

王燕, 叶伟, 马福恒. 基于 D-S 证据理论融合采空区多源信息的大坝安全评价 [J]. 水利水电技术, 2020, 51(4): 175-183.

WANG Yan, YE Wei, MA Fuheng. D-S evidence theory-based dam safety assessment fused with multi-source information of goaf area [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020, 51(4): 175-183.

基于 D-S 证据理论融合采空区多源信息 的大坝安全评价

王 燕¹, 叶 伟², 马福恒²

(1. 中国地质大学(北京) 地球科学与资源学院, 北京 100083; 2. 南京水利科学研究院
水文水资源及水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘 要: 为结合周边采空区性状对大坝进行安全评价, 构建了基于 D-S 证据理论融合多源信息的安全性评价模型。结合现场勘查、物理力学试验、数值计算、实地测量以及监测结果, 获取多种定性及定量指标, 组成多源证据指标体系。通过欧氏距离法加权优化传统 D-S 证据理论, 确定各证据指标所属评价等级的质量分配函数, 采用多比例两两对比法与熵值法确定各证据指标的权重从而融合多源信息。应用此评价主法以周边存在采空区的某均质土坝为例进行安全评价, 结果显示, 定性指标中地质构造与覆岩岩性所占权重较大; 定量指标中水位的影响最大达到 0.446 1, 其次是大坝沉降为 0.221 3。而影响因素重要性分析表明, 观测信息的结果最能表现大坝运行形态, 所占比重为 0.498 1。综合评判结果显示大坝处于“较不安全”的信任值最大, 结果与安全鉴定“三类坝”结论一致, 验证了多源证据指标体系评价方法的可行性和有效性。

关键词: 采空区; D-S 证据理论; 多源信息融合; 大坝安全评价

doi: 10.13928/j.cnki.wrahe.2020.04.021

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

中图分类号: TV62

文献标识码: A

文章编号: 1000-0860(2020)04-0175-09



D-S evidence theory-based dam safety assessment fused with multi-source information of goaf area

WANG Yan¹, YE Wei², MA Fuheng²

(1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;

2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing

Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, Jiangsu, China)

Abstract: In order to assess dam safety in accordance with the characteristics of surrounding goaf area, a safety assessment model based on D-S evidence theory fused with multi-source information is established. Combining with field investigation, physical and mechanical experiments, numerical calculation, field measurement and relevant monitoring results, several qualitative and quantitative indicators are obtained, and then a multi-source evidence index system is composited. Through weighted optimization of the conventional D-S evidence theory made through Euclidean distance method, the mass distribution functions of all the evidence

收稿日期: 2019-06-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(51779155, 51879169)

作者简介: 王 燕(1989—), 女, 博士研究生, 主要从事地层学研究。E-mail: cugbwyang@cugb.edu.cn

通信简介: 马福恒(1969—), 男, 教授级高级工程师, 博士, 研究方向为大坝安全评价及安全监控。E-mail: fhma@nhri.cn

indexes for their assessment grades are determined and then the weights of all the evidence indexes are determined by means of multi-proportion two-pair comparison method and entropy method for fusing multi-source information. By taking a homogeneous earthfill dam surrounded by goaf-areas as a case for the safety assessment, the results shows that the weights of geological structure and overburden lithology in the qualitative indexes are larger, while the influence from water level in the quantitative indexes the largest and reaches to 0.446 1, and then the dam settlement is 0.221 3. However, the analysis on the importance of the influencing factors shows that the information of the observation result is most capable to reflect the operation behavior of the dam with the proportion of 0.498 1. The comprehensive assessment result shows that the largest trust value of the dam is in a less safe state, which is consistent with the safety appraisal conclusion of the dam that the dam is in the state of safety classification III, thus the feasibility and effectiveness of the assessment method with multi-source evidence index system is verified.

Keywords: goaf area; D-S evidence theory; multi-source information fusion; dam safety assessment

0 引 言

常用的全面法、房柱法、留矿法等空场采矿法使得地下矿山遗留大量采空区。煤层采出以后,覆岩受采空区的影响会自下而上发生垮落、弯曲等破坏,当采空区扩展范围达到一定程度时,地表将产生多种形式的移动变形破坏。根据《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规范》(煤得管字[1000]第81号)要求^[1],在近水体采煤时,受影响的采区和矿井涌水量不超过其排水能力、不影响正常生产,在库区周边采煤时不仅要考虑地表水体下开采的安全性,同时要考虑采后对水库大坝的影响,分析地表受采动影响程度,防止大坝区突然下沉或变形量过大,造成溃坝。因此,对于采煤区周边的水库大坝安全性评价不仅需分析大坝自身的安全性,还需分析采空区的稳定性。

目前国内外就采空区稳定性分析提出了各种定性、定量的分析评价方法,主要分以下3类^[2-7]:(1)基于岩体力学理论的分析,包括解析法以及数值模拟;(2)基于监测信息的稳定性评价,通常考虑位移及变形信息;(3)基于非线性科学理论的评价方法,如模糊数学法、灰色理论法、神经网络法等。这些方法一般能从不同侧面评价采空区的稳定性,但综合考虑时可能会得出相互矛盾的结论。采空区是一个受多种因素共同作用的复杂系统,这些因素具有多源性、模糊性和不确定性,因此对采空区作出合理评价需要融合从不同侧面分析采空区性态的多源信息。此外,考虑水库大坝的安全性,又使得评价信息来源更为复杂。

就目前已有研究可以看到,对于大坝安全评价所采用的方法也有很多,包括人工神经网络、模糊层次分析、AHP-云模型等。如:苏怀智等^[8]运用模糊可拓方法对大坝工作性态进行了评估;王泉等^[9]运用

模糊可拓方法对大型涵洞的安全性态进行定量评估;伍元^[10]运用熵理论对大坝的安全性态进行了评估;刘天祥等^[11]建立了AFSA-AHP模型并结合工程实例对某大坝的安全性态进行了评价;龚艳冰^[12]运用正态云模型理论对河西走廊城市进行了风险评价,取得了较好的效果;胡石元等^[13]采用云模型理论对土地评价因素的权重进行了挖掘。虽然上述方法在一定程度上均取得了满意的结果,但缺少考虑大坝安全评价中评价指标的多源性。

多源信息特征提取和融合的意义在于其当前所能解决的问题和未来发展的前景两个层面。目前,工程人员能够通过勘察及检测手段对工程的不同属性进行细致地观察以及对相关信息进行有效地收集,但获取的单源信息在数量和类别两方面都存在明显的局限性和偏向性。多源信息特征提取和融合可以充分利用各种工程手段对观察对象所获得感知信息,减少单源信息处理过程中的不确定性、不完整性和不全面性等问题,从技术层面上提高了信息的利用效率和分析的精确程度,为进一步分析和处理提供物质基础。多源信息特征提取和融合不是简单地累加信息,而是在已有的信息基础上创造出更具应用价值的新信息,这一过程不仅可以应用于同类多源信息之间,而且还能应用于异类多源信息之间,多源信息互补性方面的意义更为显著。现有研究成果中,D-S证据理论能够通过多个证据的融合来增强置信度^[14-16],改善评判等级的可区分性,对于那些等级难以确定或水平相近的评估来说效果较好。此外,D-S证据理论也是实现多源信息融合的一种方法,它可以将多个不确定信息的证据合成,排除和整合矛盾信息,最终给出被观测对象的性质的判定。

然而在对研究对象进行证据融合时发现,对于同类与不同类对象的数据,目前研究未采用不同的融合措施^[17-19],且对加权融合方法缺少简便的定权重分

析^[20-22]，因此本文考虑通过变异系数联系同种项数据，再采用欧氏距离确定权重的改进加权融合法对监测数据进行处理，充分发挥 D-S 证据理论的优势，融合水库大坝及采空区两种不同结构体中的多源信息，进行大坝安全评价，以降低采空区周边大坝安全性评价结论的不确定性，增加大坝安全性评价结论的可靠性。

1 加权 D-S 证据理论

证据理论建立了命题和集合间的意义对应关系，通过引入信任函数解释不确定度，用 D-S 合成规则更新信任函数。在评价过程中首先由专家根据系统工程理论与层次分析法来确定评价因素，从而建立隶属函数；然后根据隶属函数来确定各因素的基本概率分配函数(或基本概率赋值)，通过 D-S 准则合成为总的概率分配(或概率赋值)，从而确定评价等级^[24-24]。

1.1 评价因素集的选取

采空区大坝的安全是若干个因素相互耦合的结果，影响因素众多，仅凭单一信息或分析数据得到评价结论准确度一般较低。综合考虑多源信息融合理论技术要求，以及工程实践中获取指标信息的可行性，本文将现场工程地质调查、室内岩石力学实验、数值模拟试验、大坝现场测量等多种方法获取的共 11 种定量、定性物理量视为影响采空区稳定性评价的多源信息因素，组成采空区大坝安全评价的证据指标体系(见图 1)。其中，考虑采空区的安全性，需要分析当地整体地质条件以及采空区上覆岩体的性状，而大坝的安全主要参考数据来源于数值计算结果以及观测资料分析。

根据《水电站大坝安全检查实施细则》(1988 能源电 [1988]37 号)，依据监测信息的取值范围和特点，将大坝安全的模糊评价集分为四级，即为

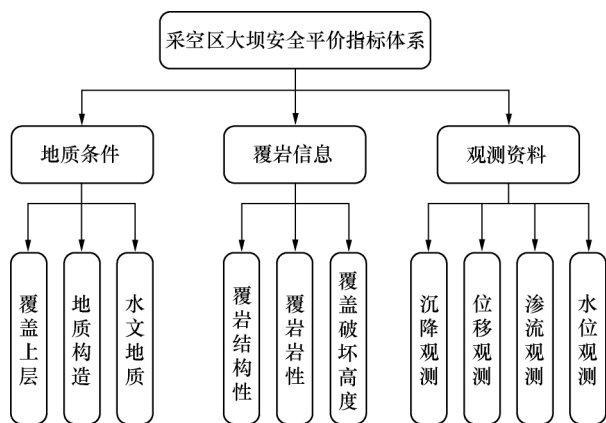


图 1 采空区大坝安全评价指标体系

$$V = \{V_1, V_2, V_3, V_4\} = \{\text{安全, 较安全, 较不安全, 不安全}\} \quad (1)$$

式中， V_i 代表了某一层指标的安全评价状态，则 V 表示该指标决策状态的识别框架。

为了建立安全评价集与评价指标之间的联系，采用隶属度区间表示。由于对等级的划分目前还没有统一的标准，在系统工程中一般采用的为等区间划分法。因此对于大坝安全分析的等级同样采用等区间划分法，分级标准如表 1 所列。

表 1 评价等级标准

等 级	安 全	较安全	较不安全	不 安 全
常规分级标准	(0, 0.25)	(0.25, 0.5)	(0.5, 0.75)	(0.75, 1)

1.2 基本概率赋值的计算

运用 D-S 证据理论进行信息融合，需要给出信息的可信度，即需要对相关指标信息进行基本概率赋值，由隶属函数获得基本概率质量分配函数。由于后期数据分区的需要，为便于简化运算，选取三角形模糊数，其隶属函数为

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & x < a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & x > c \end{cases} \quad (2)$$

在实数域上一个区间取值可以用 $a \pm b$ 的形式来表示，如区间(0, 1)可以表示为 0.5 ± 0.5 ，三角形模糊数的三元组表示形式为(0, 0.5, 1)。

将该隶属函数运用于式(1)的识别框架，将隶属度作为监测指标的基本概率赋值，即

$$\begin{cases} m(V_1) = \begin{cases} 1 - \frac{|u_i - 0.125|}{0.125}, & 0 \leq u_i \leq 0.25 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \\ m(V_2) = \begin{cases} 1 - \frac{|u_i - 0.375|}{0.125}, & 0.25 \leq u_i \leq 0.5 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \\ m(V_3) = \begin{cases} 1 - \frac{|u_i - 0.625|}{0.125}, & 0.5 \leq u_i \leq 0.75 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \\ m(V_4) = \begin{cases} 1 - \frac{|u_i - 0.875|}{0.125}, & 0.75 \leq u_i \leq 1 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \end{cases} \quad (3)$$

式中， u_i 为原始数据经标准化之后的值； $m(V_i)$ 表示各指标的对应评级的基本概率赋值。

测量值越接近某目标属性特性的中心值,则该目标的 BPA 越大。令 $m(V) = 1 - \max_{j=1,2,3} m(V_j)$ 作为不确定基本概率赋值。

1.3 基本概率赋值的融合

标准 D-S 融合规则^[20]如下

$$f(m, V) = m(V) = \begin{cases} \frac{\sum_{V_i \cap V_j = A} m_1(V_i) m_2(V_j)}{1 - K}, & A \neq \Phi \\ 0, & A = \Phi \end{cases} \quad (4)$$

式中, $K = \sum_{V_i \cap V_j = \Phi} m_1(V_i) m_2(V_j)$, 当 $K \neq 1$, 则能进行证据融合; 当 $K \leq 1$, 则认为证据间存在冲突, 不能进行融合。

该融合规则的融合结果鲁棒性差, 即基本概率赋值产生微小变化对融合结果会有较大的影响。此外该方法中当有一个概率赋值为零, 那么不管合成多少次, 该焦元对应的概率赋值永远为零, 即存在“一票否决”的现象。一票否决是指当一条证据与多条证据完全不一致时出现一票否决的效果, 当某一指标与其他指标存在协调控制的效果时此现象的出现明显不合理, 例如在进行采空区多源信息融合时, 对于覆盖层岩体裂隙发育高度大但覆岩岩性很好同时上覆土层较厚, 此时裂隙对库区渗漏的影响较小, 不能因为裂隙发育较高就判定覆岩信息赋值低。本文采用的一种改进加权证据融合方法, 能协调指标之间的控制相互关系, 结合欧氏距离引出权重。

设 $A(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ 和 $B(y_1, y_2, y_3, \dots, y_n)$ 为 n 维欧氏空间的点, 则该两点的欧氏距离为

$$D(A, B) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (5)$$

将不同的指标看做是空间不同的点, $m_i(A_1) = a_1, m_i(A_2) = a_2, \dots, m_i(A_n) = a_n, m_j(B_1) = b_1, m_j(B_2) = b_2, \dots, m_j(B_n) = b_n$, 转变为相应的向量形式为 $x = (a_1, a_2, \dots, a_n), y = (b_1, b_2, \dots, b_n)$, 此时可计算出欧氏距离, 并把该欧氏距离定义为两证据之间的距离, 有

$$d(m_1, m_2) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (a_i - b_i)^2} \quad (6)$$

后面的计算可以简化为 $d(m_1, m_2) = \sum_{i=1}^n (a_i - b_i)^2$ 。

基本过程为: (1) 计算出 m_1 与其他各个证据间的距离 $d(m_1, m_j) \quad j=1, 2, 3, \dots, k$; (2) 计算出平均距离 $\bar{d}(m_1) = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k d(m_1, m_j)$; (3) 计算出 m_1 的权重。即

$$\omega_1 = \frac{1}{\bar{d}(m_1)} \quad (7)$$

由于得出的权重分配到各个基本概率赋值后会使得其和值不为 1, 即 $\sum_{j=1}^k m_i(V_j) \neq 1$, 这显然是不合理的, 因此还需要对得出的权重进行归一化处理。

2 采空区大坝多源信息融合

2.1 定量指标的标准化处理

量级大小和量纲一般不同使得原始定量指标数据间不能直接比较, 为避免不同效应量数据量纲差别带来的影响, 须对原始定量指标数据进行无量纲化处理。各定量指标项目标准化处理如下:

(1) 对于大坝沉降量、坝体渗流及覆岩破坏高度等越小越好的指标, 其数据的标准化公式为

$$x'_j = \frac{x_{\max} - x_j}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (8)$$

式中, x_{\max}, x_{\min} 分别为某一项指标的最大和最小值; x_j 为第 j 个监测数据; x'_j 为标准化的值。

(2) 对于上下游方向位移以适中为宜的评价指标, 其数据的标准化公式为

$$x'_j = \begin{cases} \Delta x(i, j) = |x^*(i, j) - x^*(i, 0)| \\ x(i, j) = \frac{\Delta x(i, j) - \Delta x_{\min}(j)}{\Delta x_{\max} - \Delta x_{\min}(j)} \end{cases} \quad (9)$$

式中, $x^*(i, 0)$ 为第 i 项在研究时间段前的一个原始测值; $\Delta x(i, j)$ 为研究时间段内第 i 项的第 j 个值相对于 $x^*(i, 0)$ 的变化值。

(3) 对于越大越好的评价指标, 其证据评价的标准公式为

$$x'_j = \frac{x_j - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (10)$$

2.2 定量指标的归一化

对于某评价指标, 其监控模型或理论分析拟合值为 \hat{y} , 实测值为 y , 剩余标准差为 S , 又概率论的知识可知, $|y - \hat{y}|$ 落入 $(0, 2S)$ 的概率为 95.5%。因此可将 $|y - \hat{y}| \leq 2S$ 作为安全区。归一化公式如下

$$u_i = \begin{cases} 0.25 \frac{|y_t - \hat{y}_t|}{2S} & y_{\min} \leq y_t \leq y_{\max}, \text{ 且 } |y_t - \hat{y}_t| \leq 2S \\ 0.25 + 0.25 \frac{|y_t - \hat{y}_t| - 2S}{S} & y_{\min} \leq y_t \leq y_{\max}, \text{ 且 } 2S \leq |y_t - \hat{y}_t| \leq 3S \\ 0.5 + 0.25 \frac{|y_t - \hat{y}_t| - 3S}{3(\sqrt{2} - 1)S} & y_t \leq y_{\min} \text{ 或 } y_t \geq y_{\max}, \text{ 且 } 3S \leq |y_t - \hat{y}_t| \leq 3\sqrt{2}S \\ 0.75 + 0.25 \frac{|y_t - \hat{y}_t| - 3\sqrt{2}S}{3(\sqrt{3} - \sqrt{2})S} & y_t \leq y_{\min} \text{ 或 } y_t \geq y_{\max}, \text{ 且 } 3\sqrt{2}S \leq |y_t - \hat{y}_t| \leq 3\sqrt{3}S \\ 0 & y_t \leq y_{\min} \text{ 或 } y_t \geq y_{\max}, \text{ 且 } |y_t - \hat{y}_t| \geq 3\sqrt{3}S \end{cases} \quad (11)$$

式中, \hat{y}_t 为 t 时刻的模型计算或理论分析值; y_t 为 t 时刻实测值。

2.3 定量指标变异系数法赋权

对于同一评价项目含有较多子评价项的数据, 同类数据间可采用变异系数法算出相应的权重进行赋权, 赋权方法如下:

以上下游方向位移为例, 设监测布置了 m 个测点, 每个测点有 n 个测值, 则第 i 个测点的变异系数为

$$\delta_i = \frac{D_i}{\bar{x}_i} \quad (12)$$

$$D_i = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_{ij})^2}$$

$$\bar{x}_i = \frac{\sum_{j=1}^n x_{ij}}{n}$$

式中, D_i 为第 i 个定量评价指标的均方差; \bar{x} 为第 i 个评价指标的均值。

由各点的变异系数可得出各定量指标的权重

$$\omega = \frac{\delta_i}{\sum_{i=1}^m \delta_i} \quad (13)$$

2.4 组合权重

为了尽可能更加客观真实地反映各证据源的重要程度, 可采用客观熵值法确定各证据源的权重, 采用多比例两两对比法确定指标权重^[25-26]。

设 w_j 表示证据源 S_j 与其他证据源相比的重要程度, 即权重, $w = (w_1, w_2, w_3, \dots, w_n)$ 利用熵值法确定权重

$$v_j = 1 + \frac{1}{\lg p} \sum_{i=1}^p m(S) \lg m(S) \quad (14)$$

$$w_j = \frac{v_j}{\sum_{i=1}^n v_j} \quad (15)$$

根据对采空区稳定性影响程度赋予 0~1 之间的值, 且两证据所赋值得之和为 1, 对构成的判断矩阵

$[a_{ij}]$, 利用多比例两两对比法求取权重如下

$$v_j^r = \sum_{j=1}^n a_{ij} \quad (16)$$

$$w_j^r = \frac{v_j^r}{\sum_{j=1}^n v_j^r} \quad (17)$$

2.5 多源信息融合

为防止一票否决问题的发生, 首先根据证据源权重对质量函数进行修正, 修正公式为

$$m^r(V_i) = \sum_{j=1}^n w_j m(V_j) \quad (18)$$

利用式(4)融合规则对 $m(V_i)$ 迭代 $N-1$ 次 (N 为证据源个数), 得出评判对象隶属于 V_i 的基本可信度, 融合的计算模型如下

$$M = \begin{bmatrix} m(V_1) \\ m(V_2) \\ m(V_3) \\ m(V_4) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f(m^r, V_1) \\ f(m^r, V_2) \\ f(m^r, V_3) \\ f(m^r, V_4) \end{bmatrix} \quad (19)$$

3 工程应用

3.1 工程概况

某大坝为均质土坝, 现状坝顶高程 186.00 m, 最大坝高 11.7 m, 坝顶宽 8 m, 坝长 107 m, 无防浪墙。溢洪道为宽顶堰, 堰顶高程 181.40 m, 最大泄量 213.8 m³/s, 大坝无放空设施。2012 年进行了除险加固, 除险加固的内容主要包括大坝工程、溢洪道工程和其他工程等。加固后水库运行状况良好, 但是随着水下采煤的进行, 水库开始干涸。2017 年 7 月 5 日, 现场检查中发现水库大坝坝顶路面出现长约 30 m、宽约 2~3 cm 的纵向裂缝, 之后陆续发展。根据检查专家组意见, 坝顶裂缝挤压隆起现象的直接原因是水下采煤所致, 采掘面如图 2 所示。

3.2 识别框架与多源证据指标信息的确定

根据图 1 提出的采空区大坝安全评价证据指标体系, 针对该水库大坝的实际工程情况, 建立了采空区

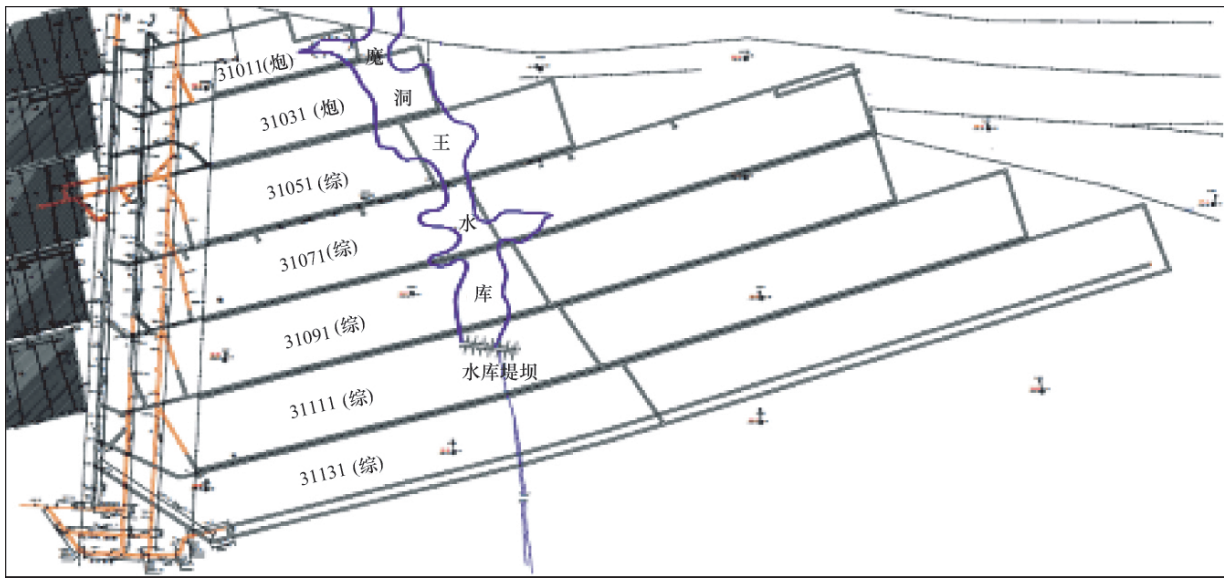


图 2 水下采煤采掘面布置情况

表 1 采空区大坝安全性定性评价指标分级标准

评价指标	指标因子	安全 $V_1(1)$	较安全 $V_2(2)$	较不安全 $V_3(3)$	不安全 $V_4(4)$
地质条件	覆盖土层	土层较厚且渗透性小	土层较薄但渗透性小	土层较厚但渗透性大	土层较薄且渗透性大
	地质构造	无断层、褶皱	褶皱影响较小	断层部分切割或褶皱影响较大	断层贯穿围岩
	水文地质	无水迹干燥	围岩潮湿、可见少量水滴	围岩有淋水，采空区内部分积水	围岩淋水较大，采空区存在严重积水
覆岩信息	覆岩结构	基岩很厚，隔水性强	基岩从浅水部至深水部逐渐变厚	基岩较薄但基本具备隔水性	基岩裂隙发育不具备隔水性
	覆岩岩性	软岩比重大，且岩体含水量小	岩性较硬但含水量小	岩性偏软但含水量大	岩性较硬且含水量大

大坝安全性识别框架的等级标准(见表 1)。结合工程地质勘探、室内岩石力学试验、数值模拟计算和现场测量及监测结果获得了评判某大坝安全性的证据指标数据信息如表 2 所列，表中定量指标(覆岩破坏高度、渗流、位移、水位)根据现场测量、参数拟合及数值、理论计算确定，定性指标根据现场实际情况及勘查结果对应分级标准确定。

单一评价指标对评价结果的影响可以简单概括为：覆盖土层越厚评价结果越好、地层岩性越坚硬评价结果越好、地下水位越低评价结果越好、覆盖岩层越完整评价结果越好、覆盖层破坏厚度越小评价结果越好；沉降、位移、水位统一以单一方向考虑；沉降变化数据属于数值越小越好；位移数据以正负表示上下游方向，结果越趋于零越好；水位数据受降雨及上游来水影响，可选相同天气环境下的数据进行对比计算。作为单一评判指标时可按上述关系进行分析，但在多源信息融合过程中指标之间也会相互影响，例如覆盖土层较薄，但岩性较坚硬，相应的评价结果也会偏好。

根据现场勘查及绘制的煤层底板标高与基岩面高度示意图可得出：①在水库范围内，地表松散层厚度普遍较薄，从水库的浅水部至深水部，表土层厚度有增加趋势。②从浅水部到深水部，基岩厚度逐渐增加，这有利于水体下安全开采。同时基岩内的隔水层总体上也增厚，加大了阻隔水库水下渗的能力。③顶板隔水层从浅部向深部逐渐增厚，但厚度总体较薄，处于导水裂缝带以内，基本不具有隔水性。④煤层顶板含水层厚度有渐增趋势，而以水库正下方总体较厚，顶板该含水层含水量弱，对矿井安全生产影响不大。⑤上覆岩体多为泥岩、砂质泥岩互层，隔水性较好。覆岩岩性属软弱偏中硬型，覆岩岩性构成中，软岩占的比重较大，有利于阻隔水库水体向下渗漏。顶板含水层水量较小，对工作面的正常生产影响不大。定性指标赋值及质量分配函数如表 2 所列。根据导水裂缝带高度计算公式计算覆岩破坏高度，根据现场不同区域多个勘查点资料对比计算值运用式(2)一式(3)确定覆岩破坏高度指标赋值及质量分配函数如表 4 所列。

表 2 地质条件定性指标赋值及质量分配函数

影响因素	指标因子	指标数值	质量分配函数			
			V ₁	V ₂	V ₃	V ₄
地质条件	覆盖土层	2	0	1	0	0
	地质构造	2	0	1	0	0
	水文地质	2	0	1	0	0
覆岩信息	覆岩结构	3	0	0	1	0
	覆岩岩性	2	0	1	0	0
观测信息	水位	4	0	0	0	1

表 3 导水裂缝带高度计算公式 m

岩 性	计算公式
坚 硬	$H_{li} = \frac{100 \sum M}{1.2 \sum M + 2.0} \pm 8.9$
中 硬	$H_{li} = \frac{100 \sum M}{1.6 \sum M + 3.6} \pm 5.6$
软 弱	$H_{li} = \frac{100 \sum M}{3.1 \sum M + 5.0} \pm 4.0$
极软弱	$H_{li} = \frac{100 \sum M}{5.0 \sum M + 8.0} \pm 3.0$

表 4 覆岩破坏高度质量分配函数

项 目	指标数值 (根据岩性计算值)	质量分配函数			
		V ₁	V ₂	V ₃	V ₄
覆盖破坏高度	24.98	0.05	0.15	0.45	0.30

根据室内试验及数值计算得出大坝变形及渗流情况如图 3 和图 4 所示。

根据现场实际测量沉降、观测位移数据(垂直坝轴线方向)、渗流数据(测压管水位信息),结合数值计算结果确定沉降及位移的质量分配函数,由于各指标因子

表 5 位移数据归一化计算过程

测 点	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
实测值	-4.73	-4.25	-5.48	-3.60	-6.07	-4.84	-2.56	-5.54	-3.51	-4.48
计算值	-4.11	-4.88	-5.21	-4.11	-5.18	-4.55	-3.19	-5.02	-3.91	-3.98
均方差	0.52	0.56	0.59	0.52	0.41	0.52	0.56	0.59	0.52	0.41
归一化	0.132	0.103	0.082	0.070	0.026	0.124	0.103	0.101	0.144	0.115

表 6 沉降质量分配函数

断 面	V ₁	V ₂	V ₃	V ₄	平均距离	权重	归一化
1	0.002	0.000	0.622	0.376	0.131	7.615	0.143
2	0.012	0.022	0.590	0.376	0.131	7.621	0.143
3	0.008	0.009	0.319	0.664	0.228	4.378	0.082
4	0.000	0.000	0.416	0.584	0.168	5.948	0.111
5	0.102	0.112	0.546	0.240	0.124	8.056	0.151
6	0.109	0.089	0.722	0.080	0.377	2.652	0.050
7	0.011	0.000	0.213	0.776	0.356	2.811	0.053
8	0.000	0.021	0.835	0.144	0.294	3.399	0.064
9	0.022	0.000	0.322	0.656	0.221	4.520	0.085
10	0.045	0.012	0.271	0.672	0.236	4.240	0.079
11	0.000	0.000	0.976	0.024	0.463	2.160	0.040
融合值	0.029	0.027	0.516 2	0.426 8			

实测及观测参数选取多个断面,需在组内进行权重确定,结果见表 6—表 8。需要说明的是,本文测量的沉降是根据很实际情况,选取典型断面,测量结果参照上一次测量值对比判定沉降量,即相对沉降量,数值能反映出不均匀沉降。以位移为例归一化过程如下:

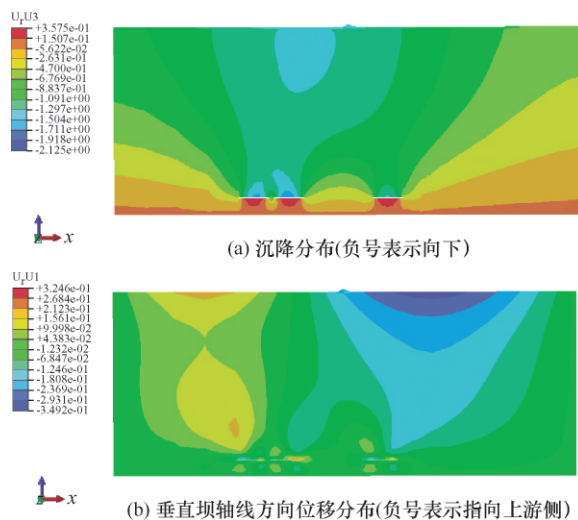


图 3 31111 采掘面采掘结束后最大断面位置沉降及位移分布云图(单位: m)



图 4 31111 采掘面采掘结束后坝体最大断面位置孔压分布云图(单位: kPa)

表 7 位移质量分配函数

断面	V_1	V_2	V_3	V_4	平均距离	权重	归一化
1	0.122	0.078	0.604	0.196	0.158	6.327	0.132
2	0.022	0.102	0.756	0.120	0.203	4.918	0.103
3	0.112	0.034	0.313	0.541	0.254	3.942	0.082
4	0.101	0.098	0.782	0.019	0.299	3.344	0.070
5	0.098	0.204	0.042	0.656	0.816	1.225	0.026
6	0.187	0.219	0.153	0.441	0.168	5.941	0.124
7	0.028	0.107	0.745	0.120	0.203	4.918	0.103
8	0.025	0.110	0.607	0.258	0.206	4.858	0.101
9	0.117	0.088	0.564	0.231	0.145	6.911	0.144
10	0.200	0.000	0.336	0.464	0.182	5.501	0.115
融合值	0.106	0.098	0.516	0.281			

表 8 渗流质量分配函数

断面	V_1	V_2	V_3	V_4	平均距离	权重	归一化
1	0.112	0.102	0.496	0.134	0.290	3.452	0.117
2	0.021	0.119	0.645	0.215	0.163	6.149	0.208
3	0.023	0.021	0.720	0.236	0.400	2.503	0.085
4	0.019	0.012	0.644	0.325	0.392	2.552	0.086
5	0.221	0.213	0.223	0.343	0.161	6.206	0.210
6	0.023	0.071	0.875	0.031	0.262	3.822	0.129
7	0.120	0.000	0.589	0.291	0.205	4.884	0.165
融合值	0.090	0.093	0.566	0.232			

运用式(14)~式(17)计算各指标及影响因素权重如表9所列。

通过权重对证据源的修正,分别对指标因子、影响因素进行融合,求出的各等级的信任函数如表10所列。

由表10可知,大坝安全程度隶属 V_3 等级的信任

表 9 各指标及影响因素权重

影响因素	指标因子	指标权重	因素权重
地质条件	覆盖土层	0.315 4	0.114 5
	地质构造	0.372 1	
	水文地质	0.312 5	
覆岩信息	覆岩结构	0.252 5	0.387 4
	覆岩岩性	0.344 0	
	覆盖破坏高度	0.403 5	
观测信息	沉降	0.221 3	0.498 1
	位移	0.187 9	
	渗流	0.144 7	
	水位	0.446 1	

表 10 各等级信任函数

信任函数值				信任等级
V_1	V_2	V_3	V_4	
0.106 4	0.238 9	0.336 2	0.318 6	V_3

函数值远比其他等级的信任函数值高,根据最大隶属度原则,安全性评价结论与大坝安全评价鉴定为“三类坝”的结果相吻合,证实本文方法科学有效。

4 结 论

本文将采空区大坝的安全性评价看作为不确定多源信息的融合问题,综合考虑大坝及周边采空区相关影响因素,获取实地勘探、数值模拟试验、现场测量与监测等各种定量、定性数据,进行基于D-S证据理论多源信息融合技术的采空区大坝安全性评价,结果表明:

(1) 地质条件影响因素中地质构造、覆岩信息中覆盖层破坏厚度、观测信息中沉降数据对工程影响较大。

(2) 地质条件、覆岩信息与观测信息三个影响因素中,因为观测信息直接反映大坝的工程性态,其所占权重最大。

(3) 大坝的安全性评价结论与工程现状及安全鉴定结果完全吻合,从而验证了本文提出方法的可行性和有效性。

本文中所提取的指标均为实际工程中考虑直接涉及的,但多源信息的融合还应包括影响指标取值的相关次要指标,这将是本文所提方法日后改进的重点。

参考文献:

- [1] 国家安全监管总局, 国家煤矿安监局, 国家能源局, 国家铁路局. 建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规范: 煤行管字(2000)第 81 号[S]. 北京: 煤炭工业出版社, 2017.
- [2] 张长敏, 祁丽华, 慎乃齐. 采空区建筑地基稳定性评价研究[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2006, 21(4): 47-50.
- [3] 刘科伟, 李夕兵, 宫凤强, 等. 基于 CALS 及 Surpac-Flac3d 耦合技术的复杂空区稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(9): 1924-1931.
- [4] 马雄忠, 王文杰, 莫焕东, 等. 基于声发射的采空区稳定性模糊综合评价[J]. 化工矿物与加工, 2014(4): 32-36.
- [5] 吴启红, 彭振斌, 陈科平, 等. 矿山采空区稳定性二级模糊综合评判[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2010, 41(2): 661-667.
- [6] 刘浪, 陈忠强. 模糊集对分析在矿山采空区稳定性评价中的应用[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2015, 46(7): 2665-2672.
- [7] 王新民, 丁德强, 段瑜. 灰色关联分析在地下采空区危险度评价中的应用[J]. 中国安全生产科学技术, 2006, 2(4): 35-39.
- [8] 苏怀智, 吴中如, 顾冲时. 大坝工作性态模糊可拓评估的基本原理[J]. 岩土力学, 2006, 27(11): 1967-1973.
- [9] 王泉, 郑东健. 基于博弈论的大型涵洞安全评估模糊可拓模型及其应用[J]. 水电能源科学, 2015, 33(2): 115-119.
- [10] 伍元. 基于熵理论的大坝安全分析评价方法研究[D]. 南京: 河海大学, 2010.
- [11] 刘天祥, 宋锦焘, 沈寿亮等. 基于 AFSA-AHP 的大坝安全指标权重研究[J]. 水电能源科学, 2014, 32(4): 30-33.
- [12] 龚艳冰. 基于正态云模型和熵权的河西走廊城市化生态风险综合评价[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(5): 169-174.
- [13] 胡石元, 李德仁, 刘耀林等. 基于云模型和关联度分析法的土地评价因素权重挖掘[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2006, 31(5): 423-427.
- [14] 李文立, 郭凯红. D-S 证据理论合成规则及冲突问题[J]. 系统工程理论与实践, 2010, 30(8): 1422-1432.
- [15] 毕凯, 王晓丹, 邢雅琼. 基于 D-S 证据理论的模糊聚类集成[J]. 系统工程与电子技术, 2014, 36(7): 1446-1452.
- [16] 张琳, 刘婧文, 王汝传, 等. 基于改进 D-S 证据理论的信任评估模型[J]. 通信学报, 2013, 34(7): 167-173.
- [17] 李文立, 郭凯红. D-S 证据理论合成规则及冲突问题[J]. 系统工程理论与实践, 2010, 30(8): 1422-1432.
- [18] 毕凯, 王晓丹, 邢雅琼. 基于 D-S 证据理论的模糊聚类集成[J]. 系统工程与电子技术, 2014, 36(7): 1446-1452.
- [19] 张琳, 刘婧文, 王汝传, 王海艳. 基于改进 D-S 证据理论的信任评估模型[J]. 通信学报, 2013, 34(7): 167-173.
- [20] 曹杰, 梦兴. 一种有效解决 D-S 证据理论冲突合成的方法[J]. 计算机应用研究, 2010, 29(5): 1815-1817.
- [21] 何金平, 马传彬, 施玉群. 高拱坝多效应量改进型 D-S 证据理论融合模型[J]. 武汉大学学报, 2012, 37(12): 1397-1400.
- [22] 姜军. 基于熵权与变异系数组合赋权法的模糊综合评价模型[D]. 北京: 首都师范大学, 2011.
- [23] 曹杰, 梦兴. 一种有效解决 D-S 证据理论冲突合成的方法[J]. 计算机应用研究, 2010, 29(5): 1815-1817.
- [24] 何金平, 马传彬, 施玉群. 高拱坝多效应量改进型 D-S 证据理论融合模型[J]. 武汉大学学报, 2012, 37(12): 1397-1400.
- [25] 姜军. 基于熵权与变异系数组合赋权法的模糊综合评价模型[D]. 北京: 首都师范大学, 2011.
- [26] 刘成栋. 大坝安全评价的多因素赋权分析方法及其应用研究[D]. 南京: 河海大学, 2004.

(责任编辑 陈小敏)