup>1</sup>, HOU Jing<sup>1</sup>, SHI Jia-hao<sup>1</sup>, YANG Lei<sup>2</sup>

(1. School of Economics and Management, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. School of Transportation Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

**[Abstract]** Cross-border transportation and multimodal transport have brought a more complex risk environment to the already high-risk transportation of dangerous goods. To effectively evaluate the risk of cross-border multimodal transportation of dangerous goods, based on the 4M factors (variables) of “human, machine, management and environment”, the two factors of “transshipment” and “international relations” in cross-border multimodal transportation were considered, and the six factors were taken as the attributes in the decision-making problem. Based on the randomness and fuzziness of the index factors, the cloud model was used to realize the mutual conversion between qualitative concepts and quantitative data, and the risk of cross-border multimodal transportation of dangerous goods was comprehensively evaluated and verified by the example. The simulation results show that the risk factors have a greater impact on the safety of cross-border multimodal transport of dangerous goods include the clarity of safety rules, the degree of operational norms, meteorological environment, international politics and economy, and corresponding measures should be taken to prevent them. At the same time, it is verified that the proposed quantitative method can comprehensively analyze the accident factors.

**[Keywords]** cloud model; dangerous goods transport; cross-border multimodal transportation; risk assessment

随着中国石油、天然气、化工原料的进出口加速增长,危险货物跨境运输、多式联运的需求日益增加,国际危险品运输管理也一直受到有关国际组织和国家的高度重视。由于中国区域发展的不平衡,导致大部分危险品存在产销分离,跨境或跨区域运输是非常必要的。在跨境运输过程中,因为交易双方相距较远,总运输时间长,会涉及多个国家、地区的人员、设施、流程等,不确定因素较

多,在一定程度上给跨境运输带来了更多的风险。因此,传统的单一的运输方式已经不能满足危险品长距离运输的需求,而是需要多种运输方式联合起来完成一次联合运输。而多式联运能够充分整合不同运输方式的优势,有效地降低运输成本,最大程度满足运输需求,并使运输总风险最小化。推动多式联运高质量发展是优化调整运输结构、构建现代综合交通运输体系、加快建设交通强国

收稿日期: 2024-08-14; 修订日期: 2024-12-16

基金项目: 国家自然科学基金(72104037); 陕西省社会科学基金(2021D024); 陕西省创新能力支撑计划(2024ZC-YBXM-126); 中央高校基本科研业务费项目(300102231647)

第一作者: 伍佳妮(1984—),女,瑶族,湖南溆浦人,博士,副教授,博士研究生导师。研究方向:物流运输、交通运输安全。E-mail: jianiwu@chd.edu.cn.

的重要内容。对危险品跨境多式联运风险的准确评估与有效控制,是推进多式联运高质量发展的必要推手。

跨境多式联运构成要素众多,且危险品具有易燃、易爆、强烈腐蚀性等性质,内部要素的复杂性和外部环境的不确定性使得危险品多式联运过程容易受到各种风险因素干扰。这些风险因素之间往往会互相影响,在运输途中一旦发生事故,往往会衍生出更严重的后果,造成经济损失、环境污染、生态破坏、人员伤亡等一系列的社会问题。因此,为了确保危险品跨境多式联运的顺利进行,有必要针对运输过程中的风险影响因素进行评估,明晰其层次结构,从而采取相应的防控措施。

目前关于多式联运风险管理的研究主要针对风险评价指标、评价模型选取的定性研究以及风险影响因素的定量评估这两方面。在风险评价指标选取方面,贺政纲等<sup>[1]</sup>在“人、机、管、环”4M理论的基础上,添加了“转运”这一风险因素,并运用犹豫直觉模糊语言集与优劣解距离法(technique for order preference by similarity to an ideal solution, TOPSIS)相结合的方法对危险品多式联运进行精准的风险评估。梁雪琴<sup>[2]</sup>从“人、机、管、环”4个方面识别出了危险品运输风险影响因素,并结合客观实际建立评价指标体系,通过构建二维云模型,对其风险等级进行综合评价。Kaewfak等<sup>[3]</sup>通过整合模糊集理论和失效模式及效应分析,提供了一种结构化的方法来统计预测多式联运风险,解决了传统风险评估中的不精确性。王馨梓等<sup>[4]</sup>从人、机、环境的角度全面分析了危险品在不同运输方式下的主要风险影响因素,并建立风险评价指标体系。Liao等<sup>[5]</sup>提出了一种基于超网络理论的多式联运模型,提供了改进韧性和优化风险管理的对策。目前关于多式联运风险评估的文献很多,但专门针对危险品跨境多式联运风险评估的研究还很少;且现有风险指标大多是从人、机、管、环、转运五方面进行选取,对于国际政策、国际经济等涉及的跨境影响因素研究较少,风险评价指标体系构建并不全面。

在评价模型选取方面,法慧妍等<sup>[6]</sup>建立了工作分解结构-风险分解结构(work breakdown structure-risk breakdown structure, WBS-RBS)直觉模糊风险矩阵,并结合投影法与专家信息,选取直觉模糊加权平均算子计算中欧班列多式联运各风险因素的大小,对其进行排序。韩言虎等<sup>[7]</sup>运用解释结构模型对多式联运网络中的风险因素进行定性定量结合分析。Yang等<sup>[8]</sup>通过三角模糊数降低评估过程中的信息损失,同时采用综合权重模型优化群体决

策,为资源分配和危险品运输风险管理政策制定提供科学依据。贺政纲等<sup>[9]</sup>运用改进过的WBS-RBS方法,得到了多式联运网络的风险矩阵,从而对其进行风险排序。张吉祥等<sup>[10]</sup>针对交通流与危险品运输风险的关系,从对事故概率和事故后果的影响角度出发,构建了考虑交通流的运输风险评价模型。Gul等<sup>[11]</sup>提出了一种基于模糊层次分析法(fuzzy analytic hierarchy process, FAPH)和模糊多准则妥协解排序法(fuzzy vlskriterijumska optimizacija i kompromisno resenje, FVIKOR)的风险评估方法。Huang等<sup>[12]</sup>运用尖点突变模型对铁路危险品运输系统风险状态进行分析,通过风险事故灾难树将铁路危险品运输的风险划分为五类。Li等<sup>[13]</sup>通过考虑风险因素级联传播和项目双重相互依赖效应,提出一种基于决策试验与评价实验室、双加性丘奎特积分和模糊推理的混合模糊方法,用于对跨境项目进行风险评估。Koohathongsumrit等<sup>[14]</sup>通过提出一种新的模糊风险评估模型、数据包络分析和多标准决策的集成框架,对多式联运网络中的风险进行分析。在对多式联运风险进行评价时因为无法获得大量的定量数据,因此现有研究多以定性指标和定性数据为主,且未将风险指标存在的模糊性和随机性考虑在内,评估结果的可靠性较低。鉴于此,将云模型引入危险品跨境多式联运风险评价,构建涵盖“人、机、管、环、转运、国际关系”6个维度的全面风险评价指标体系,弥补传统研究中定性分析主观性强、定量数据不足及跨境因素考虑不足的局限;通过定性定量数据的转化,提高了评价结果的准确性。面对中国危险品运输需求快速增长和跨境运输复杂性增加的现实,所提出的评价方法为降低运输风险、优化管理策略提供了科学依据,对推动危险品跨境运输安全与多式联运高质量发展具有重要意义。

## 1 危险品跨境多式联运风险识别

中国危险货物运输市场情况基本与去年保持持平,运输总量保持在18亿t。从运输方式来看,公路运输占比仍超过60%,是主要运输方式,铁路运输近年来徘徊在1.6亿t,水运的运量约为4亿t,而航空运输的量很少,如图1所示。

多式联运是指由两种及其以上的交通工具相互衔接、转运而共同完成的运输过程。危险品跨境多式联运可以有效整合不同运输方式的优势,减少中间的不必要环节,缩短货物运输时间,一般由一个多式联运经营人对整个跨境多式联运过程负总责,其运作流程如图2所示。基本流程为:①接受托

运申请并签订多式联运合同;②集装箱发放、提取和运送;③出口报关,根据发货地点,可在港口或离起运点最近的海关办理;④危险货物装箱并进行加封;⑤货物订舱和运输安排,通常由多式联运经营人制定科学合理的运输计划;⑥办理保险;⑦签发提单并组织运输;⑧海关业务,包括相应的通关和报税手续;⑨交付货物。若存在事故,还需进行事故处理。

在对危险品跨境多式联运风险进行评估时,通过梳理现有相关文献,发现大多数文献都以4M理论为基础进行风险因素识别。在参考贺政纲等<sup>[1]</sup>关于多式联运网络风险因素识别的基础上,考虑到在跨境运输过程中会涉及国际关系风险,因此将以“人、机、管、环、转运、国际关系”这6个方面来识别危险品跨境多式联运中的风险因素,如表1<sup>[1-2,4-9,15-20]</sup>所示。

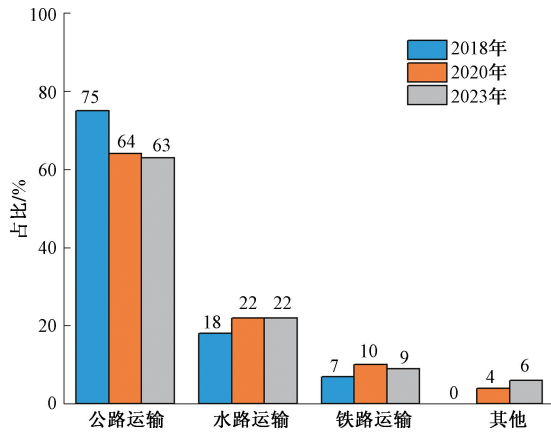


图1 中国近年危险货物运输方式变化

Fig. 1 Changes in the transportation modes of dangerous goods in China in recent years

## 2 基于云模型的风险评价

### 2.1 云模型基本理论

云模型是一种用于解决不确定性问题的数据建模分析方法,它通过概率分布函数来进行模型构建,能最大程度地降低定量数据不充足、评价指标主观性强等因素对评估结果的影响。当前,云模型

表1 风险评价指标及其参考依据<sup>[1-2,4-9,15-20]</sup>

Table 1 Risk evaluation index and references<sup>[1-2,4-9,15-20]</sup>

一级指标	二级指标	参考依据
货物与设备风险 $A_1$	危险货物理化性质 $B_1$	文献[5-6,15]
	装卸搬运设施设备 $B_2$	文献[4-5,16]
	信息处理设施设备 $B_3$	文献[1,4,8]
	运输工具 $B_4$	文献[2,4-5]
	存储设施 $B_5$	文献[2,4-5]
转运风险 $A_2$	转运量 $B_6$	文献[4,9,17]
	转运路线 $B_7$	文献[2,4,16]
	转运设施设备 $B_8$	文献[4,6,17]
人员风险 $A_3$	转运次数 $B_9$	文献[4,16-17]
	安全规则明确程度 $B_{10}$	文献[4-6]
	操作规范程度 $B_{11}$	文献[2,4-5]
	人员技能资历 $B_{12}$	文献[1,4,8]
管理风险 $A_4$	人员工作强度 $B_{13}$	文献[1,4,16]
	人员应变能力 $B_{14}$	文献[2,6,16]
	运输资质管理 $B_{15}$	文献[1,4,16]
	运输方式管理 $B_{16}$	文献[4,16,18]
环境风险 $A_5$	运输路线管理 $B_{17}$	文献[2,6,16]
	运输时间管理 $B_{18}$	文献[6,9,17]
	气象环境 $B_{19}$	文献[2,16-17]
	地理环境 $B_{20}$	文献[4,6-7]
国际关系风险 $A_6$	社会环境 $B_{21}$	文献[1,4,8]
	路况环境 $B_{22}$	文献[1,6,16]
	公共政策 $B_{23}$	文献[1,19-20]
	国际经济 $B_{24}$	文献[1,18-19]
	国际政治 $B_{25}$	文献[1,18-19]

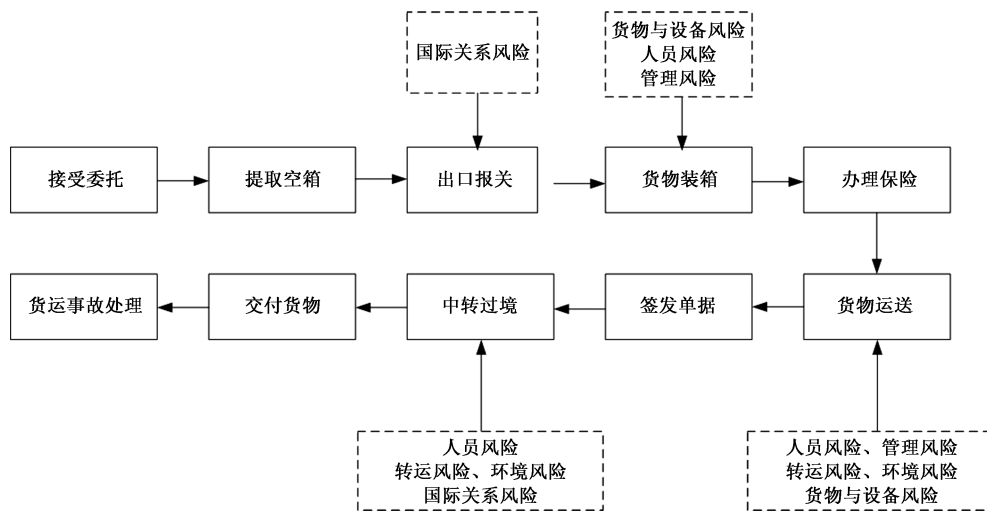
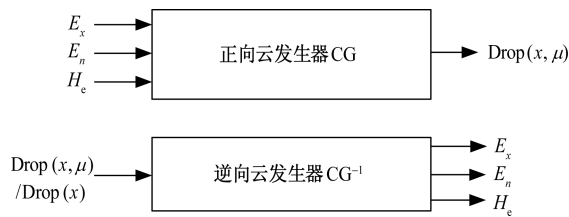


图2 危险品跨境多式联运流程图

Fig. 2 Flow chart of cross-border multimodal transport of dangerous goods

已在众多领域中得到广泛应用,并适用于多种场景的风险评价。贺佳伟等<sup>[21]</sup>采用基于多指标熵权云模型的评估方法,探讨了不同风险层级下的车载动力锂电池火灾风险指标隶属度特性,并提供了风险预防措施。魏盛宇等<sup>[22]</sup>提出了一种基于博弈论组合赋权云物元城市道路交通系统风险评价模型。

云模型源于信息科学,可以用3个数字特征表示,分别为 $E_x$ 、 $E_n$ 、 $H_e$ 。其中, $E_x$ 为期望值,表示相应的定性概念在论域空间的中心值; $E_n$ 为熵,是对期望不确定性的度量,熵值越大,表示定性概念的随机性和模糊性就越大; $H_e$ 为超熵,是熵的不确定性的度量,用来反映云滴的离散程度;云发生器是定性概念和定量数据相互转化的重要生成算法,并依托于MATLAB来实现其计算过程。云发生器有正逆向之分,如图3所示。正向云发生器指从定性到定量的转换,即把评价指标的3个数字特征值转化为云滴的过程;逆向云发生器指从定量向定性的转换,即输入云滴数 $x$ 及其确定度 $u(x)$ ,可以输出云模型的3个数字特征,见式(1)。



Drop( $x, \mu$ )为该云表示的语言值在数量上的一次具体实现,其中, $x$ 为定性概念在论域中这一次对应的数值; $\mu$ 为这个数值的可靠性的量度

图3 云发生器

Fig. 3 Cloud generator

$$\begin{cases} E_x = \frac{1}{q} \sum_{i=1}^q x_i \\ E_n = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{q} \sum_{i=1}^q |x_i - E_x| \\ H_e = \sqrt{|S^2 - E_n^2|} \\ S^2 = \frac{1}{q-1} \sum_{i=1}^q (x_i - E_x)^2 \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: $q$ 为样本数量; $S^2$ 为样本方差; $x_i$ 为第 $i$ 个样本点的值,对应专家给出的评分。

### 2.2 云模型评价过程

具体实施步骤如下。

**步骤1** 构建危险品跨境多式联运风险评价指标体系。

**步骤2** 数据收集与处理。对危险品跨境多式联运风险因素的相关数据进行统计收集,从中获取随机事件的事故发生概率 $p$ 和产生后果 $c$ 的样本数据。

**步骤3** 评价标准云的确定。由于无法获得大量数据,采用黄金分割法生成定性权重评语云,如表2所示。根据标准云的特征参数,利用正向云生成器在MATLAB中生成标准云图,如图4所示。

**步骤4** 基于云模型理论,运用逆向发生器生成各项评价指标的数字特征值标准云,并运用式(2)计算二级指标的标准云。

$$\begin{cases} \bar{E}_x = \frac{S_j^{\max} + S_j^{\min}}{2} \\ \bar{E}_n = \frac{S_j^{\max} - S_j^{\min}}{6} \\ \bar{H}_e = \left[ \frac{\bar{E}_x}{100}, \frac{\bar{E}_n}{10} \right] \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中: $\bar{E}_x$ 、 $\bar{E}_n$ 、 $\bar{H}_e$ 分别为标准云的期望、熵和超熵; $S_j^{\max}$ 和 $S_j^{\min}$ 分别为区间 $j$ 的上下限值。

**步骤5** 计算一级指标风险云。将上述计算得到的二级风险指标特征参数和权重代入式(3)进行合成运算,得到一级指标风险云。

$$\begin{aligned} C &= (w_1, w_2, w_3) \begin{bmatrix} E_{x1} & E_{n1} & E_{e1} \\ E_{x2} & E_{n2} & E_{e2} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ E_{xn} & E_{nn} & E_{en} \end{bmatrix} \\ &= (E'_x, E'_n, H'_e) \end{aligned} \quad (3)$$

式(3)中: $C$ 为一级指标风险云; $w_1$ 、 $w_2$ 、 $w_3$ 为权重;

表2 标准云特征参数

Table 2 Standard cloud characteristic parameters

权重范围	0~0.2	0.2~0.4	0.4~0.6	0.6~0.8	0.8~1
强度等级	一级	二级	三级	四级	五级
语言描述	不重要	次重要	一般重要	比较重要	非常重要
期望值	0.1	0.3	0.5	0.7	1.0
熵	0.033	0.033	0.033	0.033	0.033
超熵	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005

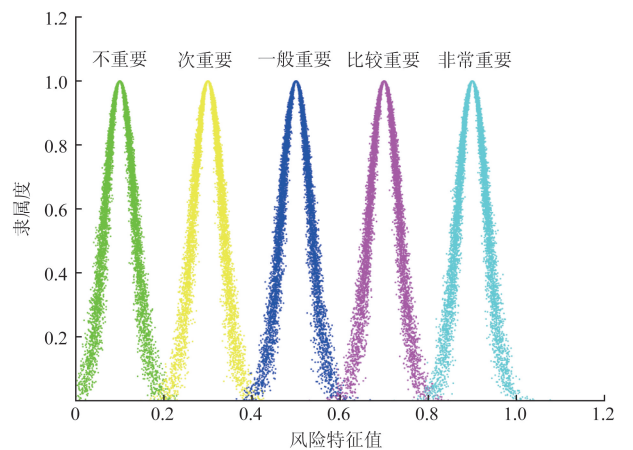


图4 标准云图

Fig. 4 Standard cloud

$E'_x$ 、 $E'_n$ 、 $H'_e$  分别为一级风险云的期望、熵、超熵。

**步骤6** 综合评价云,重复步骤5 计算得出综合风险云,并运用 MATLAB 编程生成综合评价风险云图,据此判断危险品跨境多式联运各风险影响因素的风险等级以及整个运输网络的风险等级。

### 3 算例分析

危险品跨境多式联运风险事件的发生概率和产生的后果都具有模糊性和随机性,对其进行的风险评估也是在主观判断的定性信息和事故案例定量数据相结合的基础上进行的。因此,运用云模型对危险品跨境多式联运风险进行仿真,将定性信息转化为定量数据进行分析,使得评价结果更加客观和可靠。

中国是世界上第一大原油进口国,主要海上原油进口国集中在中东、南非、北非以及南美等国家。2022 年中国自俄罗斯进口原油 8 625 万 t,同比增长 8%,主要采用陆路—管道以及管道—海运方式进行运输。其远东港口 Kozmino 港是向中国出口的主要始发港,占比为 77.53%。以此为例,分析并评价原油跨境多式联运过程的风险。

#### 3.1 二级指标云模型

邀请多位从事危险品运输行业的资深专家对涉及的二级指标发生概率和产生后果进行独立性赋值,将收集到的风险因素发生概率和产生后果进行整理分析,并使用云模型的逆向云发生器求解得出各个二级指标评价云的数字特征值,如表 3 所示。

通过各二级指标云与标准云的对比,得出人员因素中的安全规则明确程度和操作规范程度比较重要,需增加从业人员的定期培训和管理制度的落实等政策制定,以降低运输途中因人员因素造成风险事故的可能性。人员技能资历、运输资质管理、

表 3 二级指标评价云数字特征

Table 3 Cloud numerical features of secondary indicators

指标	$(E_{x0}, E_{n0}, H_{e0})$	指标	$(E_{x0}, E_{n0}, H_{e0})$
$B_1$	(0.372 0, 0.013 0, 0.007 1)	$B_{14}$	(0.252 0, 0.013 0, 0.000 3)
$B_2$	(0.312 8, 0.207 7, 0.043 1)	$B_{15}$	(0.442 4, 0.079 6, 0)
$B_3$	(0.183 6, 0.022 5, 0.009 7)	$B_{16}$	(0.190 8, 0.057 4, 0)
$B_4$	(0.284 0, 0.054 1, 0)	$B_{17}$	(0.268 0, 0.009 0, 0.006 2)
$B_5$	(0.295 0, 0.059 2, 0.022 9)	$B_{18}$	(0.236 0, 0.033 1, 0.019 6)
$B_6$	(0.1484, 0.016 4, 0.010 0)	$B_{19}$	(0.514 0, 0.186 5, 0)
$B_7$	(0.268 6, 0.011 6, 0)	$B_{20}$	(0.281 2, 0.054 9, 0.022 0)
$B_8$	(0.272 0, 0.048 1, 0)	$B_{21}$	(0.123 2, 0.023 3, 0.008 0)
$B_9$	(0.177 6, 0.014 9, 0.010 0)	$B_{22}$	(0.312 0, 0.051 1, 0.026 6)
$B_{10}$	(0.621 0, 0.108 8, 0.021 8)	$B_{23}$	(0.398 2, 0.037 9, 0)
$B_{11}$	(0.602 2, 0.060 5, 0)	$B_{24}$	(0.421 2, 0.1241, 0)
$B_{12}$	(0.471 0, 0.054 1, 0.005 0)	$B_{25}$	(0.434 0, 0.050 1, 0.025 4)
$B_{13}$	(0.142 0, 0.027 1, 0.015 4)		

气象环境、国际经济与国际政治属于一般至比较重要,承运人在运输公司的选择及其后续工作方面加强管理,针对气象环境的影响要事先做好预防措施等,在进行跨境运输时需要注意不同国家在海关方面政策的调整以及汇率变化。

#### 3.2 一级指标云模型

将二级指标特征参数及其权重代入式(3)进行合成运算,得到一级指标云模型参数,如表 4 所示。

表 4 一级指标特征参数

Table 4 Characteristic parameters of primary indicators

指标	$(E_{x0}, E_{n0}, H_{e0})$
$A_1$	(0.316 7, 0.027 6, 0.008 6)
$A_2$	(0.235 1, 0.041 8, 0.008 7)
$A_3$	(0.423 9, 0.048 9, 0.006 1)
$A_4$	(0.325 8, 0.055 0, 0.002 2)
$A_5$	(0.345 3, 0.069 1, 0.022 7)
$A_6$	(0.418 2, 0.083 0, 0.006 6)

#### 3.3 综合云模型

重复上述步骤,进行一级风险指标特征参数和权重的合成运算,得到的综合评价云数字特征为  $E_x = 0.341 1$ ,  $E_n = 0.050 8$ ,  $H_e = 0.010 0$ 。用 MATLAB 编程软件将综合评价云与标准云进行对比,如图 5 所示。可以看出,该危险品跨境多式联运作业流程属于次重要与一般重要之间,需要针对运输过程中可能出现的具体问题提出相应的事先预防和事后控制措施。

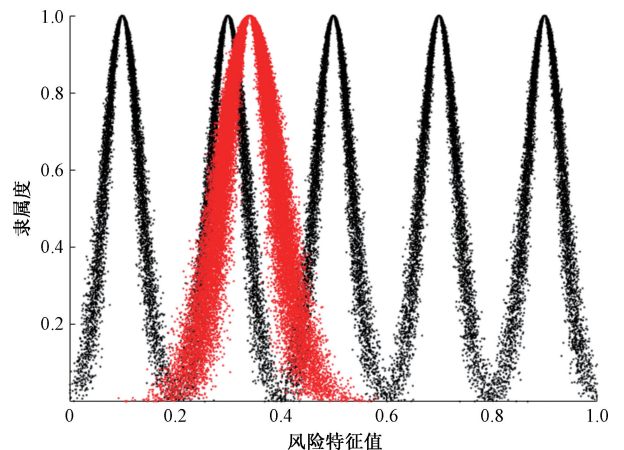


图 5 云模型对比图

Fig. 5 Cloud model comparison

## 4 结论

(1) 为了对危险品跨境多式联运进行综合风险评估,在 4M 理论的基础上,考虑到转运过程以及在跨境过程中会涉及的国际关系,从 6 个方面来系统地识别危险品跨境多式联运过程中的风险因素,并以此构建评价指标体系,是对以往研究的有益补充。

(2)运用云模型对危险品跨境多式联运过程进行风险仿真结果表明,采用提出的6个因素风险评价方法可以更好地完成从定性概念到定量数据的转换,并提高了风险评价的准确性。通过生成的云图,可以得到更加直观的风险评价结果。

(3)为了预防和控制危险品跨境多式联运风险事故的发生,多式联运经营人应该综合识别出运输过程中可能会出现风险影响因素,并针对每种影响因素提出具体的预防和管理措施。如人员风险方面,需加强对重点操作人员的选拔与培训,提高工作人员对石油等危险品的特殊理化性质、运输工具使用、装卸搬运具体操作要求、跨境运输手续等内容的认知水平,不断提高工作人员的综合素质,充分调动人员的积极性与主动性,从根本上降低人为因素的影响。在运输过程中,需要加强与途径国家的密切联系,关注其海关政策、地缘政治、国际经济的变化对于危险品运输可能造成的影响;同时需要加强对石油运输全过程的监管,建立有效的信息沟通机制,以便遇到突发状况,中外各运段的实际承运人可以及时进行沟通并制定出解决方案。对于环境风险,则需要专业技术人员对危险品运输过程中的路况和自然环境变化进行实时监测分析,采用事先进行预防,事中以正确的方法用控制的方式进行防范。

### 参 考 文 献

- [1] 贺政纲,郭静妮,徐君翔. 基于犹豫直觉模糊集-TOPSIS的危险品多式联运风险评估[J]. 安全与环境学报, 2020, 20(1): 19-24.  
He Zhenggang, Guo Jingni, Xu Junxiang. Security risk assessment for the risk cargos transportation in the multimodal transfer based on the hesitant intuitionistic fuzzy set-TOPSIS[J]. Journal of Safety and Environment, 2020, 20(1): 19-24.
- [2] 梁雪琴. 危险品道路运输风险等级综合评价[J]. 公路交通科技, 2022, 39(4): 184-190.  
Liang Xueqin. Comprehensive evaluation of risk level of road transport of dangerous goods[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2022, 39(4): 184-190.
- [3] Kaewfak K, Pharino C, Ouappara N. Advanced analytical methods for risk mitigation in multimodal freight transport[J]. Symmetry, 2024, 16(10): 1394.
- [4] 王馨梓,肖荣娜,赵南希,等. 危险货物运输风险分级指标评价体系研究[J]. 公路交通科技, 2020, 37(S1): 10-14.  
Wang Xinzi, Xiao Rongna, Zhao Nanxi. Study on risk classification indicator evaluation system for dangerous goods transport[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2020, 37(S1): 10-14.
- [5] Liao R Q, Liu W, Yuan Y D. Resilience improvement and risk management of multimodal transport logistics in the post-COVID-19 era: the case of TIR-based sea-road multimodal transport logistics [J]. Sustainability, 2023, 15(7): 6041.
- [6] 法慧妍,帅斌,吕敏,等. 基于WBS-RBS和IFWA算子的中欧班列多式联运安全风险评估[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(6): 200-206.  
Fa Huiyan, Shuai Bin, Lü Min, et al. Safety risk assessment of multimodal transportation of China Railway Express based on WBS-RBS and IFWA operator[J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(6): 200-206.
- [7] 韩言虎,耿亚芳. 基于FISM的多式联运网络风险结构模型研究[J]. 公路交通科技, 2018, 35(9): 152-158.  
Han Yanhu, Geng Yafang. Study on risk structure model of multimodal transport network based on FISM[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2018, 35(9): 152-158.
- [8] Yang Q, Chin K S, Li Y L. A quality function deployment-based framework for the risk management of hazardous material transportation process[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2018, 52: 81-92.
- [9] 贺政纲,郭静妮,徐君翔. 基于WBS-RBS和PFWA算子的多式联运网络安全风险评估[J]. 安全与环境学报, 2020, 20(2): 441-446.  
He Zhenggang, Guo Jingni, Xu Junxiang. On the safety risk assessment of the multimodal transportation network based on the WBS-RBS and PFWA operator[J]. Journal of Safety and Environment, 2020, 20(2): 441-446.
- [10] 张吉祥,柴获. 考虑交通流的危险品运输风险评估研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2023, 47(6): 1035-1041.  
Zhang Jixiang, Chai Huo. Risk assessment of hazardous materials transportation considering traffic flow saturation[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2023, 47(6): 1035-1041.
- [11] Gul M, Guven B, Guneri A F. A new Fine-Kinney-based risk assessment framework using FAHP-FVIKOR incorporation[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2018, 53: 3-16.
- [12] Huang W C, Zhang R, Xu M H, et al. Risk state changes analysis of railway dangerous goods transportation system: based on the cusp catastrophe model[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2020, 202: 107059.
- [13] Li J P, Zhang J, Suo W L. Risk assessment in cross-border transport infrastructure projects: a fuzzy hybrid method considering dual interdependent effects[J]. Information Sciences, 2019, 488: 140-157.
- [14] Koohathongsumrit N, Meethom W. An integrated approach of fuzzy risk assessment model and data envelopment analysis for route selection in multimodal transportation networks[J]. Expert Systems with Applications, 2021, 171: 114342.
- [15] 王艾迪,邢莹莹,张诗雯,等. 基于关联规则的危险品公路运输事故风险因素研究[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(6): 159-165.  
Wang Aidi, Xing Yingying, Zhang Shiwen, et al. Research on risk factors of hazardous material highway transport accidents based on association rules[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(6): 159-165.
- [16] Wu H W, Zhen J, Zhang J. Urban rail transit operation safety evaluation based on an improved CRITIC method and cloud model

- [J]. Journal of Rail Transport Planning & Management, 2020, 16: 100206.
- [17] 冯芬玲, 牛天聪. 基于二元决策图的中欧班列运营风险评估[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(12): 3281-3287.  
Feng Fenling, Niu Tiancong. Risk evaluation for operational requirements of CR express with BDD-based method[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, 15(12): 3281-3287.
- [18] 李逸, 赵媛, 鄢继尧, 等. 与中国涉贸的“一带一路”主要国家原油出口力评估及障碍因素分析[J]. 干旱区地理, 2023, 46(10): 1732-1743.  
Li Yi, Zhao Yuan, Guo Jiyao. Assessment of crude oil export power and analysis of obstacles of major countries along the “the Belt and Road” involved in trade with China[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(10): 1732-1743.
- [19] 陈洁, 魏海蕊. “一带一路”背景下海外工程项目重大件物流风险评价研究[J]. 物流工程与管理, 2022, 44(8): 6-9.  
Chen Jie, Wei Hairui. Study on logistics transportation risk evaluation of heavy and lengthy cargo of overseas engineering projects under the background of “the Belt and Road Initiative”[J]. Logistics Engineering and Management, 2022, 44(8): 6-9.
- [20] 王晨宇, 欧启晨, 甘蜜. 新冠疫情下国际班列通道综合风险测算[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(2): 209-216.  
Wang Chenyu, Ou Qichen, Gan Mi. Comprehensive risk calculation of international freight train routes during COVID-19 pandemic[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(2): 209-216.
- [21] 贺佳伟, 邵垒, 杨文举, 等. 基于多指标评估云模型的车载动力电池火灾风险研究[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(20): 8901-8906.  
He Jiawei, Shao Lei, Yang Wenju, et al. Fire safety of vehicle power lithium battery based on multi-index assessment cloud model[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(20): 8901-8906.
- [22] 魏盛宇, 梁文彪, 翟越, 等. 基于博弈论组合赋权云物元模型的城市道路交通系统风险评价[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(10): 4359-4367.  
Wei Shengyu, Liang Wenbiao, Zhai Yue, et al. Risk evaluation of urban road transportation system based on cloud matter element model of game theory combination[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(10): 4359-4367.

## 第 24 卷终