

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2013.05.010

熵权模糊聚类信息流法在渗漏探测中的应用

许波琴^{1,2}, 陈建生^{1,3}, 李刚^{1,2}, 董海洲³

(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. 河海大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210098;
3. 河海大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 针对小浪底水库左坝肩渗漏问题, 采用熵权模糊聚类信息流法对采集的 14 个样本进行分析, 以确定渗漏水的补给来源, 并结合温度和电导探测、连通试验等方法确定集中渗漏通道。结果表明: 1 号排水洞 3 号孔、1 号排水洞 35 号孔、2 号排水洞 28 号顶孔、2 号排水洞 94 号顶孔、4 号排水洞 28 号底孔、30 号排水洞 D-18 号孔、30 号排水洞 RD-7 号孔中的水由浅层库水补给; 30 号排水洞 D-133 号孔中的水由深层库水补给; 30 号排水洞 D-194 号孔中的水由深层库水、尾水、地下水补给; 30 号排水洞 RD-37 号孔中的水由地下水和尾水补给。通过对集中渗漏通道实施灌浆补强、断层封堵等防渗加固措施, 各级水位下总排水量均比以前减少, 减少幅度为 25% ~ 40%, 因此熵权模糊聚类信息流法用于判别渗漏水的补给来源是行之有效的。

关键词: 渗漏; 信息流; 熵权法; 模糊聚类; 小浪底水库

中图分类号: P641.2 文献标志码: A 文章编号: 1000-1980(2013)05-0429-05

Application of information flow method based on fuzzy clustering and entropy weights to detection of leakage channels

XU Boqin^{1,2}, CHEN Jiansheng^{1,3}, LI Gang^{1,2}, DONG Haizhou³

(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;
3. College of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: To investigate groundwater leakage from the left dam abutment of the Xiaolangdi Reservoir, an information flow method based on fuzzy clustering and entropy weights was used to determine the supply sources of leakage water according to analysis of 14 samples. Meanwhile, temperature and electric conductivity detection and interconnection testing were used to ascertain the concentrated leakage channels. The results show that there were different supply sources of leakage water: shallow reservoir water (borehole 3 in drainage tunnel 1, borehole 35 in drainage tunnel 1, top hole 28 in drainage tunnel 2, top hole 94 in drainage tunnel 2, borehole 28 in drainage tunnel 4, borehole D-18 in drainage tunnel 30, and borehole RD-7 in drainage tunnel 30); deep reservoir water (borehole D-133 in drainage tunnel 30); the mixture of deep reservoir water, tail water, and local groundwater (borehole D-194 in drainage tunnel 30); and the mixture of tail water and local groundwater (borehole RD-37 in drainage tunnel 30). After implementation of some seepage control and reinforcement measures, such as curtain grouting and fault plugging, the total leakage flux at different reservoir water levels was reduced by a range of 25% to 40%. Therefore, the proposed information flow method is effective in determining the supply source of leakage water.

Key words: seepage; information flow; entropy weight method; fuzzy clustering; Xiaolangdi Reservoir

示踪法是目前用于探测堤坝集中渗漏的主要方法,是利用天然示踪剂、人工示踪剂进行示踪^[1]。天然示踪剂和人工示踪剂统称为信息流。示踪法通过对比渗流场中各种补给源、排泄点流体的各种信息含量,确定排泄点流体的补给源及各种补给源所占的比例。以信息流为基础的探测堤坝渗漏示踪法始于20世纪50年代,20世纪90年代初被引入中国,目前已成功应用于小浪底、西霞院、碧口、刘家峡、八盘峡、黄壁庄等国家重点工程中,示踪法大幅度提高了我国堤坝渗漏通道的探测水平^[2]。但是,示踪法目前还处在初级阶段,只能通过人为定性地判断渗流通道。

模糊聚类法是用数学方法定量地确定样本的亲疏关系,从而客观地划分类型,能真实反映大坝各测点水体间的内在联系。权值确定是模糊聚类法的关键,权值是否恰当直接影响模糊综合评价效果。权重确定的主要方法有主观赋值法和客观赋值法^[2]。主观赋值法由专家根据经验主观判断,一般是根据以前的统计数据而得,与当前样本数据无关,和实际情况脱节。主观赋值法包括 Delphi 法、层次分析法、环比赋权法、加权统计法、调查统计法等。主观赋值的缺点是客观性较差,工作量大。客观赋值法由当前样本数据统计而得,客观性很强,避免了人为因素带来的偏差。客观赋值法包括主成分分析法、均方差法、离差最大化法、熵值赋权法、频率统计法、变异系数法等。笔者采用以熵值赋权法进行权重确定的模糊聚类法对堤坝渗漏进行研究,以期将信息流判别渗漏提升到理论高度。

1 熵权模糊聚类信息流法

模糊聚类是应用模糊系统基本理论对具体事物建立聚类样本集、聚类指标集、各指标权重集、聚类中心集进行运算,其基本步骤如下^[3-11]:(a)建立样本的聚类指标特征矩阵 $U=(u_{ij})_{n \times m}$, n 为样本数, m 为指标数;(b)对 U 进行归一化,得到归一化矩阵 $R=(r_{ij})_{n \times m}$;(c)确定聚类中心矩阵 C ;(d)采用熵权赋值法确定聚类指标体系的权重 W ;(e)确定初始分划矩阵 S_0 ;(f)确定最佳分划矩阵 S 。

对 U 进行归一化有2个目的:(a)建模和计算都要求度量单位统一,归一化能将指标特征值统一为0~1之间的无量纲数;(b)加快收敛性。

在熵权法中,若 $u_{ij}=0$,则熵值无意义,所以采用式(1)作为归一化函数,得到的值在0.1~0.9之间。

$$r_{ij} = \frac{0.8(u_{ij} - u_{jmin})}{u_{jmax} - u_{jmin}} + 0.1$$

(1)

式中 u_{jmin}, u_{jmax} 分别为第 j 项指标最小、最大样本的聚类指标特征值。

2 工程实例

2.1 工程概况

小浪底水库运行后,左坝肩的渗漏量为10 L/s,个别孔中还伴随小石块流出。小浪底水库蓄水后曾针对帷幕的渗漏进行灌浆补强,耗资达2亿元,但由于渗漏来源未调查清楚,因此未取得满意效果,渗漏现象依然十分严重。为了查清水库渗漏产生的原因,探明集中渗漏通道,确定渗漏通道与断层(F28等)的关系,选取左坝肩14个示踪试验孔,采用同位素综合示踪、温度^[12]和电导^[13]探测、pH与各种离子含量分析、地球物理探测、连通试验等方法进行渗漏通道的探测^[14],并结合连通试验,得出左坝肩存在数个明显集中渗漏通道的结论。

2.2 熵权模糊聚类信息流法的应用

2.2.1 数据选取

水库渗漏水主要来源于浅层库水、深层库水、地下水和尾水,但由于深层库水和尾水的特征指标值极为相似,故先将渗漏水分为浅层库水、深层库水、地下水补给,然后再根据实际情况进行具体判断。(a)选取浅层库水、深层库水、距离左坝肩东南约2 km的14个水样(表1)作为样本进行模糊聚类分析。(b)选取 δ_{18O} , $\rho(Ca^{2+})$, $\rho(Cl^{-})$ 和 TDS 值^[15-17]作为样本指标,指标测量结果见表1。

2.2.2 熵权模糊聚类分析

为判断渗漏水的补给源,对选取的数据进行熵权模糊聚类分析。

a. 将表1的数据矩阵化成样本的聚类指标特征矩阵 U 。

表 1 水样各指标测量结果

Table 1 Measurement results of characteristic indices of water samples

样本编号	位置	$\rho(\text{Ca}^{2+})/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\rho(\text{Cl}^{-})/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\delta_{\text{D}}/$ %	$\delta_{18\text{O}}/$ %	TDS 值/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
1	浅层库水	72.97	112.10	-6.41	-0.81	41.94
2	深层库水	64.34	113.90	-6.90	-0.94	18.73
3	泰山村地下水	80.03	8.90	-6.10	-0.69	8.28
4	官庄村地下水	82.38	16.73	-6.40	-0.84	5.18
5	1 号排水洞 3 号孔	98.08	118.53	-5.80	-0.87	47.95
6	1 号排水洞 35 号孔	96.11	119.24	-6.29	-0.88	45.41
7	2 号排水洞 28 号顶孔	66.69	115.68	-6.68	-0.91	48.78
8	2 号排水洞 94 号顶孔	79.44	112.12	-6.11	-0.85	54.20
9	4 号排水洞 28 号底孔	72.18	113.90	-6.60	-0.88	59.73
10	30 号排水洞 D-18 号孔	78.46	109.63	-6.41	-0.85	33.65
11	30 号排水洞 RD-7 号孔	72.58	115.68	-6.68	-0.89	44.19
12	30 号排水洞 D-133 号孔	50.02	112.12	-6.80	-0.86	18.95
13	30 号排水洞 D-194 号孔	62.77	101.45	-6.29	-0.86	8.61
14	30 号排水洞 RD-37 号孔	82.38	102.51	-6.11	-0.89	14.15

b. 对 U 进行归一化得 R :

$$R = \begin{bmatrix} 0.4820 & 0.8482 & 0.4564 & 0.5160 & 0.6391 \\ 0.3384 & 0.8613 & 0.1000 & 0.1000 & 0.2987 \\ 0.5995 & 0.1000 & 0.6818 & 0.9000 & 0.1455 \\ 0.6387 & 0.1568 & 0.4636 & 0.4200 & 0.1000 \\ 0.9000 & 0.8949 & 0.9000 & 0.3240 & 0.7272 \\ 0.8672 & 0.9000 & 0.5436 & 0.2920 & 0.6900 \\ 0.3775 & 0.8742 & 0.2600 & 0.1960 & 0.7394 \\ 0.5897 & 0.8484 & 0.6745 & 0.3880 & 0.8189 \\ 0.4689 & 0.8613 & 0.3182 & 0.2920 & 0.9000 \\ 0.5734 & 0.8303 & 0.4564 & 0.3880 & 0.5175 \\ 0.4755 & 0.8742 & 0.2600 & 0.2600 & 0.6721 \\ 0.1000 & 0.8484 & 0.1727 & 0.3560 & 0.3019 \\ 0.3122 & 0.7710 & 0.5436 & 0.3560 & 0.1503 \\ 0.6387 & 0.7787 & 0.6745 & 0.2600 & 0.2315 \end{bmatrix} \tag{2}$$

c. 采用 Matlab 软件计算各指标的权重,得 $\rho(\text{Ca}^{2+})$, $\rho(\text{Cl}^{-})$, δ_{D} , $\delta_{18\text{O}}$ 和 TDS 值的权重分别为 0.149 3, 0.150 9, 0.192 7,0.297 0,0.210 2。一般情况下,稳定同位素的权重比水化学大。

d. 确定初始分划矩阵为 S_0 :

$$S_0 = \begin{bmatrix} 0.8000 & 0.1000 & 0.1000 & 0.1000 & 0.8000 & 0.8000 & 0.8000 & 0.8000 & 0.8000 & 0.7000 & 0.8000 & 0.1000 & 0.1000 & 0.1000 \\ 0.1000 & 0.8000 & 0.1000 & 0.1000 & 0.1000 & 0.1000 & 0.1000 & 0.1000 & 0.1000 & 0.2000 & 0.1000 & 0.8000 & 0.1000 & 0.4000 \\ 0.1000 & 0.1000 & 0.8000 & 0.8000 & 0.1000 & 0.1000 & 0.1000 & 0.1000 & 0.1000 & 0.1000 & 0.1000 & 0.8000 & 0.8000 & 0.4000 \end{bmatrix} \tag{3}$$

e. 经 Matlab 计算,迭代 6 次后得到最终的分划矩阵 S :

$$S = \begin{bmatrix} 0.8201 & 0.0779 & 0.0699 & 0.0378 & 0.6944 & 0.8803 & 0.7625 & 0.8849 & 0.8284 & 0.5979 & 0.7679 & 0.0565 & 0.1069 & 0.1894 \\ 0.1220 & 0.8568 & 0.1009 & 0.0900 & 0.1640 & 0.0753 & 0.1780 & 0.0692 & 0.1149 & 0.2962 & 0.1782 & 0.8864 & 0.5633 & 0.4224 \\ 0.0580 & 0.0653 & 0.8293 & 0.8723 & 0.1416 & 0.0444 & 0.0595 & 0.0460 & 0.0567 & 0.1059 & 0.0539 & 0.0572 & 0.3298 & 0.3881 \end{bmatrix} \tag{4}$$

由 S 分析得:样本 1,5,6,7,8,9,10,11 归于第 1 类,即源于浅层库水;样本 2,12 归于第 2 类,即源于深层库水或者尾水;样本 3,4 归于第 3 类,即源于地下水;样本 13,14 归为第 4 类,为深层库水或尾水和地下水的混合。

结合实际情况,尾水位的高程为 135 m,而 30 号排水洞底的高程为 117 m,低于尾水附近的地下水位 18 m,形成排泄漏斗,经过南侧的排水孔流出。所以 30 号排水洞南侧的样本 14 为尾水和地下水的结合。后经连通试验经证实:(a)下游地下水沿着 F2 断层补给到 30 号排水洞;(b)30 号排水洞北侧的 D-133 号孔中

的水由深层库水补给;(c)30号排水洞下游侧的D-194号孔由深层库水、下游的尾水(孔中的低温水为来自下游的尾水)、地下水补给;(d)地下水通过F1和F2断层及渗透层向30号排水洞补给。

2.3 灌浆补强效果

在采用熵权模糊聚类信息流法得出补给水来源的基础上,再结合温度和电导探测、连通试验等推断出集中渗漏通道,如图1所示。在F28断层的下盘与灌浆帷幕之间高程58 m以上的地层中存在一条绕过坝肩的集中渗漏通道,这是造成30号排水洞渗漏量增大的主要原因。2号排水洞U28~U34号顶孔存在来自库水的渗漏的现象,水量与库水位呈正相关关系,水温随季节变化明显;2号排水洞58~60号顶孔和底孔沿2条断层(F236,F238)存在集中渗漏的现象,渗漏水通过断层渗漏,补给途径短,呈带状渗漏。连通试验发现,主渗漏通道并不垂直于坝轴线,而要偏向南侧,该渗漏通道较窄,为20~30 m。4号排水洞附近160 m高程以上的灌浆帷幕存在渗漏,当库水位高于230 m高程以上时,渗漏量与库水位呈非线性增大趋势,该渗漏水在30号和28号排水洞(长洞)顶孔排出,是厂房渗漏水的主要补给来源;1号排水洞的主要补给途径是F231和F233断层,F231,F233为陡倾角断层,走向呈近东西向展布,纵贯水库上下游,库水沿断层带及其影响带向库外渗流,形成1号排水洞内的带状渗流溢出点。

根据所得结论进行灌浆补强、断层封堵等防渗加固措施后,各级水位下总排水量均比以前减少,减少幅度为25%~40%,尤其是2号排水洞,240 m库水位时渗漏量由1 692 m³/d减小为68 m³/d,减幅达96%,加固效果相当显著。

小浪底水库左岸防渗加固处理不仅增大了工程的经济效益,更重要的是消除了渗漏对工程安全的不利影响。如果不进行防渗加固处理,渗漏断层在水流作用下可能产生冲刷融蚀,长期将严重威胁大坝的安全,在洪水作用下更可能产生很大的危害。

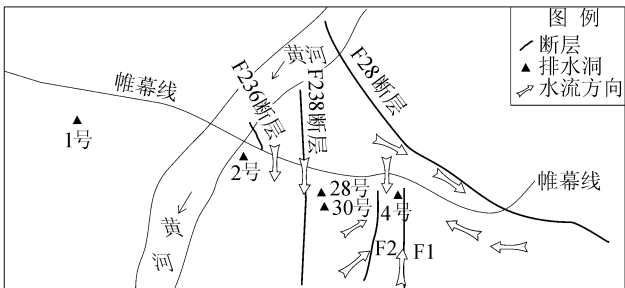


图1 小浪底左坝肩渗流场分布
Fig. 1 Distribution of main seepage fields of left dam abutment of Xiaolangdi Reservoir

3 结 语

针对小浪底左坝肩渗漏情况,应用熵权模糊聚类分析、温度和电导探测、连通试验等手段对渗漏区的14个样本进行了分析。结果标明:用熵权模糊聚类信息流法判别渗漏水来源是切实可行的,它有效地克服了传统的人为主观判断带来的误差。

参考文献:

[1] 陈建生,刘建刚. 北江大堤石角堤段渗漏探测分析[J]. 岩土工程学报,2002, 24(4): 436-441. (CHEN Jiansheng, LIU Jiangang. Study on leakage of Shijiao section of Beijiang River dyke[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(4): 436-441. (in Chinese))

[2] 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.

[3] 樊皓,葛慧,雷少平,等. 模糊数学方法在生态系统服务价值评估中的应用[J]. 水资源保护,2011,27(2):34-36. (FAN Hao, GE Hui, LEI Shaoping, et al. Estimation of ecosystem services value based on fuzzy mathematic method[J]. Water Resources Protection, 2011, 27(2):34-36. (in Chinese))

[4] 王文川,徐冬梅,陈守煜,等. 可变模糊集理论研究进展及其在水科学中的应用[J]. 水利水电科技进展,2012,32(5):89-94. (WANG Wenchuan, XU Dongmei, CHEN Shouyu, et al. Research advances and applications in water science of variable fuzzy set theory[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2012, 32(5):89-94. (in Chinese))

[5] 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 Zhihong, WEI Minghua. 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))

[6] 牟萍,艾萍. 熵权和属性识别模型在水利现代化评价中的应用[J]. 水利经济,2011,29(5):1-4. (MU Ping, AI Ping. Application of entropy weight and attribute recognition model in evaluation of water conservancy modernization[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2011, 29(5):1-4. (in Chinese))

[7] 鲁婷婷,俞淞,王红瑞,等. 基于熵权的集对分析在地下水质量评价中的应用[J]. 水利经济, 2013,31(1):34-37. (LU Tingting, YU Song, WANG Hongrui, et al. Application of entropy weight-based set pair analysis to evaluation of groundwater quality[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2013,31(1):34-37. (in Chinese))

[8] 李玉琳,高志刚,韩延玲. 模糊综合评价中权值确定和合成算子选择[J]. 计算机工程与应用,2006,27(7): 38-43. (LI Yulin, GAO Zhigang, HAN Yanling. The determination of weight value and the choice of composite operators on fuzzy comprehensive evaluation[J]. Journal of Frontiers of Computer Science and Technology, 2006, 27(7): 38-43. (in Chinese))

[9] 陈守煜. 工程模糊集理论与应用[M]. 北京:国防工业出版社,1988.

[10] 黄建元. 模糊集及其应用[M]. 银川:宁夏人民教育出版社,1999.

[11] 樊哲超,陈建生,董海洲,模糊聚类方法研究堤坝渗漏[J]. 岩土力学,2006, 27(7): 1214-1218. (FAN Zhechao, CHEN Jiansheng, DONG Haizhou. Applying fuzzy clustering method to study leakage of dyke[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(7): 1214-1218. (in Chinese))

[12] 董海洲. 堤坝渗漏热源法及示踪理论研究[D]. 南京:河海大学,2004.

[13] 钟启明,陈建生,陈亮. 滨海地区海水入侵的一种测定方法[J]. 水利水电科技进展,2007, 27(1):50-52. (ZHONG Qiming, CHEN Jiansheng, CHEN Liang. Method for measurement of seawater intrusion in coastal areas[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2007, 27(1): 50-52. (in Chinese))

[14] 林统,陈建生,陈亮. 土石坝下伏基岩交错断层导水示踪研究[J]. 岩石力学与工程学报,2009, 28 (增刊 2):3645-3652. (LIN Tong, CHEN Jiansheng, CHEN Liang. Study of conducted water tracer of intersecting fault of lower bedrock of earth-rockfill dam[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28 (Sup2): 3645-3652. (in Chinese))

[15] 陈建生,刘建刚,董海洲,等. 环境同位素示踪方法研究新安江右坝肩绕坝渗流[J]. 中国工程科学,2004, 6(1): 57-63. (CHEN Jiansheng, LIU Jiangang, DONG Haizhou, et al. Environment isotope method to investigate the bypass abutment seepage flow in Xin’ anjiang right dam[J]. Engineering Science, 2004, 6(1):57-63. (in Chinese))

[16] 陈建生,董海洲,陈亮. 采用环境同位素方法研究北江大堤石角段基岩渗漏通道[J]. 水科学进展,2003,14(1):57-61. (CHEN Jiansheng, DONG Haizhou, CHEN Liang. Application of the environment isotope method to study on the leakage passage in foundation of Beijiang Dyke Shijiao section[J]. Advance in Water Science, 2003,14(1):57-61. (in Chinese))

[17] 刘建刚,陈建生,陈亮. 综合示踪方法探测复杂堤基渗流[J]. 地质与勘探,2002,38(2):94-96. (LIU Jiangang, CHEN Jiansheng, CHEN Liang. Detection of complicated embankment foundation influent by the comprehensive labelling method[J]. Geology and Prospecting, 2002,38(2):94-96. (in Chinese))

+++++

• 简讯 •

河海大学 3 项科研成果获 2013 年度中国仪器仪表学会科学技术奖

2013 年度中国仪器仪表学会科学技术奖获奖名单于 8 月 27 日在北京中国国际展览中心揭晓,河海大学共有 3 项科研成果获奖。徐立中教授主持完成的“HSN-3000 厂站综合自动化系统”、王慧斌教授主持完成的“REOS200 专家优化系统”、李臣明副教授主持完成的“RICH 6000 集散控制系统”分别获中国仪器仪表学会科学技术奖三等奖(优秀产品奖)。

中国仪器仪表学会科学技术奖是经国家科学技术部批准、国家科技奖励办公室授权、中国仪器仪表学会设立的科学技术奖项,每年评奖 1 次。该奖项面向全国仪器仪表领域,目前是国内仪器仪表学科和产业领域公认的权威奖项。中国仪器仪表学会科学技术奖项设有一等奖、二等奖、科技创新奖、科技成果奖和优秀产品奖,2013 年度共评出中国仪器仪表学会科学技术奖 56 项。

(本刊编辑部供稿)