

矿山排泥库渗漏特性的地下水示踪试验研究

李源^{1,2}, 王滨², 张全秀³

(1. 河北省水资源可持续开发与利用实验室, 河北 石家庄 050031;

2. 石家庄经济学院 工程学院, 河北 石家庄 050031; 3. 河北建设勘察研究院, 河北 石家庄 050031)

摘要: 以广西省某排泥库为研究区, 对该排泥库进行地下水示踪试验, 绘制时间浓度曲线, 并利用一维水动力弥散模型对试验曲线进行了研究, 计算出接收点地下水的流速、弥散系数和弥散度, 探讨了示踪试验中出现多峰、双峰现象的机理。试验结果表明, 地下水示踪模型计算所得流速与视流速总体接近, 对示踪剂投放点和接收点的渗漏途径、地下水的流向、水力联系等情况的分析与实际情况吻合, 该方法可以为库外水源污染情况评价和施工提供技术参考。

关键词: 示踪试验; 水力联系; 示踪模型; 渗漏途径

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2012)02-0096-04

中图分类号: P642.5

Groundwater Tracer Experiments on Leakage Characteristics of a Tailings Pond

LI Yuan^{1,2}, WANG Bing², ZHANG Quan-xiu³

(1. Key Lab of Sustainable Utilization and Exploitation of Water Recourses of Heibei Province, Shijiazhuang, Hebei 050031, China; 2. Engineering College, Shijiazhuang University of Economics, Shijiazhuang, Hebei 050031, China; 3. Hebei Research Institute of Construction and Geotechnical Investigation, Shijiazhuang, Hebei 050031, China)

Abstract: A tailings pond in Guangxi Province was chosen as the study area. Groundwater tracer test was carried out to obtain the time—concentration curves. The velocity of groundwater flow, coefficient of dispersion, and dispersity were obtained by means of the groundwater dispersion model developed using the data from the test. The mechanism of multimodal and double-humped curves was also analyzed. The experimental results show that the calculated flow velocity was in general close to the apparent velocity. The leakage path with the giving and receiving locations of the tracer, the direction of groundwater flow, and hydraulic connection matched well with the observations. The method can provide technical references for future water pollution evaluation and construction of trailings ponds.

Keywords: tracer test; hydraulic connection; dispersion model; leakage path

排泥库是矿山工程中堆存尾矿泥的场所, 在岩溶区修建排泥库, 渗漏是经常遇到且必须解决的工程地质问题。一旦发生岩溶渗漏问题, 库内的废渣、废水就会污染地下水、湖泊及农田。因此, 查明排泥库渗漏特性对于矿山环境地质问题防治具有重要意义。地下水示踪现场试验是在地下水系统的某个工程部位选择投放点投放能随地下水运动的示踪剂, 并能在预期可能到达的部位进行接收检测, 根据检测结果, 综合分析和评价场区的水力联系、判断地下水流的通道、地下水流的主导方向等水文地质条件的探测方法。所以, 地下水现场示踪试验能够较好的解决矿山排泥库渗漏特性的研究问题, 且具有不改变地下水的运移方向、易检测、灵敏度高、成本相对较低等优点。本试验选用钼酸铵示踪剂对广西省百色地区某矿山排泥库

进行现场试验, 该示踪剂在工程中需投放量较少, 易于化验检测, 自然背景值较小, 对水质和环境无破坏作用, 非常适合大型复杂工程地下水示踪试验研究。

1 排泥库试验场地概况

该排泥库拟建场地位于广西省百色市境内, 四面环山, 地势总体西高东低, 属峰丛—洼地的地貌组合形态。库区由东到西由两个洼地组成, 汇水总面积约 1.25 km²。场地内的岩石主体为碳酸盐岩, 大部分裸露地表, 场内岩溶漏斗、落水洞、溶洞(等各类地表、地下岩溶形态发育, 库区内周边断裂构造多, 且节理裂隙发育, 水文地质条件复杂。

2 示踪试验

收稿日期: 2011-06-03

修回日期: 2011-08-12

资助项目: 石家庄经济学院基金项目“岩溶区废渣堆场的渗漏问题研究”(XN0911)

作者简介: 李源(1980—)男(汉族)河北省张家口市人, 硕士, 讲师, 研究方向为水文地质和工程地质。E-mail: liyuan8021@163.com。

2.1 选择、投放、取样分析

为了查明库区内、外的水力联系,确定地下水的流速、流向,评价尾矿库岩溶渗漏可能导致的污染情况等问题,该工程采用钼酸铵示踪剂进行示踪试验。首先,示踪剂投放时选择库区上游天然落水洞,考虑测区的地下水量、水力坡度、示踪距离、仪器的检测灵敏度及岩溶发育等情况,并结合其它排泥库的勘察资料,采用下式计算示踪剂投放量:

$$M = Kw/j \quad (1)$$

式中: M ——示踪剂的投放量; K ——岩溶率系数; w ——示踪区段的总水量(L/s); j ——检测方法的灵敏度。

经计算,并考虑到野外实际投放量略高于计算值,示踪剂投放量约为 225 kg,且瞬时注入水中。接收点的布置位置要求尽可能将示踪剂接收到,本试验以库区外围天然水点(编号 D_1 — D_{15})作接收点,各点布置覆盖到库区内所有水样范围(图 1)。

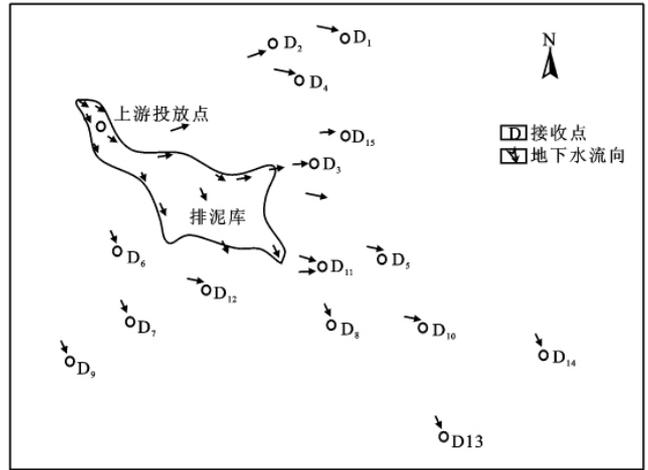


图 1 地下水示踪试验投放点和接收点平面位置示意图

2.2 试验样品的检测和资料整理

根据示踪试验对取样点的本底调查及样品的,确定样品出现的异常浓度为 $20 \mu\text{g/L}$,按时间顺序排序和浓度值的变化分析整理,绘出时间与浓度曲线图(图 2—5)。

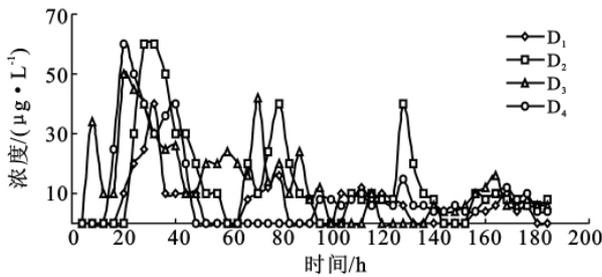


图 2 研究区接受点 D_1 — D_4 点浓度曲线

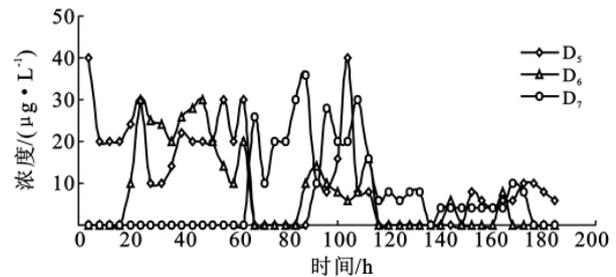


图 3 研究区接受点 D_5 — D_7 浓度曲线

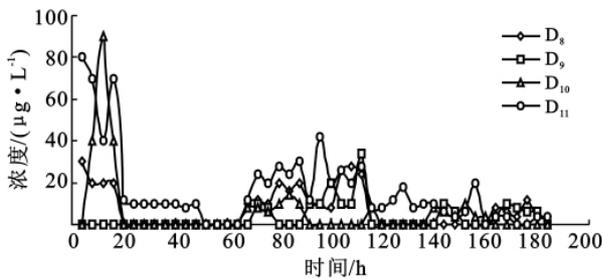


图 4 研究区接受点 D_8 — D_{11} 浓度曲线

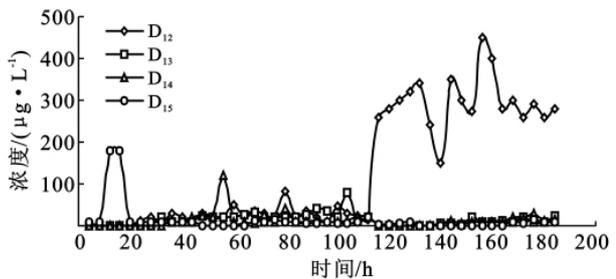


图 5 研究区接受点 D_{12} — D_{15} 浓度曲线

3 结果分析

在示踪试验中,示踪剂存在分子扩散和对流弥散,分子扩散是使地下水流域各部分浓度趋于均匀化的过程,对流弥散是由于地下水流速不均匀引起的。若假定该库区所投放示踪剂在岩溶地下水流域中扩散时,流体不可压缩,流域无源汇;介质相对均质,地下水流近似为一维稳定流二维弥散,且地下水平均流速为 U 。当在投放点瞬时注入质量为 m_M 的示踪剂

时,可用该水动力弥散方程进行分析:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_T \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_T \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - u \frac{\partial C}{\partial x} \quad (2)$$

式中: C ——示踪剂浓度; t ——时间; D_L ——纵向(x 轴)弥散系数; D_T ——横向弥散系数; u ——地下水流速。

3.1 地下水示踪模型的建构及解析解

在网状岩溶含水结构中,地下水呈分散流动,当流速较快时主要为紊流状态,在上述假定条件下,近似认为符合一维稳定流动二维弥散情况下的地下水

示踪问题。

因此,建立地下水示踪模型为^[1]:

$$\begin{cases} \frac{\partial C}{\partial t} = D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_T \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - u \frac{\partial C}{\partial x} \\ C(x, y, 0) = 0 \quad (x^2 + y^2 > 0) \\ C(\pm x, y, t) = C(x, \pm y, t) = 0 \quad (t > 0) \\ \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} C n L dx dy = m_M \quad (t > 0) \end{cases} \quad (3)$$

其解析解为:

$$C(x, y, t) = \frac{m_M/L}{4\pi n \sqrt{D_L D_T t}} \exp\left\{-\left[\frac{(x-ut)^2}{4D_L t} + \frac{y^2}{4D_T t}\right]\right\} \quad (4)$$

式中: $C(x, y, t)$ ——示踪剂浓度随时间、空间的变化函数; m_M ——投入的示踪剂质量; L ——含水层厚度; x ——距离投源点的纵向坐标; t ——示踪剂运移时间; D_L ——纵向弥散系数; u ——地下水流速;

n ——岩溶率。

3.2 浓度曲线双峰、多峰问题

在地下水示踪试验得到的时间—浓度曲线中,双峰、多峰问题经常可以看到,本试验中就存在此类情况,如图 3 中的 D_6 浓度曲线。造成示踪剂时间浓度曲线出现双峰、多峰现象的原因有多种,其中最主要的是示踪剂以多种途径到达接收点,且示踪剂在各通道中运移的时间不同^[2],另外试验期间地下水位变化、人工流场的参与也会产生多峰现象。

3.3 浓度曲线分析

已知接收点共 20 个,示踪曲线中接收点的浓度曲线一般有两个峰甚至多峰,根据示踪试验所得各接收点时浓曲线图,先按 $u = L/t$ 计算视速度,然后按照参考文献[3]的直线图解法编写 C 语言程序对地下水示踪模型的解析式(4)进行计算,求得各接收点的地下水流速和地层的弥散度(表 1)。

表 1 排泥库地下水示踪试验各接收点情况分析

编号	峰波	峰值浓度/ ($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	峰值 时间/h	距离/ m	视速度/ ($\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$)	铝 酸 铵																																																																																																																																																																																																																																																																																				
						辅助点浓度/ ($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	辅助点 时间/h	弥散系数/ ($\text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$)	平均流速/ ($\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$)	弥散度/ ($\alpha_L \cdot \text{m}^{-1}$)																																																																																																																																																																																																																																																																																
D ₁	峰 1	40	33	3 580	108.4	10	21	10 042	98.6	101.80																																																																																																																																																																																																																																																																																
						20	25				D ₂	峰 1	60	28	2 780	99.2	30	24	4 829	95.75	50.43	50	36	25	76	D ₃	峰 2	40	80	2 450	34.7	10	72	223	34.6	6.43	25	76	D ₄	峰 1	34	8	2 450	308.2	10	12	13 714	286.2	47.85	45	24	D ₅	峰 2	50	20	2 540	122.5	40	28	37 119	87.1	426.30	40	28	D ₆	峰 1	60	20	2 540	127.0	25	16	4 487	123.4	36.30	30	32	D ₇	峰 2	40	40	2 540	63.5	36	36	7 836	57	137.50	20	8	D ₈	峰 1	40	8	3 610	451.2	16	16	223 545	401.6	557.50	16	16	16	16	D ₉	峰 2	30	24	1 500	150.4	24	20	39 183	126.9	308.90	24	20	D ₁₀	峰 1	30	24	1 500	62.5	10	20	701	61.55	11.39	28	44	D ₁₁	峰 2	30	48	1 500	31.3	28	44	1 222	29.6	41.30	10	72	D ₁₂	峰 1	36	88	2 300	26.1	20	80	665	25.6	26.03	10	72	D ₁₃	峰 1	30	8	2 850	356.2	20	10	156 341	379	412.50	10	92	D ₁₄	峰 1	34	112	3 300	29.5	20	100	895	28.9	30.95	10	100	D ₁₅	峰 1	90	12	5 100	425.0	40	8	110 450	397.8	267.60	40	8	D ₁₆	峰 1	80	4	2 250	562.0	70	8	282 699	533.6	342.40	40	12	D ₁₇	峰 2	70	16	1 150	140.6	40	12	11 036	130.5	84.60	12	24	10	32	D ₁₈	峰 3	50	60	1 150	19.2	20	56	29	19.12	1.50	20	56	20	56	D ₁₉	峰 1	20	32	8 620	269.3	10	40	37 712	259.9	145.10	20	84	D ₂₀	峰 2	40	92	8 620	93.7	20	84	4 797	92.6	41.80	20	84	D ₂₁	峰 1	120	52	9 860	189.6	24	44	12 501	172.9	72.30	10	8	D ₂₂	峰 1	180	12
D ₂	峰 1	60	28	2 780	99.2	30	24	4 829	95.75	50.43																																																																																																																																																																																																																																																																																
						50	36																																																																																																																																																																																																																																																																																			
						25	76																																																																																																																																																																																																																																																																																			
D ₃	峰 2	40	80	2 450	34.7	10	72	223	34.6	6.43																																																																																																																																																																																																																																																																																
						25	76																																																																																																																																																																																																																																																																																			
D ₄	峰 1	34	8	2 450	308.2	10	12	13 714	286.2	47.85																																																																																																																																																																																																																																																																																
						45	24																																																																																																																																																																																																																																																																																			
D ₅	峰 2	50	20	2 540	122.5	40	28	37 119	87.1	426.30																																																																																																																																																																																																																																																																																
						40	28																																																																																																																																																																																																																																																																																			
D ₆	峰 1	60	20	2 540	127.0	25	16	4 487	123.4	36.30																																																																																																																																																																																																																																																																																
						30	32																																																																																																																																																																																																																																																																																			
D ₇	峰 2	40	40	2 540	63.5	36	36	7 836	57	137.50																																																																																																																																																																																																																																																																																
						20	8																																																																																																																																																																																																																																																																																			
D ₈	峰 1	40	8	3 610	451.2	16	16	223 545	401.6	557.50																																																																																																																																																																																																																																																																																
						16	16																																																																																																																																																																																																																																																																																			
						16	16																																																																																																																																																																																																																																																																																			
D ₉	峰 2	30	24	1 500	150.4	24	20	39 183	126.9	308.90																																																																																																																																																																																																																																																																																
						24	20																																																																																																																																																																																																																																																																																			
D ₁₀	峰 1	30	24	1 500	62.5	10	20	701	61.55	11.39																																																																																																																																																																																																																																																																																
						28	44																																																																																																																																																																																																																																																																																			
D ₁₁	峰 2	30	48	1 500	31.3	28	44	1 222	29.6	41.30																																																																																																																																																																																																																																																																																
						10	72																																																																																																																																																																																																																																																																																			
D ₁₂	峰 1	36	88	2 300	26.1	20	80	665	25.6	26.03																																																																																																																																																																																																																																																																																
						10	72																																																																																																																																																																																																																																																																																			
D ₁₃	峰 1	30	8	2 850	356.2	20	10	156 341	379	412.50																																																																																																																																																																																																																																																																																
						10	92																																																																																																																																																																																																																																																																																			
D ₁₄	峰 1	34	112	3 300	29.5	20	100	895	28.9	30.95																																																																																																																																																																																																																																																																																
						10	100																																																																																																																																																																																																																																																																																			
D ₁₅	峰 1	90	12	5 100	425.0	40	8	110 450	397.8	267.60																																																																																																																																																																																																																																																																																
						40	8																																																																																																																																																																																																																																																																																			
D ₁₆	峰 1	80	4	2 250	562.0	70	8	282 699	533.6	342.40																																																																																																																																																																																																																																																																																
						40	12																																																																																																																																																																																																																																																																																			
D ₁₇	峰 2	70	16	1 150	140.6	40	12	11 036	130.5	84.60																																																																																																																																																																																																																																																																																
						12	24																																																																																																																																																																																																																																																																																			
						10	32																																																																																																																																																																																																																																																																																			
D ₁₈	峰 3	50	60	1 150	19.2	20	56	29	19.12	1.50																																																																																																																																																																																																																																																																																
						20	56																																																																																																																																																																																																																																																																																			
						20	56																																																																																																																																																																																																																																																																																			
D ₁₉	峰 1	20	32	8 620	269.3	10	40	37 712	259.9	145.10																																																																																																																																																																																																																																																																																
						20	84																																																																																																																																																																																																																																																																																			
D ₂₀	峰 2	40	92	8 620	93.7	20	84	4 797	92.6	41.80																																																																																																																																																																																																																																																																																
						20	84																																																																																																																																																																																																																																																																																			
D ₂₁	峰 1	120	52	9 860	189.6	24	44	12 501	172.9	72.30																																																																																																																																																																																																																																																																																
						10	8																																																																																																																																																																																																																																																																																			
D ₂₂	峰 1	180	12	3 310	275.8	10	20	196 277	255.2	769.10																																																																																																																																																																																																																																																																																
						10	20																																																																																																																																																																																																																																																																																			

根据图6所示, D_1 — D_{15} 接收点计算速度与视速度值非常接近, 对该数学模型所得模型误差进行计算后, 其计算速度与视速度的相对误差及绝对误差均较小, 表明该流速计算方法科学, 所采用的地下水示踪模型正确适用。弥散度反映了溶质运移的距离, 弥散度越大, 对于同一接收点的不同渗漏通道溶质运移距离相对越远^[4]。

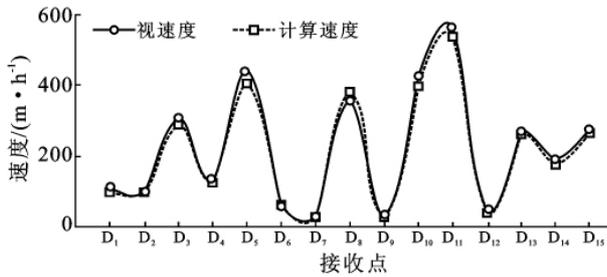


图6 各接收点视速度与计算速度对比

根据时浓曲线计算结果分析, 推断该地区存在3种不同的地下水岩溶管道流^[4-5]。

(1) 第一种为流速较快的岩溶管道(接收点: D_5 , D_8 , D_{10} , D_{11})。投放示踪剂4 h后, 首先在 D_5 出现, 最大浓度达 $40 \mu\text{g/L}$, D_8 于4 h后出现示踪剂异常, 且最大浓度达 $30 \mu\text{g/L}$, D_{10} 点最大浓度 $90 \mu\text{g/L}$, D_{11} 点最大浓度为 $80 \mu\text{g/L}$, 上述点流速在 $301 \sim 533.6 \text{ m/h}$ 。其中 D_8 和 D_{10} 示踪曲线呈现单峰, 说明投放点到 D_8 和 D_{10} 的岩溶管道流单一, 投放点到 D_{10} 的最大浓度时间为12 h, 4 h后浓度降至低值, 说明该区构造导水较快。 D_8 点与投放点直线距离是2 850 m, 异常出现时间8 h, 平均视速度 366.5 m/h , 通过地下水示踪模型计算流速为 379 m/h , 基本与平均视速度吻合; D_{10} 点与投入点直线距离5 100 m, 异常出现时间12 h, 平均视速度 425 m/h , 模型计算流速为 397.8 m/h , 基本与视速度吻合, 且在该水点导水快, 岩溶主通道非常通畅, 投放点为库区内岩溶落水洞, 当示踪剂流至此岩溶主通道时直达水点。

D_5 和 D_{11} 示踪试验曲线呈现双峰, 说明其间至少存在两条主要的岩溶地下水通道, 水力联系较好, D_5 点峰1对应的平均流速为 401.6 m/h , 峰2对应的平均流速为 126.9 m/h , 基本体现了地下水的实际运动状况。两峰的弥散度相差较大, 峰1对应的可能是曲折的裂隙通道, 峰2反映出岩溶通道相对较通畅。对于 D_{11} 点, 峰1对应的平均流速为 533.6 m/h , 峰2对应的平均流速为 130.5 m/h , 明显峰1的平均流速远大于峰2, 峰1的弥散度大于峰2, 说明峰1对应的通道不均匀程度较峰2大, 推测可能是较为曲折的岩溶

裂隙管道, 且相对峰2通道来说距离较远, 峰2对应的是较通畅的岩溶管道流。

(2) 第二种为中等流速管道(接收点: D_3 , D_{13} , D_{14} , D_{15})。投放示踪剂经8 h后, 在水点 D_3 出现示踪剂异常值, 最大浓度 $30 \mu\text{g/L}$ 。水点 D_{13} , D_{14} , D_{15} 分别32, 56, 12 h出现示踪剂异常, 该类水点一般流速为 $172.9 \sim 286.2 \text{ m/h}$, 且计算流速与平均视流速相差较小, 基本体现了地下水的实际运动状况。其中 D_{14} 和 D_{15} 呈现单峰, 说明投放点到接收点的岩溶管道流单一。 D_3 和 D_{13} 呈现双峰, 说明其间至少存在两条主要的岩溶地下水通道。对于 D_3 点峰1对应的平均流速远大于峰2, 弥散度小于峰2, 说明峰1对应是相对快速、通畅的岩溶管道流, 且相对峰2来说流程小, 对峰2来说可能是灰岩中曲折的裂隙通道。 D_{13} 点峰1对应的平均流速和弥散度均大于峰2, 推测峰1对应的通道总体来说较峰2运移距离较远。

(3) 第三种为较慢速、慢速流的地下水岩溶管道(接收点: D_1 , D_2 , D_4 ; D_6 , D_7 , D_9 , D_{12})。经计算可得, 水点 D_1 , D_4 和 D_2 一般流速为 $94.2 \sim 145.5 \text{ m/h}$, 最大浓度值为 $32 \sim 60 \mu\text{g/L}$ 。其中 D_1 呈现单峰, 说明投放点到接收点 D_1 的岩溶管道流单一, D_2 和 D_4 呈现双峰, 说明其间至少存在两条主要的岩溶地下水通道, 其浓度较低, 说明它们之间的水力联系较 D_1 差, 推测它们的渗漏路径来源于较曲折的岩溶管道流或是裂隙渗漏通道。

水点 D_6 , D_7 , D_9 和 D_{12} 流速为 $19.2 \sim 73.6 \text{ m/h}$, 最大浓度值 $10 \sim 340 \mu\text{g/L}$ 。除 D_{12} 点曲线浓度较高外, 其余接收点的浓度较低, 总体来说此类接收点的弥散度较低, 说明它们的渗漏路径来源于曲折的裂隙渗漏通道, 且水力联系很差。对于 D_{12} 点虽然平均流速相对很小, 出现示踪剂异常值后, 持续时间较长, 且最大浓度值较大, 表明该水点为岩溶水主要汇集点的特征。其中 D_6 和 D_{12} 呈现双峰或多峰^[6], 该类水点存在两条或多条流程较远的渗漏通道。

4 结论

(1) 该排泥库区节理裂隙发育, 各种岩溶形态和渗漏点较多, 水文地质条件复杂。地下水示踪试验对该库区的渗漏特性研究提供了必要的依据。

(2) 通过对示踪曲线进行分析计算, 得到各接收点流速不同, 投放点与接收点间均具有水力联系, D_5 , D_8 , D_{10} 和 D_{11} 等点流速较快, 说明地下水主体流向为东南方向。

(下转第104页)

效应,在丰富度指数、群落优势度、物种多样性方面,均表现为:交错带 > 旱生带 > 湿生带。

(3) 保护区的建立对湿生带与旱生带的影响最大,及时遏制了湿生带与旱生带出现的退化现象;湿地上游人工湖的建设对湿地核心部分湿生带影响最大,使得湿地水域面积出现萎缩;铁路建设对湿地边缘靠铁路最近的旱生带影响最大,旱生带已经出现严重退化现象。由于交错带并未造成严重的破坏,同时湿生带在 2010 年降雨量出现减少的情况下出现恢复状况,这些都表明湿地尽管遭受破坏,但还未出现不可逆转的退化现象。只要恢复湿地的外部供水机制和停止铁路建设等人为因素对湿地的破坏,湿地的生态环境还可得到恢复。

(4) 四儿滩湿地交错带植被变化情况与降雨量密切相关。

[参 考 文 献]

- [1] 陈宜瑜. 中国湿地研究 [M]. 长春: 吉林科学技术出版社, 1995.
- [2] 孙广友. 中国湿地科学的进展和展望 [J]. 地球科学进展, 2000, 15(6): 666-672.
- [3] Lunetta R S, Balogh M E. Application of multi-temporal landsat 5 TM imagery for wetland identification [J]. *Photogram Metric Engineering & Remote Sensing*, 1999, 65(11): 1303-1310.
- [4] 陆健健. 中国湿地 [M]. 上海: 华东师范大学出版社, 1990: 1-177.
- [5] 王国平. 水资源开发对科尔沁湿地环境的负面效应 [J]. *国土与自然资源研究* 2001, 4(2): 45-47.
- [6] 买买提·阿不都拉. 新疆湿地现状与保护 [J]. *新疆林业* 2001, 43(4): 4-5.
- [7] 张克斌, 刘云芳, 李瑞. 半干旱区湿地—干草原群落交错带边缘效应研究 [J]. *西北植物学报*, 2007, 27(5): 990-993.
- [8] 彭少麟, 方炜, 任海, 黄忠良, 等. 鼎湖山厚壳桂群落演替过程的组成和结构动态 [J]. *植物生态学报*, 1998, 22(3): 245-249.
- [9] 周先叶, 王伯荪, 李鸣光, 等. 广东黑石顶自然保护区森林次生演替过程中的群落动态 [J]. *植物学报*, 1999, 41(8): 877-886.
- [10] 李全发, 刘文耀, 沈有信, 等. 南涧干热退化山地植被恢复的植物多样性变化 [J]. *山地学报*, 2005, 22(5): 557-564.
- [11] Greig S P. *Quantitative Plant Ecology* [M]. 3rd ed. Oxford: Blackwell Science Publications, 1983: 105-112.
- [12] 傅伯杰, 陈利顶, 马克明, 等. *景观生态学原理及运用* [M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [13] 王庆锁. 生态交错带与生物多样性 [J]. *生物多样性*, 1997, 5(2): 126-131.
- [14] 毕润成, 杨焕根, 朱新军. 山西霍山落叶阔叶林边缘效应的研究 [J]. *西北植物学报*, 2004, 24(8): 1441-1447.
- [15] 李瑞, 张克斌, 王百田. 湿地—干草原生态系统植物物种多样性研究: 以宁夏盐池为例 [J]. *北京林业大学学报*, 2006, 28(5): 12-17.
- [16] 王国梁, 刘国彬, 刘芳. 黄土丘陵区纸坊沟流域植被特点与生态交错带效应 [J]. *西北植物学报*, 2002, 22(5): 1102-1108.
- (上接第 99 页)
- (3) 示踪模型计算所得流速与视流速总体接近, 说明该模型适用于该排泥库地下水问题的研究。本研究进一步利用该模型对示踪曲线的双峰、多峰问题进行分析, 用计算所得弥散度值分析了投放点到各接收点不同渗漏通道的情况。
- (4) 通过对地下水示踪试验所得流速、流向及渗漏特性分析, 该排泥库存在对环境产生污染的隐患, 在施工过程中应做好防渗处理工作。
- [1] 张祯武, 郇成杰. 岩溶地下水分散流场示踪探测原理及其在水库渗漏研究中的应用 [J]. *中国岩溶*, 1995, 14(3): 251-259.
- [2] 车友明. 基于现场示踪试验的水库渗流研究 [D]. 江苏南京: 河海大学, 2006.
- [3] 陈崇希, 李国敏. 地下水溶质运移理论及模型 [M]. 湖北武汉: 中国地质大学出版社, 1996: 63-65.
- [4] 郑克勋. 地下水人工化学连通示踪理论及试验方法研究 [D]. 江苏南京: 河海大学, 2007.
- [5] 李敬兰, 李益民. 广西龙布排泥库地下水多元示踪试验研究 [J]. *安全与环境工程*, 2004, 11(1): 59-61.
- [6] Martin R, Thomas A. An example of the bacteriophage as a groundwater tracer [J]. *Journal of Hydrology*, 1974, 23(1): 68-70.