doi：10. 3969/j. issn. 1002-0268. 2022. 04. 021

危险品道路运输风险等级综合评价

梁雪琴
（兰州交通大学 交通运输学院，甘肃 兰州 730070）

摘要：针对危险品道路运输过程中，因各种风险因素造成的不利影响导致危险品道路运输风险增大的问题，提出了一种基于二维云模型的危险品道路运输风险等级综合评价方法，全面、客观地评估了危险品道路运输风险等级，从而降低危险品道路运输事故发生概率。从人员、货物与设备、环境、管理 4 个方面识别了危险品道路运输风险因素，结合客观实际构建了危险品道路运输风险评价指标体系。以风险危害和风险概率 2 个方面确定危险品道路运输风险等级，使用熵权法确定了评价指标权重，运用二维云模型实现定性概念和定量数值之间的转换并对危险品道路运输风险进行综合评定。最终通过计算数学贴近度的方法确定危险品道路运输综合风险等级。将本评价方法应用于某危险品道路运输企业，进行了实例验证，得出的综合风险等级为二级，即该企业在危险品道路运输过程中发生风险的概率较大、风险发生后危害较重、企业需采取相应管理措施规避风险。另一方面，根据评价方法得出的风险评价结果与该企业所获安全生产标准化达标建设等级一致，验证了该评价模型在危险品道路运输风险等级评价中的可行性及科学性，具备客观反映危险品道路运输企业风险来源的特点。得出的结果可为危险品道路运输企业识别风险等级、规避安全风险提供参考。

关键词：运输经济；风险评价；二维云模型；危险品运输；安全管理

中图分类号：U492. 3 **文献标识码**：A **文章编号**：1002-0268（2022）04-0184-07

Comprehensive Evaluation of Risk Level of Road Transport of Dangerous Goods

LIANG Xue-qin
(School of Transportation, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu 730070, China)

Abstract: In the process of road transport of dangerous goods, the adverse influences caused by various risk factors lead to the increase of the risk of road transport of dangerous goods. In view of this problem, a method for comprehensive evaluating the risk level of dangerous goods road transport based on 2D cloud model is proposed to comprehensively and objectively evaluate the risk level of dangerous goods road transport, so as to reduce the probability of dangerous goods road transport accidents. The risk factors of road transport of dangerous goods are identified from the aspects of personnel, goods and equipment, environment and management, and a risk evaluation indicator system for road transport of dangerous goods is constructed based on objective reality. The risk level of road transport of dangerous goods is determined in terms of risk hazard and risk probability, the weights of evaluation indicators are determined by using the entropy weight method, the conversion between qualitative concepts and quantitative values is realized by using 2D cloud model, and the risk of road transport of dangerous goods is comprehensively evaluated. Finally, the comprehensive risk level of road transport of dangerous goods is determined by the method of calculating mathematical closeness. This evaluation method is applied to a dangerous goods road transport enterprise for case verification, the obtained comprehensive risk level is level 2, that is, the enterprise has a higher risk probability in the road transport process of dangerous goods, the hazard is heavier after the risk occurs, and this enterprise needs to

收稿日期：2020-09-03
作者简介：梁雪琴（1996-），女，内蒙古乌兰察布人，硕士研究生．（1695450720@ qq. com）

take corresponding management measures to avoid the risk. On the other hand, the obtained risk evaluation result according to the evaluation method is consistent with the construction level of safety production standardization obtained by the enterprise, which verified the feasibility and scientificity of the evaluation model in the risk level evaluation of dangerous goods road transport, the evaluation model has the characteristics of objectively reflecting the risk sources of dangerous goods road transport enterprises. The obtained result can provide a reference for the dangerous goods road transport enterprises to identify risk levels and avoid safety risks.

Key words: transport economies; risk assessment; 2D cloud model; dangerous goods transport; safety management

0　引言

危险品具有爆炸、易燃、腐蚀性等性质，在运输、贮存和保管的过程中，极易引起人身伤亡和财产损失，因此需要特别防护。危险货物运输作为一种特种运输，需拥有能保障危险品安全运输的设施设备，并通过国家相关职能部门审核批准，才有资格进行危险品运输。据最新统计，我国年危险品运输量约 10 亿 t，专业车辆有 31 万辆，从业人员达 120 万人。危险品运输事故一方面威胁人类健康、财产安全，另一方面会对道路、环境、交通等造成重大影响。因此，危险品运输界如何降低运输过程中风险事故发生频率是很具现实意义的问题。

针对危险品运输风险评价，国内外学者进行了相关研究。DONG 等[1] 基于理论方法建立了多层级危险品运输安全评估指标体系。Yuliia 等[2] 为确定铁路运输危险品期间的环境风险及其管理原则，提出了一种能够优化铁路运输环境管理的新功能策略，强调了优化环境安全监测和组织环境风险管理的重要性。HUANG 等[3] 基于尖端灾难模型建立了铁路危险货物运输系统，并对铁路危险品运输系统的风险状态变化进行分析。杨婷等[4] 基于 N-K 模型从人-机-物-环-管 5 类风险因素定量分析了道路危险品运输系统耦合风险，得出耦合风险与参与耦合风险因素有关。吴金中等[5] 应用模糊综合评价法，建立了危险品道路运输风险评价模型。黄文成等[6] 利用道路危险品安全事故数据对道路危险品运输系统进行耦合协调度分析，建立了危险品道路运输系统风险评价方法。任常兴等[7] 在基于 NFPA 进行危险品运输风险数字分级的基础上考虑了现实风险因素对风险等级评定的影响，建立了危险品运输风险分级指数程序。陈跃等[8] 在现有风险分级指数模型的基础上提出了基于指数评价模型的集成化风险管控流程并验证了其有效性和可行性。左博睿等[9] 基于模糊推理技术的 Fuzzy-FRAM 模型，克服了危险品运输事故分析中无法定量分析的缺陷，得到了功能的风险指数。贺政纲等[10] 考虑了危险品运输的时变特性，构建了人口风险评估模型，得出最佳出发时间，为有效降低危险品运输人口风险提供新途径。李升朝[11] 基于 AHP 和熵权计算方法构建了模糊综合评价矩阵，对危险品道路运输风险进行评价。

综上所述，目前研究成果多数集中在评价指标、评价模型的定性分析和风险影响因子重要度的定量分析，而未考虑评价指标存在的模糊性与随机性问题。基于此，本研究引用熵权法获取评价指标权重，并在云理论的基础上，构建基于熵权二维云模型的危险品运输风险评价方法，为保障危险品运输安全，降低危险品运输风险事故提供新的思路与方法。

1　熵权二维云模型基本理论

1.1　熵权法

熵权法是一种高精度、强客观性的较成熟赋权方法，熵值可以判断评价指标的变异性。若某个指标的熵值越小，则指标变异程度越大，信息量越多，权重越重要。但若某个指标的值均相等，则该指标不可作为综合评价的评价指标。评价指标的赋权步骤如下：构造设有待评价项目 m 个，评价指标 n 个的原始判断矩阵 $\boldsymbol{R}=(r_{ij})_{m\times n}$，第 j 个指标的熵值计算为：

$$\begin{cases} P_{ij}=\dfrac{r_{ij}}{\sum\limits_{i=1}^{m} r_{ij}} \\ k=\dfrac{1}{\ln m} \\ e_j=-k\sum\limits_{i=1}^{m} p_{ij}\ln P_{ij} \end{cases}, \tag{1}$$

式中，$\boldsymbol{P}_n$ 为观权重向量；k 为常数；m 为评价项目数量；r_{ij} 为指标 j 在项目 i 下的评分；e_j 为指标 j 的熵值。

指标 j 的熵权计算为：

$$\omega_j = \frac{(1 - e_j)}{\sum_{j=1}^{n}(1 - e_j)}, \tag{2}$$

式中 ω_j 为指标 j 的熵权。

1.2 二维云模型

云模型的概念最早由李德毅在 1995 年提出，自提出至今，在数据挖掘、智能控制、决策分析等多个方面得到广泛应用[12]。二维云则是在一维正态云的基础上提出的思想，用以表示定性与定量不确定转换的过程。本研究运用该模型处理危险品运输中风险危害和风险概率两大因素相互作用下的不确定性问题。定义二维云数字特征为：（期望值，熵，超熵）。设 F 为服从正态分布的二维随机函数，其中 Ex 和 En_x 为期望值，Ey 和 Ey_n 为标准差，He 为超熵；μ 为确定度，故称满足式（3）的云模型为二维正态云模型[13]。

$$\begin{cases} (x_i,\ y_i) = F(Ex,\ Ey,\ En_x,\ En_y) \\ (P_{xi},\ P_{yi}) = F(En_x,\ En_y,\ He_x,\ He_y) \\ \mu_i = e^{-\frac{1}{2}\left[\frac{(x_i-Ex)^2}{P_{xi}^2}+\frac{(y_i-Ey)^2}{P_{yi}^2}\right]} \end{cases}。 \tag{3}$$

2 危险品运输风险评价模型

2.1 危险品运输风险评价体系

危险品运输风险是各项风险因素综合作用导致的，为了采取有效的安全管理、控制措施应对风险，本研究根据我国道路危险品运输现行的相关标准《生产过程危险和有害因素分类与代码》（GB/T13861—2009）、《公路物流主要单证要素要》（GB/T 33458—2016）并参考对公路危险品运输风险识别及风险发生后应急处理办法具有成熟理论国家的现行标准《危险品公路运输-运输过程中的紧急处置和覆盖-特性、尺寸和装填》（ABNT NBR 7503—2017），从人员因素、货物与设备因素、环境因素、管理因素 4 个方面辨识危险源。人员因素包含人员健康、人员素质和人员专业技能；危险品货物性质、运输设备、应急预防设备为货物与设备影响因子；环境影响因素包含运输途中道路特征、天气状况、交通状况和影响人员分布情况；安全管理、风险应急预案、运输时间以及运输路线是管理范畴的影响因子。危险品运输风险评价指标体系见图 1。

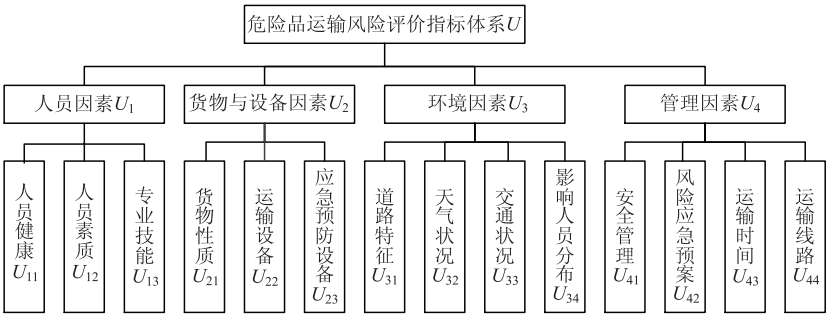

图 1 危险品运输风险评价指标体系

Fig. 1 Dangerous goods transport risk evaluation indicator system

2.2 风险云

邀请专家采用打分法对评价对象的各项指标进行危害等级和概率等级评定，分值区间为［0，10］，分值精确到小数点后 1 位。通过计算得到危害等级和概率等级的风险云，即二级风险云，风险云数字特征计算为：

$$\begin{cases} Ex = \dfrac{1}{q}\sum_{k=1}^{q} x_i \\ En = \sqrt{\dfrac{\pi}{2}} \times \dfrac{1}{q}\sum_{k=1}^{q} |\ x_k - Ex\ | \\ He = \sqrt{|\ S^2 - En\ |^2} \\ S^2 = \dfrac{1}{q-1}\sum_{k=1}^{q}(x_k - Ex)^2 \end{cases}, \tag{4}$$

式中，q 为样本数；Ex 为样本期望；S^2 为样本方差；x_k 为第 k 位专家的评分；En 为熵；He 为超熵。

2.3 标准云

依据从严从高的风险等级判定原则将［0，10］分成 4 个子区间，与之相对应的将评价指标的风险等级、危害等级、概率等级划分为Ⅰ~Ⅳ级，标准云数字特征计算为：

$$\begin{cases} \overline{Ex} = \dfrac{S_j^{\max} + S_j^{\min}}{2} \\ \overline{En} = \dfrac{S_j^{\max} - S_j^{\min}}{6} \\ \overline{He} \in \left[\dfrac{Ex}{100},\ \dfrac{En}{10}\right] \end{cases}, \tag{5}$$

式中，$\overline{Ex}$，$\overline{En}$，$\overline{He}$ 分别为标准云的期望、熵和超熵；$S_j^{\min}$ 和 $S_j^{\max}$ 分别为区间 j 的上、下限值。

2.4　综合风险云

为评价危险品运输的风险等级，将二级风险云矩阵与二级权重矩阵合成运算，得到一级风险云矩阵，再将其与一级权重矩阵合成运算，最终得到综合风险云。合成运算为：

$$C=(\omega_1,\ \omega_2,\ \omega_3)\begin{bmatrix} E_{x_1} & E_{n_1} & E_{e_1} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ E_{x_n} & E_{n_n} & E_{e_n} \end{bmatrix}=(Ex',\ En',\ He'),\tag{6}$$

式中，Ex'为一级风险云的期望；En'为一级风险云的熵；He'为一级综合风险云的超熵。风险等级数字特征见表 1。

表 1　风险等级及其数字特征

Tab. 1　Risk levels and their numerical characteristics

风险等级	取值区间	数字特征	危害描述	概率描述	等级描述
Ⅳ级	[0，3)	(1.5，0.5，0.1)	低	较小概率发生	安全的，暂时可忽略
Ⅲ级	[3，6)	(4.5，0.5，0.1)	一般	一定概率发生	临界的，需采取措施管控
Ⅱ级	[6，8)	(7，0.33，0.1)	较大	较大概率发生	危险的，需采取措施规避
Ⅰ级	[8，10]	(9，0.33，0.1)	重大	极大概率发生	不可接受的，需立即整改

2.5　综合评价云图

运用 MATLAB 编程实现正向云发生器并生成风险云图，得到危险品运输风险等级，同时得到各项评价指标风险等级[14]。

2.6　数学贴近度

为实际、客观的判定风险等级，提出一种数学计算方法表示实际、标准风险云的贴近程度。其中，相近度越大，评价结果越相似。运算公式为：

$$L=\frac{1}{\sqrt{(\overline{Ex}-Ex)^2+(\overline{Ex}'-Ex')^2}},\tag{7}$$

式中，L 为风险等级相近度；$\overline{Ex}$，$\overline{Ex}'$分别为标准云的危害、概率等级期望；Ex，$\overline{Ex}'$分别为实际风险云的危害、概率等级期望[15-18]。

3　算例分析

某危险品运输公司创立于 2010 年，是一家以危险品运输为特色集运输、仓储、配送、货运代理为一体的国家 3A 级综合物流企业。该企业先后通过了 ISO9001 国际质量管理体系认证、ISO14001 环境管理体系认证、OHSAS18001 职业健康安全管理体系认证、和 RSQAS 道路安全管理认证，被授予“中国危险品物流百强企业”称号。企业针对化危险品运输现有化工专家 2 名，国家安全注册工程师 3 名，专业化工操作人员 100 余名，危险品运输车 100 余辆，主要支持第 2，3，4，5，6 类 1 项，8，9 类危险品运输。同时企业建有先进的 GPS 监控中心，可实现对城市危险品运输车辆的实时监控，以及规范危险化学品仓储和运输的安全管理。为确定企业危险品运输风险等级，邀请了 6 位资深专家对危险品运输风险评价体系中各指标的重要程度、危害等级和概率等级进行独立性评分，分值区间为 [0，10]。

3.1　确定评价矩阵

6 名专家打分结果如表 2 所示。

表 2　评价指标重要程度/危害等级/概率等级分值

Tab. 2　Importance，hazard rating and probability rating of evaluation indicators

二级指标	$x_1/x_1'/x_1''$	$x_2/x_2'/x_2''$	$x_3/x_3'/x_3''$	$x_4/x_4'/x_4''$	$x_5/x_5'/x_5''$	$x_6/x_6'/x_6''$
U_{11}	6/6.7/2.4	5/6.6/2.5	4/6.8/2.7	5/6.9/2.8	5/6.8/2.6	6/6.6/2.7
U_{12}	4/6.4/2.6	5/6.5/2.4	3/6.7/2.4	4/6.8/2.5	4/6.5/2.7	5/6.6/2.5
U_{13}	6/7.4/3.3	6/7.3/3.1	6/6.9/3.3	7/7.0/3.3	6/7.2/3.2	7/7.2/3.5
U_{21}	5/7.3/3.9	4/7.4/3.5	4/7.3/3.7	5/7.2/3.8	4/7.3/3.7	6/7.5/3.8
U_{22}	7/7.8/3.3	7/7.5/3.2	8/7.7/3.2	7/7.6/3.1	8/7.7/3.3	7/7.3/3.4
U_{23}	6/7.4/2.6	6/6.6/2.8	6/6.5/2.9	6/6.8/2.7	6/6.6/2.7	7/6.7/2.9
U_{31}	7/5.8/3.7	6/6.0/3.2	5/6.2/3.4	6/5.9/3.5	5/6.1/3.3	5/6.3/3.1
U_{32}	4/6.6/3.8	4/6.5/4.2	3/6.8/3.7	4/6.9/3.8	5/6.7/4.1	3/6.7/3.9
U_{33}	7/7.1/2.1	6/6.8/3.6	6/6.7/3.3	7/7.0/3.3	7/6.8/3.3	8/6.9/3.5

续表 2

二级指标	$x_1/x_1'/x_1''$	$x_2/x_2'/x_2''$	$x_3/x_3'/x_3''$	$x_4/x_4'/x_4''$	$x_5/x_5'/x_5''$	$x_6/x_6'/x_6''$
U_{34}	3/7.9/3.3	4/7.4/2.7	4/7.6/2.5	3/7.7/2.6	3/7.5/2.6	4/7.4/2.7
U_{41}	5/6.7/3.7	6/6.8/3.1	5/6.6/3.3	5/6.3/3.1	6/6.7/3.4	6/6.5/3.2
U_{42}	6/6.2/2.6	6/5.8/3.2	6/6.1/3.5	7/5.9/3.5	6/6.1/3.6	6/6.0/3.2
U_{43}	4/7.2/2.7	4/7.0/2.5	4/7.1/2.7	4/6.9/2.5	5/7.1/2.4	3/7.0/2.5
U_{44}	7/7.5/2.7	7/6.6/2.7	6/6.4/2.8	6/6.5/2.7	6/6.7/2.6	7/6.8/2.5

注：x_1，x_1'，x_1''分别为二级指标重要程度/危害等级和概率等级评分。

表 3 危害等级和概率等级风险云数字特征

Tab. 3 Digital characteristics of risk cloud of hazard rating and probability rating

综合风险云			一级风险云				二级风险云			
指标	危害	概率	一级指标	权重	危害	概率	二级指标	权重	危害	概率
U	(6.86, 0.15, 0.13)	(3.11, 0.15, 0.13)	U_1	0.254	(6.70, 0.14, 0.13)	(2.63, 0.12, 0.11)	U_{11}	0.089	(6.73, 0.13, 0.11)	(2.62, 0.15, 0.13)
							U_{12}	0.138	(6.58, 0.15, 0.13)	(2.52, 0.11, 0.10)
							U_{13}	0.027	(7.17, 0.18, 0.15)	(3.28, 0.11, 0.10)
			U_2	0.160	(7.31, 0.13, 0.11)	(3.57, 0.12, 0.11)	U_{21}	0.123	(7.33, 0.01, 0.09)	(3.73, 0.13, 0.11)
							U_{22}	0.020	(7.60, 0.17, 0.14)	(3.25, 0.10, 0.10)
							U_{23}	0.017	(6.77, 0.28, 0.19)	(2.77, 0.13, 0.11)
			U_3	0.394	(6.81, 0.16, 0.13)	(3.38, 0.19, 0.16)	U_{31}	0.084	(6.05, 0.19, 0.16)	(3.37, 0.21, 0.17)
							U_{32}	0.159	(6.70, 0.13, 0.11)	(3.92, 0.19, 0.16)
							U_{33}	0.050	(6.88, 0.15, 0.13)	(3.38, 0.14, 0.12)
							U_{34}	0.101	(7.58, 0.19, 0.16)	(2.53, 0.19, 0.15)
			U_4	0.091	(6.81, 0.16, 0.12)	(2.79, 0.11, 0.10)	U_{41}	0.041	(6.60, 0.17, 0.14)	(3.23, 0.13, 0.11)
							U_{42}	0.017	(6.02, 0.15, 0.13)	(3.45, 0.21, 0.17)
							U_{43}	0.104	(7.05, 0.10, 0.10)	(2.53, 0.10, 0.09)
							U_{44}	0.029	(6.75, 0.33, 0.21)	(2.67, 0.10, 0.09)

3.2 权重及云数字特征确定

运用式（1）、（2），对各项二级指标进行熵值计算，根据式（3）、（4）、（5）、对二级指标风险云数值进行计算，最后运用式（6）进行合成运算，得到综和风险云数字特征。

3.3 形成云图

运用 MATLAB 编程得到综合风险云与标准风险云对比云图如图 2 所示。

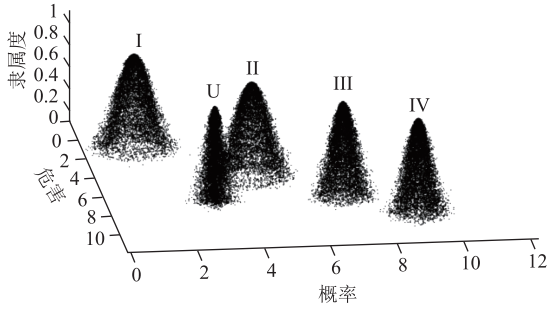

图 2 综合风险云

Fig. 2 Comprehensive risk cloud

根据式（6）和表 2、表 3 得出二级指标的数字特征可知综合风险云的数字特征为（6.86，0.15，0.13），（3.11，0.15，0.13）。最终在 MATLAB 中利用正向云发生器实现二维云成像。根据图 2 及式（7）的计算结果，得出本企业危险品运输风险等级为Ⅱ级，即该企业在危险品道路运输过程中发生风险的概率较大、风险发生后危害较大、企业需采取相应管理措施规避风险。风险评价结果与该企业所获安全生产标准化达标建设等级一致。

4 结论

（1）基于二维云模型，综合考虑危险品运输评价指标的随机性和模糊性等特点，提出危险品运输风险等级评价方法，实现了定性、定量概念不确定转换。通过输出云图，得到直观、方便的风险等级评价结果。

（2）使用熵权法全面获取了各评价指标权重系

数，减少了系统风险评价的不确定性，使评价结果更准确可靠。

（3）使用数学贴近度计算公式，真实的反映了危险品运输风险等级，进一提升评价结果可信度使得评价结果更具说服性。

（4）基于熵权法二维云模型对危险品道路运输风险影响因素进行综合评价，评价结果与传统指数模型评价结果一致且与某危险品运输企业安全考评标准结果具有良好吻合性，验证了本评价模型的科学性和实际应用性。

参考文献：

References：

[1] DONG Q, QIAN D L, LI C H, et al. Research on Safety Evaluation Indexes of the Road Transportation Enterprise of Dangerous Goods [J]. Applied Mechanics & Materials, 2013, 409-410: 1330-1334.

[2] ZELENKO Y, DZHUS O, DZHUS V, et al. Methodology of Risk Assessment and Forms of Environmental Safety Management for the Transport of Dangerous Goods by Railway Transport [J]. MATEC Web of Conferences, 2019, 294: 03011.

[3] 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.

[4] 杨婷，帅斌，黄文成. 基于 N-K 模型的道路危险品运输系统耦合风险分析 [J]. 中国安全科学学报，2019，29（9）：132-137.
YANG Ting, SHUAI Bin, HUANG Wen-cheng. Coupling Risk Analysis of Road Dangerous Goods Transportation System Based on N-K Model [J]. China Safety Science Journal, 2019, 29 (9): 132-137.

[5] 吴金中，范文姬. 危险货物道路运输风险评价体系研究 [J]. 公路交通科技，2015，32（12）：6-11.
WU Jin-zhong, FAN Wen-ji. Risk Evaluation System of Dangerous Goods Transport [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2015, 32 (12): 6-11.

[6] 黄文成，帅斌，庞璐，等. 基于耦合协调度的道路危险品运输系统风险评价 [J]. 中国安全科学学报，2016，26（6）：117-122.
HUANG Wen-cheng, SHUAI Bin, PANG Lu, et al. Research on Coupling Coordination Degree Based Method for Assessing Risk in Road Dangerous Goods Transport System [J]. China Safety Science Journal, 2016, 26 (6): 117-122.

[7] 任常兴，吴宗之. 危险品道路运输风险分级指数法研究 [J]. 安全与环境学报，2006（4）：126-129.
REN Chang-xing, WU Zong-zhi. Study on the Risk Rank Indices of Hazardous Materials Transportation [J]. Journal of Safety and Environment, 2006 (4): 126-129.

[8] 陈跃，张玉玲. 基于指数模型的危险货物道路运输风险评价与管理研究 [J]. 公路交通科技，2018，35（3）：143-150.
CHEN Yue, ZHANG Yu-ling. Study on Risk Evaluation and Management for Road Transport of Dangerous Goods Based on Index Model [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2018, 35 (3): 143-150.

[9] 左博睿，帅斌，黄文成. 基于模糊推理的 FRAM 事故定量分析方法研究 [J]. 中国安全生产科学技术，2020，16（7）：11-17.
ZUO Bo-rui, SHUAI Bin, HUANG Wen-cheng. Research on FRAM Accident Quantitative Analysis Method Based on Fuzzy Reasoning [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2020, 16 (7): 11-17.

[10] 贺政纲，房杰，张超. 时变条件下基于事故综合特征的危险品运输人口风险评估模型研究 [J]. 安全与环境工程，2017，24（4）：168-172.
HE Zheng-gang, FANG Jie, ZHANG Chao. Research on Population Risk Assessment Model of Hazardous Material Transportation Based on Accident Comprehensive Characteristics under Time-varying Conditions [J]. Safety and Environmental Engineering, 2017, 24 (4): 168-172.

[11] 李升朝，吴越，白雪萌. 基于 AHP 和熵权法的道路危货运输风险评估研究 [J]. 重庆交通大学学报（社会科学版），2020，20（2）：43-50.
LI Sheng-chao, WU Yue, BAI Xue-meng. Research on Risk Assessment of Dangerous Goods Transportation on Roads Based on AHP and Entropy Method [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Social Sciences Edition), 2020, 20 (2): 43-50.

[12] 叶琼，李绍稳，张友华，等. 云模型及应用综述 [J]. 计算机工程与设计，2011，32（12）：4198-4201.
YE Qiong, LI Shao-wen, ZHANG You-hua, et al. Cloud Model and Application Overview [J]. Computer Engineering and Design, 2011, 32 (12): 4198-4201.

[13] 李众，杨一栋. 一种新的基于二维云模型不确定性推理的智能控制器 [J]. 控制与决策，2005（8）：866-872，877.
LI Zhong, YANG Yi-dong. A Novel Intelligent Controller Based on Uncertainty Reasoning of Two-dimension Cloud

Model [J]. Control and Decision, 2005 (8): 866-872, 877.

[14] 王景春, 张法. 基于熵权二维云模型的深基坑施工风险评价 [J]. 安全与环境学报, 2018, 18 (3): 849-853.
WANG Jing-chun, ZHANG Fa. Risk Assessment of the Deep Foundation Pit Based on the Entropy Weight and 2-dimensional Cloud Model [J]. Journal of Safety and Environment, 2018, 18 (3): 849-853.

[15] 王景春, 董妍妍, 李钦, 等. 基于组合赋权二维云模型的箱涵下穿既有铁路施工风险评价 [J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17 (2): 516-523.
WANG Jing-chun, DONG Yan-yan, LI Qin, et al. Risk Assessment of Box Culverts Construction under Existing Railway Based on Combined Weighted Two-dimensional Cloud Model [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2020, 17 (2): 516-523.

[16] 刘冬华, 刘茂, 任常兴. 危险品道路运输泄漏引发水污染事故的定量风险评估方法研究 [J]. 安全与环境学报, 2008, 8 (6): 140-143.
LIU Dong-hua, LIU Mao, REN Chang-xing. Estimating Water Pollution Risks Arising from Road Accidents [J]. Journal of Safety and Environment, 2008, 8 (6): 140-143.

[17] 任常兴, 吴宗之. 危险品道路运输风险评价与优化选线的研究进展 [J]. 安全与环境学报, 2007 (3): 127-131.
REN Chang-xing, WU Zong-zhi. Progress of Risk Assessment and Optical Routing for Hazardous Materials Transportation by Road [J]. Journal of Safety and Environment, 2007 (3): 127-131.

[18] 宋洋, 孙俊富. 危险品道路运输网络风险-成本综合优化研究 [J]. 公路交通科技, 2015, 32 (10): 141-145, 152.
SONG Yang, SUN Jun-fu. Study on Risk-cost Synthetic Optimization of Dangerous Goods Transport in Road Network [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2015, 32 (10): 141-145, 152.

(上接第 183 页)

REN Hui. Design of Reliable Three-echelon Supply Chain Network with Transportation Disruption [J]. Computer Engineering and Applications, 2019, 55 (6): 265-270.

[13] 付红, 李良强. 供应不可靠时下游企业投资上游企业的供应链协调 [J]. 工业工程与管理, 2020, 25 (2): 44-50.
FU Hong, LI Liang-qiang. Coordinating a Supply Chain with Unreliable Supply When Downstream Firm Invests in Upstream Firm [J]. Industrial Engineering and Management, 2020, 25 (2): 44-50.

[14] 张亮星, 王少华, 张明尧. 串联可修复供应链运行可靠性研究 [J]. 机械设计与制造, 2019 (11): 25-28.
ZHANG Liang-xing, WANG Shao-hua, ZHANG Ming-yao. Research on Operation Reliability of Repairable Series Supply Chain [J]. Machinery Design and Manufacture, 2019 (11): 25-28.

[15] OZKAN O, KILIC S. A Monte Carlo Simulation for Reliability Estimation of Logistics and Supply Chain Networks [J]. IFAC Papers OnLine, 2019, 52 (13): 2080-2085.

[16] ZHANG J, LI H, GOLIZADEH H, et al. Reliability Evaluation Index for the Integrated Supply Chain Utilising BIM and Lean Approaches [J]. Engineering, Construction and Architectural Management, 2020, 27 (5): 997-1038.

[17] WANG B, ZHANG H, YUAN M, et al. Sustainable Refined Products Supply Chain: A Reliability Assessment for Demand-side Management in Primary Distribution Processes [J]. Energy Science & Engineering, 2019, 8 (4): 1029-1049.

[18] 郭茜, 蒲云, 郑斌. 基于故障贝叶斯网的冷链物流系统可靠性分析 [J]. 控制与决策, 2015, 30 (5): 911-916.
GUO Qian, PU Yun, ZHENG Bin. Reliability Analysis of Cold-chain Logistics System Based on Fault Bayesian Networks [J]. Control and Decision, 2015, 30 (5): 911-916.