

DOI:10.19431/j.cnki.1673-0062.2020.01.004

基于灰色关联度和变权理论的地震条件下 铀尾矿库群坝安全评价研究

蒋复量^{1,2,3}, 吴浩楠¹, 刘永^{1,2,3}, 王者¹, 谭彪¹, 郭锦涛¹, 陈冠¹

(1. 南华大学资源环境与安全工程学院, 湖南衡阳 421001; 2. 湖南省铀尾矿库退役治理工程技术研究中心, 湖南衡阳 421001; 3. 湖南省核燃料循环技术与装备协同创新中心, 湖南衡阳 421001)

摘要:为了解决在极端条件(地震)下尾矿库坝体稳定性的安全评价问题,提出灰色关联度与变权理论相结合的评价模型。以南方某铀尾矿库为例,将10个坝体依据尾矿堆坝坡、抗剪切强度、孔隙度、含水量四个方面进行指标取值;最后,利用灰色关联度与变权理论计算出各坝体稳定性关联度指标并进行排序,结果表明:在南方某铀尾矿库的10个坝中,第一拦水坝(1#坝)的稳定性最好,初期坝(6#坝)和战斗坝(5#坝)的稳定性排在末位。

关键词:铀尾矿坝;变权理论;灰色关联度;蝴蝶结模型;安全评价

中图分类号:TD928 **文献标志码:**B **文章编号:**1673-0062(2020)01-0022-07

Safety Evaluation of Uranium Tailings Dams Under Earthquake Based on Gray Relational Analysis and Variable Weight Theory

JIANG Fuliang^{1,2,3}, WU Haonan¹, LIU Yong^{1,2,3}, WANG Zhe¹,
TAN Biao¹, GUO Jintao¹, CHEN Guan¹

(1. School of Resource & Environment and Safety Engineering, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China; 2. Hunan Province Engineering Technology Research Center of Uranium Tailings Treatment Technology, Hengyang, Hunan 421001, China; 3. Hunan Cooperative Innovation Center for Nuclear Fuel Cycle Technology & Equipment, Hengyang, Hunan 421001, China)

Abstract: In order to solve the safety evaluation of the stability of the tailings dam under earthquake, an evaluation model combining gray relational analysis and variable weight the-

收稿日期:2019-10-31

基金项目:国家自然科学基金项目(11875164);铀矿冶放射性控制技术湖南省工程研究中心、湖南省铀尾矿库退役治理技术工程技术研究中心联合开放课题(2018YKZX1004);2019年湖南省核燃料循环技术与装备协同创新中心开放基金项目(2019KFZ01);2019年湖南省研究生科研创新项目(CX20190726)

作者简介:蒋复量(1978-),男,副教授,博士,主要从事铀矿冶辐射防护与环境保护方面的研究。E-mail: jfljfd@163.com

ory is proposed. Taking a uranium tailings pond in the south as an example, tailings dam slope, shear strength, porosity and water quantity of ten dams are measured. Finally, the gray relational degree and variable weight theory are used to calculate and sort the correlation index of each dam body. The results show that the stability of the first dam (1[#] dam) is the best, and the stability of the initial dam (6[#] dam) and the combat dam (5[#] dam) is ranked at the last position among the 10 dams in a uranium tailings pond.

key words: uranium tailings dam; variable weight theory; gray relational analysis; bow tie model; safety evaluation

0 引言

据资料显示,全球每年产生的铀尾矿达到 6×10^4 t^[1]。作为储存铀尾矿砂等放射性废物场所的铀尾矿库,其数量也随之激增。我国矿产资源分布与地震带分布具有高度的重合性,许多尾矿库处于地震带区域。地震荷载条件下,地震加速度影响和坝体强度降低是导致尾矿坝抗震稳定性不足的重要因素^[2]。2008年汶川地震期间,四川省、甘肃省、陕西省的多处尾矿库不同程度受损^[3],分析认为,当地震发生时,由于地震波对坝体在水平和垂直两个方向剧烈震荡作用,尾矿坝极易发生边坡失稳、溃坝等安全事故;2011年,日本本州岛东海岸发生里氏9.0级特大地震,地震发生时产生的叠加自然效应引起高达14 m以上的强海啸冲毁了柴油机组,最终因反应堆过热发生化学爆炸,致使大量放射性物质向外界泄露^[4]。地震及其产生的次生灾害如海啸、山体滑坡、爆炸等叠加效应对核设施的安全运行构成了重大威胁。与此同时,近年来随着大规模砂岩型铀矿的勘探开发,发现砂岩型铀矿常常与石油、天然气或煤共生在同一区域,这些矿产之间的共生关系导致其尾矿坝在地质灾害发生时极易导致放射性污染物泄露事故。由此可见,保证铀尾矿库在地震条件下的安全运行以及防止放射性污染物泄露已成为亟需解决的问题。

很多学者研究了不同的风险评价方法,比如:模糊评价法^[5]、神经网络法^[6]、集对分析法^[7]、云模型^[8]以及灰色理论^[9],Q. Li等^[5]基于传统的概率统计方法忽略数据集不完整情况下风险评估的模糊性的缺陷,建立一个模糊模型,以评估洪水风险的不完全数据集。宋博^[6]应用基于BP神经网络的地铁站深基坑施工安全评价,结果表明:该车站深基坑施工安全等级为高,与实际情况吻合;安全意识、机械伤人、周边环境、技术交底、渗流破

坏是影响深基坑施工安全的主要指标。Y. C. Wang等^[7]针对喀斯特隧道涌流的不确定特性,采用集对分析(set pair analysis, SPA)方法对涌流进行了风险评估,评价结果不仅与属性数学理论的结果一致,而且与实际情况吻合良好。此外,还验证了集对分析方法在岩溶隧道风险评估中具有较高的准确性。周江涛等^[8]用云模型分析2000—2011年山东省危化品企业事故时空分布的均匀性和稳定性,并据此分析了事故的直接原因。灰色系统理论是一种基于较少的数据和不完整的信息,尤其是适当的数据难以获取的不确定研究方法^[9],由于尾矿库仍然属于复杂的研究对象,数据不容易获取,所以灰色系统理论可以运用于此。在安全评价领域,不同的评价指标权重将会影响到评价结果,因此为了使评价结果更加精准,评价指标权重的选取就显得十分重要了。

确定评价指标权重的方法可以分为主观权重法、客观权重法以及综合权重法。主观权重法主要包括:层次分析法^[10]、特尔菲法^[11],这些方法主要基于专家打分而不是实际数据。主观权重吸取了专家的优点,但不同的专家可能给出大相径庭的评价结果;客观权重法主要有:主要成分分析法^[12]、熵权重法^[13]、变系数法^[14],这些方法主要基于实际数据而不是专家的判断。客观权重法虽然基于实际数据,但并不意味着这些数据反映了事情的真实情况;综合权重法则结合了两者的,在基于实际数据的同时也参考了专家的判断。

蝴蝶结模型是对目标事件提出针对性措施的有效方法,也被广泛用作风险分析工具,将事故的基本原因、可能的后果和相应的安全措施集成在一个直观的图中。该模型已应用于风险分析的许多方面,如风险控制^[15]、安全管理^[16]。V. Dianous^[15]采用了蝴蝶结模型来进行现场风险控制,并使用蝴蝶结法识别了重大事故和障碍。M. Yazdi^[16]根据蝴蝶结模型分析和评估了H₂S造成危险的致因和后果。本研究希望将蝴蝶结模型应

用于铀尾矿库坝体稳定性的安全实践中来,进行坝体失稳的薄弱环节分析。

1 方法

1.1 灰色关联分析

灰色关联分析是灰色系统理论的重要组成部分,用于评价不同因素之间的灰色关联程度。两个因素之间的灰色关联度越高,表明其相关性越大;两个因素之间的灰色关联度越低,表明其相关性越小^[17]。灰色关联度的计算是灰色关联分析的核心。具体步骤如下:

行表示评价对象,列表示评价对象的评价指标值,利用所有评价对象及其原始指标数据建立矩阵,如下:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix}$$

其中, a_{ij} 的数值表示第*i*评价对象的第*j*个评价指标值。

矩阵 $D = [d_1 d_2 \cdots d_n]$ 是各项评价指标的最优值。对于正向指标, d 取评价指标值中的最大值;对于负向指标,则取评价指标值中的最小值。如果在同一个评价对象中所有的评价指标参数均达到了最优值,则认为该评价对象是最优的。但是,在实际情况中几乎不存在这样完美的评价对象。

在评价过程中,由于不同的评价指标有着不同的量纲并且会存在着一些比较大的数值,直接使用原始数据不利于计算。因此,将评价指标值运用公式(1)和(2)作无量纲化处理。

$$\bar{a} = \frac{\sum_{i=1}^m a_{ij}}{m} \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

$$b_{ij} = \frac{a_{ij}}{\bar{a}_j} \quad (2)$$

对原始指标数据矩阵 A 处理后,得到原始数据的无量纲矩阵 B :

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ b_{m1} & b_{m2} & \cdots & b_{mn} \end{bmatrix}$$

矩阵 $D^* = [d_1^* d_2^* \cdots d_n^*]$ 为无量纲矩阵 B 的各项评价指标最优值,根据矩阵 B 和 D^* ,计算灰色关联度系数以完成后续灰色关联度分析。灰

色关联度系数的计算公式如下:

$$\xi_{ij} = \frac{\min_{\substack{1 \leq i \leq m \\ 1 \leq j \leq n}} |d_j^* - b_{ij}| + \rho \max_{\substack{1 \leq i \leq m \\ 1 \leq j \leq n}} |d_j^* - b_{ij}|}{|d_j^* - b_{ij}| + \rho \max_{\substack{1 \leq i \leq m \\ 1 \leq j \leq n}} |d_j^* - b_{ij}|} \quad (3)$$

由于绝对值的最大值可能过大,所以借助系数 ρ 来削弱该数据的影响以便改善灰色关联度系数之间的显著差异,通常地, ρ 取0.5。

将灰色关联地系数和各项评价指标的权重值相结合即可由公式(4)计算出评价对象的灰色关联度。灰色关联度数值越大,所评价的对象越接近最优指标集 D 。据此,可以确定所评价对象的优劣次序。

$$r_i = \sum_{j=1}^n \xi_{ij} \times w_j \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (4)$$

1.2 变系数法

在选择灰色关联度法或是其他分析方法对评价对象进行分析时,必然离不开权重的确定,赋权重值的方法是否合理、是否能反应实际情况直接影响着评价结果的准确性。考虑到主观权重受个人主观感受的限制,所以本文采用变系数法。该方法计算权重值是基于原始数据并且可以反应指标信息的变化,属于客观权重法。评估指标的变化程度越大,就表明该评价指标在所讨论的问题中具有良好的独特性,因此,应对这样的评估指标应给予更大的权重;反之,应对指标给予较小的权重。以下是根据变系数法计算评价指标权重的过程。

评估指标的预期和标准偏差基于公式(5)和(6)计算得出:

$$\mu = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m a_{ij} \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (a_{ij} - \mu_j)^2} \quad (6)$$

通过公式(7)可得出评价指标的变系数:

$$\delta_j = \frac{\sigma_j}{\mu_j} \quad (7)$$

通过公式(8)将变系数作归一化处理,得到评估指标的权重:

$$w_j = \frac{\delta_j}{\sum_{j=1}^n \delta_j} \quad (8)$$

1.3 蝴蝶结模型

蝴蝶结模型(如图1所示)是对目标事件提出针对性措施的有效方法,需要讨论的核心事件(事故)位于蝴蝶结的中间,其左边是可能导致核

心事件发生的原因事件(事故致因),与事故树分析法的原理相同;而右边是核心事件可能造成的后果,原理与事件树类似。针对事故的致因及后果来设置相应的安全屏障,以阻断核心事件发生的路径,防止其发生。为了有效的防范事故发生,预防型安全措施被设立在蝴蝶结的左边,用来防止核心事件发生;补救型安全措施被设立在蝴蝶结的右边,用来降低核心事件造成的后果。

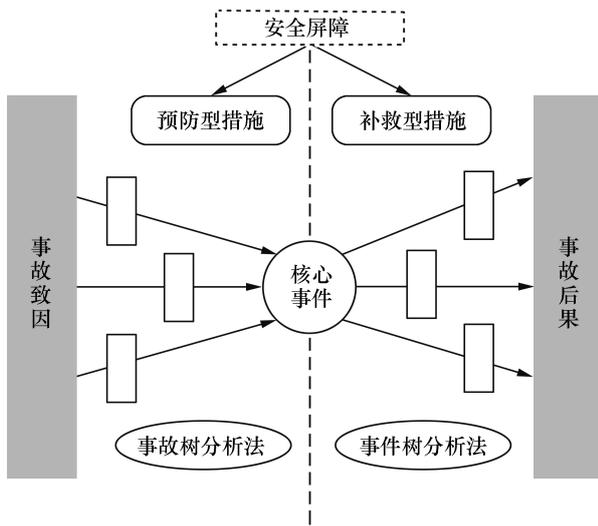


图1 蝴蝶结模型
Fig.1 Bow tie model

2 实例分析

凭借变系数法得出的评价指标权重是各指标对评价对象影响程度的量化表达,也是计算灰色关联度的基础。本文将变系数权重法和灰色关联度分析法相结合,希望为铀尾矿库的安全稳定提供更优质的评价方法。

2.1 应用

南方某尾矿库位于人口密集区,由10个坝段围拦而成,10个坝段的总长度为4600m,约占库周围总长度的77%。坝段的坝坡总面积约为 $22 \times 10^5 \text{ m}^2$,各坝段的名称分别为:第一拦水坝(1#坝)、第二拦水坝(2#坝)、跃进坝(3#坝)、松林坝(4#坝)、战斗坝(5#坝)、初期坝(6#坝)、南坡坝(7#坝)、南坡横坝(8#坝)、雷公塘坝(9#坝)以及东试验坝(10#坝)。由于尾矿库的建造时间长、工程量大并且受当时生产力水平和技术工艺的限制,尾矿库的稳定性发生了很大的变化。此外,通过查阅关于我国内陆地质活动断裂带的相关资料可知,该铀尾矿库所在的湘江衡阳段上游地区属

于浏阳—衡阳—永州断裂带。该地震带由数条次级断裂组成,延伸长达几百公里,总体走向北东 $30^\circ \sim 40^\circ$,倾向北西,倾角 $40^\circ \sim 60^\circ$ 。在断裂带延展的衡阳、长平盆地边界带和盆地与北东断裂带及北西向断裂交汇部位有地震活动。一旦发生地震,铀尾矿库的稳定性就会受到破坏,还有可能引发次生灾害造成重大核安全事故。因此,为了尾矿库的长期稳定安全,需要对十座坝体在极端条件(地震)下的稳定性进行安全评价,以便于进一步为尾矿库的退役治理工作提供指导。

2.2 评价指标体系

由于地震条件对坝体稳定性的影响因素较为复杂,本文依据相关文献^[18-19]以及所研究铀尾矿库的现场实际测量情况,建立了相应的评价指标,其中包括:坝坡、抗剪切强度、孔隙度和含水量四个指标,各指标取值见表1。

表1 评价指标及取值
Table 1 Evaluation indicators and values

坝体编号	坝坡	抗剪切强度/kPa	孔隙度/%	含水量/%
1#	1:4.03	65	46	28.3
2#	1:3.35	52	46	27.9
3#	1:3.07	13	47	28.8
4#	1:2.27	42	48	29.7
5#	1:1.50	23.4	47.9	29.5
6#	1:1.31	25.3	47	28.8
7#	1:1.50	30	44	25.9
8#	1:1.50	30	42	24.9
9#	1:2.50	19	49	30.2
10#	1:2.50	40	45	24.5

在发生地震时,地震作用会造成岩体结构松动,产生破裂面和错位面;由于边坡坡肩的端部效应,使得地震加速度在坡肩部位急剧放大,造成瞬时拉应力,使得坝坡和坝体其他部位在一定范围内产生弧形裂缝,这种裂缝导致其稳定性降低。因此,坝体的边坡和坝体的抗剪切强度是评价地震条件下坝体稳定性的重要因素。此外,地震的累积效应会使坝体出现易于产生触变和液化的松散结构,当降雨量、自身含水量过大或孔隙水压力过大时,会导致岩体力学参数降低,进而导致坝体失稳。所以,选择坝体的孔隙度和含水量作为其评价指标。

2.3 计算过程和结果

根据上述评价体系建立原始数据矩阵:

$$A = \begin{bmatrix} 0.248 & 65 & 46 & 28.3 \\ 0.299 & 52 & 46 & 27.9 \\ 0.326 & 13 & 47 & 28.8 \\ 0.441 & 42 & 48 & 29.7 \\ 0.667 & 23.4 & 47.9 & 29.5 \\ 0.763 & 25.3 & 47 & 28.8 \\ 0.667 & 30 & 44 & 25.9 \\ 0.667 & 30 & 42 & 24.9 \\ 0.4 & 19 & 49 & 30.2 \\ 0.4 & 40 & 45 & 24.5 \end{bmatrix}$$

其中,最优值矩阵 $D = [0.248 \ 65 \ 42 \ 24.5]$

通过公式(1)、(2)建立原始数据的无量纲矩阵:

$$B = \begin{bmatrix} 0.508 & 1.913 & 0.996 & 1.016 \\ 0.613 & 1.531 & 0.996 & 1.002 \\ 0.668 & 0.383 & 1.017 & 1.034 \\ 0.904 & 1.236 & 1.039 & 1.067 \\ 1.367 & 0.689 & 1.037 & 1.059 \\ 1.564 & 0.745 & 1.017 & 1.034 \\ 1.367 & 0.883 & 0.953 & 0.930 \\ 1.367 & 0.883 & 0.909 & 0.894 \\ 0.821 & 0.559 & 1.061 & 1.084 \\ 0.821 & 1.178 & 0.975 & 0.880 \end{bmatrix}$$

其中,无量纲矩阵 B 的最优值矩阵为

$$D^* = [0.508 \ 1.913 \ 0.909 \ 0.880]$$

通过公式(3)计算得出灰色关联度系数:

$$E = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0.898 & 0.849 \\ 0.879 & 0.667 & 0.898 & 0.862 \\ 0.827 & 0.333 & 0.876 & 0.832 \\ 0.659 & 0.531 & 0.855 & 0.804 \\ 0.471 & 0.385 & 0.857 & 0.810 \\ 0.422 & 0.396 & 0.876 & 0.832 \\ 0.471 & 0.426 & 0.946 & 0.939 \\ 0.471 & 0.426 & 1 & 0.982 \\ 0.610 & 0.341 & 0.815 & 0.729 \\ 0.610 & 0.510 & 0.921 & 1 \end{bmatrix}$$

根据公式(5)~(8)分别计算出各评价指标的期望值、标准差及变系数,进而得出权重值(表2)。

表2 评价指标权重参数

Table 2 Evaluation index weight parameter

项目	坝坡	抗剪切强度	孔隙度	含水量
期望值	0.487 8	33.97	46.19	27.85
标准差	0.175 8	15.07	1.98	1.934
变系数	0.360 4	0.4436	0.0429	0.0694
权重值	0.393 3	0.4842	0.0468	0.0757

由公式(4)得出铀尾矿库各坝体的灰色关联度:

$$R = E \times W = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0.898 & 0.849 \\ 0.879 & 0.667 & 0.898 & 0.862 \\ 0.827 & 0.333 & 0.876 & 0.832 \\ 0.659 & 0.531 & 0.855 & 0.804 \\ 0.471 & 0.385 & 0.857 & 0.810 \\ 0.422 & 0.396 & 0.876 & 0.832 \\ 0.471 & 0.426 & 0.946 & 0.939 \\ 0.471 & 0.426 & 1 & 0.982 \\ 0.610 & 0.341 & 0.815 & 0.729 \\ 0.610 & 0.510 & 0.921 & 1 \end{bmatrix} \times$$

$$\begin{bmatrix} 0.3933 \\ 0.4842 \\ 0.0468 \\ 0.0757 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.9618 \\ 0.7760 \\ 0.5904 \\ 0.6172 \\ 0.4730 \\ 0.4763 \\ 0.5069 \\ 0.5126 \\ 0.4983 \\ 0.6056 \end{bmatrix}$$

由灰色关联度计算结果可得,在地震条件下坝体稳定性最差的是战斗坝(5#坝),在此基础上将评价结果与基于瑞士圆弧法得出的抗震参数作对比(见表3),可以看出两者有较好的一致性。

表3 评价结果及对应排序

Table 3 Evaluation results and corresponding ranking

坝体编号	灰色关联度	抗震参数	灰色关联度降序	坝体抗震参数降序
1#	0.961 8	2.103	1#	1#
2#	0.776 0	1.909	2#	2#
3#	0.590 4	1.509	4#	10#
4#	0.617 2	1.843	10#	4#
5#	0.473 0	1.219	3#	8#
6#	0.473 6	1.265	8#	7#
7#	0.506 9	1.531	7#	3#
8#	0.512 6	1.536	9#	9#
9#	0.498 3	1.477	6#	6#
10#	0.605 6	1.87	5#	5#

3 蝴蝶结分析

蝴蝶结模型(图 2)的左边包括了 5 个可能导致 5# 坝体失稳的致因并且相应提出了 8 个预防型

安全措施;其右边包含了 5# 坝体失稳可能会导致的后果以及 6 个补救型安全对策。通过蝴蝶结法分析,坝体失稳的控制思路将会更加清晰、条理,从而降低坝体失稳的可能性。

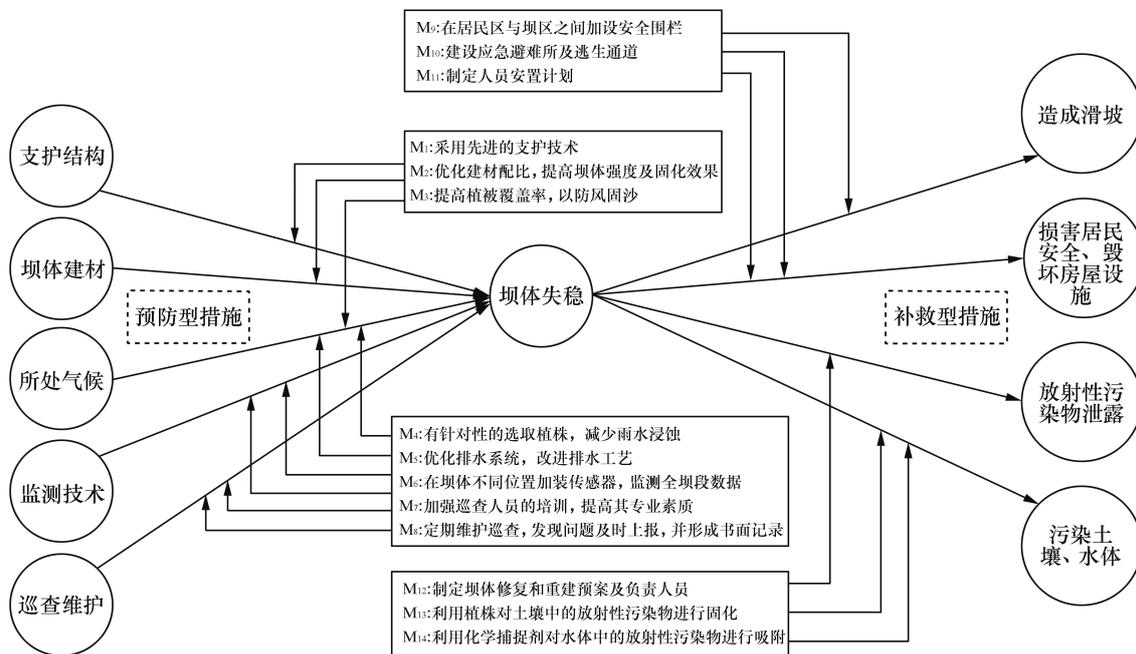


图 2 蝴蝶结模型分析

Fig.2 Bow tie model analysis

4 结论

1) 本文将变权重法和灰色关联度分析方法相结合,对铀尾矿库多坝段在地震条件下的稳定性进行评价,得出了与退役治理报告计算结果一致性较高的评价结论。在确定评价指标权重时完全基于客观的指标值,削弱了主观因素对评价结果的影响,进而使结果更加贴切于实际情况。

2) 经计算,第一拦水坝、第二拦水坝、跃进坝、松林坝、战斗坝、初期坝、南坡坝、南坡横坝、雷公塘坝以及东试验坝的灰色关联度依次为:0.961 8、0.776 0、0.590 4、0.617 2、0.473 0、0.473 6、0.506 9、0.512 6、0.498 3、0.605 6。即:在铀尾矿库的十个坝中,第一拦水坝的稳定性最好,初期坝和战斗坝在地震条件下的稳定性最差,需要在后续的退役治理工作中重点采取措施保障其安全可靠。

3) 蝴蝶结分析法基于系统工程思维,对事故致因及事故后果两方面分别建立安全屏障来阻断事故发生的路径,有利于更加深入的了解关键事

件。通过蝴蝶结模型得出的安全措施可以更加有效的防范事故发生。

参考文献:

- [1] 张金带,李友良,简晓飞. 我国铀资源勘查状况及发展前景[J]. 中国工程科学,2008,20(1):54-60.
- [2] 王文星,曹平,刘业科,等. 地震条件下尾矿坝稳定性分析[J]. 中国安全生产科学技术,2006,12(6):58-61.
- [3] 沈楼燕,龙卿吉. 汶川地震对尾矿库设计与管理的启示[J]. 有色金属(矿山部分),2009,61(1):75-76;78.
- [4] 陈达. 核能与核安全:日本福岛核事故分析与思考[J]. 南京航空航天大学学报,2012,44(5):597-602.
- [5] LI Q,ZHOU J,LIU D, et al. Research on flood risk analysis and evaluation method based on variable fuzzy sets and information diffusion[J]. Safety science, 2012, 50(5):1275-1283.
- [6] 宋博. DEA-BP 神经网络下地铁车站深基坑施工安全评价[J]. 中国安全科学学报,2019,29(5):91-96.
- [7] WANG Y C,JING H W, YU L, et al. Set pair analysis for risk assessment of water inrush in karst tunnels[J]. Bul-

- letin of engineering geology and the environment, 2017, 76(3):1199-1207.
- [8] 周江涛,张俊朋. 基于事故死亡弹性和云模型的危化企业事故时空分布及其致因分析[J]. 中国安全科学学报, 2019, 29(6):49-55.
- [9] LIANG C Y, GU D X, BICHINDARITZ I, et al. Integrating gray system theory and logistic regression into case-based reasoning for safety assessment of thermal power plants [J]. Expert systems with applications, 2012, 39:5154-5167.
- [10] ZHANG S, ZHU Q. Heterogeneous wireless network selection algorithm based on group decision[J]. The journal of China universities of posts and telecommunications, 2014, 21(3):1-9.
- [11] CHAULEUR C, GRIS J C, LAPORTE S, et al. Use of the Delphi method to facilitate antithrombotics prescription during pregnancy [J]. Thrombosis research, 2010, 126(2):88-92.
- [12] AZIRA T N, MAN Y B C, HAFIDZ R N R M, et al. Use of principal component analysis for differentiation of gelatine sources based on polypeptide molecular weights [J]. Food chemistry, 2014, 151:286-292.
- [13] HE Y, GUO H, JIN M, et al. A linguistic entropy weight method and its application in linguistic multi-attribute group decision making [J]. Nonlinear dynamics, 2016, 84(1):399-404.
- [14] OPAIT G, BLEOJU G, NISTOR R, et al. The influences of competitive intelligence budgets on informational energy dynamics [J]. Journal of business research, 2016, 69(5):1682-1689.
- [15] DE DIANOUS V, FIÉVEZ C. ARAMIS project: a more explicit demonstration of risk control through the use of bow-tie diagrams and the evaluation of safety barrier performance [J]. Journal of hazardous materials, 2006, 130(3):220-233.
- [16] YAZDI M. The application of bow-tie method in hydrogen sulfide risk management using layer of protection analysis (LOPA) [J]. Journal of failure analysis and prevention, 2017, 17(2):291-303.
- [17] HUANG S J, CHIU N H, CHEN L W. Integration of the grey relational analysis with genetic algorithm for software effort estimation [J]. European journal of operational research, 2008, 188(3):898-909.
- [18] 祁生文,伍法权,刘春玲,等. 地震边坡稳定性的工程地质分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(16):2792-2797.
- [19] 刘红帅,薄景山,刘德东. 岩土边坡地震稳定性分析研究评述[J]. 地震工程与工程振动, 2005, 25(1):164-171.

(责任编辑:周泉)

(上接第21页)

- [3] WIDIATMOJO A, SASAKI K, WIDODO N P, et al. Numerical simulation to evaluate gas diffusion of turbulent flow in mine ventilation system [J]. International journal of mining science and technology, 2013, 23(3):349-355.
- [4] 惠鑫,马凤山,郭捷,等. 金属矿山深部巷道围岩分区破裂现场监测研究 [J]. 工程地质学报, 2018, 26(增刊1):710-715.
- [5] 戴剑勇,孟令聪,邹树梁. 基于多智能体技术的通风降氢系统协调优化控制研究 [J]. 核动力工程, 2015, 36(2):113-115.
- [6] 肖雅丹,王占山. 基于物联网的煤矿综合自动化控制系统研究 [J]. 控制工程, 2018, 25(5):816-822.
- [7] 廖建尚. 基于物联网的温室大棚环境监控系统设计方法 [J]. 农业工程学报, 2016, 32(11):233-243.
- [8] JO B W, KHAN R M A. An internet of things system for underground mine air quality pollutant prediction based on azure machine learning [J]. Sensors, 2018, 18(4):930-949.
- [9] 邹霞玲,彭绍琴,皮依标. 基于物联网的大型地震区域监控系统设计 [J]. 地震工程学报, 2018, 40(5):244-250;263.
- [10] KARINIOTAKIS G N, STAVRAKAKIS G S, NOGARET E F. Wind power forecasting using advanced neural networks models [J]. IEEE transactions on energy conversion, 1996, 11(4):762-767.

(责任编辑:扶文静)