

文章编号: 1000-7598-(2006) 07-1214-05

模糊聚类方法研究堤坝渗漏

樊哲超¹, 陈建生², 董海洲², 赵 霞¹

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

摘 要: 稳定同位素、水化学的方法是研究堤防渗漏是一种十分有效的方法, 以往人们大多只是定性的分析判断。结合北江大堤工程实例, 尝试应用模糊聚类方法, 选取 22 个水样稳定同位素和水化学值作为指标特征值, 并赋与不同的权重, 进行模糊聚类分析, 聚类结果表明, T12 孔和 T9 孔北 5 m 处涌水、江水和 T9 孔北排水沟出水在稳定同位素和水化学成分 Cl⁻ 及 TDS 上表现出了较大的相关性, 可能为同一补给来源, 为堤坝渗漏通道的判断提供了佐证。

关 键 词: 稳定同位素; 水化学; 模糊聚类

中图分类号: TV 543

文献标识码: A

Applying fuzzy clustering method to study leakage of dyke

FAN Zhe-chao¹, CHEN Jian-sheng², DONG Hai-zhou², ZHAO Xia¹

(1. Geotechnical Research Institute of Hohai University, Nanjing 210098, China

2. Research Institute of Science and Technology, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Applying the methods of stable isotopes and hydrochemistry to study the leakage of dyke is an effective way. But men only qualitatively analysed and judged the problem. The authors attempted to perform the analysis of fuzzy clustering by applying fuzzy clustering method that stable isotopes and hydrochemistry values of 22 water samples were taken as index characteristic values and endued different weightings, combining the case of Beijiang Dyke. The clustering result shows that there is great interrelation about stable isotopes, Cl⁻ and TDS among the water samples of T12 borehole, water gushing at 5m north to T9 borehole, river water and out-waters of drainage gallery north to T9 borehole. It is a proof to judge the leakage passage that the water samples may has the same replenishment source.

Key words: stable isotope; hydrochemistry; fuzzy clustering

1 引 言

利用稳定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、陆地效应和季节效应等的影响, 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^[1~3]。一般在小范围的研究区域内具有大致相同的稳定同位素和水化学值的水样可能是同一补给来源, 另一方面地下水化学成分从一个侧面反映了地下水的径流条件, 径流缓慢则水中将有较高的离子浓度, 反之则离子浓度低。而地下水化学成分与所处的区域岩性、水文地质构造的开启程度等有关^[4]。

在进行稳定同位素和水化学分析时, 人们常常采用定性分析方法。为了将稳定同位素和水化学的分析定量化或半定量化, 本文结合北江大堤石角段的工程实例进行模糊聚类尝试。

2 模糊聚类模型

2.1 模糊聚类理论^[5,6]

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 $\mathbf{X}=[x_{ij}]_{n \times m}$, 按下式转化为指标特征规格化矩阵 $\mathbf{R}=[r_{ij}]_{n \times m}$ 。

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - \wedge_i x_{ij}}{\vee_i x_{ij} - \wedge_i x_{ij}} \quad (1)$$

式中 $\wedge_i$, $\vee_i$ 分别为连续取小、取大运算。

收稿日期: 2004-11-01

修改稿收到日期: 2005-02-21

基金项目: 国家自然科学基金资助重大项目(No.2002505947)。

作者简介: 樊哲超, 男, 1979 年生, 博士研究生, 主要从事地下水渗漏探测方法方面的研究。E-mail: fanzhechao@163.com

将 n 个样本分为 c 类, 分类矩阵 $U = [u_{ki}]_{c \times n}$, 其中 u_{ki} 为第 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聚类中心矩阵 V 表示:

$$V = [v_{kj}]_{c \times m} \quad (2)$$

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 $\sum_{h=1}^m \omega_h = 1$, 建立目标函数^[5]:

$$\bar{J} = \sum_{k=1}^c \sum_{i=1}^n u_{ki}^2 \sum_{j=1}^m [\omega_j (r_{ij} - v_{kj})]^2 \quad (3)$$

为了得到最佳分划矩阵 U 和对应的聚类中心矩阵 V , 从而确定最佳的分类结果, 就必须使 $\bar{J}$ 达到最小, 确定迭代方程如下:

$$v_{kj}^{(l-1)} = \frac{\sum_{i=1}^n (u_{ki}^{(l-1)})^2 r_{ij}}{\sum_{i=1}^n (u_{ki}^{(l-1)})^2} \quad (4)$$

$$u_{ki}^{(l)} = \frac{1}{\sum_{j=1}^m [\omega_j (r_{ij} - v_{kj}^{(l-1)})]^2 + \sum_{h=1}^m [\omega_h (r_{ih} - v_{kh}^{(l-1)})]^2} \quad (5)$$

循环迭代, 当满足判断条件 $\max |u_{ki}^{(l)} - u_{ki}^{(l-1)}| \leq \varepsilon$ 时迭代结束, 其中, ε 为给定的允许计算精度; l 为迭代次数。

2.2 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 T.L.Saaty (1980 年) 提出的标度法 (表 1) 确定, 然后再用数值代数法求出矩阵 A 的最大特征值 $\lambda_{\max}$ 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, 使用公式:

$$CR = CI / RI \quad (6)$$

式中 CR 为判断矩阵的随机一致性比率; CI 为判断矩阵的一般一致性指标, $CI = \frac{(\lambda_{\max} - n)}{(n-1)}$; RI 为判断矩阵的平均随机一致性指标, 对于 1~12 阶的判断矩阵, RI 的值列见表 2^[6]。

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。

表 1 判断矩阵标度及其含义

标度 a_{ij}	含义
1	表示 a_i 与 a_j 比较, 具有同等重要性
3	表示 a_i 与 a_j 比较, a_i 比 a_j 稍微重要
5	表示 a_i 与 a_j 比较, a_i 比 a_j 明显重要
7	表示 a_i 与 a_j 比较, a_i 比 a_j 强烈重要
9	表示 a_i 与 a_j 比较, a_i 比 a_j 极端重要
2, 4, 6, 8	上述相邻判断的中值
1~9 的倒数	因数 i 与 j 比较得 a_{ij} , 则因数 j 与 i 比较的标度 $a_{ji} = 1/a_{ij}$

表 2 RI 的取值

阶数	RI	阶数	RI
1	0.00	7	1.32
2	0.00	8	1.41
3	0.58	9	1.45
4	0.90	10	1.49
5	1.12	11	1.51
6	1.24	12	1.54

2.3 模糊聚类计算步骤

首先确定权重向量 $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m)^T$, 给定允许计算精度 ε 和初始的模糊划分矩阵 U^0 , 利用式 (4) 进行迭代, 满足迭代判断条件时迭代结束, 从而得到最佳分划矩阵 U , 实现对样本的分类。笔者根据以上思路编制了 fortran 程序。

3 工程实例

3.1 工程概况

北江大堤石角段位于广东省清远市石角镇, 石角堤段地基为覆盖于第三系红层之上的第四系冲积层, 上部为薄层壤土, 下层为透水的砂和卵、砾石层, 深达 30 余米。由于历史上各堤段溃决时剧烈冲刷, 堤坡脚存在大量渊塘, 致使堤基渗漏严重, 是北江大堤最严重的险段。

为了确保北江大堤的安全运行, 曾对石角段 5 km 范围的大堤地基进行了全截式高压喷浆防渗处理。但在 1994 年 6 月的 50 年一遇和 1997 年 7 月的 20 年一遇洪水期间, 距堤脚一百多米的地方发生严重喷水冒砂现象, 后又进行大面积的压渗处理, 并在原管涌口附近增设减压井 (图 1)。为查明喷水冒砂原因, 在堤内堤顶设置了 25 个示踪试验孔。

大量的现场试验证实了石角段的管涌来自基岩渗漏通道, 这些试验包括试验区的地质详查、示踪试验孔、江水、塘水等的稳定同位素和主要的水化学成分分析、温度场和电导值分布、连通试验、水位水量分析等, 其中稳定同位素 D、 ^{18}O 是判断的主要依据^[7, 8]。

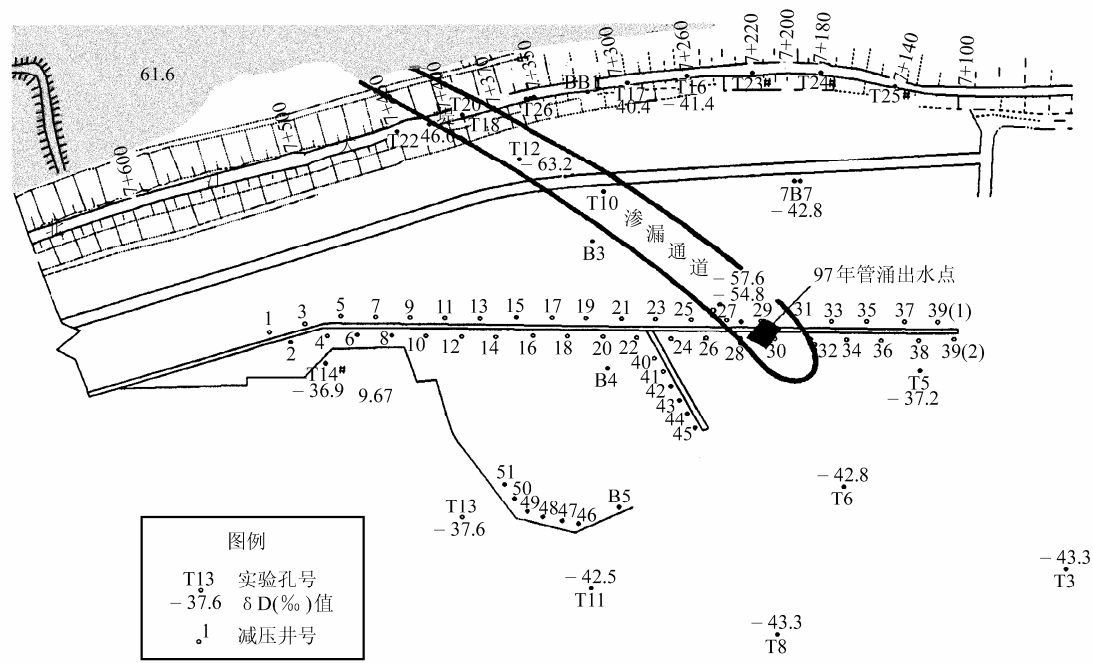


图 1 石角段稳定同位素 δD (‰) 值证实存在一条深层基岩断裂渗漏通道
Fig.1 A deep rock leakage passage verified by the analysis of δD (‰) at Shijiao section

3.2 模糊聚类的再认识

在判断地下水的补给来源时，稳定同位素的 δD 、 $\delta^{18}O$ 值是判断的主要依据，其相应的权重应取大。由于在地下水的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。北江大堤石角段 22 个水样中的稳定同位素和 Cl^- 、TDS 分析结果见表 3。指标特征向量取 (Cl^- 、TDS、 δD 、 $\delta^{18}O$)，指标特征值两两比较的判断矩阵 $A_1 = [a_{ij}]_{4 \times 4}$ 取值见表 4。

$$A_1 W = \lambda_{\max} W \tag{7}$$

式中 W 为矩阵 A_1 的单位特征向量； $\lambda_{\max}$ 为矩阵 A_1 的最大特征值，由式 (7) 求得， $\lambda_{\max} = 4.03$ ， $W = (0.073, 0.116, 0.405, 0.405)$ 。利用式 (6)，算得判断矩阵 A_1 的随机一致性比率 $CR = 0.01 < 0.1$ ，表明 A_1 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 22 个样本的指标特征按式 (1) 规格化，结果见表 5。这里取允许计算精度 $\varepsilon = 0.001$ ，权重 $\omega_1 = 0.073, \omega_2 = 0.116, \omega_3 = 0.405, \omega_4 = 0.405$ ，将样本分为两类，给定模糊初始划分矩阵 U^0 。

表 3 石角段水样中 D 、 ^{18}O 、 Cl^- 及 TDS 分析结果
Table 3 Analysis result of D 、 ^{18}O 、 Cl^- and TDS in water samples at Shijiao section

样本 编号	位置	取样 深度 /m	取样时间 /年-月-日	Cl^- /mg·l ⁻¹	TDS /mg·l ⁻¹	δD /‰	$\delta^{18}O$ /‰
1	T1	35	2001-7-14	14.2	227.7	-43.3	-6.33
2	T2	35	2001-7-14	17	239.6	-43.8	-6.62
3	T3	35	2001-7-14	11.3	253.9	-39.6	-6.3
4	T4	35	2001-7-14	11.3	202.38	-37	-5.84
5	T5	35	2001-7-14	10.6	158.29	-37.2	-6.49
6	T6	35	2001-7-14	4.95	95.13	-42.8	-6.22
7	B7	48	2001-7-12	7.08	206.78	-42.8	-6.47
8	T8	35	2001-7-14	3.54	204.94	-43.3	-6.03
9	T11	40	2001-7-13	4.6	244.5	-42.5	-6.76
10	T12	37	2001-7-13	4.6	105.91	-63.2	-9.39
11	T14	38	2001-7-13	2.12	95.65	-36.9	-6.06
12	T16	75	2001-7-13	4.95	172.65	-41.4	-6.39
13	T21	55	2001-7-12	5.66	172.86	-46	-6.62
14	T26	50	2001-7-11	7.08	131.48	-43.3	-6.64
15	BB1	51	2001-7-13	9.25	196.85	-41.2	-6.21
16	T9孔北5 m 处涌水	0	2001-7-11	1.77	198.33	-57.6	-8.11
17	江水	0	2001-7-11	2.83	89.78	-61.6	-8.95
18	T9孔北排水 沟出水	0	2001-7-11	1.77	202.47	-54.8	-8.42
19	T17	50	2001-7-15	3.54	204.02	-40.4	-6.13
20	T13	35	2001-7-14	4.25	215.27	-37.6	-5.85
21	T15	35	2001-7-15	7.43	140.69	-32.5	-5.84
22	附近塘水	0	2001-7-15	1.06	88.75	-36	-6.27

表 4 指标特征值的判断矩阵 A_1
Table 4 Judgement matrix A_1 of index characteristic values

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

表 5 样本指标特征值规格化矩阵 R
Table 5 Format matrix R of samples' index characteristic values

样本 编号	Cl ⁻	TDS	δD	$\delta^{18}O$	样本 编号	Cl ⁻	TDS	δD	$\delta^{18}O$
1	0.82	0.84	0.65	0.86	12	0.24	0.51	0.71	0.85
2	1.00	0.91	0.63	0.78	13	0.29	0.51	0.56	0.78
3	0.64	1.00	0.77	0.87	14	0.38	0.26	0.65	0.77
4	0.64	0.69	0.85	1.00	15	0.51	0.65	0.72	0.90
5	0.60	0.42	0.85	0.82	16	0.04	0.66	0.18	0.36
6	0.24	0.04	0.66	0.89	17	0.11	0.01	0.05	0.12
7	0.38	0.71	0.66	0.82	18	0.04	0.69	0.27	0.27
8	0.16	0.70	0.65	0.95	19	0.16	0.70	0.74	0.92
9	0.22	0.94	0.67	0.74	20	0.20	0.77	0.83	1.00
10	0.22	0.10	0.00	0.00	21	0.40	0.31	1.00	1.00
11	0.07	0.04	0.86	0.94	22	0.00	0.00	0.89	0.88

根据最大隶属度原则分类结果: 样本 10, 16, 17, 18 归为第一类, 其余样本归于第二类, 即 T12、T9 孔北 5 m 处涌水、江水和 T9 孔北排水沟出水在稳定同位素和水化学成分 Cl⁻ 及 TDS 上表现出了较大的相关性, 这一点与文[7]中的结论是一致的, 文[7]中指出 T12、T9 孔北 5 m 处涌水和 T9 孔北排水沟出水是由江水通过基岩渗漏通道补给的, 而其他水样均为局部降水。

3.3 判断矩阵 A 的选取讨论

由于表 4 中的判断矩阵 A_1 的选取具有一定的人为性, 其必须具有满意的一致性, 根据专家意见, 在实际判断中, 稳定同位素的权重比水化学值大, 在地下水径流过程中, 地下水中的 ^{18}O 相对 D 来说易于同围岩发生同位素交换, 所以 δD 的权重大于等于 $\delta^{18}O$ 的权重, 另外, 由于 Cl⁻ 的易污染性, 判断矩阵的 TDS 的权重大于等于 Cl⁻ 的权重。笔者分别选取了如下的 3 组判断矩阵, 见表 6, 并且都具有满意的一致性, 可以分别算出各组相应的权向量, 取允许计算精度 $\varepsilon = 0.001$, 将样本分为两类, 给定与前面相同的模糊初始划分矩阵 U^0 , 迭代计算后, 分别得到相应的最后的划分矩阵 U_2 、 U_3 、 U_4 , 最后的分类结果是一致的: 样本 10, 16~18 归为第一类, 其余样本归于第二类。

$$U^0 = \begin{bmatrix} 0.8 & 0.2 & 0.9 & 0.2 & 0.8 & 0.6 & 0.7 & 0.8 & 0.8 & 0.8 & 0.8 & 0.8 & 0.8 & 0.8 & 0.8 & 0.8 & 0.8 & 0.8 & 0.8 & 0.8 \\ 0.2 & 0.8 & 0.1 & 0.8 & 0.2 & 0.4 & 0.3 & 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0.2 \end{bmatrix}, \text{利用笔者}$$

编制的 fortran 程序, 迭代 7 次后满足迭代判断条件, 得到最后的划分矩阵 U_1 为

$$U_1 = \begin{bmatrix} 0.03 & 0.06 & 0.02 & 0.03 & 0.02 & 0.04 & 0.02 & 0.02 & 0.05 & 0.96 & 0.04 & 0.003 & 0.07 & 0.04 & 0.003 & 0.94 & 0.98 & 0.94 & 0.01 & 0.02 & 0.06 & 0.05 \\ 0.97 & 0.94 & 0.98 & 0.97 & 0.98 & 0.96 & 0.98 & 0.98 & 0.95 & 0.04 & 0.96 & 0.997 & 0.93 & 0.96 & 0.997 & 0.06 & 0.02 & 0.06 & 0.99 & 0.98 & 0.94 & 0.95 \end{bmatrix}$$

$$U_2 = \begin{bmatrix} 0.03 & 0.07 & 0.01 & 0.02 & 0.02 & 0.03 & 0.02 & 0.02 & 0.04 & 0.96 & 0.03 & 0.01 & 0.10 & 0.04 & 0.00 & 0.96 & 0.98 & 0.93 & 0.01 & 0.02 & 0.07 & 0.04 \\ 0.97 & 0.93 & 0.99 & 0.98 & 0.98 & 0.97 & 0.98 & 0.98 & 0.96 & 0.04 & 0.97 & 0.99 & 0.90 & 0.96 & 1.00 & 0.04 & 0.02 & 0.07 & 0.99 & 0.98 & 0.93 & 0.96 \end{bmatrix};$$

$$U_3 = \begin{bmatrix} 0.04 & 0.08 & 0.03 & 0.03 & 0.02 & 0.05 & 0.02 & 0.02 & 0.07 & 0.96 & 0.05 & 0.01 & 0.07 & 0.05 & 0.00 & 0.93 & 0.98 & 0.93 & 0.01 & 0.03 & 0.06 & 0.06 \\ 0.96 & 0.92 & 0.97 & 0.97 & 0.98 & 0.95 & 0.98 & 0.98 & 0.93 & 0.04 & 0.95 & 0.99 & 0.93 & 0.95 & 1.00 & 0.07 & 0.02 & 0.07 & 0.99 & 0.97 & 0.94 & 0.94 \end{bmatrix};$$

$$U_4 = \begin{bmatrix} 0.02 & 0.05 & 0.01 & 0.02 & 0.02 & 0.02 & 0.02 & 0.02 & 0.03 & 0.96 & 0.02 & 0.00 & 0.10 & 0.03 & 0.00 & 0.96 & 0.99 & 0.94 & 0.00 & 0.02 & 0.07 & 0.03 \\ 0.98 & 0.95 & 0.99 & 0.98 & 0.98 & 0.98 & 0.98 & 0.98 & 0.97 & 0.04 & 0.98 & 1.00 & 0.90 & 0.97 & 1.00 & 0.04 & 0.01 & 0.06 & 1.00 & 0.98 & 0.93 & 0.97 \end{bmatrix}。$$

表 6 指标特征值的判断矩阵 A_2 、 A_3 、 A_4 Table 6 Judgement matrix A_2 , A_3 , A_4 of index characteristic values

矩阵	标度 a_{ij}	CI	TDS	δD	$\delta^{18}O$
A_2	CI	1	1	0.2	0.25
	TDS	1	1	0.2	0.25
	δD	5	5	1	2
	$\delta^{18}O$	4	4	0.5	1
A_3	CI	1	0.5	0.25	0.25
	TDS	2	1	0.333	0.333
	δD	4	3	1	1
	$\delta^{18}O$	4	3	1	1
A_4	CI	1	1	0.111	0.125
	TDS	1	1	0.111	0.125
	δD	9	9	1	2
	$\delta^{18}O$	8	8	0.5	1

4 结 语

稳定同位素和水化学是分析地下水补给来源的重要手段,但是前人的分析判断大多是定性的,本文尝试用模糊聚类的方法将稳定同位素和水化学成分中的性质稳定的 CI 和 TDS 进行聚类分析,结果较为理想。但是,由于地下水在径流过程中会发生复杂的水岩作用,从而改变地下水的水化学成分的相对含量,甚至发生稳定同位素的正负漂移,如何考虑这些作用,将更多的水样中的离子进行聚类分析,还有待于进一步地研究。

参 考 文 献

- [1] Payne B R, Eriksson E, Danilin A I, et al. Guidebook on Nuclear Techniques in Hydrology 1983 Edition[M]. Vienna: International Atomic Energy Agency, 1983.
- [2] GAT R J, Gonfiantini R. Stable Isotope Hydrology Deuterium and Oxygen-18 in the Water Cycle[M]. Vienna: International Atomic Energy Agency, 1981. 45—50.
- [3] 李樟苏, 曹更新, 程和森, 等. 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.
- [4] 李学礼. 水文地球化学[M]. 北京: 原子能出版社, 1988. 16—30.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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 Jian-sheng, DONG Hai-zhou, CHEN Liang. Application of the environment isotope method to study on the leakage passage in foundation of Beijiang Dyke Shijiao section[J]. *Advances In Water Science*, 2003, 14(1): 57—61.
- [8] 刘建刚, 陈建生. 平面热源法在北江石角段堤基渗漏分析中的应用[J]. 水利水运工程学报, 2002, (3): 63—65.
LIU Jian-gang, CHEN Jian-sheng. Application of plane heat source method in leakage analysis for Shijiao reach of Beijiang dike[J]. *Hydro-Science And Engineering*, 2002, (3): 63—65.

三峡大坝全面建成在即已进入收尾

经过三峡建设者的艰苦奋战,目前三峡工程右岸大坝混凝土浇筑施工已进入收尾阶段,三峡大坝全面建成指日可待。全长 2 309 米、设计高程 185 米、混凝土总方量 1610 万立方米的三峡大坝从 1998 年底开始混凝土浇筑。多年来,三峡建设者攻克了一系列大体积混凝土浇筑中的技术难题,创造了一系列世界纪录,于 2002 年完成左岸大坝浇筑。随后,建设者从三峡工程左岸转战到右岸,于 2003 年 7 月开始浇筑右岸大坝。三峡工程拦河大坝为混凝土重力坝,坝顶高程 185 米,最大坝高 181 米,坝顶宽度 15 米,底部宽度为 124 米,从右岸非溢流坝段起点至左岸非溢流坝段终点,大坝轴线全长 2309 米。

(路桥资讯网)

