

应用环境同位素和模糊聚类方法研究堤防渗漏

樊哲超¹, 陈建生¹, 董海洲², 陈亮¹

(1. 河海大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学科学研究院, 江苏 南京 210098)

摘要 利用环境同位素方法对某堤防几个典型段进行渗漏分析, 查明了其地下水的渗漏来源, 结果表明江都船厂段 T1 号孔、小菜谭段 T23 号孔、联盟庄码头 T29 号孔中的地下水为河水补给来源, T5 号孔附近的黑鱼塘水为当地降雨或近期降雨形成的地下水补给, 万寿宫段 T7 号孔中的地下水为河水和当地降雨的混合。应用模糊聚类方法, 选取环境同位素和水化学值作为指标特征值, 并赋予不同的权重, 进行模糊聚类分析, 分析结果与环境同位素、水化学定性分析的结论一致。

关键词 环境同位素; 水化学; 模糊聚类; 堤防渗漏

中图分类号: TV223.4 文献标识码: A 文章编号: 1006-7647(2005)02-0008-03

Application of environmental isotope and fuzzy clustering method to study of seepage from dykes//FAN Zhe-chao¹, CHEN Jian-sheng¹, DONG Hai-zhou², CHEN Liang¹(1. Geotechnical Research Institute of Hohai Univ., Nanjing 210098, China; 2. Research Institute of Science and Technology, Hohai Univ., Nanjing 210098, China)

Abstract: The groundwater seepage from several typical sections of a dyke was analyzed by use of the environmental isotope method, and the seepage sources were ascertained. The result shows that the groundwater from the borehole No. 1 at Jiangdu dockyard, the borehole No. 23 at Xiaocaitan section and the borehole No. 29 at Lianmengzhuang dock comes from rivers, that the water of Heiyutang around the borehole No. 5 is recharged by the local and late precipitation, and that the groundwater from the borehole No. 7 at Wanshougong section comes from the mixture of river water and local precipitation. The fuzzy clustering analysis was performed by use of the fuzzy clustering method, in which the environmental isotope and values of hydrochemistry were taken as index characteristic values and endowed with different weights. The analysis result accords with that of the environmental isotope and hydrochemistry method.

Key words: environmental isotope; hydrochemistry; fuzzy clustering; seepage from dykes

利用环境同位素探测堤坝渗漏是近几十年发展起来的一种新的探测手段。河水、地下水都来自大气降水, 由于受大气降水的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, 不同来源的水体呈不同的同位素特征, 因此可以根据水体的同位素特征判断其来源^[1,2]。同时, 在地下水径流过程中, 地下水的水化学成分也可以作为判断其来源的辅助手段^[3]。

人们在进行稳定同位素和水化学分析时, 常常采用的是定性分析方法, 这种方法存在片面性, 往往容易产生因人而异的结果。为将稳定同位素和水化学的分析定量化或半定量化, 本文拟结合某堤防几个典型段的工程实例进行模糊聚类尝试。

1 模糊聚类模型

1.1 模糊聚类理论

设有 n 个待分类的样本, 每个样本有 m 个指标

特征, 则 n 个样本的指标特征矩阵为 $X = [x_{ij}]_{n \times m}$, 按式(1)转化为指标特征规格化矩阵 $R = [r_{ij}]_{n \times m}$:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - \bigwedge_i x_{ij}}{\bigvee_i x_{ij} - \bigwedge_i x_{ij}} \quad (1)$$

式中: \bigwedge_i 和 \bigvee_i 分别为连续取小、取大运算。

将 n 个样本分为 c 类, 分类矩阵为 $U = [u_{ki}]_{c \times n}$, u_{ki} 表示第 i 个样本归属于第 k 类的隶属度, 类别 k 的 m 个指标特征值为该类的聚类中心, 则 c 个类别的指标特征值可以用聚类中心矩阵 V 表示:

$$V = [v_{kj}]_{c \times m}$$

在模糊聚类中考虑不同指标对聚类的作用不同, 设指标权向量 $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m)^T$, 使 $\sum_{h=1}^m \omega_h = 1$, 为了得到最佳划分矩阵 U 和对应的聚类中心矩阵 V , 从而确定最佳的分类结果, 按下列迭代方程进

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50179009)

作者简介: 樊哲超(1979—), 男, 湖北荆州人, 博士研究生, 从事地下水渗流研究。

行运算^[4]：

$$v_{kj}^{(l-1)} = \frac{\sum_{i=1}^n (u_{ki}^{(l-1)})^2 r_{ij}}{\sum_{i=1}^n (u_{ki}^{(l-1)})^2} \quad (2)$$

$$u_{ki}^{(l)} = \frac{1}{\sum_{h=1}^c \frac{\sum_{j=1}^m [\omega_j (r_{ij} - v_{kj}^{(l-1)})]^2}{\sum_{j=1}^m [\omega_j (r_{ij} - v_{kj}^{(l-1)})]^2}} \quad (3)$$

当满足迭代判断条件 $\max |u_{ki}^{(l)} - u_{ki}^{(l-1)}| \leq \epsilon$ 时,迭代结束 (ϵ 为给定的允许计算精度, l 为迭代次数)。

1.2 层次分析法确定权重向量

首先确定各指标特征值两两比较的判断矩阵 $A = [a_{ij}]_{m \times m}$, 其中 a_{ij} 的值可按 Saaty1980 年提出的标度法^[5]确定, 再用数值代数法求出矩阵 A 的最大特征值 λ_{\max} 及其对应的单位特征向量 $W = (w_1, w_2, \dots, w_m)$, 最后对判断矩阵进行一致性检验, 使用如下公式：

$$CR = CI/RI \quad (4)$$

式中： CR 为判断矩阵的随机一致性比率； CI 为判断矩阵的平均随机一致性指标， $CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1)$ ； RI 为判断矩阵的平均随机一致性指标，对于 4 阶的判断矩阵， RI 值为 0.9^[5]。

当 $CR < 0.1$ 时，认为判断矩阵具有满意的一致性，此时最大特征值对应的单位特征向量即是权向量，否则需重新调整判断矩阵。

2 工程实例

南水北调京杭大运河堤防自从修建以来，存在着堤防渗漏，尤其是送水期间某堤防在 25 km 内存在明显渗漏的点达到 35 处，渗漏水量较大，虽然对部分严重的渗漏段进行了疏导处理，但由于情况特殊（运河河底高程一般为 2 m，最高水位可达 8.3 m，而堤内地面高程平均为 4 m 左右），并且运河河堤附近存在许多建筑物、湖泊、河流、水塘等，地质条件差的堤段在高水位条件下渗漏点增多，渗漏量增大。为调查堤坝本身是否存在较强的渗漏，笔者在渗漏较

严重的 6 个地段进行了探测研究，每段钻设观测孔 2~11 个，孔深在 15~20 m 之间，对每一段分别取水样进行环境同位素 D、¹⁸O 及氚 (T) 分析，部分分析结果见表 1。据此可以准确了解渗漏水的来源、地下水的年龄，从而确定地层中是否存在集中渗漏的隐患，并辅助于水化学分析加以印证。在这里选取了典型的几段进行分析。

2.1 环境同位素和水化学分析

2.1.1 江都船厂段

T1 号孔位于江都船厂段，该段有一个冒水点，出水量不大，化验水样取自这里，在水样的同位素成分中，氚含量为 24.00 TU，与本地降水的氚含量相差较远（本地降水氚含量约为 9.5 TU），因而不是来自于大气降水入渗后的补给，并且 $\delta D = -5.398\%$ 和 $\delta^{18}O = -0.911\%$ ，与河水极为接近，说明这个位置冒出的水来自河水；冒水中的总溶解固体为 716.9 mg/L，明显高于河水的值，阳离子 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的含量也明显高于河水，且 NO_3^- 的含量相当低，说明水中氧的含量低，水流运动缓慢。这是因为硝酸根离子主要来源于地下水中含氮的化合物如 NH_4^+ 、 NO_2^- 、 NO_3^- 等， NH_4^+ 在氧较充足的条件下发生硝化作用，最后才形成 NO_3^- 。

2.1.2 黑鱼塘段

T5 号孔位于该段，堤坝脚下有一水塘，据当地村民反映，他们曾试图抽干塘水，但始终没有达到目的，因而怀疑水塘这一位置的堤坝渗漏较为严重。为了验证这个塘中的水是否直接由河水补给，笔者在水塘中取水样进行环境同位素分析，发现 $\delta D = -3.283\%$ ， $\delta^{18}O = -0.313\%$ ，远高于河水的含量，这种情况只有长期蒸发才能出现。塘水中氚含量是所有水样中最低的，只有 8.46 TU，与降水接近；从水化学成分来看，水中的总溶解固体为 385.7 mg/L，比河水高，因此，水中其他离子也有所增加，但地层中的 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 含量却比河水中的低，这主要是由于硫酸盐还原菌的作用，这些细菌在缺氧条件下和有机物存在时， SO_4^{2-} 被还原，水中氧的含量低说明水流运动十分缓慢，且主要为上部水流的渗入，这更证明了河水补给的塘水是极其微小的。同时，在堤坝上钻设了 3

表 1 水样的环境同位素和水化学分析结果

样本号	位置	离子质量浓度 (mg·L ⁻¹)							总溶解固体 / (mg·L ⁻¹)	$\delta D / \%$	$\delta^{18}O / \%$	氚含量 / TU	
		K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻					NO ₃ ⁻
1	T1 号孔附近出水点	10.81	28.67	107.35	23.67	431.19	21.26	56.14	1.66	716.9	-5.398	-0.911	24.00
2	T5 号孔附近塘水	11.66	25.43	47.82	17.16	206.74	33.82	28.07	5.87	385.7	-3.283	-0.313	8.46
3	T7 号孔 (16 m)	1.67	11.55	44.89	10.06	157.71	14.24	25.73	6.05	285.3	-6.141	-0.988	16.51
4	T23 号孔 (15 m)	1.64	27.62	97.59	34.33	348.50	28.48	107.60	4.72	664.8	-5.288	-0.813	11.67
5	T29 号孔 (14 m)	1.07	71.80	141.51	39.06	770.83	28.48	21.05	0.55	1095.0	-5.608	-0.824	10.61
6	河道某取样点	2.37	11.79	40.01	10.06	129.95	16.02	42.10	7.61	269.3	-5.411	-0.866	22.32

个孔(孔号为 T3, T4 和 T5)进行水平渗透流速测试,流速分别为 1.66×10^{-3} m/d, 2.58×10^{-3} m/d 和 0.69×10^{-3} m/d,流速在所有孔中是较小的。

综合以上分析,可以得出结论:黑鱼塘水主要补给源为当地降雨或是近期降雨形成的地下水,而不是河水。

2.1.3 万寿宫江港作业区段

在这一位置共钻设了 6 个孔,孔号从 T6 到 T11 水样取自 T7 号孔 16 m 深处。水样同位素成分中氡含量为 16.51 TU,高于当地大气降水中的氡含量。水中的总溶解固体为 285.3 mg/L,略高于河水值。阳离子的含量也十分接近于河水,说明孔中的水主要来自于河水的补给。虽然水中 NO_3^- 中的含量也较低,但没有黑鱼塘段明显,因此,在该孔 16 m 深处的渗漏比黑鱼塘段要强得多,是一个集中渗漏部位。另外, δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的值分别为 -6.441% 和 -0.988% ,低于河水相应的值,水中 Cl^- 的含量低于河水,这两点又说明孔中的水又有降水的成分,这主要是由于在取样前刚下过雨,大气降水补给孔中地下水,孔中水为河水与降水的混合。根据简单混合原则($N = N_1(1 - X) + N_2X$, $X = (N - N_1)/(N_2 - N_1)$),即可大致估算出河水、降水各占的比例。利用氡含量计算混合比: $N = 16.51$, $N_1 = 9.5$, $N_2 = 22.32$, $X = 55\%$,即孔中河水所占比例大致为 55%,降雨大致为 45%。由于存在降雨的稀释作用,故 T7 号孔中水样的 SO_4^{2-} 浓度和总溶解固体在所有的钻孔中是最低的。

2.1.4 小菜谭段

小菜谭段共钻设了 6 个孔,孔号从 T18 到 T23 水样取自 T23 号孔 15 m 深处。T23 号孔 15 m 深处的总溶解固体为 664.8 mg/L,与河水比较也有一定幅度的提高。离子成分中 SO_4^{2-} 含量是所有水样中最高的,说明地层中存在含该离子的相应矿物,且有足够的时间进行溶解,从而使水中 SO_4^{2-} 的含量大大提高,这也说明径流强度并不大,并有一定的循环深度。同位素成分中,氡含量为 11.67 TU,高于当地大气降水的氡含量,是河水水源; δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 含量也十分接近河水的值,说明河水是该孔地下水的补给水源。

2.1.5 联盟庄码头段

联盟庄码头段共钻孔 6 个,从南往北,孔号依次为 T24 至 T29,平均孔深 15 m 左右,水样取自于 T29 号孔 14 m 深处。T29 号孔总溶解固体达 1095.0 mg/L,是所有钻孔中最大的,且 NO_3^- 含量最小,仅为 0.55 mg/L,所以该孔地下水肯定存在深部缓慢径流。T29 号孔中 14 m 处取样分析的环境同位素 D, ^{18}O 和氡显示该水来自河水,渗漏的时间较长,

因为氡含量为 10.61 TU,低于河水的 22.32 TU,这一点与总溶解固体大致对应。

2.2 模糊聚类分析

根据专家意见,在判断地下水的补给来源时,环境同位素 D 和 ^{18}O 是判断的主要依据,其相应的权重应取大。由于在地下水径流过程中会发生水岩作用,从而引起水化学成分复杂变化,因此选择具有很强的迁移性能、不被胶体吸附,也不能被生物积累的 Cl^- 和反映径流方向、在径流方向上逐渐增大的 TDS 作为模糊聚类的指标特征。指标特征向量取 Cl^- , TDS, δD , $\delta^{18}\text{O}$, 指标特征值两两比较的判断矩阵 $A = [a_{ij}]_{4 \times 4}$ 取值如表 2 所示。

表 2 指标特征值的判断矩阵 A

标度 a_{ij}	Cl^-	TDS	δD	$\delta^{18}\text{O}$
Cl^-	1	0.5	0.2	0.2
TDS	2	1	0.25	0.25
δD	5	4	1	1
$\delta^{18}\text{O}$	5	4	1	1

求权向量公式如下:

$$AW = \lambda_{\max} W \quad (5)$$

式中: W 为矩阵 A 的单位特征向量; λ_{\max} 为矩阵 A 的最大特征值。由式(5)求得 $\lambda_{\max} = 4.03$, $W = (0.073, 0.116, 0.405, 0.405)$,利用公式(4),算得判断矩阵 A 的随机一致性比率 $CR = 0.01 < 0.1$,表明判断矩阵 A 具有满意的一致性, W 即为指标特征向量对应的权向量。

对选取的 6 个样本的指标特征按公式(1)规格化,结果见表 3。

表 3 样本指标特征值规格化矩阵 R

样本号	Cl^-	TDS	δD	$\delta^{18}\text{O}$
1	0.36	0.54	0.26	0.11
2	1.00	0.14	1.00	1.00
3	0.00	0.02	0.00	0.00
4	0.73	0.48	0.30	0.26
5	0.73	1.00	0.19	0.24
6	0.09	0.00	0.26	0.18

这里取允许计算精度 $\epsilon = 0.001$,权重 $\omega_1 = 0.073$, $\omega_2 = 0.116$, $\omega_3 = 0.405$, $\omega_4 = 0.405$,给定模糊初始划分矩阵 U^0 :

$$U^0 = \begin{bmatrix} 0.8 & 0.1 & 0.1 & 0.2 & 0.8 & 0.8 \\ 0.1 & 0.8 & 0.1 & 0.8 & 0.1 & 0.1 \\ 0.1 & 0.1 & 0.8 & 0.0 & 0.1 & 0.1 \end{bmatrix}$$

利用笔者编制的 FORTRAN 程序,迭代 13 次后满足迭代判断条件,得到最后的划分矩阵为

$$U = \begin{bmatrix} 0.90 & 0.00 & 0.01 & 0.95 & 0.86 & 0.72 \\ 0.01 & 1.00 & 0.00 & 0.01 & 0.02 & 0.02 \\ 0.09 & 0.00 & 0.99 & 0.04 & 0.12 & 0.26 \end{bmatrix}$$

(下转第 57 页)

[8] 钟万勰, 姚伟岸. 板弯曲求解新体系及其应用[J]. 力学学报, 1999, 31(2): 173—184.

[9] 钟万勰. 弹性力学求解新体系[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 1995.

[10] 姚伟岸, 钟万勰. 辛弹性力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.

[11] 周建方, 卓家寿. 弹性力学混合方程和 Hamilton 正则方程的几种推导方法[J]. 河海大学学报(自然科学版), 1997, 25(6): 119—121.

[12] 唐立民, 诸致中, 邹贵平. 混合状态 Hamiltonian 元的半解析解和叠层板的计算[J]. 计算结构力学及其应用, 1992, 9(4): 345—360.

[13] 周建方, 卓家寿. Hamilton 体系下的变分原理和半解析有限元解[J]. 工程力学, 1998, 15(1): 30—38.

[14] 周建方, 卓家寿, 李典庆. 基于 Hamilton 方法的有限元[J]. 河海大学常州分校学报, 2000, 14(3): 1—6.

[15] 钟万勰. 互等定理与共轭辛正交关系[J]. 力学学报, 1992, 24(4): 432—437.

[16] 张鸿庆. Hamilton 体系与辛正交系的完备性[J]. 应用数学和力学, 1997, 18(3): 217—221.

[17] 钟万勰, 徐新生, 张洪武. Hamilton 体系与弹性力学 Saint-Venant 问题[J]. 应用数学和力学, 1996, 17(9): 787—789.

[18] 钟万勰, 姚伟岸. 多层合板圣维南问题的解析解[J]. 力学学报, 1997, 29(5): 617—626.

[19] 姚伟岸. 平面各向异性哈密顿体系及圣维南问题的解析解[J]. 大连理工大学学报, 1999, 39(5): 612—615.

[20] 钟万勰, 徐新生, 张洪武. 弹性曲梁问题的直接法[J]. 工

程力学, 1996, 13(4): 1—8.

[21] 姚伟岸. 极坐标哈密顿体系约当型与弹性楔的佯谬解[J]. 力学学报, 2001, 33(1): 79—86.

[22] 周建方, 卓家寿. 极坐标下弹性力学的一个新解答[J]. 力学学报, 2001, 33(6): 839—846.

[23] 张洪武, 李云鹏, 钟万勰. 双材料楔形结合点的奇性分析[J]. 大连理工大学学报, 1995, 35(6): 776—782.

[24] 王治国, 唐立民. 弹性力学中的哈密顿系统及其变分原理[J]. 应用数学和力学, 1995, 16(2): 117—122.

[25] 周建方, 卓家寿. Hamilton 体系下弹性力学的两个守恒律[J]. 固体力学学报, 1999, 20(1): 90—93.

[26] 周建方, 卓家寿. 弹性力学 Hamilton 方法广义解的适定性[J]. 力学学报, 2001, 33(4): 492—498.

[27] 周建方, 卓家寿, 李典庆. Hamilton 体系下弹性力学半解析法的一个守恒律[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2000, 28(5): 41—43.

[28] 邹贵平, 唐立民. 复合材料条形问题的混合状态 Hamiltonian 元的半解析解[J]. 力学与实践, 1993, 15(6): 29—34.

[29] 邹贵平, 唐立民. 圆柱坐标系中弹性力学的哈密顿正则方程及其哈密顿单元方法[J]. 计算结构力学及其应用, 1995, 12(1): 53—59.

[30] 胡超, 郑立平, 刘丽坤, 等. 求解平板轴对称振动问题的 Hamilton 方法[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2001, 6(3): 96—101.

[31] 裘春航, 吕和祥, 蔡志勤. 在哈密顿体系下分析非线性动力学问题[J]. 计算力学学报, 2000, 17(2): 127—169.

(收稿日期 2004-06-01 编辑 高建群)

(上接第 10 页)

根据最大隶属度原则, 分类结果: 样本 1、4、5、6 归为第一类, 样本 2 归于第二类, 样本 3 归于第三类. 分类结果与环境同位素、水化学分析结论一致, 样本 1、4、5 为河水补给来源, 样本 2 为当地降雨补给, 样本 3 为河水和当地降雨的混合.

3 结论

a. 本文应用环境同位素、水化学分析方法对 5 个典型堤段进行了地下水来源分析, 得出其不同补给来源的结论: 江都船厂段 T1 号孔、小菜潭段 T23 号孔、联盟庄码头 T29 号孔中的地下水为河水补给来源, T5 号孔附近的黑鱼塘水为当地降雨或近期降雨形成的地下水补给, 万寿宫段 T7 号孔中的地下水为河水和当地降雨的混合.

b. 以往人们应用环境同位素调查堤坝渗漏时, 只能定性地说明问题^[6]. 本文尝试利用模糊聚类模型, 同时考虑聚类判断时样本指标特征的不同权重, 将 6 个样本进行聚类定量分析, 聚类结果与环境同

位素、水化学分析结论一致.

c. 在堤坝渗漏加固工程中, 调查清楚堤内地下水(渗漏水)的来源, 对防渗加固无疑具有极强的指导意义.

参考文献:

[1] Payne B R, Eriksson E, Danilin A I, et al. Guidebook on nuclear techniques in hydrology[M]. VIENNA: International Atomic Energy Agency, 1983. 17—27.

[2] 李樟苏. 同位素技术在水利工程中的应用[M]. 北京: 水利电力出版社, 1988. 24—56.

[3] 李学礼. 水文地球化学[M]. 北京: 原子能出版社, 1988. 16—30.

[4] 陈守煜. 工程模糊集理论与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998. 81—93.

[5] 黄健元. 模糊集及其应用[M]. 银川: 宁夏人民教育出版社, 1999. 90—111, 248—251.

[6] 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(1): 57—61.

(收稿日期 2004-08-26 编辑 高建群)