·数理应用·

文章编号：1003－1251(2024)05－0091－06

基于 BWM－云模型的煤矿突发事件应急救援能力评价

崔欣超[1]，薛凯隆[1]，祁 云[2]，齐庆杰[3]

(1. 山西大同大学 煤炭工程学院，山西 大同 037000；2. 辽宁工业大学 机械工程与自动化学院，辽宁 锦州 121001；
3. 煤炭科学研究总院 应急科学研究院，北京 100013)

摘 要：为有效应对煤矿突发事件，提高应急救援能力，提出一种最优最劣法(best worst method，BWM)与云模型相结合的煤矿突发事件应急救援能力评价模型。首先构建包括应急预防能力、应急准备能力、应急响应能力、善后恢复能力等4个一级指标以及17个二级指标在内的煤矿突发事件应急救援能力评价指标体系；然后采用BWM确定评价指标的权重，将各指标权重值与其对应的云参数耦合后得到综合评价云，将综合评价云与标准云进行对比得到评价结果。在山西东古城煤矿进行模型的实际应用，结果表明，基于BWM－云模型的煤矿突发事件应急救援能力评价结果为“良好”，与矿企实际救援水平一致。通过对应急预防能力、善后恢复能力等关键因素的监测，可实现对突发事件的全方位管理，从而有效提高煤矿突发事件应急救援能力。

关 键 词：煤矿；突发事件；最优最劣法；云模型；应急救援

中图分类号：X936 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.1003－1251.2024.05.014

Evaluation of Mine Emergency Rescue Ability Based on BWM-cloud Model

CUI Xinchao[1]，XUE Kailong[1]，QI Yun[2]，QI Qingjie[3]

(1. School of Coal Engineering，Shanxi Datong University，Datong 037000，China；2. College of Mechanical Engineering and Automation，Liaoning University of Technology，Jinzhou 121001，China；
3. Emergency Science Research Institute，CCTEG Chinese Institute of Coal Science，Beijing 100013，China)

Abstract：In order to effectively deal with coal mine emergencies and improve the emergency rescue ability，a coal mine emergency rescue ability evaluation model based on the best worst method (BWM) and cloud model is proposed. First of all，the evaluation index system of coal mine emergency rescue ability，which includes four first-level indexes，emergency prevention ability，emergency preparedness ability，emergency response ability，recovery ability and 17 second-level indexes，is constructed. Then BWM is used to determine the weight of evaluation indicators，and the weight value of each indicator is coupled with the corresponding cloud parameters to obtain a comprehensive evaluation cloud，and the evaluation results are compared with the standard cloud. The practical application of the model in Dongguchengcoal Mine of Shanxi Province shows that the evaluation result of mine emergency rescue ability based on BWM-cloud model is good，which is consistent

收稿日期：2024－03－09

基金项目：国家自然科学基金面上项目(52174188)；山西大同大学研究生教育创新项目(23CX49)

作者简介：崔欣超(1999—)，男，硕士研究生；祁云(1988—)，通信作者，男，副教授，博士，研究方向为矿井灾害防治、安全评价、应急技术与管理。

with the actual rescue level of mining enterprises. By monitoring the key factors such as emergency prevention ability and recovery ability, the comprehensive management of emergencies can be realized, so as to effectively improve the emergency rescue ability of coal mine.

Key words: coal mine; emergencies; best worst method; cloud model; emergency rescue

我国 2022 年能源消费总量为 54.1 亿吨标准煤,其中煤炭消费量占能源总量的 56.2%[1]。近年来,随着煤矿开采深度不断加大,各种灾害的发生频率、范围均不断增加,生产人员生命和国家财产遭受重大损失[2-3]。因此,科学评价煤矿突发事件应急救援能力有利于矿企认清自身应急救援水平并强化薄弱环节,从而减少人员伤亡与财产损失,对于突发事件应急救援工作具有重要指导意义。

目前,国内外学者对煤矿突发事件应急救援能力评价开展了大量的研究。兰国辉等[4]使用粗糙集与重要性 – 绩效表现性分析对煤矿突发事件应急救援能力进行评价,论证了各评价指标的重要性,提升了评价结果的准确性和易理解性;张宇等[5]将模糊优先规划和区间可拓理论相结合,构建了矿井火灾应急救援能力评估模型,有效增强了矿井应急救援决策的可信度;杨悦等[6]采用梯形 Vague 集熵权法构建了煤矿应急救援能力效用值评估模型,使得应急救援决策结果更为稳健和可信;田水承等[7]在物理 – 事理 – 人理系统方法论(WSR)的基础上,将组合赋权法与物元可拓理论相结合,构建了煤矿突发事件应急管理能力评价模型,改善了煤矿应急管理过程中的薄弱环节;Jha 等[8]运用计算机辅助设计软件模拟确定救援队伍应急救援最短路线,可在紧急情况下更直观地指挥应急救援队伍,以提高人员生存率。

虽然上述研究取得了一定成效,但由于煤矿突发事件应急救援的影响因素比较复杂,目前研究中均存在评价指标主次关系不明确、考虑因素相对较少等缺点,导致评价结果缺乏可靠性。鉴于此,本文利用最优最劣法(best worst method, BWM)确定各评价指标的权重,引入云理论,构建基于 BWM – 云模型的煤矿突发事件应急救援能力评价模型,通过对比分析综合评价云与标准评价云的分布特征,得出煤矿突发事件应急救援能力评价等级,并以山西东古城煤矿为例,验证所建模型的合理性,以期为煤矿突发事件应急救援能力评价体系的建立提供理论支撑。

1 煤矿突发事件应急救援能力评价指标体系的构建

依据《煤矿安全规程》(国家安全生产监督管理总局令第 87 号,应急管理部令第 8 号修正)、《生产安全事故应急预案管理办法》(国家安全生产监督管理总局令第 88 号),并参考文献[9],构建煤矿突发事件应急救援能力评价指标体系,该体系包括应急预防能力、应急准备能力、应急响应能力、善后恢复能力等 4 个方面,共计 17 个指标,具体如图 1 所示。

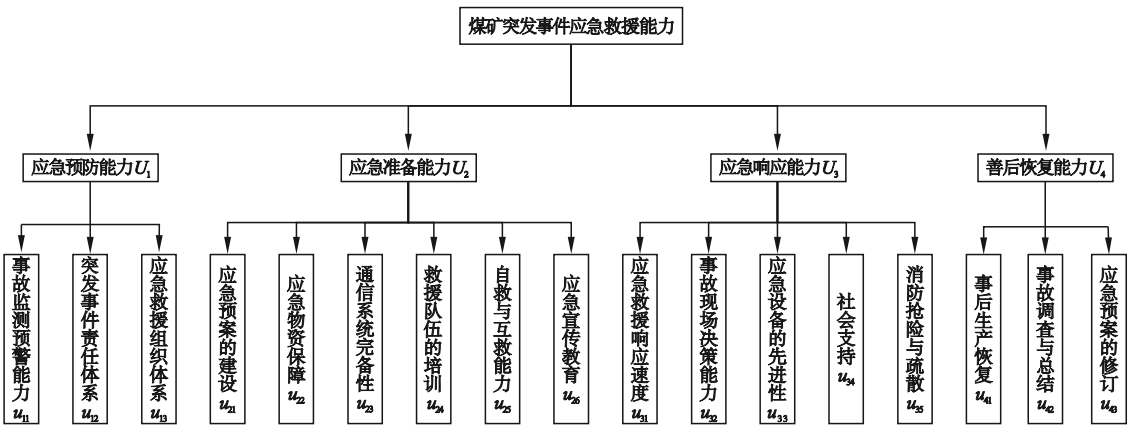


图 1 煤矿突发事件应急救援能力评价指标体系

Fig. 1 Evaluation index system of mine emergency rescue ability

2　基于 BWM – 云模型的评价模型

2.1　BWM

BWM 是由 Rezaei[10] 于 2015 年提出的一种权重确定方法,该方法可通过较少的比较信息获得一致性结果,其步骤如下[11]。

1)确定评价指标体系。

2)确定最优指标和最劣指标。

3)为确定最优指标与其他指标的相对重要性,采用 a_{bi} 表示最优指标相对于指标 i($i=1,2,\cdots,n$)的重要度,赋值为 1 ~9 之间的整数,建立比较矩阵 $\boldsymbol{A}_b=(a_{b1},a_{b2},\cdots,a_{bn})$,$n$ 表示指标数量。

4)同理,采用 a_{iw} 表示指标 i 相对于最劣指标的重要度,建立比较矩阵 $\boldsymbol{A}_w=(a_{1w},a_{2w},\cdots,a_{nw})^T$。

5)通过 Excel 内置规划求解工具得到最优指标权重。最优问题及约束条件表示为

$$\begin{cases}\min\ \delta\\ \text{s.t.}\ \left|\dfrac{w_b}{w_i}-a_{bi}\right|\leqslant\delta\\ \left|\dfrac{w_i}{w_w}-a_{iw}\right|\leqslant\delta\\ \sum\limits_{i=1}^{n}w_i=1\\ w_i\geqslant 0\end{cases}\tag{1}$$

式中:δ 为绝对误差,优化目标是使 δ 最小;w_b 为最优指标的权重;w_i 为指标 i 的权重;w_w 为最劣指标的权重。

6)将式(1)求得的最优 δ 值用 δ^* 表示,并求得一致性比率 C_R,其取值区间为[0,1],C_R 值越低,说明权重结果越可靠。C_R 计算公式为

$$C_R=\delta^*/C\tag{2}$$

式中 C 为一致性系数,其值参考文献[10]确定。

2.2　综合评价模型

1995 年,李德毅教授等首次提出了云模型[12],该模型采用隶属云、数字特征和云生成器等方式处理定性概念与其定量描述间的不确定性转换,目前已在可靠性评估和应急路径选择等多个领域得到广泛应用,具体实施过程如下[13-15]。

1)确定标准云模型参数。根据文献[16]对煤矿突发事件应急救援能力进行等级划分,结果按照由低到高的顺序可分为 5 个等级,分别是 I(差)、II(较差)、III(一般)、IV(良好)和 V(优秀)。标准云模型参数(期望 E_x,熵 E_n,超熵 H_e)计算式为

$$\begin{cases}E_x=(c_{max}+c_{min})/2\\ E_n=(c_{max}-c_{min})/6\\ H_e=1/2\end{cases}\tag{3}$$

式中:c_{min} 为专家评分的最小值;c_{max} 为专家评分的最大值。

依据式(3)确定标准云模型参数,具体见表 1 所示。

表 1　标准云模型参数

Table 1　Standard cloud model parameters

应急救援能力等级	分值范围	云模型参数
V	[90.0,100.0]	(95.0,1.7,0.5)
IV	[75.0,90.0)	(82.5,2.5,0.5)
III	[60.0,75.0)	(67.5,4.2,0.5)
II	[25.0,60.0)	(42.5,4.2,0.5)
I	[0.0,25.0)	(12.5,4.2,0.5)

2)确定评价指标云模型参数。根据煤矿突发事件应急救援能力评价指标评分数据计算得到本文评价指标 i 的指标云期望 $E_{x,i}$、指标云熵 $E_{n,i}$、评分数据标准差 S_i^2、指标云超熵 $H_{e,i}$,计算方法如下。

$$\begin{cases}E_{x,i}=\dfrac{1}{m}\sum\limits_{j=1}^{m}Z_{j,i}\\ E_{n,i}=\sqrt{\dfrac{\pi}{2}}\cdot\dfrac{1}{m}\sum\limits_{j=1}^{m}|Z_{j,i}-E_{x,i}|\\ S_i^2=\dfrac{1}{m-1}\sum\limits_{j=1}^{m}(Z_{j,i}-E_{x,i})^2\\ H_{e,i}=\sqrt{|S_i^2-E_{n,i}^2|}\end{cases}\tag{4}$$

式中:$Z_{j,i}$ 表示第 j 个专家对第 i 个指标的评分数据;m 为专家人数。

3)生成综合评价云。将 BWM 获取的权重值用于云模型,利用反向云生成器生成综合评价云,通过对比综合评价云和标准评价云分布特征得到最终评价结果,并确定煤矿突发事件应急救援能力的评价级别。综合评价云的期望 E_x、熵 E_n 和超熵 H_e 计算式分别为

$$\begin{cases}E_x=\sum\limits_{i=1}^{n}(E_{x,i}\cdot w_i)\\ E_n=\sqrt{\sum\limits_{i=1}^{n}(E_{n,i}^2\cdot w_i)}\\ H_e=\sum\limits_{i=1}^{n}(H_{e,i}\cdot w_i^2)/\sum\limits_{i=1}^{n}w_i^2\end{cases}\tag{5}$$

煤矿突发事件应急救援能力评价流程如图 2 所示。具体步骤为:首先对被评价目标进行分析,并选取评价指标;然后采用 BWM 确定各个指标的权重,并与云特征值进行相乘,得到综合评价云结果;最后将标准云与获得的综合评价云进行叠加,生成综合评价云图,通过观测获得最终评价结果。

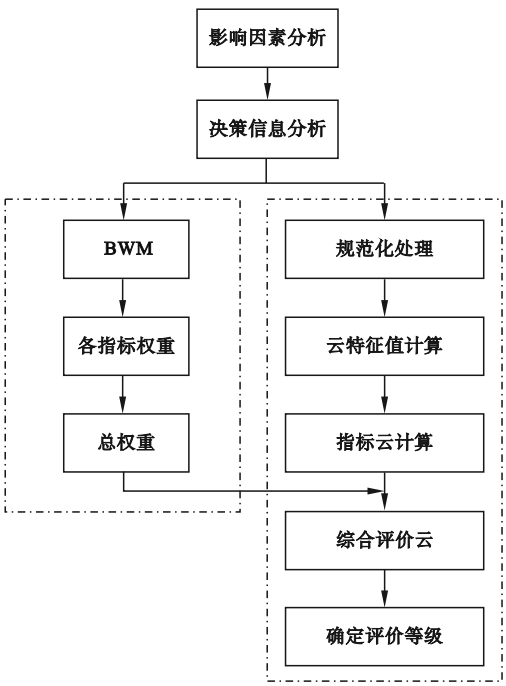


图 2 煤矿突发事件应急救援能力评价流程图

Fig. 2 Flow chart of evaluation of mine emergency rescue bility

3 工程应用

3.1 工程背景概述

以山西东古城煤矿为例,对其突发事件应急救援能力进行分析评价,验证本文模型的可靠性。山西煤炭进出口集团东古城煤矿 22#煤层平均厚度为 17.27 m,区含煤地层的厚度为 600 ~ 1 050 m,平均厚度为 729 m,平均倾斜长度为173 m,平均煤层倾角为 8°。工作面地质构造复杂,顶板的稳定性相对较差,承受的压力也相对较大,易被压碎剥落,存在生产事故隐患。准确评价煤矿突发事件应急救援能力,能够使矿企正确认识自身应急救援能力水平,保障矿井安全高效生产。

3.2 指标权重的确定

邀请 10 位采矿工程、应急管理方面专家,采用本文所建评价模型定性评价煤矿突发事件应急救援能力。由式(1)和式(2)获得各评价指标的权重,如表 2 所示。

表 2 指标权重计算结果

Table 2 The calculation results of index weights

一级指标	权重	二级指标	BWM 权重	总权重
U_1	0.146	u_{11}	0.66	0.096
		u_{12}	0.10	0.015
		u_{13}	0.24	0.035
U_2	0.259	u_{21}	0.046	0.012
		u_{22}	0.099	0.026
		u_{23}	0.165	0.042
		u_{24}	0.101	0.027
		u_{25}	0.432	0.112
		u_{26}	0.157	0.041
U_3	0.528	u_{31}	0.164	0.086
		u_{32}	0.433	0.229
		u_{33}	0.164	0.086
		u_{34}	0.074	0.039
		u_{35}	0.165	0.087
U_4	0.067	u_{41}	0.661	0.044
		u_{42}	0.102	0.007
		u_{43}	0.237	0.016

3.3 综合评价云的构建

由专家组对企业应急救援能力打分,并根据式(4)计算各评价指标的云模型参数,具体结果如表 3 所示。

表 3 各指标云模型参数

Table 3 Parameters of each index cloud model

评价指标	云模型参数
u_{11}	(79.7,2.63,0.833)
u_{12}	(86.1,2.38,0.122)
u_{13}	(86.6,2.46,0.482)
u_{21}	(75.6,2.91,0.692)
u_{22}	(76.9,2.41,0.295)
u_{23}	(76.7,3.21,0.711)
u_{24}	(76.3,1.88,0.836)
u_{25}	(79.2,3.76,1.296)
u_{26}	(78.2,3.16,0.896)
u_{31}	(81.3,2.76,0.519)
u_{32}	(76.1,3.13,0.531)
u_{33}	(73.5,2.13,1.137)
u_{34}	(78.6,3.37,0.831)
u_{35}	(77.5,2.97,0.637)
u_{41}	(71.2,2.37,0.644)
u_{42}	(76.9,2.93,0.681)
u_{43}	(74.7,2.61,0.733)

将所有指标的云模型参数代入式(5),即可得到东古城煤矿突发事件应急救援能力综合评价云模型数字特征(cloud model numerical characteristics,CMNC),本文 CMNC(期望,熵,超熵)为(77.65,2.9,0.75)。通过 Matlab 软件获得各评价等级的标准云图,将标准云和综合评价云叠加得到综合评价云图,如图 3 所示。

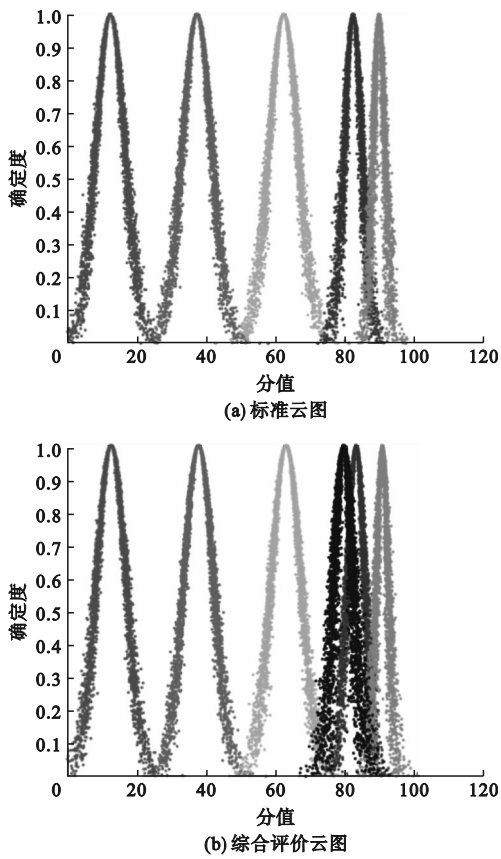


图 3　标准云图和综合评价云图

Fig. 3　Standard cloud image and comprehensive evaluation cloud image

由图 3 可知,在煤矿突发事件应急救援能力评价中,采用本文提出 BWM – 云模型得到的分布期望与标准云分布期望相对误差仅为 5.9%。图 3(b)中由本文模型得到的评价云滴比较集中,未出现明显波动,所得结果的可靠性很高,且云滴绝大多数分布在等级“IV”区间内,几乎与之重合,仅少数云滴分布在等级“III”区域内。由此可依据最大隶属度原理得到,东古城煤矿突发事件应急救援能力评价等级为“IV”级,即“良好”等级。本文评价结果与该矿井实际评估验收结果一致,说明本文模型真实可靠。

基于上述评价结果,并针对东古城煤矿实际情况,提出如下改进措施:完善应急预案,根据各种突发事故的特点和可能发生的情况,制定详细、可行的应急预案,确保在事故发生时各项救援工作能够有序、高效地进行;提高设备投入,确保救援设备先进、适用且具备良好的性能,为救援工作提供有力保障,定期对设备进行维护和检查,确保设备在关键时刻能够正常使用;强化救援队伍建设,加强救援队伍的组织建设,提高队伍的凝聚力、执行力和战斗力,注重救援队伍的思想政治工作,树立救援人员的责任感和使命感。加强应急指挥人员的培训,提高其业务素质、领导能力和沟通协调能力,确保在事故发生时指挥人员能够迅速做出决策并有效指挥救援。

4　结论

构建了基于 BWM – 云模型的煤矿突发事件应急救援能力评价模型,并在山西东古城煤矿进行实际应用,得到如下结论。

1)通过 BWM 得到的指标权重可有效降低主观因素对指标权重产生的影响。从权重可以看出:事故监测预警能力(u_{11})、自救与互救能力(u_{25})、事故现场决策能力(u_{32})和消防抢险与疏散(u_{35})对煤矿突发事件应急救援能力影响较大,且影响程度按由大到小的顺序为 $u_{32} > u_{25} > u_{11} > u_{35}$。

2)将本文提出 BWM – 云模型法所得到的综合评价云模型数字特征与标准云模型数字特征进行对比分析,结果表明,综合评价云分布与标准云分布期望的相对误差仅为 5.9%,且两者的超熵较为接近,说明 BWM – 云模型法所得到的评价结果准确有效,具有较好的工程应用前景。

3)通过 BWM – 云模型法评价结果可知:东古城煤矿在突发事件中的应急救援能力为“IV”级,在综合评价云图中表现出较高的集中度,未见明显波动,评价结果具有较高的可靠性。该矿突发事件应急救援能力整体良好,但在生产中也应加强事故的监测和生产人员的应急训练与管理,以确保最大程度减少事故发生造成的损失。

4)针对该矿应急救援能力评价中存在的不足,提出了完善应急预案、提高设备投入、强化救援队伍建设等 3 种措施,以提升煤矿突发事件的应急救援能力,减少事故损失,保障员工生命财产安全。

参考文献(References):

[1]　国家统计局. 中华人民共和国 2022 年国民经济和社会发展统计公报[J]. 中国统计,2023(3):12 – 29.

[2]　王云刚,崔春阳,张飞燕,等. 2011—2020 年我国较大及以上煤矿事故统计分析及研究[J]. 安全与环境学报,2023,

23(9):3269 – 3276.
WANG Y G,CUI C Y,ZHANG F Y,et al. Statistical analysis and research on major and above coal mine accidents in China from 2011 to 2020[J]. Journal of Safety and Environment, 2023,23(9):3269 – 3276. (in Chinese)
[3] 祁云,汪伟,陈淼,等. 深部矿山巷道岩爆应急管理能力评估[J]. 安全与环境学报,2023,23(5):1407 – 1414.
QI Y,WANG W,CHEN M,et al. Evaluation on emergency management ability of rock burst in deep mine roadway[J]. Journal of Safety and Environment,2023,23(5):1407 – 1414. (in Chinese)
[4] 兰国辉,陈亚树,荀守奎. 基于 RS-IPA 的煤矿突发事件应急救援能力评价[J]. 中国安全科学学报,2020,30(5):169 – 176.
LAN G H,CHEN Y S,XUN S K. Evaluation of emergency rescue ability of coal mines based on RS-IPA[J]. China Safety Science Journal,2020,30(5):169 – 176. (in Chinese)
[5] 张宇,吕淑然. 基于 FPP – 区间可拓的矿井火灾应急救援能力评估[J]. 矿业安全与环保,2021,48(1):108 – 114.
ZHANG Y,LYU S R. Evaluation of mine fire emergency rescue capability based on FPP-interval extension[J]. Mining Safety & Environmental Protection,2021,48(1):108 – 114. (in Chinese)
[6] 杨悦,杨丹,陈孝国,等. 基于梯形 Vague 集熵权法的煤矿应急救援能力评价研究[J]. 灾害学,2018,33(3):156 – 160.
YANG Y,YANG D,CHEN X G,et al. Research on coal mine emergency rescue capability evaluation based on trapezoidal vague sets entropy method[J]. Journal of Catastrophology, 2018,33(3):156 – 160. (in Chinese)
[7] 田水承,高玲,范彬彬,等. 基于 WSR 方法论的煤矿突发事件应急管理能力评价[J]. 西安科技大学学报,2022,42(4):647 – 654.
TIAN S C,GAO L,FAN B B,et al. Capability evaluation of coal mine emergency management based on WSR methodology[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology,2022,42(4):647 – 654. (in Chinese)
[8] JHA A,VERBURG A,TUKKARAJA P. Internet of things-based command center to improve emergency response in underground mines[J]. Safety and Health at Work,2022,13(1):40 – 50.
[9] 孙继平,钱晓红. 煤矿重特大事故应急救援技术及装备[J]. 煤炭科学技术,2017,45(1):112 – 116,153.
SUN J P,QIAN X H. Emergency rescue technology and equipment of mine extraordinary accidents[J]. Coal Science and Technology,2017,45(1):112 – 116,153. (in Chinese)
[10] REZAEI J. Best-worst multi-criteria decision-making method: some properties and a linear model[J]. Omega,2016,64: 126 – 130.
[11] HU N Y,LI X X,LI Y F,et al. Decision-making and optimization model for fire emergency replacements in colleges based on BWM and VIKOR under interval 2-tuple linguistic [J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems,2023,45(2): 3123 – 3136.
[12] 李德毅,孟海军,史雪梅. 隶属云和隶属云发生器[J]. 计算机研究与发展,1995,32(6):15 – 20.
LI D Y,MENG H J,SHI X M. Membership clouds and membership cloud generators[J]. Journal of Computer Research and Development,1995,32(6):15 – 20. (in Chinese)
[13] QI Y,XUE K L,WANG W,et al. Coal and gas protrusion risk evaluation based on cloud model and improved combination of assignment[J]. Scientific Reports,2024,14:4551.
[14] 于洋,孙成伟,张冰冰,等. 云模型 RBF 神经网络的数据中心温度预测[J]. 沈阳理工大学学报,2013,32(4):9 – 14.
YU Y,SUN C W,ZHANG B B,et al. Temperature prediction based on cloud model RBF neural network data center[J]. Journal of Shenyang Ligong University,2013,32(4):9 – 14. (in Chinese)
[15] WANG D,ZENG D B,SINGH V P,et al. A multidimension cloud model-based approach for water quality assessment[J]. Environmental Research,2016,149:113 – 121.
[16] 苗成林,孙丽艳,杨力,等. 煤矿企业突发事件应急能力影响因素实证分析[J]. 中国安全科学学报,2014,24(1): 113 – 118.
MIAO C L,SUN L Y,YANG L,et al. An empirical research on factors affecting sudden events emergency capability of coal mine enterprise[J]. China Safety Science Journal,2014, 24(1):113 – 118. (in Chinese)

(责任编辑:宋颖韬)

(上接第 90 页)

[7] 石棚,王浩,柳家为,等. 钢筋插入式波纹管浆锚连接受力性能数值分析[J]. 哈尔滨工程大学学报,2021,42(6): 810 – 817.
SHI P,WANG H,LIU J W,et al. Numerical analysis of anchorage properties of grouting connection of pre-buried bellows with steel bars inserted[J]. Journal of Harbin Engineering University,2021,42(6):810 – 817. (in Chinese)
[8] 周文君,吴敏,李姗珊,等. 装配式浆锚连接有限元计算弹簧 – 杆模型研究[J]. 沈阳理工大学学报,2021,40(5): 71 – 78.
ZHOU W J,WU M,LI S S,et al. Study on spring-rod element model for the finite element calculation of prefabricated slurry anchor connection[J]. Journal of Shenyang Ligong University,2021,40(5):71 – 78. (in Chinese)
[9] 周文君,于莹,吴敏,等. 装配式浆锚连接有限元计算弹簧 – 梁模型提出[J]. 水利与建筑工程学报,2021,19(4): 144 – 149.
ZHOU W J,YU Y,WU M,et al. A spring-beam element model for the finite element calculation of prefabricated slurry anchor connection[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering,2021,19(4):144 – 149. (in Chinese)
[10] 聂红鑫,于莹,李令令,等. 钢筋套筒灌浆连接有限元计算弹簧 – 梁 – 块单元模型提出[J]. 科技和产业,2022,22(3):297 – 303.
NIE H X,YU Y,LI L L,et al. Put forward spring-beam-block element model for the finite element calculation of grouting sleeve connection[J]. Science Technology and Industry, 2022,22(3):297 – 303. (in Chinese)
[11] COMI C,PEREGO U. Fracture energy based bi-dissipative damage model for concrete[J]. International Journal of Solids and Structures,2001,38(36/37):6427 – 6454.
[12] 尹兴文. 竖向钢筋浆锚搭接预制剪力墙抗震性能研究[D]. 湘潭:湖南科技大学,2019.
[13] 陈昕. 改进约束浆锚连接(CPSS)的预制剪力墙抗震性能研究[D]. 大连:大连理工大学,2020.
[14] 倪英华. 约束浆锚连接极限搭接长度试验研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.
[15] 路辉. 带钢接头的装配式钢筋混凝土梁抗剪性能研究[J]. 建筑结构,2023,53(9):115 – 122.
LU H. Study on shear behavior of prefabricated reinforced concrete beams with steel joints[J]. Building Structure,2023, 53(9):115 – 122. (in Chinese)

(责任编辑:宋颖韬)