

doi: 10.7690/bgzdh.2026.05.014

基于云模型的某型储运发箱转运过程保障风险指标权重研究

张 伟, 邓士杰, 于贵波

(陆军工程大学石家庄校区, 石家庄 050003)

摘要: 为解决传统的权重设置方法未能融合主观与客观的认知, 导致定性分析与定量分析结果不一致, 从而可能引入偏差的问题, 提出一种基于云模型的权重赋予方法。利用云发生器有效处理不确定性信息, 并在定性分析与定量分析之间建立映射。同时结合决策者的主观经验与客观数据, 既利用了决策者的直觉和经验, 又充分结合了数据支持, 使得权重分配更加科学与合理。选取某次储运发箱转运过程作为案例进行分析。结果表明, 应用云模型理论设定的指标权重不仅客观反映了各指标在转运过程中的实际影响, 而且与人类的直观认知相符。

关键词: 储运发箱; 保障风险; 指标权重; 云模型

中图分类号: TJ410.89 **文献标志码:** A

Research on Security Risk Index Weight of a Certain Type of Storage, Transportation, Delivery and Transshipment Process Based on Cloud Model

Zhang Wei, Deng Shijie, Yu Guibo

(Shijiazhuang Campus, Army Engineering University, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: In order to solve the problem that the traditional weight setting method fails to integrate subjective and objective cognition, resulting in inconsistent qualitative and quantitative analysis results, which may introduce bias, a weight giving method based on cloud model is proposed. The cloud generator is used to effectively deal with the uncertainty information, and the mapping between qualitative and quantitative analysis is established. At the same time, it combines the subjective experience and objective data of decision makers, which not only uses the intuition and experience of decision makers, but also fully combines the data support, making the weight distribution more scientific and reasonable. The process of a storage, transportation, shipping and transshipment is selected as a case for analysis. The results show that the index weights set by cloud model theory not only objectively reflect the actual impact of each index in the transport process, but also conform to human intuitive cognition.

Keywords: storage and transportation; guarantee risk; index weight; cloud model

0 引言

储运发箱作为一种专业的军事后勤保障装备, 旨在为弹药提供安全、可靠的储存及运输解决方案^[1]。在转运过程中, 由于弹药所具有的危险属性, 仅仅是由储运发箱的箱体保护是不足以应对复杂的突发情况, 容易受到外力的因素造成箱体内弹药发生剧烈的震动、内部材料泄漏, 严重者甚至发生火灾、爆炸等安全事故; 因此, 对储运发箱在转运过程中的风险进行评估是十分有必要的。鉴于储运发箱保护的主体为弹药, 那么关于通用弹药的研究成果也具有一定的参考价值。刘江等^[2]针对弹药处废系统的安全风险问题, 采用熵权法与模糊综合法对其进行评估, 有效地保证了评估结果的客观性, 并通过实例验证了其有效性。颜正阳等^[3]构建了一种基于熵权与云模型结合的弹药航空军事运输装卸载

风险评估方法, 该方法采用熵权和层次分析法相结合确定指标权重, 通过正态云模型确定评价指标的隶属度, 并运用实例验证了其方法的可行性。叶文等^[4]提出了一种基于改进灰色评价法的机载弹药技术保障安全风险综合评价模型, 该模型首先利用层次分析法确定各指标的权重, 然后通过改进的白化权函数确定灰色综合评价值, 完成对安全风险的评估。

综上所述, 有关弹药的安全风险评估已经有了较多的研究成果^[5]。云模型可以通过云发生器实现主观定性评价向客观定量权重的转换, 同时通过云图直观地展示权重的不确定性。笔者以储运发箱转运过程中保障风险的指标权重为研究对象, 提出一种基于云模型的指标权重赋予方法。该方法融合了专家的主观经验和数据的客观统计特性, 使

收稿日期: 2024-12-02; 修回日期: 2025-01-18

基金项目: 军内科研项目(LJ20212A031131)

第一作者: 张 伟(1995—), 男, 江苏人, 硕士。

权重结果既符合人类认知习惯，又具有较高的可解释性^[6]。

1 保障风险评价指标体系构建

储运发箱保障风险评价指标体系的构建涵盖多个领域，需要综合考虑转运过程中的各种潜在风险因素并结合实际情况做出选择^[7]。在充分借鉴 GJB 8329-2015 火箭炮储运发箱通用规范、GJB 145A-1993 防护包装规范、GJB 1181 军用装备包装、装卸、贮存和运输通用大纲以及相关科学研究的基础上，结合部队实际使用状况，分别从人员、保障装备、储运发箱、环境以及管理 5 方面进行描述，建立了储运发箱保障风险评价指标体系，如图 1 所示。

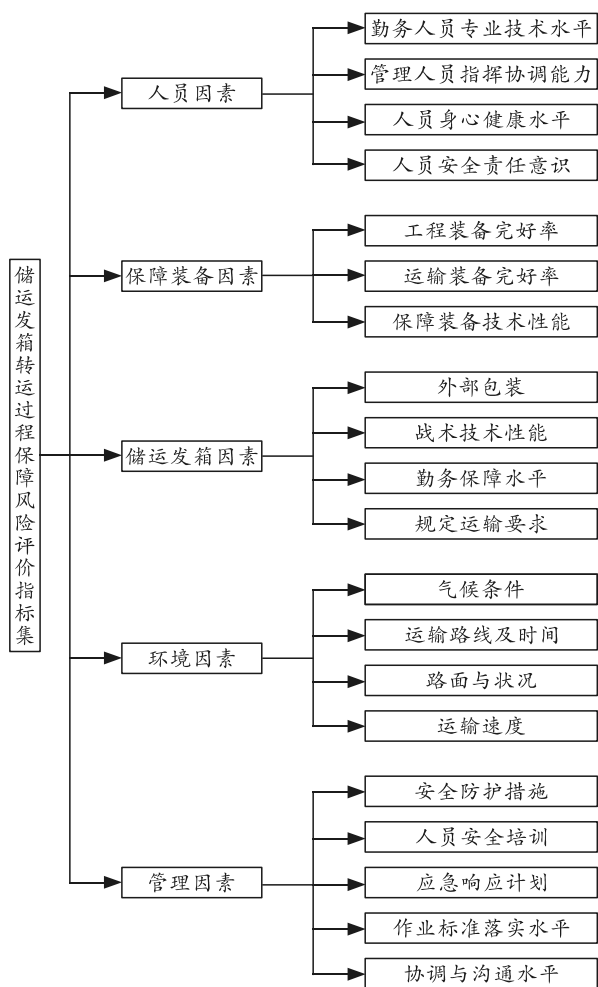


图 1 储运发箱转运过程保障风险评价指标集

2 云模型的相关理论及权重设置的应用

2.1 云模型基础理论

云模型是一种数学框架，专门设计用于处理包含模糊性和随机性在内的不确定性信息^[8]。通过将

抽象的定性概念转化为具体的定量表示，采用概率论和模糊集理论的原理，量化描述概念的模糊边界和不确定性分布^[9]。

2.2 云模型的基本概念及数字特征

设定性概念 C 是定量论域 U 上的概念，若定量值 $x \in U$ 是概念 C 的一次随机实现， x 对 C 的确定度 $\mu(x) \in [0, 1]$ 是具有稳定分布的随机数，即 $\mu(x): U \rightarrow [0, 1], \forall x \in U x \rightarrow \mu(x)$ ，则 (x, μ) 称为一个云滴^[10-11]。

云模型通常包含：期望值 Ex (expected value)、熵 En (entropy)和超熵 He (hyper entropy) 3 个数字特征。期望值(Ex)反映了云滴分布的中心趋势；熵(En)反映了云滴分布的离散程度；超熵(He)则反映了熵的不确定性和波动程度，即熵的熵，可以从云的厚度上直观感知，超熵越大，厚度越大，代表着模型对于定性的度量难以达成一致的意见^[12]。

在云模型中，云发生器分为正向云发生器和逆向云发生器 2 种类型。正向云发生器是从抽象的定性概念到具体定量表示的映射，从而允许我们通过云滴的分布来分析和理解概念的模糊性和随机性；逆向云发生器则实现了从具体定量数据到抽象定性概念的反向转换，通过云滴生成模型的数字特征。

2.3 云模型在权重设置上的应用

云模型在指标权重中的应用，其核心优势在于其独特的模型框架，能够综合并反映指标权重的不确定性和模糊性^[13]。此外，云模型将专家的直观判断与数据的定量分析相结合，增强了评价过程的思维逻辑性和可解释性，进一步为管理者提供了更加科学的现实依据，减少了主观判断对于评价结果的影响，增强了评价结果的客观性和实用性^[14]。

3 保障风险指标权重计算方法

基于云模型的保障风险指标权重计算方法：

步骤 1：生成权重评语集。根据部队储运发箱转运实际现状以及军事相关领域专家的意见描述，可将其指标权重划分为 5 个等级，重要程度由低到高分别为 I 级、II 级、III 级、IV 级、V 级，对应低、较低、一般、较高以及高，组成权重评语集 $F = \{I \text{ 级、II 级、III 级、IV 级、V 级}\}$ ，等级越高表明该指标影响力越强。

步骤 2：计算标准云数字特征。由于研究的对象没有较多的先验知识以及专家人数的限制，无法获取大量数据，因此该研究采用适合数据量少的黄

金分割法生成定性权重云^[15]。设指标取值范围为 $[I_{\min}, I_{\max}]$ ，并按照评语集划为 5 个子区间，超熵 He 取值视具体情况而定，定义为 K ，则标准云数字特征计算规则^[16]如表 1 所示。

表 1 基于黄金分割法的云数字特征计算方法

Ex	En	He
$Ex_1=I_{\min}$	$En_1=En_n/0.618$	$He_1=He_n/0.618$
$Ex_n=Ex_m-0.382(I_{\max}+I_{\min})/2$	$En_n=0.382(I_{\max}-I_{\min})/6$	$He_n=He_m/0.618$
$Ex_m=(I_{\max}+I_{\min})/2$	$En_m=0.618 En_n$	$He_m=K(\text{视情况取值})$
$Ex_n=Ex_m+0.382(I_{\max}+I_{\min})/2$	$En_n=0.382(I_{\max}-I_{\min})/6$	$He_n=He_m/0.618$
$Ex_n=I_{\max}$	$En_n=En_n/0.618$	$He_n=He_n/0.618$

笔者将 $[0, 1]$ 确定为指标取值范围，划分为 5 个子区间，并按照表 1 计算方法，计算云数字特征。超熵 He 的值 K ，结合以往弹药转运经验，取值 0.001。云数字特征结果如表 2 所示。

表 2 指标权重云数字特征

重要程度	定性描述	Ex	En	He
I	低	0.000	0.103	0.002 6
II	较低	0.309	0.064	0.001 6
III	一般	0.500	0.039	0.001 0
IV	较高	0.691	0.064	0.001 6
V	高	1.000	0.103	0.002 6

步骤 3：绘制标准评价云图。根据表 2 的计算结果，将云数字特征 (Ex, En, He) 和水滴数 N 输入正向云发生器，水滴数 N 通常按照问题的复杂程度确定，此处取 1 500，并集合隶属度函数^[17]绘制评价云图。具体过程：首先构建 En 为期望值， He 为标准差的正态随机数 En_i ；其次构建以 Ex 为期望值， En_i 为标准差的正态随机数 x ；然后计算相应云滴的隶属度 μ ：

$$\mu_i = \exp[-(x - Ex)^2 / 2En_i] \quad (1)$$

最后重复上述过程，直到生成 N 个云滴。

步骤 4：计算各级云数字特征。通过专家给出的指标权重值作为样本值 $x=x_i$ ，其中 $i=1, 2, \dots, n$ 。并使用逆向云发生器计算各级指标云数字特征：

$$Ex = \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2)$$

$$En = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - Ex| \quad (3)$$

$$He = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 - En^2} \quad (4)$$

然后，运用正向云发生器得出该指标的评价云图。由于专家群体对某评价指标的认知可能会存在较大的差异，从而使云图呈现较为分散的状况，可

以引入含混度 (confusion degree, CD) 衡量概念外延的离散程度^[18]：

$$CD = \frac{3He}{En} \quad (5)$$

步骤 5：求解更高一级指标权重。第 1 层指标通常用于对对象进行综合性描述，而第 2 层及更深层次的指标则对第 1 层指标进行进一步细化与分解，进而构建起一个多级递阶的评价框架^[19]。设某一级指标含有 k 个下一级指标，则该级指标的云数字特征 (Ex', En', He') 计算如下：

$$Ex' = \frac{Ex_1 \times En_1 + Ex_2 \times En_2 + \dots + Ex_k \times En_k}{En_1 + En_2 + \dots + En_k} \quad (6)$$

$$En' = En_1 + En_2 + \dots + En_k \quad (7)$$

$$He' = \frac{He_1 \times En_1 + He_2 \times En_2 + \dots + He_k \times En_k}{En_1 + En_2 + \dots + En_k} \quad (8)$$

步骤 6：求解定量表示的权重值。对同级指标权重进行归一化处理，得到该指标定量表示的权重值：

$$W_i = \frac{Ex_i}{\sum_{i=1}^n Ex_i} \quad (9)$$

步骤 7：求解定性表示的权重值。该研究采用式(1)计算各级指标云模型对应 5 种重要程度定性表示的隶属度。考虑到隶属度的随机性特征，将执行多次独立重复计算，并取平均值作为计算结果。

4 案例分析

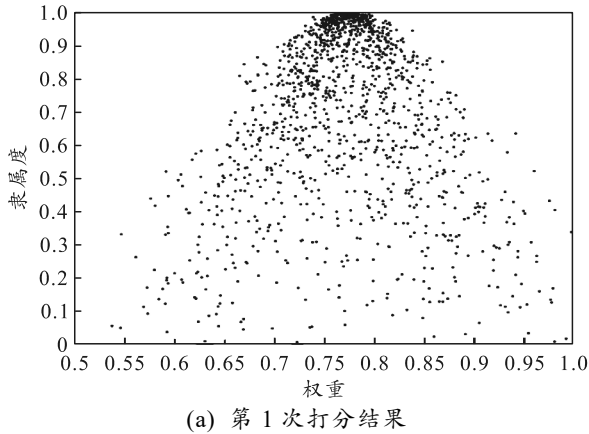
4.1 案例介绍

在某次储运发箱调拨任务中，需要将一定数量的储运发箱从某储备仓库输送至某弹药临时储备点。转运期间，涵盖叉车搬运、吊机吊装以及公路输送等多个环节。储运发箱质量为堪用，外表观察无损伤；运输车辆为特种运弹车，工具附件齐全率高，车况良好；运输路段的情况则较为复杂，主要为 109 国道及少部分未硬化道路。

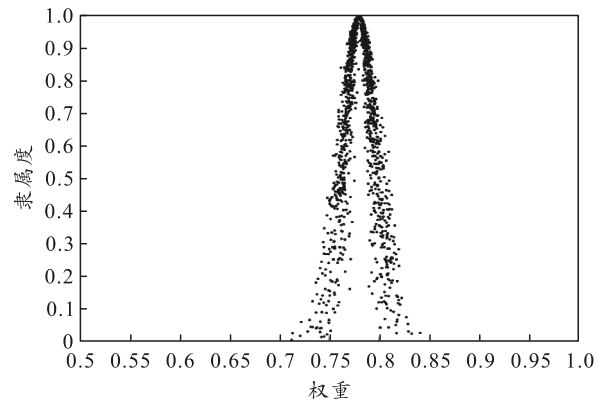
4.2 确定各级指标权重云模型

考虑到单一类型专家可能会对评价的结果产生偏差，该研究选取军队院校专家、部队弹药相关工程师以及机关弹药助理共 10 人参与打分。为详细描述步骤 4 的处理过程，选取末级指标“气候条件”为例。根据第 1 次打分数据，使用式(2)–(5)得出指标权重的云数字特征为 $C(0.773, 0.061 3, 0.043 6)$ 、含混度 CD 为 2.133 8，并通过正向云发生器绘制云

图。第 2 次征询专家意见前，及时将第 1 次打分结果归纳总结后反馈给专家，以便专家调整自己的打分结果。第 3 次打分结果时云模型已呈现较好的凝聚性，表明专家的意见已基本达成共识，形成了较为成熟的评价意见含混度 CD 为 0.890 3。



(a) 第 1 次打分结果



(b) 第 3 次打分结果

图 2 “气候条件” 指标权重迭代优化云

从图 2 中可以观察到云图较为发散，表明专家意见存在较大的分歧，概念雾化。通过对末级指标进行多重打分评价，最终获得 20 类指标的云数字特征及含混度，如表 3 所示。

表 3 各级指标云数字特征及含混度

第 1 级评价指标	云数字特征	含混度	第 2 级评价指标	云数字特征	含混度
人员因素	C(0.801, 0.184 8, 0.008 2)	0.133 1	勤务人员专业技术水平	C(0.780, 0.031 6, 0.002 1)	0.199 4
			管理人员指挥协调能力	C(0.796, 0.053 4, 0.009 8)	0.550 6
			人员身心健康水平	C(0.825, 0.076 0, 0.010 3)	0.135 6
			人员安全责任意识	C(0.760, 0.023 8, 0.005 9)	0.423 9
保障装备因素	C(0.773, 0.124 9, 0.010 1)	0.242 6	工程装备完好率	C(0.785, 0.045 6, 0.012 2)	0.802 6
			运输装备完好率	C(0.774, 0.066 5, 0.010 2)	0.460 2
			保障装备技术性能	C(0.725, 0.012 8, 0.001 8)	0.421 9
储运发箱因素	C(0.745, 0.113 4, 0.003 8)	0.100 5	外部包装	C(0.736, 0.022 7, 0.003 1)	0.409 7
			战术技术性能	C(0.852, 0.016 1, 0.001 6)	0.298 1
			勤务保障水平	C(0.841, 0.028 0, 0.006 5)	0.696 4
			规定运输要求	C(0.655, 0.046 6, 0.003 2)	0.215 2
环境因素	C(0.765, 0.073 7, 0.004 1)	0.166 9	气候条件	C(0.780, 0.015 5, 0.004 6)	0.890 3
			运输路线及时间	C(0.672, 0.012 2, 0.003 5)	0.860 7
			路面与状况	C(0.789, 0.022 2, 0.002 3)	0.310 8
			运输速度	C(0.780, 0.023 8, 0.005 9)	0.840 7
管理因素	C(0.773, 0.133 5, 0.003 2)	0.071 9	安全防护措施	C(0.790, 0.049 8, 0.002 8)	0.168 7
			人员安全培训	C(0.747, 0.022 1, 0.002 1)	0.285 1
			应急响应计划	C(0.789, 0.018 6, 0.001 9)	0.306 5
			作业标准落实水平	C(0.746, 0.028 7, 0.005 7)	0.595 8
			协调与沟通能力	C(0.787, 0.014 3, 0.002 6)	0.545 5

20 项末级指标含混度小于 0.890 3，表明专家已对各项指标有了基本统一的意见，形成了较为一致的看法。同时，通过式(5)–(8)计算上一级指标的云数字特征及含混度，含混度均低于 0.25，远小于末级指标的最高值 0.890 3，表明专家在上一级指标权重的认知趋于一致，达成了较高的共识。

4.3 确定各级指标的定性与定量权重

在考虑多个指标权重评价时，采用云数字特征中 Ex 的加权平均值能够使得评估结果既能体现指标之间的差异，又能保持一定的模糊性。仍以末级

指标“气候条件”为例，根据式(9)可以计算得到该末级指标的定量权重值为 0.246 8。同时，根据式(1)计算“气候条件”指标的云模型对应 5 种重要程度定性表示的隶属度，模拟次数选择 1 500 次，并取其计算的平均值。得到的结果为 $\mu(I)=4.104 4 \times 10^{-12}$ 、 $\mu(II)=1.171 6 \times 10^{-9}$ 、 $\mu(III)=2.777 \times 10^{-8}$ 、 $\mu(IV)=0.309 1$ 、 $\mu(V)=0.125$ 。根据最大隶属度原则，该指标在重要程度 IV 的隶属度最大，则重要程度定义为较高。依照该计算方法可得出其他各级指标定性表示的权重，如表 4 所示。

表 4 各级指标定量与定性权重

第 1 级评价指标	定量权重值	重要程度	第 2 级评价指标	定量权重值	重要程度
人员因素	0.207 7	较高	勤务人员专业技术水平	0.246 8	较高
			管理人员指挥协调能力	0.251 8	较高
			人员身心健康水平	0.261 0	较高
			人员安全责任意识	0.240 4	较高
保障装备因素	0.200 4	较高	工程装备完好率	0.343 7	较高
			运输装备完好率	0.338 9	较高
			保障装备技术性能	0.317 4	较高
储运发箱因素	0.193 2	较高	外部包装	0.238 7	较高
			战术技术性能	0.276 3	较高
			勤务保障水平	0.272 7	较高
			规定运输要求	0.212 3	一般
环境因素	0.198 3	较高	气候条件	0.258 2	较高
			运输路线及时间	0.222 4	一般
			路面与状况	0.261 2	较高
			运输速度	0.258 2	较高
管理因素	0.200 4	较高	安全防护措施	0.204 7	较高
			人员安全培训	0.193 6	较高
			应急响应计划	0.204 5	较高
			作业标准落实水平	0.193 3	较高
			协调与沟通能力	0.203 9	较高

5 结束语

笔者所提方法消融了定性定量评价之间的界限，并通过云数字特征及云图更加形象、直观地反映了指标的重要程度，获得了比简单数字衡量更具有可靠性的不确定性认知，有效地增强了数据的可解释性，便于人们理解。实例验证结果表明：云模型不仅提供了定量权重值，而且得出了基于不确定认知的定性权重评价，实现了定量与定性评价的统一，保证了储运发箱转运过程中保障风险指标权重设置的科学性及合理性。

参考文献：

[1] 于骥瑞, 李军, 赵鑫, 等. 基于 HyperWorks 的火箭炮储运发箱优化设计与分析[J]. 兵工自动化, 2017, 36(10): 80-83.

[2] 刘江, 凌丹, 肖振林. 基于熵权模糊综合评判的弹药处废系统安全风险评估[J]. 兵工自动化, 2011, 30(8): 31-34.

[3] 顿正阳, 安红, 陈思杨. 基于熵权-云模型的弹药航空军事运输装卸载保障风险评价[J]. 军械工程学院学报, 2017, 29(3): 34-39.

[4] 叶文, 赵建忠, 万海涛, 等. 基于改进灰色评价法的机载弹药技术保障安全风险综合评价研究[J]. 舰船电子

工程, 2017, 37(8): 133-135, 139.

[5] 王巍, 姚恺, 李黎明. 弹药公路运输安全评估研究综述[J]. 装备环境工程, 2022, 19(4): 28-35.

[6] LI D Y, LIU C Y, GAN W Y. A new cognitive model: Cloud model[J]. Intelligent systems, 2009, 24(3): 357-375.

[7] KAWPRASERT A, BARKAN C P L. Communication and Interpretation of Results of Route Risk Analyses of Hazardous Materials Transportation by Railroad[J]. Transportation Research Record, 2009, 45(2097): 125-135.

[8] GAO F. An integrated risk analysis method for tanker cargo handling operation using the cloud model and DEMATEL method[J]. Ocean engineering, 2022, 266: 113021.

[9] SHEN S L, LIN S S, ZHOU A. A cloud model-based approach for risk analysis of excavation system[J]. Reliability engineering & system safety, 2023, c: 108984.

[10] 张建伟, 毋伟涛, 侯鹤, 等. 基于权重优化-云模型的土石坝运行安全综合评价[J]. 工程科学与技术, 2025, 57(4): 165-175.

[11] 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.

[12] ZHANG Q W, ZHANG Y Z, ZHONG M. A cloud model based approach for multi-hierarchy fuzzy comprehensive evaluation of reservoir-induced seismic risk[J]. Hydraulic Engineering, 2014, 45(1): 87-95.

[13] LIN L, DING G. A multiple classification method based on the cloud model[J]. Neural Network World, 2010, 20(5): 651-666.

[14] 王艳伟, 韩晓庆, 熊凯. 基于云模型和熵权法的 PPP 项目风险评价研究[J]. 工程管理学报, 2020, 34(6): 66-70.

[15] SHEN G, DING Y, ZHANG Y, et al. Failure analysis of tool changer system based on cloud model[J]. Central South University(ence and Technology), 2013, 44(4): 1420-1424.

[16] 李振强, 曹琦, 孟庆军. 基于指数标度 AHP-黄金分割率法云模型的军事设施建设项目风险评价[J]. 军事运筹与评估, 2023, 38(2): 23-29.

[17] 郭茜. 基于云模型的京津冀物流一体化指标权重研究[J]. 云南财经大学学报, 2018, 34(6): 96-104.

[18] 刘琳岚, 谷小乐, 刘松, 等. 基于云模型的无线传感器网络链路质量的预测[J]. 软件学报, 2015, 26(S1): 70-77.

[19] 董三强, 冯顺山, 金俊. 弹药安全性能评价模型研究[J]. 兵工学报, 2011, 32(4): 421-425.