

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2016.04.0013

基于熵权-可变模糊集模型的堤坝渗漏探测

陈建生^{1,2}, 何会祥^{1,2}, 王涛^{1,2}

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098)

摘要: 针对堤坝中集中渗漏通道探测问题, 基于信息熵理论和可变模糊集理论, 建立用于堤坝渗漏探测的熵权-可变模糊集模型。以南方某水库为例, 首先确定各探测指标, 采用客观赋值法中的熵权法确定不同探测指标的权重; 然后计算各钻孔水样相对于降水、渗漏水 and 地下水的综合相对隶属度以及各个钻孔的 H 值; 最后依据相应的判断标准将钻孔水样进行分类, 确定钻孔水的来源。结果表明, 通过该模型确定此大坝存在 4 条集中渗漏通道, 与前人结果一致。

关键词: 信息熵; 熵权法; 可变模糊集; 堤坝渗漏; 渗漏通道探测

中图分类号: TV62⁺1

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2016)04-0358-06

Dam leakage detection based on entropy weight-variable fuzzy set model

CHEN Jiansheng^{1,2}, HE Huixiang^{1,2}, WANG Tao^{1,2}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Aiming at detecting the concentrated leakage passage in a dam, an entropy weight-variable fuzzy set model for dam leakage detection was developed based on information entropy theory and variable fuzzy set theory. Using a dam in southern China as an example, the indices to be detected were determined first, followed by the weight of each index via the entropy weight method in the objective weight assignment method. Then, the comprehensive membership degrees of different borehole water samples to precipitation, leakage water, and groundwater, as well as the H value of each water sample, were obtained. Based on these values, the borehole water samples were classified and their origins were determined. The results show that there are four concentrated leakage passages in the dam, which accords with previous findings.

Key words: information entropy; entropy weight method; variable fuzzy set; dam leakage; leakage passage detection

堤坝是防御洪水的重要工程设施, 而渗漏是危害堤坝安全的一个重大隐患。对堤坝渗漏通道, 尤其是集中渗漏通道位置的准确探测在堤坝渗漏分析中显得尤为重要。达西渗流理论应用的关键在于渗透系数的准确确定。对于均质场, 渗透系数的确定较为准确, 所得结果符合精度要求; 但是对于非均质、高度离散、不连续的裂隙岩体, 所得结果在多数情况下与实际情况出入较大^[1]。董海洲等^[2-3]、王新建等^[4-5]将热力学第一定律中的内能应用于描述渗流场。流体内能的传递不仅有对流方式, 还有热传导, 内能是靠介质传递的, 介质的几何形状对渗透性有很大影响, 但是对于热传导系数的影响相对较小^[1]。因此在渗流量计算以及集中渗漏通道的准确探测方面, 基于热传导理论建立的热源法渗流模

收稿日期: 2015-11-17

基金项目: 国家自然科学基金(51578212); 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2012CB417005); 中央高校基本科研业务费专项(2015B24614)

作者简介: 陈建生(1955—), 男, 江苏泗阳人, 教授, 博士, 主要从事同位素水文、渗流理论科学应用研究。E-mail: jschen@hhu.edu.cn

型比传统的达西渗流理论具有得天独厚的优势。

由于示踪方法具有直观的特点,因此其被广泛应用于堤坝渗漏探测中^[6]。陈建生等^[7]利用温度示踪方法,成功探测出陡河水库左坝肩绕坝渗漏通道,并计算出绕坝渗漏量;段珣^[8]利用地层中温度的异常变化,探测出集中渗漏水从坝基处水平排水条带汇集到坝后量水堰;陈建生等^[9]、张令等^[10]以环境同位素和水化学作为天然示踪剂研究堤坝渗漏。然而目前的示踪方法往往仅限于某单一方法,或几种方法简单结合,缺乏系统性。笔者拟基于水化学和环境同位素示踪方法,综合考虑分属于水化学和环境同位素的各探测指标,采用熵权法确定指标权重,再运用可变模糊集理论计算各钻孔水样的综合相对隶属度,依据最大隶属度原则对各钻孔水样进行分类,并纵向分析级别特征值在坝轴线上的变化趋势,以期综合分析堤坝渗漏问题。

1 熵权-可变模糊集模型

1.1 熵权法确定指标权重

权重的确定是计算样本相对隶属度的关键,其恰当与否直接影响结果的准确性。目前权重的确定方法主要有主观赋值法和客观赋值法,主观赋值法是指根据以前的统计数据由专家主观判断取得权值,这种方法与当前样本数据没有关联,和实际情况也脱节较大,客观性较差,工作量大;客观赋值法是根据样本数据统计得出权值,此方法可以有效避免人为主观因素带来的误差。

熵原指的是体系的混乱程度,是热力学中的概念,后来被运用到信息论当中,并产生了信息熵原理,其理论依据是:某一指标的离散程度越高,其熵值越大;反之,熵值越小。当由若干个指标对事物进行综合评价时,对其中一个指标而言,若各样本值区别不大,则在综合评价中该指标的作用不大;反之,若该指标的各个样本值存在很大波动,即离散程度很高,则表明该指标在综合评价中具有很大影响。基于信息熵原理确定的权重客观性较好,可信度较高,因此,笔者采用此方法确定指标权重,其主要计算步骤见文献[11-12]。

1.2 可变模糊集和各探测指标的相对隶属度确定

可变模糊集理论是陈守煜基于 Zadeh 创建的模糊集合理论建立的。由于 Zadeh 创建的模糊集合隶属函数存在绝对化、唯一化亦即静态化的理论缺陷,因此,陈守煜运用自然辩证法中中介、差异、共维、两极的概念以及客观事物都存在的矛盾运动规律,建立了相对隶属函数概念与模型,并首先将其运用于模糊水文水资源学^[13-14],而后被广泛应用于其他实际工程领域^[15-16],但在堤坝渗漏探测方面还鲜有应用。由可变模糊集理论计算各探测指标的相对隶属度的主要步骤如下^[17-18]:

a. 计算各探测指标的相对差异度 $D_A(u)$, A 为论域上的一个模糊概念(事物、现象), u 为论域上的任意元素。依据可变模糊集定义, $[a, b]$ 为实轴上模糊可变集合的吸引域, $[c, d]$ 为包含 $[a, b]$ 的某一上、下界范围域,如图 1 所示。



图 1 点 x 与区间 $[a, b]$ 、 $[c, d]$ 的位置关系

Fig. 1 Position of point x relative to sections $[a, b]$ and $[c, d]$

图 1 中 M 为吸引域区间 $[a, b]$ 中 $D_A(u) = 1$ 的某一点值,从物理角度分析,一般 M 为 $[a, b]$ 的中点值。点 x 是区间 $[c, d]$ 内的任意点量值, x 落入 M 点左侧时的相对差异函数模型为

$$D_A(u) = \begin{cases} \left(\frac{x-a}{M-a} \right)^\beta & x \in [a, M] \\ -\left(\frac{x-a}{c-a} \right)^\beta & x \in [c, a) \end{cases} \quad (1)$$

x 落入 M 点右侧时,其相对差异函数模型为

$$D_A(u) = \begin{cases} \left(\frac{x-b}{M-b} \right)^\beta & x \in [M, b] \\ -\left(\frac{x-b}{d-b} \right)^\beta & x \in (b, d] \end{cases} \quad (2)$$

式中: β ——非负指数,通常可取 1,即相对差异函数模型为线性函数。

由式(1)、式(2)可以算得每个待测样本中各探测指标相对于不同级别的相对差异度 $D_A(u_{th})$ ($t = 1, 2, \dots, n$, 为指标数; $h = 1, 2, \dots, c$, 为级别数)。

b. 依据模糊集合理论的余集定义计算各指标对应的相对隶属度:

$$\mu_A(u_{th}) = \frac{1 + D_A(u_{th})}{2} \quad (3)$$

1.3 计算综合相对隶属度和级别特征值

设第 s 个待测样本相对于 h 级别的综合相对隶属度为 u'_{sh} 。采用熵权法确定各指标权重向量 W , 然后基于式(1)~(3)可得到样本对每个指标的 $D_A(u_{th})$ 、 $\mu_A(u_{th})$, 依据模糊可变识别模型^[18]计算样本对各级别的综合相对隶属度 u'_{sh} :

$$u'_{sh} = \frac{1}{1 + \left(\frac{d_{hg}}{d_{hb}}\right)^\alpha} \quad (4)$$

$$\text{其中 } d_{hg} = \left\{ \sum_{t=1}^n [w_t (1 - \mu_A(u_{th}))]^p \right\}^{\frac{1}{p}} \quad d_{hb} = \left[\sum_{t=1}^n (w_t \mu_A(u_{th}))^p \right]^{\frac{1}{p}}$$

式中: w_t ——指标熵权重; p ——距离参数; α ——优化准则参数。

各样本的级别特征值^[18]:

$$H_s = \sum_{h=1}^c u_{sh} h \quad (5)$$

其中

$$u_{sh} = \frac{u'_{sh}}{\sum_{h=1}^c u'_{sh}}$$

2 工程实例

2.1 工程概况

采用文献[19]中的工程实例和数据对模型的正确性和实用性进行验证。水库为一小型水库,大坝为均质土坝,坝顶长度为500m、宽度为7.5m,最大坝高为58.5m,流域面积3.42km²,水库正常高水位81.8m,相应库容为520×10⁴ m³。库区内广布第四系松散堆积物,以残坡积、冲洪积物为主,其次为坡洪积物。由于库区位于排牙山背斜的南东翼,且属较古老岩体,受多期构造运动影响,构造形迹较复杂,断裂构造发育。坝基及溢洪道开挖时发现多条较大断层,对大坝的渗漏造成不可忽视的影响。大坝建设过程及建成后一直存在较大渗漏,总渗漏量达83.8 m³/d。

2.2 指标选取与分类标准

对于堤坝渗漏探测问题,指标选取是否恰当会直接影响探测结果的准确性。探测指标的合理选取可以依据示踪法相关理论来进行。示踪法^[20]按示踪剂所属类别不同分为水化学方法和环境同位素方法。由于地层中长期存在水岩相互作用、水土相互作用,因此地层中的水必然包含了能够揭示地下水历史以及所经过的地层等方面的信息,水化学方法就是基于此来分析堤坝渗漏的部位、强度等。环境同位素方法的依据是大气降水中稀有同位素存在的高程效应、纬度效应、陆地效应、季节效应,来源不同的水体会呈现不同的同位素特征,因此通过测定钻孔水样中的 δD 和 $\delta^{18}O$ 可以分辨钻孔水的来源^[21]。综上所述,选取 pH、电导率、 $\rho(Cl^-)$ 、 δD 、 $\delta^{18}O$ 共5项作为探测指标。

由于实例中只给出了水库溪水(近似为降水)和量水堰水(近似为地下水)的各探测指标实测值,没有给出降水、渗漏水 and 地下水各指标的变化范围。现按照以下方法确定其变化范围^[18,20]:以量水堰水和水库溪水的探测指标测量值的平均值作为渗漏水的参考实测值,以水库溪水和渗漏水探测指标值的平均值作为降水探测指标的上限和渗漏水探测指标的下限,以渗漏水 and 量水堰水探测指标数值的平均值作为渗漏水探测指标的上限和地下水探测指标的下限。由此可确定渗漏水探测指标的变化范围、降水探测指标的上限、地下水探测指标的下限。降水下限和地下水上限可按照渗漏水探测指标的区间长度,从降水上限和地下水下限分别进行外延得到。降水、渗漏水 and 地下水各探测指标的变化范围见表1。

表 1 钻孔水样分类标准

Table 1 Classification standard of borehole water samples

水样	pH	电导率/($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	$\rho(\text{Cl}^-)/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\delta D/\%$	$\delta^{18}\text{O}/\%$
降水	(5.01,5.73)	(23.83,66.58)	(3.81,6.53)	(-4.540,-4.170)	(-0.695,-0.628)
渗漏水	(5.73,6.45)	(66.58,109.33)	(6.53,9.25)	(-4.170,-3.830)	(-0.628,-0.561)
地下水	(6.45,7.17)	(109.33,335.00)	(9.25,19.20)	(-3.830,-3.340)	(-0.561,-0.494)

2.3 计算过程

依据表 1、文献[17]可以确定可变模糊集合差异函数计算的各项参数 $[a,b]$ 、 $[c,d]$ 取值矩阵 I_{ab} 、 I_{cd} :

$$I_{ab} = \begin{bmatrix} (5.01,5.73) & (5.73,6.45) & (6.45,7.17) \\ (23.83,66.58) & (66.58,109.33) & (109.33,335.00) \\ (3.81,6.53) & (6.53,9.25) & (9.25,19.20) \\ (-4.540,-4.170) & (-4.170,-3.830) & (-3.830,-3.340) \\ (-0.695,-0.628) & (-0.628,-0.561) & (-0.561,-0.494) \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$I_{cd} = \begin{bmatrix} (5.01,6.45) & (5.01,7.17) & (5.73,7.17) \\ (23.83,109.33) & (23.83,335.00) & (66.58,335.00) \\ (3.81,9.25) & (3.81,19.20) & (6.53,19.20) \\ (-4.540,-3.830) & (-4.540,-3.340) & (-4.170,-3.340) \\ (-0.695,-0.561) & (-0.695,-0.494) & (-0.628,-0.494) \end{bmatrix} \quad (7)$$

M 取 $[a,b]$ 中的最优点,即左端点 a 。计算各探测指标的相对差异度、相对隶属度;基于熵权法,得 pH、电导率、 $\rho(\text{Cl}^-)$ 、 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 这 5 项探测指标的权重依次为 0.1953、0.1997、0.1551、0.2090 和 0.2408;最后应用文献[18]中的模糊可变识别模型取优化准则($\alpha=1$, $p=1$)计算 16 个钻孔水样对各级别的综合相对隶属度并作归一化处理。归一化后的隶属度 u_i ($i=1,2,3$ 分别对应降水、渗漏水和地下水)和级别特征值 H 见表 2。

表 2 各钻孔水样的归一化隶属度和级别特征值

Table 2 Membership degrees of borehole water samples after normalization and characteristic values for different grades of water samples

钻孔序号	u_1	u_2	u_3	H	计算结果	文献[19]结果
K0-025	0.3075	0.4271	0.2654	1.96	渗漏水	渗漏水
K0+025	0.2868	0.4381	0.2751	1.99	渗漏水	渗漏水
K0+075	0.2458	0.5088	0.2454	2.00	渗漏水	渗漏水
K0+125	0.2436	0.4299	0.3265	2.08	渗漏水	渗漏水
K0+175	0.2216	0.5363	0.2421	2.02	渗漏水	渗漏水
K0+200	0.1469	0.4099	0.4432	2.30	地下水	地下水
K0+225	0.1547	0.4026	0.4427	2.29	地下水	地下水
K0+250	0.0691	0.4024	0.5285	2.46	地下水	地下水
K0+275	0.2737	0.4394	0.2869	2.01	渗漏水	渗漏水
K0+285	0.1688	0.4479	0.3833	2.21	渗漏水	渗漏水
K0+300	0.1851	0.5199	0.2950	2.11	渗漏水	渗漏水
K0+325	0.1003	0.4726	0.4271	2.33	渗漏水	渗漏水
K0+350	0.0702	0.4075	0.5223	2.45	地下水	地下水
K0+375	0.0844	0.4055	0.5100	2.43	地下水	地下水
K0+425	0.0970	0.4776	0.4254	2.33	渗漏水	渗漏水
K0+475	0.2548	0.4856	0.2596	2.00	渗漏水	渗漏水

2.4 结果分析

据表 2、最大隶属度原则可知:(a) K0-025~K0+175 钻孔中的水主要是渗漏水,为第 1 条渗漏通道位置;由于在 K0-025、K0+025、K0+075 中 u_1 大于 u_3 ,因此降水占主要成分,即钻孔中水主要来源于浅层库水或地

表水, K0+125、K0+175 中 u_3 大于 u_1 , 深层库水占其主要成分; 一条集中渗漏通道中渗漏水的主要来源却不相同, 因此可以断定在 K0-025~K0+175 钻孔所处位置应该存在 2 条渗漏通道, 分别在 K0-025~K0+075 附近和 K0+125~K0+175 附近。(b) K0+275~K0+325 以及 K0+425~K0+475 这 2 段钻孔水样亦为渗漏水, 并且各钻孔 u_3 均大于 u_1 , 深层库水占其渗漏水的主要来源, 因此 K0+275~K0+325 和 K0+425~K0+475 附近为该大坝第 3 条、第 4 条集中渗漏通道。

由表 2 的级别特征值 H 、级别特征值判断准则^[22]可知这 16 个钻孔水全为库水渗漏, 显然这不符合实际情况。现绘制 H 沿大坝轴线方向上的变化曲线(图 2), 纵向分析 H 值的变化: K0-025~K0+175、K0+275~K0+300、K0+425~K0+475 这些钻孔都近似处于曲线的极小值附近, 因此可以判断该大坝主要存在 3 条集中渗漏通道, 分别位于 K0-025~K0+175、K0+275~K0+300、K0+425~K0+475 附近。综合上述分析可知熵权-可变模糊集模型对于该大坝渗漏探测结果与前人结果具有一致性。库区平面渗漏通道位置见图 3。大部分钻孔水样来源与前人分析相一致, 只在 K0+025、K0+075、K0+275、K0+475 处的分析略有不同, 这 4 个钻孔的 u_1 与 u_3 相差非常小, 可见渗漏水来源于浅层库水或地表水和来源于深层库水的量近似相等。

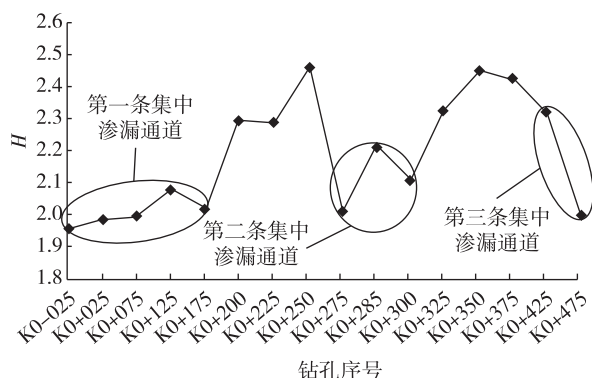


图 2 H 变化曲线

Fig. 2 Change curve of H value

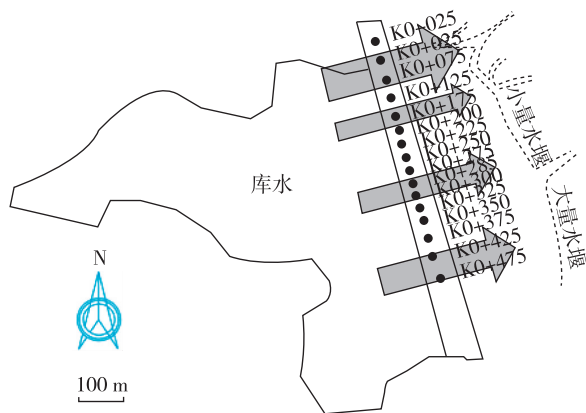


图 3 库区渗漏示意图

Fig. 3 Sketch of reservoir leakage

3 结 论

a. 运用基于吸引与排斥思想的可变模糊集理论, 结合信息熵, 提出了适用于堤坝渗漏探测的熵权-可变模糊集模型, 克服以往权值确定的主观性, 并将其用于工程实例, 依据最大隶属度原则和级别特征值 2 种判别方法对钻孔水样进行分类, 2 种方法相互印证, 使得结果更具有可靠性。

b. 探测结果显示: 该大坝在沿坝轴线方向上共存在 4 条集中渗漏通道, 分别在钻孔 K0-025~K0+125、K0+175、K0+275~K0+325 和 K0+425~K0+475 附近。这与前人研究成果大致相同, 也证实了该模型的正确性和实用性。

c. 本文所提出的模型也存在一定的缺陷, 比如模型中参数的取值以及吸引域和界限范围域的偏差都会对结果产生某种程度上的影响, 接下来会就参数变化对该模型的影响程度作进一步的研究。

参考文献:

- [1] 陈建生, 董海洲, 吴庆林, 等. 虚拟热源法研究坝基裂隙岩体渗漏通道[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(22): 4019-4024. (CHEN Jiansheng, DONG Haizhou, WU Qinglin, et al. Detection of leakage passage in fissure rock with assumptive heat source method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(22): 4019-4024. (in Chinese))
- [2] 董海洲, 陈建生. 利用孔中温度场分布确定堤坝渗透流速的热源法模型研究[J]. 水文地质工程地质, 2003, 30(5): 40-43. (DONG Haizhou, CHEN Jiansheng. Model research of heat source method by using water temperature distribution in borehole to determine seepage velocity of dyke[J]. Hydro-geology and Engineering Geology, 2003, 30(5): 40-43. (in Chinese))
- [3] 董海洲, 陈建生. 利用温度示踪方法探测基坑渗漏[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(12): 2085-2090. (DONG Haizhou, CHEN Jiansheng. Study on groundwater leakage of foundation pit with temperature tracer method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(12): 2085-2090. (in Chinese))

- [4] 王新建,陈建生.堤坝集中渗漏温度场探测模型及数值试验[J].岩石力学与工程学报,2006,25(增刊2):3794-3801. (WANG Xinjian, CHEN Jiansheng. Model for detecting of concentrated leakage in dam and dyke and its numerical experiment [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(Sup2): 3794-3801. (in Chinese))
- [5] 王新建,陈建生.温度探测土坝圆柱状集中渗漏模型研究[J].水文地质工程地质,2006,33(4):31-36. (WANG Xinjian, CHEN Jiansheng. A study of temperature field tracer method used to detect tubular leakage in dam [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2006, 33(4): 31-36. (in Chinese))
- [6] 陈建生,董海洲.堤坝渗漏探测示踪新理论与技术研究[M].北京:科学出版社,2007.
- [7] 陈建生,樊哲超,董海洲,等.热源法探测陡河水库左坝肩绕坝渗漏通道[J].水文地质工程地质,2006,33(5):61-65. (CHEN Jiansheng, FAN Zhechao, DONG Haizhou, et al. Detecting the dam-detouring leakage passage in the left dam abutment of Douhe Reservoir with the method of heat source [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2006, 33(5): 61-65. (in Chinese))
- [8] 段珣.基于温度示踪法的堤坝渗漏探测研究[J].科学技术与工程,2014,14(9):141-143. (DUAN Xun. Study on detection dam leakage with temperature tracer method [J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(9): 141-143. (in Chinese))
- [9] 陈建生,杨松堂,刘建刚,等.环境同位素和水化学在堤坝渗漏研究中的应用[J].岩石力学与工程学报,2004,23(12):2091-2095. (CHEN Jiansheng, YANG Songtang, LIU Jiangang, et al. Application of environmental isotope and hydrochemistry to leakage study [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(12): 2091-2095. (in Chinese))
- [10] 张令,张一,党雪梅,等.隧洞涌水来源环境同位素及水化学判别研究[J].工程勘察,2013(5):39-42. (ZHANG Ling, ZHANG Yi, DANG Xuemei, et al. Study on the sources of tunnel gushing water by using environment isotope and hydrochemical analysis [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2013(5): 39-42. (in Chinese))
- [11] 吴景龙,孙亚丽,马毅,等.基于熵权的可变模糊集方法在水质污染评价中的应用[J].数学的实践与认识,2012,42(6):66-73. (WU Jinglong, SUN Yali, Ma Yi, et al. Application of variable fuzzy set theory method based on entropy weight to evaluation water pollution [J]. Mathematics in Practice and Theory, 2012, 42(6): 66-73. (in Chinese))
- [12] 孟宪萌,胡和平.基于熵权的集对分析模型在水质综合评价中的应用[J].水利学报,2009,40(3):257-260. (MENG Xianmeng, HU Heping. Application of set pair analysis model based on entropy weight to comprehensive evaluation of water quality [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(3): 257-262. (in Chinese))
- [13] CHEN Shouyu, FU Guangtao. A DRASTIC-based fuzzy pattern recognition methodology for groundwater vulnerability evaluation [J]. Int Assoc of Hydrolog Sci, 2003, 48(2):211-220.
- [14] CHEN S Y, HOU Z C. Multi-criterion decision making for flood control operations: theory and application [J]. J of Amer Water Resour Assoc, 2004, 40(1):67-76.
- [15] 陈守煜,韩晓军.围岩稳定性评价的模糊可变集合工程方法[J].岩石力学与工程学报,2006,25(9):1857-1861. (CHEN Shouyu, HAN Xiaojun. Engineering method of variable fuzzy set for assessment of surrounding rock stability [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(9): 1857-1861. (in Chinese))
- [16] CHEN Shouyu, FU Guangtao. A fuzzy approach to the lectotype optimization of offshore platform [J]. Ocean Eng, 2003, 30(7): 877-891.
- [17] 陈守煜.工程可变模糊集理论与模型:模糊水文水资源学数学基础[J].大连理工大学学报,2005,45(2):308-312. (CHEN Shouyu. Theory and model of engineering variable fuzzy set; mathematical basis for fuzzy hydrology and water resources [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2005, 45(2): 308-312. (in Chinese))
- [18] 陈守煜,李敏.基于可变模糊集理论的水资源可再生能力评价模型[J].水利学报,2006,37(4):431-435. (CHEN Shouyu, LI Min. Assessment model of water resources reproducible ability based on variable fuzzy set theory [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(4): 431-435. (in Chinese))
- [19] WANG Tao, CHEN Jiansheng, WANG Ting, et al. Entropy weight-set pair analysis based on tracer techniques for dam leakage investigation [J]. Nat Hazards, 2015, 76(2):747-767.
- [20] 王涛,陈建生,王婷.熵权-集对分析模型探测堤坝渗漏[J].岩土工程学报,2014,36(11):2137-2143. (WANG Tao, CHEN Jiansheng, WANG Ting. Entropy weight-set pair analysis (SPA) for the dam leakage detection [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(11): 2137-2143. (in Chinese))
- [21] 巴金福,詹沪成,张博.判断堤坝渗漏来源的环境同位素法[J].水利水电科技进展,2014,34(增刊2):1-3. (BA Jinfu, ZHAN Hucheng, ZHANG Bo. Environmental isotope method to judge the source of leakage of dam [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2014, 34(Sup2): 1-3. (in Chinese))
- [22] 陈守煜,郭瑜.模糊可变集合与模型及在岩爆分级预测中的应用[J].岩石力学与工程学报,2005,24(8):4604-4609. (CHEN Shouyu, GUO Yu. Model of variable fuzzy sets and its application to classification prediction of rockburst [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(8): 4604-4609.)