

# 基于未确知聚类的隧道涌水类别判别方法

赵国彦, 申燕元, 唐洋

中南大学资源与安全工程学院, 长沙 410083

**摘要** 以国内8条隧道的涌水量原始数据作为研究样本, 将其进行分类。运用未确知测度预测方法, 选取年降水量、地质-水文地质条件、地表汇流条件及地表水体补给条件4项主要影响因素作为评价指标, 建立了可行的未确知测度模型。经验证, 未确知测度预测判别方法的正确率高, 可以迅速判别隧道涌水所属的类别, 为隧道涌水量的类别判别提供了一种新方法。

**关键词** 隧道涌水; 矿井安全; 未确知测度

**中图分类号** U453.6<sup>+1</sup>

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.20.006

## Discrimination of Tunnel Water Gushing Based on the Unascertained Clustering Method

ZHAO Guoyan, SHEN Yanyuan, TANG Yang

School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China

**Abstract** The original water gushing data in eight tunnels in China were collected and classified. The prediction method of unascertained measure was used to establish a feasible unascertained measurement model. There are many uncertain factors affecting tunnel water inflow, among which annual precipitation, geological and hydrogeological conditions, surface flow conditions and surface water supply conditions are the most important ones, so they can be used as evaluation indices of the unascertained measurement model. Discrimination and analysis show that the accuracy of the discrimination method is high, which can be used to quickly distinguish categories of tunnel water gushing, providing a new way for tunnel water gushing discrimination.

**Keywords** tunnel gushing; mine safety; unascertained measurement

在隧道建设中, 隧道涌水是一种相当普遍的危害。隧道施工过程中突发涌水, 会造成仪器设备的损失, 延误工期; 如果涌水量过大, 还可能威胁工作人员的生命安全, 造成隧道的大面积破坏, 增加大量的施工费用。因此, 如何较为准确的预测隧道涌水量的大小, 并迅速判别隧道涌水所属的类别, 是目前研究隧道涌水量的重要工作。

隧道涌水量的预测方法有许多, 例如, 朱大力等<sup>[1]</sup>介绍了9种比较适合中国情况的预测隧道涌水量的方法; 张雷等<sup>[2]</sup>阐述了隧道涌水量预测的各种方法, 并阐明了它们的优缺点、适用条件及工程应用情况; 刘丹等<sup>[3]</sup>将模糊类比法用于隧道

涌水量预测的基本原理与方法; 姬永红等<sup>[4]</sup>讨论了水底隧道涌水的预测计算问题, 利用经验法和有限元法对某拟建海底隧道工程方案的涌水量进行了预测计算和对比分析; 王建秀等<sup>[5]</sup>介绍了深埋隧道涌水量数值计算中的试算流量法; 王建秀等<sup>[6]</sup>用正演和反演的方法计算涌水量; 杜敏铭等<sup>[7]</sup>从确定和不确定分析的角度, 综述了工程实践中常用的矿井涌水量预测方法, 评述了各评价方法的主要特点及适用性。由于隧道涌水是一种复杂而又随机的现象, 因而研究隧道涌水量的方法并未达成共识, 迄今为止尚无成熟的理论和公认的准确计算方法。

收稿日期: 2014-03-19; 修回日期: 2014-04-17

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2010CB732004); 国家重点实验室开放基金项目(SKLG DUEK0906)

作者简介: 赵国彦, 教授, 研究方向为采矿工程、矿山安全和岩石力学与工程等, 电子信箱: gyzhao@263.net; 申燕元(共同第一作者), 硕士研究生, 研究方向为采矿工程、富水矿床治水分析等, 电子信箱: 2109324948@qq.com

引用格式: 赵国彦, 申燕元, 唐洋. 基于未确知聚类的隧道涌水类别判别方法[J]. 科技导报, 2014, 32(20): 44-48.

未确知信息是由王光远提出的一种不同于模糊信息、随机信息和灰色信息的一种新的不确定信息<sup>[8]</sup>。王玉成<sup>[9]</sup>提出未确知聚类预测法,并应用于航材损耗的预测,预测结果令人满意。隧道涌水类别判别因为存在许多不确定因素,是一项非常复杂的工作,在这方面,未确知数学理论提供了一个很好的思路。将未确知聚类方法应用于隧道涌水量的类别判别研究,选取隧道涌水量的主要因素,建立未确知测度模型,利用该方法对8个样本进行分级评价,并结合一隧道实例验证判别方法。

## 1 未确知聚类预测优化法

未确知聚类预测的原理<sup>[10]</sup>可以简要概括为:1) 根据样本实测数据值确定待预测事物的分类模式及各分类模式下所对应的影响因素均值和预测对象均值,根据分类模式建立各判别指标的单一指标测度函数,即判别指标属于不同分类模式的概率函数;2) 根据单一指标测度函数确定预测对象各判别指标相应的单一指标测度;3) 基于信息熵理论求出指标权重和待预测对象的多指标综合未确知测度;4) 根据待预测对象的多指标综合未确知测度与各分类模式未确知测度间的距离判断待测对象所属的类别。

### 1.1 确定待预测事物的分类模式系统

未确知聚类预测优化法可以将聚类预测问题描述为<sup>[11]</sup>:对研究对象空间 $\Omega$ 中的任意元素 $x$ ,与 $m$ 个因素有关,将空间 $\Omega$ 中的元素分类为 $C_1, C_2, \dots, C_k$ ,组成分类集 $F$ ,并满足 $C_i \cap C_j = \emptyset, \bigcup_{i=1}^K C_i = F$ , $F$ 亦称为分类空间。已知样本集 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 中各元素的分类和各指标的测量值,如第 $i$ 个样本 $x_i$ 的分类为 $C_k, x_i \in C_k$ (表示 $x_i$ 属于 $C_k$ 类),其第 $j$ 个指标的测量值为 $x_{ij}$ 。对于新的研究对象 $x_{n+1}$ ,在已知各指标的测量值 $x_{(n+1)j}$ 的条件下,预测 $x_{n+1}$ 所属类。

根据事物的特性将事物分为 $K$ 类: $C_1, C_2, \dots, C_k$ ,相应的将 $m$ 个因素也分为 $K$ 类,确定各类的样本平均值为分类中心,并确定 $K$ 个分类模式 $C_1, C_2, \dots, C_k$ ,未确知测度分别为 $u_1=(1, 0, \dots, 0), u_2=(0, 1, \dots, 0), u_3=(0, 0, 1, \dots, 0), \dots, u_k=(0, 0, \dots, 1)$ 。

### 1.2 建立待预测事物与参照系统的未确知测度向量

记 $u_{jk}(x_{ij} \in C_k; i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m; k=1, 2, \dots, K)$ 表示测量值 $x_{ij}$ 属于第 $k$ 个分类模式 $C_k$ 的程度,则样本 $x_i$ 单一指标测度矩阵为

$$[u_{ijk}]_{m \times K} = \begin{bmatrix} u_{i11} & u_{i12} & \cdots & u_{i1K} \\ u_{i21} & u_{i22} & \cdots & u_{i2K} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{im1} & u_{im2} & \cdots & u_{imK} \end{bmatrix} \quad (1)$$

若待预测事物的未确知测度对各个因素的依赖程度不同,或者说各因素对分类的重要性有大小之分,以权系数来表示各因素的重要程度。权系数的大小对于未确知测度具有举足轻重的作用,不同的权系数会得出不同的结论,权系数是否合理影响预测的效果,因此应合理地确定权系数。权

系数记为 $\alpha=(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)$ ,可采用信息熵理论计算<sup>[12]</sup>,表示为

$$H(j) = \sum_{k=1}^K u_{jk} \lg u_{jk} \quad (2)$$

$$v_j = 1 + \frac{1}{\lg K} H(j) = 1 + \frac{1}{\lg K} \sum_{k=1}^K u_{jk} \lg u_{jk} \quad (3)$$

$$a_j = v_j / \sum_{j=1}^m v_j \quad (4)$$

那么 $x_i$ 的未确知测度 $u_{ik}$ 为

$$u_{ik} = \sum_{j=1}^m a_j u_{ijk} \quad (5)$$

### 1.3 计算未确知测度距离

设 $d_k(k=1, 2, \dots, K)$ 为未确知测度向量 $u_i$ 与 $u_k(k=1, 2, \dots, K)$ 的距离,称为未确知测度距离

$$d_k = \begin{cases} \sqrt{(u_{i1}-0)^2 + (u_{i2}-0)^2 + \dots + (u_{ik}-1)^2 + \dots + (u_{iK}-0)^2} & k \neq K \\ \sqrt{(u_{i1}-0)^2 + (u_{i2}-0)^2 + \dots + (u_{iK}-1)^2} & k = K \end{cases} \quad (6)$$

### 1.4 确定预测事物所属的类别

比较各个未确知测度距离 $d_k(k=1, 2, \dots, K)$ 的大小,若

$$d_k = \min(d_1, d_2, \dots, d_K) \quad (7)$$

则认为待预测事物与分类模式系统最接近,因而可以把待测事物归入 $C_k$ 。

## 2 在隧道涌水量预测中的应用

隧道涌水主要发生在一些岩体较破碎、渗透性大且水量丰富的地层岩体中,特别是褶皱和断层发育的地区,对地下水渗透通道的大小和连通性都会产生显著影响。隧道在掘进时,破坏了含水层的原有结构,改变了水动力条件,且围岩应力重新分布,打破了原有的力学平衡状态,在部分洞侧和洞顶出现切向拉应力,从而使岩体裂隙或原有的细微裂缝增宽增大,以致地下水体所储存的能量以流体(有时有固体物质伴随)高速运移形式瞬间释放而产生的一种动力破坏。由此可见,隧道涌水量的大小与许多因素有关,主要概括为:年降水量 $V_{i1}$ 、地质-水文地质条件 $V_{i2}$ 、地表汇流条件 $V_{i3}$ 及地表水体补给条件 $V_{i4}$ 。选取这4个参数作为未确知测度模型评估指标,指标值按以下方法确定<sup>[13]</sup>。

年降水量指标( $V_{i1}$ ):可采用隧道所在地区的年平均降水量,即 $V_{i1} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i$ 。

地质-水文地质条件指标( $V_{i2}$ ):可采用式 $V_{i2} = \frac{\sum k_i l_i}{\sum l_i} +$

$\sum r_i$ 进行计算。式中, $k_i$ 为分段含水层(系统)的渗透系数(m/d); $l_i$ 为分段含水层(系统)沿隧道轴线的长度(m); $r_i$ 为断裂构造的强化因子,可按断裂与隧道的空间几何关系确定。

地表汇流条件指标( $V_{i3}$ ):可利用式  $V_{i3} = \delta\beta(1 - \theta/90)$  进行计算。式中, $\delta$ 为植被发育系数,可按3种情况取值, $0 \leq \delta < 0.3$  (差)、 $0.3 \leq \delta < 0.7$  (中等)、 $0.7 \leq \delta < 1$  (好); $\beta$ 为地貌类型系数,对于中高山,中低山和丘陵区, $\beta$ 可分别取1~2、2~4和4~5; $\theta$ 为地面坡度。

地表水体补给条件指标( $V_{i4}$ ):可按式  $V_{i4} = qf/Q$  计算。式中, $q$ 为地表水单位时间的下渗量; $Q$ 为地表水单位时间的总水量; $f$ 为与隧道埋深有关的系数。当埋深 $\leq 800$  m时, $f$ 可

取0.5~1;当埋深 $> 800$  m时, $f$ 取0~0.5。

### 2.1 分类样本集

本研究共收集了8条涌水铁路隧道的涌水量的相关参数作为未确知测度模型的评估指标,表1<sup>[13]</sup>为各隧道的涌水量及相关参数。通过比较,涌水量范围在0.10~5.41,可将其分成3类( $K=3$ ),即 $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ ,分别表示涌水量小、涌水量一般、涌水量大。表2给出各样本的涌水量范围,各分类系统的涌水量平均值及4个影响因子的平均值,以便确认未确知测度函数。

表1 隧道涌水量数据

Table 1 Data of tunnel water gushing

序号	隧道名称	$V_{i1}/\text{mm}$	$V_{i2}/(\text{m} \cdot \text{d}^{-1})$	$V_{i3}$	$V_{i4}$	涌水量实测值/ $(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{m}^{-1})$	隧道长度/m
1	大黑山	575	56.4	0.84	0.17	3.18	2715
2	中山	750	87	1.25	0.25	5.41	1410
3	大冷沟	590	78.5	1.19	0.20	5.09	2025
4	摩天岭	560	35.7	0.6	0.09	0.41	2458
5	南乡山	690	72	0.98	0.22	5.03	5170
6	桃园	550	8.2	0.41	0.02	0.10	1250
7	桂生	670	58	0.85	0.10	1.94	3409
8	花果山	570	42.5	0.66	0.11	0.27	3741

### 2.2 各影响因素的未确知测度函数

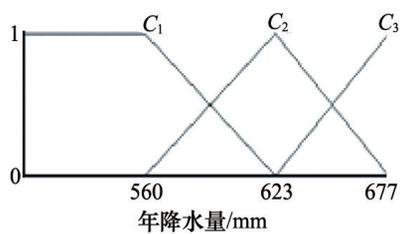
根据表2的分类等级标准,建立的年降水量 $V_{i1}$ 、地质-水

文地质条件 $V_{i2}$ 、地表汇流条件 $V_{i3}$ 及地表水体补给条件 $V_{i4}$ 的未确知测度函数,如图1所示。

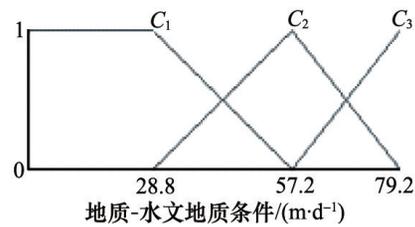
表2 隧道涌水量的各样本分类数据

Table 2 Sample classification data of tunnel water gushing

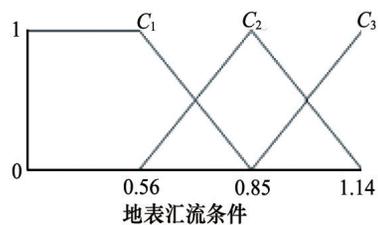
分类	序号	涌水量范围/ $(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{m}^{-1})$	涌水量均值/ $(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{m}^{-1})$	$V_{i1}/\text{mm}$	$V_{i2}/(\text{m} \cdot \text{d}^{-1})$	$V_{i3}$	$V_{i4}$
$C_1$	4, 6, 8	0.1~1.9	0.26	560	28.8	0.56	0.07
$C_2$	1, 7	1.9~3.7	2.56	623	57.2	0.85	0.14
$C_3$	2, 3, 5	3.7~5.5	5.18	677	79.2	1.14	0.22



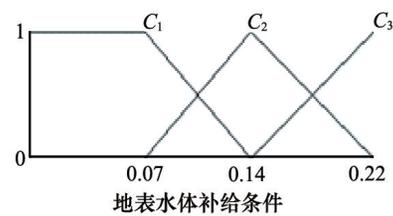
(a) 年降水量



(b) 地质-水文地质条件



(c) 地表汇流条件



(d) 地表水体补给条件

图1 未确知测度函数

Fig. 1 Unascertained measure function

### 2.3 隧道涌水量的未确知聚类预测方法

以样本1为例进行预测,根据各影响因子的未确知测度函数,可知其相对于分类系统的未确知测度分别为(0.762, 0.238, 0)、(0.028, 0.972, 0)、(0.035, 0.965, 0)、(0, 0.625, 0.375)。运用熵计算客观型指标权系数方法确定4个影响因子的权系数 $\alpha=(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4)=(0.2122, 0.2536, 0.3655, 0.1687)$ ,根据计算可得影响因子的加权综合未确知测度为

(0.1816, 0.7551, 0.0633),计算未确知测度距离 $d_1, d_2, d_3$ 分别为1.1153、0.3114、1.2168,可知样本1属于 $C_2$ ,其预测结果正确。同理可求得样本2~8的未确知测度距离与预测级(表3)。

从表3可看出,8个样本的判别结果完全正确,理论计算正确率高达100%。但在实际工程中,隧道涌水量预测还会与一些不稳定因素有关,如施工方法、施工人员、季节等,可能会导致正确率下降,但影响极小,在判别时可以忽略。

表3 加权综合未确知测度,未确知距离与预测结果

Table 3 Weighted aggregate unascertained measure, unascertained measurement distance and predicted results

序号	加权综合未确知测度	未确知测度距离			实际级	聚类级
		$d_1$	$d_2$	$d_3$		
1	(0.1816, 0.7551, 0.0633)	1.1153	0.3114	1.2168	$C_2$	$C_2$
2	(0, 0, 1)	1.4142	1.4142	0	$C_3$	$C_3$
3	(0.0710, 0.1195, 0.8095)	1.2380	1.1982	0.7448	$C_3$	$C_3$
4	(0.8692, 0.1308, 0)	0.1850	1.2292	1.3314	$C_1$	$C_1$
5	(0, 0.1234, 0.8766)	1.3542	1.1498	0.0808	$C_3$	$C_3$
6	(1, 0, 0)	0	1.4142	1.4142	$C_1$	$C_1$
7	(0.0748, 0.7190, 0.2062)	1.1897	0.3565	1.0736	$C_2$	$C_2$
8	(0.6412, 0.3588, 0)	0.5074	0.9074	1.1159	$C_1$	$C_1$

### 2.4 工程实例应用

某隧道涌水量<sup>[14]</sup>的相关因素年降水量 $V_{a1}$ 、地质-水文地质条件 $V_{a2}$ 、地表汇流条件 $V_{a3}$ 及地表水体补给条件 $V_{a4}$ 数值分别为668.1、53.2、0.74、0.13,其涌水量的大小为2.07,可知其属于 $C_2$ 。根据4个影响因子的未确知测度函数,可知其相对于分类系统的未确知测度分别为(0, 0.165, 0.835)、(0.141, 0.859, 0)、(0.379, 0.621, 0)、(0.143, 0.875, 0)。运用熵计算客观型指标权重的方法确定4个影响因子的权系数 $\alpha=(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4)=(0.2639, 0.2806, 0.1764, 0.2791)$ ,根据计算可得影响因子的加权综合未确知测度为(0.1463, 0.6333, 0.2204),可分别计算其未确知测度距离 $d_1, d_2, d_3$ 分别为1.0856、0.4522、1.0150,可知本隧道属于 $C_2$ ,其判别结果正确。

### 2.5 分析讨论

隧道涌水类别判别是制定矿井防治水措施的重要依据和评价矿井安全的重要指标。由于隧道涌水是一种复杂而又随机的现象,研究隧道涌水量的方法并未达成共识,迄今为止尚无成熟的理论和公认的准确计算方法。目前,研究隧道涌水的主要方法如表4<sup>[2,4]</sup>所示。

从表4可知,经验法虽简单好用,但考虑不全;解析法虽快速实用,但唯有在公式假定条件与实际情况接近时才适用;比拟法对相似精度要求过高,较难进行;而数值分析法的分析模式较难建立。这些方法在计算时对地质原型进行了简化,使用时有许多的限制条件,影响了分析的准确性。在工程实践中,隧道涌水受很多因素的影响,因果关系很复杂,所得信息不一定是纯粹的随机信息或模糊信息。由于具有

某种不确定性,从而得到的试验结果每次都不相同。即使在同一条件下,也会由于各种误差导致试验结果的不一致性。

未确知测度方法将不确定因素考虑在内,并在分类过程中采用信息熵理论确定各指标的权重,避免了主观因素的影响,相对来说,提高了计算的准确性。为了进一步提高正确率,还可在运用过程中增大样本数量。实例表明,用未确知测度方法比传统方法更能精细地表达未确知信息,可以获得工程意义上更安全、可信度较高的指标,计算结果更趋合理,值得在数据处理中进一步探讨和推广使用。

## 3 结论

1) 隧道的涌水量的影响因素有许多,运用未确知测度预测方法,选取年降水量 $V_{a1}$ 、地质-水文地质条件 $V_{a2}$ 、地表汇流条件 $V_{a3}$ 及地表水体补给条件 $V_{a4}$ 这4项主要影响因素作为评价指标,建立了可行的未确知测度模型。

2) 运用未确知测度预测方法预测隧道的涌水量,能迅速判别涌水量所属等级,计算相对简单,正确率高,是预防和解决由于涌水量引起灾害的有效途径,基本能达到工程运用的要求。

3) 通过对某隧道涌水量的类别判别分析,未确知预测方法预测精度高,正确率高,可作为隧道涌水类别判别的方法,为工程实际操作提供理论基础。

4) 在实际工程中,隧道涌水量的大小受很多不确定因素影响,比如施工方法、施工人员的操作、季节等,在以后的研究中可多考虑一些因素以使本方法更科学全面。

表4 各方法优缺点比较

Table 4 Comparison of advantages and disadvantages of each method

方法	原理	缺点	适用性
经验法	把含水岩土体的渗流特性处理为等效连续介质的前提下,运用多孔介质渗流理论并结合工程实践得到	由于隧道所处地质环境千差万别,经验方法预测涌水量比较粗糙,并且有许多限制条件	渗透系数较大、水力响应敏感的含水层中的一般隧道
解析法	利用地下水水力学公式及一些经验公式计算涌水量	唯有在公式假定条件与实际情况接近时,估算涌水量才比较符合实际	在岩性均质或构造简单的隧道
比拟法	由导坑实测及主隧道开挖的涌水量推主隧道及主隧道未开挖段的涌水量	导坑实测段及已开挖主隧道涌水量实测段,其地质与主隧道预估段相似者才能求得接近实际的涌水量	适用于施工中的隧道
数值分析法	以有限元素法利用热传导元素,模拟地下水分布。一般步骤如下:研究区域网格化,决定各节点坐标及元素的物理参数,决定边界条件及边界值,求取未知区域的地下水位值,进行软件处理分析	分析采用的模式与参数较难由现场调查及室内实验所得,且因水文地质变异性大,故分析模式较难正确的建立	适用于设计或施工中的隧道,而其分析结果可依开挖面的地质情况与施工中量测的隧道涌水量,再进行反复修订
未确知测度方法	根据待预测事物的分类模式建立单指标测度函数,再确定预测对象各判别指标相应的单指标测度。在信息熵理论的基础上求出指标权重和待测对象的多指标综合未确知测度,最后判断待测对象所属的类别	此方法的好坏依赖于评价指标分级的合理与否,对指标分级有较高的要求	所得信息不确定的隧道

参考文献 (References)

- [1] 朱大力, 李秋枫. 预测隧道涌水量的方法[J]. 工程勘察, 2000, 4(10): 44-48.  
Zhu Dali, Li Qiufeng. Forward methods of water flow into tunnels[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2000, 4(10): 44-48.
- [2] 张雷, 赵剑, 张和平. 隧道涌水量预测的计算方法研究[J]. 公路交通技术, 2007(1): 121-123.  
Zhang Lei, Zhao Jian, Zhang Heping. Study on calculation method for tunnel seepage prediction[J]. Technology of Highway and Transport, 2007(1): 121-123.
- [3] 刘丹, 查坤, 李启彬. 基于模糊类比的秦岭I线特长隧道涌水量预测[J]. 现代隧道技术, 2005(3): 46-48.  
Liu Dan, Zha Kun, Li Qibin. Prediction of water inflow into Qinling extra-long tunnel on No.1 line based on fuzzy analogy[J]. Modern Tunnelling Technology, 2005(3): 46-48.
- [4] 姬永红, 项彦勇. 水底隧道涌水量预测方法的应用分析[J]. 水文地质工程地质, 2005, 32(4): 84-87.  
Ji Yonghong, Xiang Yanyong. An analysis of application of the methods of predicting water influx to under-water tunnels[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2005, 32(4): 84-87.
- [5] 王建秀, 杨立中, 何静. 深埋隧道涌水量数值计算中的试算流量法[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(12): 1776-1780.  
Wang Jianxiu, Yang Lizhong, He Jing. Trial method for simulating tunnel discharge[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(12): 1776-1780.
- [6] 王建秀, 朱合华, 叶为民. 隧道涌水量的预测及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(7): 1150-1153.  
Wang Jianxiu, Zhu Hehua, Ye Weimin. Forward and inverse analyses of water flow into tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(7): 1150-1153.
- [7] 杜敏铭, 邓英尔, 许模. 矿井涌水量预测方法综述[J]. 四川地质学报, 2009, 29(1): 70-73.  
Du Minming, Deng Ying'er, Xu Mo. Review of methodology for prediction of water yield of mine[J]. Acta Geologica Sichuan, 2009, 29(1): 70-73.
- [8] 王光远. 论未确知性信息及其数学处理[J]. 哈尔滨建筑工程学院学报, 1990, 23(4): 52-58.  
Wang Guangyuan. Unascertained information and its mathematical treatment[J]. Journal of Harbin Architecture and Engineering Institute, 1990, 23(4): 52-58.
- [9] 王玉成. 未确知性在预测与决策问题中的应用[D]. 南京: 东南大学, 2004, 22-271.  
Wan Yucheng. Research on the methods and applications of forecasting and decision making based on unascertainty[D]. Nanjing: Southeast University, 2004, 22-271.
- [10] 赵国彦, 吴浩. 未确知聚类方法及其在松动圈厚度预测中的应用[J]. 科技导报, 2013, 31(2): 50-55.  
Zhao Guoyan, Wu Hao. Application of unascertained clustering method in the thickness prediction of excavation damaged zone[J]. Science & Technology Review, 2013, 31(2): 50-55.
- [11] 董陇军, 李夕兵, 宫凤强. 地下开采引发地面沉降的未确知聚类预测方法[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2008, 19(2): 95-99.  
Dong Longjun, Li Xibing, Gong Fengqiang. Predicting surface subsidence induced by mining based on unascertained clustering method[J]. Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2008, 19(2): 95-99.
- [12] 曹庆奎, 刘开展, 张博文. 用熵计算客观型指标权重的方法[J]. 河北建筑科技学院学报, 2000, 17(3): 40-42.  
Cao Qingkui, Liu Kaizhan, Zhang Bowen. Calculation method of objective index weight by entropy[J]. Journal of Hebei Institute of Architectural Science and Technology, 2000, 17(3): 40-42.
- [13] 刘丹, 李启斌. 秦岭特长隧道涌水量的预测研究[J]. 煤田地质与勘探, 2005, 33(1): 41-43.  
Liu Dan, Li Qibin. A study on prediction of water inflow into Qinling tunnel[J]. Coal Geology & Exploration, 2005, 33(1): 41-43.
- [14] 田海涛, 董益华, 王延辉. 隧道涌水量预测的研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2007, 5(3): 75-78.  
Tian Haitao, Dong Yihua, Wang Yanhui. Study on forecasting for water-gushed yeild of tunnel[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2007, 5(3): 75-78.

(编辑 陈华姣)