

DOI: 10.11779/CJGE201411021

# 熵权-集对分析模型探测堤坝渗漏

王 涛<sup>1, 2</sup>, 陈建生<sup>1, 2\*</sup>, 王 婷<sup>3</sup>

(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;  
3. 湖州职业技术学院建筑工程分院, 浙江 湖州 313000)

**摘要:** 堤坝渗漏过程中水流携带的各种物质构成“信息流”, 通过“信息流”中的“信息熵”可以确定地下流场的性质, 其中运用水化学和环境同位素方法探测堤坝渗漏已经得到广泛应用。基于信息熵和集对分析系统理论, 并结合水化学和环境同位素探测方法, 建立了一种新的堤坝集中渗漏通道探测模型: 熵权—集对分析模型。将 PH, 电导, Cl<sup>-</sup>, δD 和 δ<sup>18</sup>O 作为探测指标, 依据探测指标和判断标准界限值的关系, 对待测样本进行同一、差异和对立的集对分析, 计算各探测指标联系度; 采用基于极大熵原理的熵权赋值法确定不同指标的权重, 计算各样本综合联系度; 并据此将待测样本分类, 进而确定钻孔内水的来源。最后将该模型应用于探测南方某水库堤坝渗漏问题, 并利用流速和温度探测方法相互验证, 分析表明: 该模型探测结果跟流速和温度探测结果相吻合。

**关键词:** 信息熵; 熵权法; 集对分析; 堤坝渗漏

中图分类号: TV621 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2014)11-2136-08

作者简介: 王 涛 (1990-), 男, 河北海人, 博士研究生, 主要从事渗流理论与示踪探测技术的研究。  
E-mail:jxalfoudqt@163.com。

## Entropy weight-set pair analysis (SPA) for dam leakage detection

WANG Tao<sup>1, 2</sup>, CHEN Jian-sheng<sup>1, 2</sup>, WANG Ting<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;  
2. Geotechnical Research Institute of Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Faculty of Architectural Engineering Huzhou Vocational  
and Technological College, Huzhou 313000, China)

**Abstract:** The dam seepage flow contains many kinds of materials, forming the information flow, the information entropy of which can be used to determine the nature of the flow field; and the water chemistry and environmental isotope detection methods have been widely applied. Based on the knowledge of information entropy and set pair analysis, a new method consisting of water chemistry and environmental isotope detection, entropy weight-set pair analysis model, is introduced to ascertain the dam concentration leakage channels. Firstly, PH, conductance, Cl<sup>-</sup>, δD and δ<sup>18</sup>O are chosen as five detection indexes, and the connection degree of each index value to the classification standard is calculated. Then, the weight of each index is determined by using the information entropy weight method based on the principle of the maximum entropy. After that, the comprehensive connection degree of all samples from the drilling is calculated, and thus all the samples are classified so as to determine the resource of water. Finally, this new method is applied to detect the dam leakage channels of one south reservoir and the results are tested and improved by the method of horizontal velocity and temperature detection. It is concluded that the results of the entropy weight-set pair analysis model match those of the horizontal velocity and temperature detection very well.

**Key words:** information entropy; entropy-weight method; set pair analysis; dam leakage

## 1 研究意义

堤坝渗漏是一个重大隐患问题, 查明渗漏通道, 特别是集中渗漏通道, 是堤坝渗漏探测分析的基础。众所周知, 任何一个自然系统都在不断地进行着物质、能量和信息的交换, 这些过程必须遵循热力学基本定律, 渗漏过程也不例外。例如, 达西渗流理论的基础

是热力学第一定律中的机械能守恒, 但是流体的内能并没有完全考虑在达西渗流理论之中, 流体内能的传

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目  
(2012CB417005); 江苏省高校研究生科研创新项目 (1046/B14045)

收稿日期: 2014-01-08

\*通讯作者

递除了通过对流方式之外, 还可以通过热传导方式进行, 所以内能也是与渗流场有关的物理参量。基于热力学第一定律的内能也可被用来描述渗流场, 董海洲等<sup>[1-3]</sup>、王新建等<sup>[4-5]</sup>、陈建生等<sup>[6-7]</sup>引进了热源法渗流模型。由于热源法渗流模型所遵从的热传导理论与达西渗流理论所服从的水力学定理不同, 二者是完全独立的两种物理场。热源法渗流模型的优点是可以通过热传导带走的流体内能得到渗流量并确定集中渗漏通道的具体位置, 由于热传导系数等热物性参数受岩体介质非均质性影响较小, 其计算结果也较为准确。而达西渗流理论更利于描述均质场, 对于存在集中渗漏的区域, 由于渗透非均匀性及渗透系数难以确定, 应用达西渗流理论会均化集中渗流通道, 带来较大的误差。

另一方面, 流体本身的物质组成以及所携带各种物质构成“信息流”, “信息流”中的“信息熵”可以作为渗流场划分的重要条件, 即流体在运动过程中其各种同位素与离子浓度都必须满足热力学第二定律:  $S \geq 0$ 。渗流场中的同位素、温度、离子、电导等都可以作为信息熵, 对最初的渗流场划分进行检验, 信息熵能客观地反映补给源区与渗流场的特征。所以, 将信息熵反馈到渗流场模型中, 使渗流场即满足水力学原理与热传导定律, 还必须同时满足信息熵的约定。

包括水化学和环境同位素<sup>[8-10]</sup>在内的传统堤坝渗漏探测方法也存在其局限性, 有些仅是利用单一方法分析, 如利用坝区、水库及坝后温度场来探测渗漏通道; 利用库水、钻孔水和溢出水之间的同位素确定补给关系; 利用 Cl<sup>-</sup>示踪渗漏通道; 利用电导测钻孔中地下水水流速, 进而判别可能渗漏区域; 有些是以上几种方法简单结合。在水化学和环境同位素探测堤坝渗漏的基础上, 本文利用系统的数学方法—集对分析理论, 更加系统的分析堤坝渗漏问题。

## 2 集对分析

集对分析理论的核心思想是把确定性、不确定性合二为一, 视为一个系统, 将确定性分为“同一”与“对立”, 不确定性称为“差异”, 从同、异、反 3 个方面来分析。通过引入联系度及其数学表达式统一描述这些确定性和不确定性, 将对此系统的辩证分析转化为数学运算。

该理论的基本思路是<sup>[11]</sup>: 在一定具体背景下, 将集合  $A$  和集合  $B$  组成一个集对, 对其特性展开分析。假设共有  $N$  个特性, 其中有  $S$  个是两个集合所共有, 又在另外  $P$  个特性上相对立, 在剩余  $F$  个特性上关系

为不确定, 则两个集合的联系度为

$$\left. \begin{aligned} u &= \frac{S}{N} + \frac{F}{N} i + \frac{P}{N} j = a + bi + cj, \\ a + b + c &= 1. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中  $u$  为联系度,  $\frac{S}{N}$  为集合  $A$  和  $B$  的同一度, 简记为  $a$ ;  $\frac{F}{N}$  为差异度, 简记为  $b$ ;  $\frac{P}{N}$  为对立度, 简记为  $c$ ;  $i \in [-1, 1]$ , 称为差异度系数, 根据不同情况取不同值;  $j$  为对立度系数, 其值为  $-1$ ;  $i$  和  $j$  也可以仅作为标记使用。由上式可以看出, 联系度表达式体现了同一、差异和对立之间的联系、影响和转化。联系度  $u$  与不确定系数  $i$  是该理论的基石, 该理论可以描述随机、模糊、灰色等一系列常见的不确定现象。经过多年的发展, 集对分析理论已经广泛应用于多个领域<sup>[12-16]</sup>。

## 3 熵权-集对分析模型

### 3.1 极大熵原理<sup>[17]</sup>

熵增原理是指一个封闭系统的熵将自动增加到其所能达到的最大值, 后来人们把熵增原理用于非热力学领域, 即极大熵原理 (POME, principle of maximum entropy)。假设求解一个问题, 但是数据不充分, 在这种情况下求得的解必须满足两个条件, 一是和已知数据要相互吻合, 二是必须对未知数据做出最少的假定, 即对已知数据的外推和内插采取最超然的态度。求解过程可以理解为是从数据中提取信息, 信息来自两个部分, 一是已知数据, 二是对已知数据外推和内插得到的假定数据, 这些假定数据相当于人为“添加”了一些已知信息, 极大熵原理就意味“添加”的信息量最少。

### 3.2 计算各探测指标联系度

设一个具体问题有  $n$  个指标, 将各指标的分类标准  $A_p = \{A_{p1}, \dots, A_{pk}, \dots, A_{pn}\}$  分别组成一个集合,  $p$  表示类别, 将待测样本指标实测值系列  $B = \{B_{q1}, \dots, B_{qk}, \dots, B_{qn}\}$  分别组成一个集合,  $q$  表示待测样本。这两个集合构成一个集对  $(A_p, B_q)$ 。比较两个集合中的对应项  $A_{pk}$  和  $B_{qk}$ , 若  $B_{qk}$  处于  $A_{pk}$  类别中, 则认为是相同; 若  $B_{qk}$  处于  $A_{pk}$  的相邻类别中, 则认为是异; 若  $B_{qk}$  处于  $A_{pk}$  的相隔类别中, 则认为是反<sup>[18]</sup>。通过集对之间对应项比较分析, 采用距离贴近度的方法计算各指标联系度系数, 确定联系度表达式。具体计算公式如下<sup>[12]</sup>:

对越小越优型指标, 其联系度为

$$u_{sk} = \begin{cases} 1+0i+0j & (x \in [0, S_1]) \\ \frac{S_2-x}{S_2-S_1} + \frac{x-S_1}{S_2-S_1} i + 0j & (x \in [S_1, S_2]) \\ 0 + \frac{S_3-x}{S_3-S_2} i + \frac{x-S_2}{S_3-S_2} j & (x \in [S_2, S_3]) \\ 0 + 0i+1j & (x \in [S_3, +\infty]) \end{cases}; \quad (2)$$

对越大越优型指标，其联系度为

$$u_{sk} = \begin{cases} 1+0i+0j & (x \in [S_1, +\infty]) \\ \frac{S_2-x}{S_2-S_1} + \frac{x-S_1}{S_2-S_1} i + 0j & (x \in [S_2, S_1]) \\ 0 + \frac{S_3-x}{S_3-S_2} i + \frac{x-S_2}{S_3-S_2} j & (x \in [S_3, S_2]) \\ 0 + 0i+1j & (x \in [0, S_3]) \end{cases}. \quad (3)$$

式中  $S_1, S_2, S_3$  分别为标准的界限值； $k$  为第  $k$  项指标； $s$  为第  $s$  个待测样本； $x$  为待测样本的第  $k$  项指标的实测值。

### 3.3 熵值法确定权重系数

权值确定是计算样本综合联系度的关键，权值是否恰当直接影响集对分析分析结果。权重确定方法主要包括主观赋值法和客观赋值法，主观赋值法是指专家根据以前的统计数据主观判断取得权值，与当前样本数据无关，和实际情况脱节，客观性较差，工作量大；客观赋值法是根据当前样本数据统计而得到权值，此方法可以有效避免人为因素可能带来的误差<sup>[19]</sup>。基于极大熵原理的熵值法在众多客观赋值法中是较客观的一种权值确定方法，熵值反映了信息的无序化程度，可以用来度量信息量的大小，某项指标携带的信息越多，表示该项指标对结果的作用越大，此时熵值越小，即系统的无序度越小。其主要计算步骤如下<sup>[11]</sup>：

(1) 假定有  $m$  个待测样本，每个待测样本有  $n$  个指标，构成判断矩阵

$$R = (r_{st})_{m \times n}, (s=1, 2, \dots, m; t=1, 2, \dots, n),$$

式中， $r_{st}$  为第  $s$  个待测样本的第  $t$  个指标的实测值。

(2) 将判断矩阵  $R$  归一化，得到归一化矩阵  $B$ ， $B$  的元素为

$$b_{st} = \frac{r_{st} - r_{\min}}{r_{\max} - r_{\min}}, \quad (4)$$

式中， $r_{\min}$ ， $r_{\max}$  分别为同一指标下不同待测样本的最小值和最大值。

(3) 根据传统熵的概念可以定义各指标的熵为

$$H_t = -\frac{\left(\sum_{s=1}^m f_{st} \ln f_{st}\right)}{\ln m} (s=1, 2, \dots, m; t=1, 2, \dots, n), \quad (5)$$

式中， $f_{st} = b_{st} / \sum_{s=1}^m b_{st}$ 。显然当  $f_{st}=0$  时， $\ln f_{st}$  无意义。

因此，对  $f_{st}$  的计算加以修正，将其定义为

$$f_{st} = (1+b_{st}) / \sum_{s=1}^m (1+b_{st}). \quad (6)$$

$$(4) \text{ 计算各指标的熵权 } \omega_t = (1-H_t) / (n - \sum_{t=1}^n H_t),$$

$$W = (\omega_t)_{1 \times n}, \text{ 且满足 } \sum_{t=1}^n \omega_t = 1.$$

### 3.4 计算综合联系度

设第  $s$  个待测样本的综合联系度为  $\mu_s$ ，首先根据式(2)或式(3)计算第  $k$  项指标联系度  $\mu_{sk}$ ；再利用熵权赋值法计算各项指标的权重向量  $W = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)^T$ ，满足归一化条件  $\sum_{k=1}^n \omega_k = 1$ ；最后利用下式计算各个待测样本的综合联系度  $\mu_s = \sum_{k=1}^n (\omega_k \times \mu_{sk})$ ，式中  $n$  为指标个数。

### 3.5 判断标准

比较各待测样本综合联系度  $\mu_s$  中  $a, b, c$  的相对大小。结合本文工程实例，其判断准则为<sup>[11-12]</sup>：①若  $\max[a, b, c] = b$ ，则判断为来源于渗漏水；②若  $\max[a, b, c] = a$ ，且  $a+b \geq 0.7$ ，则判断为来源于降水，否则来源于渗漏水；③若  $\max[a, b, c] = c$ ，且  $b+c \geq 0.7$ ，则判断为来源于地下水，否则来源于渗漏水。

## 4 示踪法

传统的地球物理方法是一种对天然存在或人工建立的地球物理场进行探测的方法，包括电法、磁法、地震勘探等，当有钻孔资料对比时，它们在探测大尺度的物性差异场方面能起到一定的作用，但对小尺度的物性差异场或深埋通道的探测效果却不明显<sup>[20]</sup>。示踪法包括人工同位素示踪和天然示踪，是通过对比渗流场中各种补给源和排泄点流体的各种信息量，确定排泄点流体的补给源及各种补给源所占的比例。流体中的示踪剂不但承载了水流源区流体的一些特征，而且还包含了流体与损伤岩体之间发生的水岩相互作用、同位素交换、溶蚀反应等信息。

### 4.1 水化学方法

水中化学成分的形成是水与地层间长期相互作用的结果，它包含了地下水的历史以及地层等方面的信息，是分析地下水补排的重要依据。通过水化学分析可以知道钻孔水是来自于地下水还是库水，因而可以利用地下水化学成分特征分析堤坝渗漏的部位、强度等<sup>[9]</sup>。本文选用 PH，电导和 Cl<sup>-</sup> 为探测指标，原因如下<sup>[10, 21]</sup>：①土颗粒表面吸附大量溶于水的粒子，渗漏水流经渗漏通道过程中，会溶解一部分离子，其

PH 值将明显升高, 升高幅度取决于渗径长短; ②库水主要来自大气降水, 一般来说其矿化度较低, 电导值也非常低, 大气降水经地表渗入地层过程中, 会与地层中的矿物质发生一系列物理化学作用, 水中的矿化度不断提高, 从而使地下水具有较高的电导值; ③Cl<sup>-</sup>广泛分布于地下水, 它不为植物及细菌摄取, 不被土颗粒表面吸附, 也不会与其他任何成分结合形成难溶化合物而析出地下水, 具有很强的水迁移能力。

#### 4.2 环境同位素

库水、地下水都来自大气降水, 由于受大气降水稀有同位素的高程效应、纬度效应、陆地效应、季节效应等影响, 不同来源的水体呈现不同的同位素特征, 因此通过测定地下水的  $D$  和  $^{18}\text{O}$  值, 可以很容易区分地下水是来自于库水渗漏还是来自于局部降水。研究表明<sup>[22]</sup>: 中国东部季风区大气降水同位素值表现出非常明显的季节周期性变化: 夏半年偏负, 冬半年偏正, 具有显著的降水量效应, 并且大大掩盖了温度效应。降水中同位素的周期性变化可以作为很好的示踪剂, 用来探测堤坝渗漏, 可以极大地减少探测成本。然而必须说明, 此方法只适用小型水库, 因为小型水库储水量小, 用水量相对来说比较大, 其更新速度快, 库水受到蒸发的程度有限, 能够保留降水同位素的性质, 使根据同位素周期性变化探测堤坝渗漏成为可能。

### 5 工程实例

#### 5.1 工程概况

现有南方某均质土坝水库, 坝顶高程为 85.5 m, 坝顶长 500 m, 坝顶宽 7.5 m, 最大坝高 58.5 m, 流域面积  $3.42 \text{ km}^2$ , 水库正常水位 81.8 m, 总库容为  $596 \times 10^4 \text{ m}^3$ , 属小型水库。该水库坝址东南面临大亚湾海域, 西北背靠排牙山, 属滨海中低山丘陵地貌, 地形起伏变化较大。排牙山主峰海拔高程 707.60 m, 呈 NE~SW 向延伸。库区第四系松散堆积物广布, 基岩露头甚少, 第四系以残坡积、冲洪积物为主, 其次为坡洪积物, 分布于沟谷、两岸斜坡和谷底。岩性以细粒长石石英砂岩、粉砂岩和石英砾岩为主, 巨厚层状, 层理不明显。

水库于 1996 年 9 月建成蓄水后一直受到渗漏量过大的困扰, 总渗漏量高达  $83.8 \text{ m}^3/\text{d}$ , 曾于 1997 年 10 月至 1998 年 7 月两次采用劈裂灌浆对坝体作防渗处理, 同时对坝体与基础接触带, 采用高压喷射板墙处理防渗加固工程。但是大坝渗漏量未见减少, 水库在正常水位运行, 渗漏量反而由加固前的 33 L/s 增大到 40 L/s。针对该水库渗漏问题, 2007 年 7 月至 10 月间, 在坝顶沿坝轴线进行钻孔 16 个, 对钻孔内水的 PH,

电导, Cl<sup>-</sup>, δD 和 δ<sup>18</sup>O 等一系列值进行了相应的测量。

#### 5.2 探测过程

对于水库堤坝渗漏探测问题, 首先探测指标的选取不宜过多, 否则会使评价工作过于复杂; 指标过少又不能客观反映出渗漏的本质。结合上述堤坝集中渗漏通道的水化学和环境同位素探测方法, 选取 PH, 电导, Cl<sup>-</sup>, δD 和 δ<sup>18</sup>O 作为探测指标, 16 个钻孔内水样作为待测样本。其次量水堰水探测指标的测量值作为一个参考标准, 深层库水主要通过地下渗漏通道, 汇集于量水堰处, 量水堰水探测指标的测量值可以近似看做地下水; 库水主要来自当地的降水补给, 水库溪水探测指标测量值作为一个参考标准, 近似为降水; 以量水堰水和水库溪水探测指标测量值的平均值作为中间参考标准, 近似为渗漏水。根据熵权-集对分析模型, 编制 Matlab 程序计算各探测指标权重和综合联系度, PH, 电导, Cl<sup>-</sup>, δD 和 δ<sup>18</sup>O 的权重分别为 0.1953, 0.1997, 0.1551, 0.2090, 0.2408。根据待测样本测量值和判断标准阈值之间的关系, 利用式(2)计算各探测指标联系度, 然后根据既得各指标权重计算样本综合联系度, 其结果列于表 1 中。各待测样本钻孔位置绘于图 1 中。

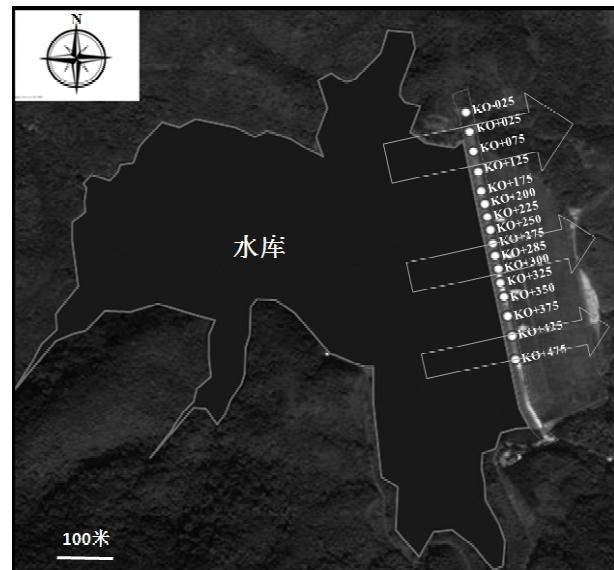


图 1 待测样本钻孔图

Fig. 1 Borehole sites of samples

#### 5.3 结果分析

从表 1 可以看出, 钻孔序号 K0-025, K0+025, K0+075, K0+125, K0+175, K0+275, K0+285, K0+300, K0+325, K0+425, K0+475 为一类, 这些钻孔中的水主要为库水渗漏, 其中 K0+025, K0+125, K0+175, K0+285, K0+300, K0+325, K0+425 综合联系度中 c 比 a 明显大, 说明其渗漏水主要是深层库水, 钻孔序号 K0+325 和 K0+425 的 c 比 a 大一个数量级, 可见



表 1 样本和计算结果

Table 1 Samples and calculated results

钻孔序号	PH	电导	Cl <sup>-</sup>	$\delta D$	$\delta^{18}\text{O}$	综合联系度( $a+bi+cj$ )	分类结果
K0-025	6.27	40.70	5.70	-37.60	-6.03	0.3860+0.4176 <i>i</i> +0.1964 <i>j</i>	渗漏水
K0+025	6.06	53.00	5.30	-37.70	-5.83	0.3333+0.5254 <i>i</i> +0.5253 <i>j</i>	渗漏水
K0+075	5.47	85.70	10.10	-40.60	-5.86	0.2368+0.6361 <i>i</i> +0.1261 <i>j</i>	渗漏水
K0+125	5.41	73.10	11.00	-33.40	-5.80	0.2615+0.3754 <i>i</i> +0.3641 <i>j</i>	渗漏水
K0+175	5.75	205.80	19.20	-41.70	-5.98	0.2464+0.3988 <i>i</i> +0.3548 <i>j</i>	渗漏水
K0+200	5.68	153.10	14.30	-37.90	-6.02	0.1702+0.3458 <i>i</i> +0.4840 <i>j</i>	地下水
K0+225	5.58	130.70	14.10	-38.20	-6.03	0.1997+0.3347 <i>i</i> +0.4656 <i>j</i>	地下水
K0+250	6.37	257.10	13.40	-36.10	-5.95	0.0425+0.3177 <i>i</i> +0.6398 <i>j</i>	地下水
K0+275	5.69	170.80	15.50	-42.20	-6.06	0.3123+0.3329 <i>i</i> +0.3548 <i>j</i>	渗漏水
K0+285	6.33	224.60	12.80	-41.90	-5.93	0.1546+0.4254 <i>i</i> +0.4200 <i>j</i>	渗漏水
K0+300	5.90	171.80	16.80	-41.40	-5.93	0.1755+0.4697 <i>i</i> +0.3548 <i>j</i>	渗漏水
K0+325	6.41	217.40	12.30	-40.50	-5.84	0.0473+0.5111 <i>i</i> +0.4416 <i>j</i>	渗漏水
K0+350	6.26	225.40	13.60	-36.30	-5.89	0.0283+0.3617 <i>i</i> +0.6100 <i>j</i>	地下水
K0+375	6.96	335.00	10.50	-40.10	-5.77	0.0062+0.4494 <i>i</i> +0.5444 <i>j</i>	地下水
K0+425	5.88	131.70	10.60	-38.50	-5.82	0.0688+0.4841 <i>i</i> +0.4471 <i>j</i>	渗漏水
K0+475	5.33	78.00	11.70	-39.70	-5.81	0.2513+0.5752 <i>i</i> +0.1735 <i>j</i>	渗漏水
水库溪水	5.37	45.20	5.17	-43.40	-6.79	—	降水
均匀混合	6.09	87.95	7.89	-40.00	-5.77	—	渗漏水
量水堰水	6.81	130.70	10.60	-36.60	-5.45	—	地下水

其渗漏水几乎全部来自于深层库水；而钻孔序号 K0-025, K0+075, K0+475 综合联系度中的  $a$  大于  $c$ , 其渗漏水中降水占主要成分, 说明这些钻孔中的水主要来源于浅层库水渗漏或者地表水, 钻孔序号 K0-025 和 K0+075 的  $a$  约为  $c$  的 2 倍, 这两个钻孔中的水明显来源于浅层库水渗漏。钻孔序号 K0+200, K0+225, K0+250, K0+350, K0+375 分为一类, 其钻孔中的水主要为地下水。由以上探测结果可知, 该水库堤坝主要存在 3 条集中渗漏通道, 分别位于钻孔序号 K0-025~K0+175, K0+275~K0+325 和 K0+425~K0+475 附近, 渗漏通道绘于图 1 中。

## 6 流速和温度探测

众所周知, 使用单一探测方法并不能很好地确定集中渗漏通道的位置, 为了保证探测结果的准确性, 下面采用水平流速和温度探测方法进行验证。

### 6.1 水平流速探测

地下水流动的水平流速可以通过测定注入钻孔中的示踪剂浓度变化的方法来确定, 原理如下<sup>[8]</sup>: 假设一定量的示踪剂注入孔中的水体内, 止水塞之间长度为  $h$ , 孔径为  $d$ , 最初浓度为  $C$ , 并满足以下假定条件: ①试验点地下水的模式处于稳定状态; ②在孔中被标定的圆柱的体积为  $V=d^2h/4$ , 被测定的示踪剂始终是均匀分布; ③不存在垂向流的通路, 不存在由于扩散引起的明显的示踪剂损失。钻孔中的地下水水流速可采用下式求出:

$$V_f = \frac{\pi(r_1^2 - r_0^2)}{2r_1 \cdot \alpha \cdot t} \ln \frac{N_0}{N_1} \quad (7)$$

式中  $r_1$  为井内半径;  $r_0$  为探头半径;  $t$  为两次测量时间间隔;  $\alpha$  为流场畸变系数;  $N_0$  为  $t=0$  时的计数率;  $N_1$  为  $t=1$  时的计数率。

图 2 是各个钻孔地下水水平流速随深度的变化图, 其中钻孔 K0-025 和 K0+175 浅层的渗透流速比深层渗透流速大一倍左右, K0+025—K0+125 钻孔 30~40 m 深度有较大流速, 与图 1 中钻孔序号 K0-025—K0+175 处的集中渗漏通道相吻合; K0+275 和 K0+285 钻孔的渗透流速整体较均匀, 平均渗透流速较大, 从浅层到深层逐渐变小; K0+300 和 K0+325 钻孔 30 m 深度以上的渗透流速较大, 钻孔 35 m 深度以下的渗透流速相对较小, 这两处正是图 1 中钻孔序号 K0+275—K0+325 处的集中渗漏通道位置; K0+425 和 K0+475 钻孔 30 m 深度以上的渗透流速较大, 从上到下逐渐减小, 钻孔底部的渗透流速较小, 这也验证了图 1 中钻孔序号 K0+425—K0+475 处的集中渗漏通道。

### 6.2 温度探测

水在 4℃时密度最大, 4℃~100℃之间的水服从热胀冷缩原理, 冷水的密度大向下沉, 热水的密度小而上升, 从而造成河水、库水、湖水等表层的温度较高, 底部的温度较低。而地层中温度的变化趋势则与之相反, 随着深度的增加, 温度也随之增加。因此, 地层中地下水温度的变化可以反映库水对下游地下水的补给情况及补给程度, 由此可以推断出渗漏区域。一般来说, 在堤坝渗漏较强的坝后观测孔中可以测定到低温区, 温度最低的区域一般是渗透性最强的区域。库水或河水的表层温度是随着季节而变化的, 而深层

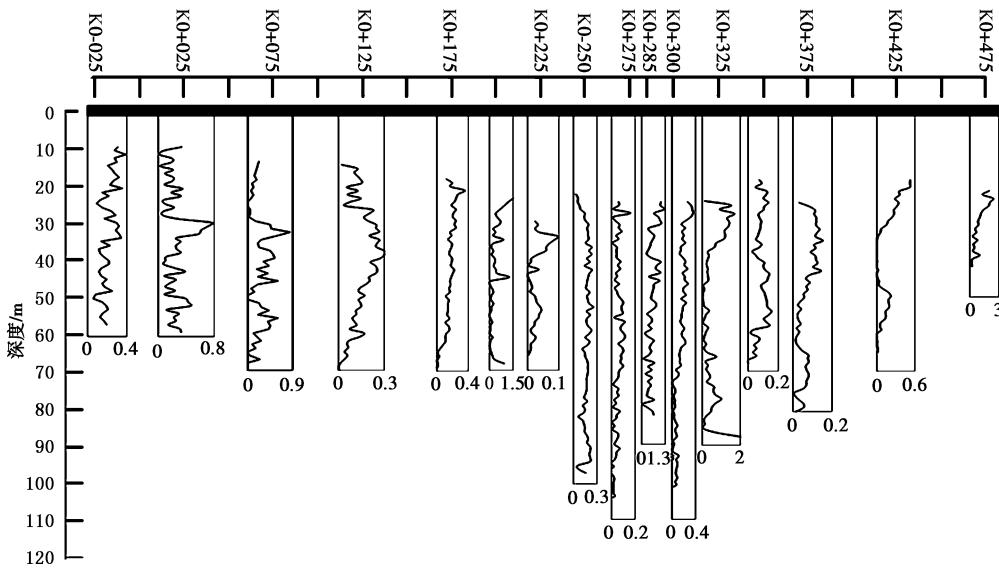


图 2 钻孔水平流速随深度变化图

Fig. 2 Relationship between horizontal velocity and depth in boreholes

库水和地下水温度随季节变化则较小, 由降雨造成的山坡渗水其温度变化也与季节有关。各层的库水、山坡渗水及地下水三者的温度是不同的, 温度异常带常常被认为是渗透层, 通过对钻孔及相关位置的温度场测定可以获得集中渗漏通道位置及其渗流的情况。

如图 3 所示, 在 K0+275—K0+325 钻孔之间是明显的低温区, 表面此处是很强的集中渗漏带; 在 K0+425、K0+175 和 K0-025—K0+125 孔附近也存在着局部范围的低温区, 推测这些孔附近均存在较强的渗漏通道。温度探测结果与上述模型分析结果基本吻合, 仅在 K0+175 钻孔处有些偏差, 图 3 表面该处渗漏通道与钻孔 K0-025~K0+125 处集中渗漏通道并不是连在一起的, 是分开的两个独立渗漏通道, 所以探测结果为该水库堤坝存在 4 条主要渗漏通道, 分别位于 K0-025—K0+125, K0+175, K0+275—K0+325 和 K0+425 钻孔附近。

图 1, 3 比较可以看出, 两种方法探测结果也存在一些偏差, 比如图 1 钻孔 K0-025—K0+175 是连在一起的一条集中渗漏通道, 但是图 3 中显示钻孔 K0+175 附近与钻孔 K0-025—K0+125 处的渗漏通道并非连在一起, 而是分开的 2 个独立渗漏通道。分析原因如下: ①本文所测数据是通过在钻孔中测量或取样测量所得, 钻孔并不一定揭露真实渗漏通道, 可能处于渗漏通道影响范围内, 所以造成结果存在偏差。②此次探测结果实际上仅是对一次抽样结果的探测, 其探测结果难免受到随机观测误差的影响。③探测标准是根据实际问题选定的, 并没有严格的既定标准, 难免会有偏差。④数据处理的过程中, 难免会受到人为因素的

干扰, 但是误差在可接受范围内。

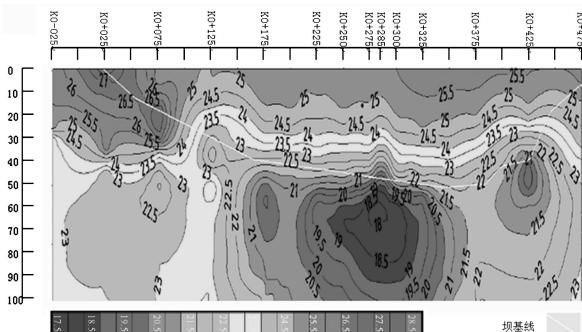


图 3 温度探测结果

Fig. 3 Results of temperature detection

## 7 结 论

(1) 本文基于水化学和环境同位素探测方法, 结合信息熵和集对分析理论, 建立了一种新的堤坝集中渗漏通道探测模型: 熵权-集对分析模型, 并应用该模型探测南方某水库堤坝集中渗漏通道, 采用流速和温度探测方法进行验证。研究表明: 该水库在钻孔 K0-025—K0+125、K0+175、K0+275—K0+325 和 K0+425 附近存在 4 条集中渗漏通道, 跟流速和温度探测结果相吻合。

(2) 本文理论建立在热力学第二定律的基础上, 通过“信息流”中的“信息熵”来确定地下流场的性质, 探测堤坝集中渗漏通道。在计算各探测指标的权重过程中引入基于极大熵原理的熵权赋值理论, 采用信息熵反映实测数据的效用值, 获得 PH、电导、Cl<sup>-</sup>、δD 和 δ<sup>18</sup>O 探测指标的权重分别为 0.1953, 0.1997,

0.1551, 0.2090 和 0.2408, 避免了以往确定指标权重的主观性。

(3) 应该指出该方法也存在其不足之处, 比如应用该模型探测结果和温度探测结果之间存在偏差, 其主要原因可能是本文所测数据是通过在钻孔中测量或取样测量所得, 钻孔并不一定揭露渗漏通道, 钻孔可能处于渗漏通道影响范围内, 所以造成结果存在偏差。不过, 误差在可接受范围内。

## 参考文献:

- [1] 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 Hai-zhou, CHEN Jian-sheng. Model research of heat source method by using water temperature distribution in borehole to determine seepage velocity of dyke[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2003, **30**(5): 40 - 43. (in Chinese))
- [2] 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 Hai-zhou, CHEN Jian-sheng. 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))
- [3] 董海洲, 张小燕. 堤坝渗漏圆柱状热源模型及试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, **30**(增刊 2): 3665 - 3670. (DONG Hai-zhou, ZHANG Xiao-yan. Seepage cylindrical heat source model of dam and its experimental study[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, **30**(S2): 3665 - 3670. (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 Xin-jian, CHEN Jian-sheng. Model for detecting of concentrated leakage in dam and dyke and its numerical experiment[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(S2): 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 Xin-jian, CHEN Jian-sheng. 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, 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 Jian-sheng, DONG Hai-zhou, WU Qing-lin, 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))
- [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 Jian-sheng, FAN Zhe-chao, DONG Hai-zhou, 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] 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: 51 - 205. (CHEN Jian-sheng, DONG Hai-zhou. Dam leakage detecting tracer new theory and technology research[M]. Beijing: Science Press, 2007: 51 - 205. (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 Jian-sheng, YANG Song-tang, LIU Jian-gang, 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] 黄琳, 沈国良, 杨松堂. 综合示踪方法探测堤坝渗漏的原理[J]. 西部探矿工程, 2004, **16**(5): 19 - 22. (HUANG Lin, SHEN Guo-liang, YANG Song-tang. The principle of comprehensive tracer method to detect dam leakage[J]. West-China Exploration Engineering, 2004, **16**(5): 19 - 22. (in Chinese))
- [11] 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 - 262. (MENG Xian-meng, HU He-ping. 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))
- [12] 谢正文, 吴超, 李孜军, 等. 基于信息熵和集对分析理论的硫化矿石自燃倾向性判定[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, **43**(5): 1858 - 1863. (XIE Zheng-wen, WU Chao, LI Zi-jun, et al. Evaluation on spontaneous combustion tendency of sulfide ores based on entropy and set pair analysis theory[J]. Journal of Central South University (Natural Sciences), 2012, **43**(5): 1858 - 1863. (in Chinese))
- [13] 贺瑞敏, 张建云, 王国庆, 等. 基于集对分析的广义水环境承载能力评价[J]. 水科学进展, 2007, **18**(5): 730 - 735.

- (HE Rui-min, ZHANG Jian-yun, WANG Guo-qing, et al. Evaluation on generalized water environment carrying capacity based on SPA[J]. Advances in Water Science, 2007, 18(5): 730 - 735. (in Chinese))
- [14] SU M R, YANG Z F, CHEN B, et al. Urban ecosystem health assessment based on energy and set pair analysis—A comparative study of typical Chinese cities[J]. Ecological Modelling, 2009, 220(18): 2341 - 2348.
- [15] TAO J, FU M C, SUN J J, et al. Multifunctional assessment and zoning of crop production system based on set pair analysis-A comparative study of 31 provincial regions in mainland China[J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2014, 19(5): 1400 - 1416.
- [16] ZOU Q, ZHOU J Z, ZHOU C, et al. Comprehensive flood risk assessment based on set pair analysis-variable fuzzy sets model and fuzzy AHP[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2013, 27(2): 525 - 546.
- [17] 张继国, SINGH V P(辛格). 信息熵—理论与应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012: 26 - 28. (ZHANG Ji-guo, SINGH V P. Information entropy—methodology and application[M]. Beijing: China WaterPower Press, 2012: 26 - 28. (in Chinese))
- [18] 郑志宏, 魏明华. 基于熵值法的改进集对分析水质模糊评价[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2013, 41(2): 136 - 139. (ZHENG Zhi-hong, WEI Ming-hua. Water quality fuzzy evaluation based on entropy method-improved set pair analysis[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2013, 41(2): 136 - 139. (in Chinese))
- [19] 许波琴, 陈建生, 李 刚, 等. 熵权模糊聚类信息流法在渗漏探测中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2013, 41(5): 429 - 433. (XU Bo-qin, CHEN Jian-sheng, LI Gang, et al. Application of information flow method based on fuzzy clustering and entropy weights to detection of leakage channels[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2013, 41(5): 429 - 433. (in Chinese))
- [20] 刘建刚. 地基渗透变形理论与渗漏探测方法[D]. 南京: 河海大学, 2002. (LIU Jian-gang. The theory of foundation seepage deformation and the method of leakage detection[D]. Nanjing: Hohai University, 2002. (in Chinese))
- [21] 刘建刚, 洪光森. 混凝土重力坝的渗漏及示踪探测研究[J]. 勘察科学技术, 2009(5): 21 - 24, 56. (LIU Jian-gang, HONG Guang-sen. The concrete gravity dam leakage and the tracer detecting research[J]. Site Investigation Science and Technology, 2009(5): 21 - 24, 56. (in Chinese))
- [22] 卫克勤, 林瑞芬. 论季风气候对我国雨水同位素组成的影响[J]. 地球化学, 1994, 23(1): 33 - 41. (WEI Ke-qin, LIN Rui-fen. The influence of monsoon climate on the isotopic composition of rain in our country[J]. Geochimica, 1994, 23(1): 33 - 41. (in Chinese))