

文章编号:1001-4179(2012)07-0073-04

陕西泾河河流溶质弥散系数示踪试验研究

王 恒^{1,3}, 杨启勇², 曹兴旺¹, 邓标荣¹

(1. 桂林理工大学 环境科学与工程学院, 广西 桂林 541004; 2. 中国地质科学院 岩溶地质研究所, 广西 桂林 541004; 3. 广东省化工地质勘察院, 广东 广州 510800)

摘要:为了对不同情况下的河流污染物弥散系数进行实地研究,以陕西泾河枯水期水流为研究对象,利用钼酸钠为示踪剂进行了示踪试验。根据试验所得数据以及相应河段的水文资料,用相关分析法分析了河流弥散系数与平均流速及传播距离的关系。试验结果表明:泾河枯水季节的流量及河流弥散系数都很小,对污染物的稀释净化能力很低。

关键词:示踪实验; 矩分析; 相关分析; 弥散系数; 枯季径流; 泾河
中图分类号: TV121 **文献标志码:** A

在河流溶质运移模拟中,纵向弥散系数是评价污染物混合、扩散的重要水文参数,可为构造水质数学模型、评价水体运输扩散能力和突发性污染河流事故情况下的承载能力以及确定水环境容量提供重要的依据^[1]。目前确定纵向弥散系数的方法主要有经验公式法和示踪试验分析法^[2]。由于经验公式法局限性强,对于不同的河流需用不同的经验公式或经验系数,因此得到的结果也具有很强的人为经验因素,误差相对较大。示踪试验分析法是通过数学方法求解出弥散系数的表达式,然后结合野外实测数据,根据弥散系数表达式计算出河流弥散系数。求解弥散系数表达式的方法目前主要有单站法、双站演算法^[3]、数值法、微分方程法、图解法^[2]、相关系数极值法^[4]、单一参数估计法、矩分析法等。矩分析方法是目前最准确而有效的一种分析方法^[5]。矩分析中主要用到概率分布函数。其不仅可以为矩分析方法提供基本方程,还能应用于理论运移模型。溶质运移方程可以通过拉普拉斯(Laplace)或傅里叶(Fourier)转换,转换成与矩分析相应的矩分析方程。它可以模拟计算污染物在水流中的行为参数,其评估计算结果可直接用于实际中。由于其计算精确、简单的特点,在行业中受到普遍关注。

1 基本原理

溶质在流体中的一维对流弥散方程为^[6]

$$\frac{\partial c}{\partial t} = K \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - U \frac{\partial c}{\partial x} \quad (1)$$

式中, c 为溶质浓度; K 为弥散系数; U 为流体平均流速。

根据王季震在瞬时排放示踪剂的情况下对方程的求解可知,示踪剂组分的瞬时排放一维方程的解为正态函数^[7]:

$$C(t, x) = WA^{-1}(4\pi Kt)^{-1/2} \exp[-(x - Ut)^2/4Kt] \quad (2)$$

式中, W 为示踪剂的投放量; A 为投放点断面面积; t 为时间; x 为距离。

将(2)式进行 Laplace 变换,得

$$c(s, x) = \int_0^{\infty} e^{-st} C(t, x) dt \quad (3)$$

式中, s 为垂向距离。

为了计算方便,可以构建新函数 $F(s, x)$

$$F(s, x) = \frac{c(s, x)}{\int_0^{\infty} C(t, x) dt} \quad (4)$$

收稿日期:2011-12-11

基金项目:广西环境工程与保护评价重点实验室研究基金项目(桂科能 0701K019)

作者简介:王 恒,男,硕士研究生,主要研究方向为水文地质与工程地质。E-mail:3050104324@163.com

通讯作者:杨启勇,男,副研究员,主要研究方向为岩溶生态水文地质。E-mail:yangqiyong0739@163.com

费克等人给出 $F(s, x)$ 的表达式^[8]：

$$F(s, x) = [2v(s)]^{-1} \exp \times \left\{ \left[\int_0^{\infty} C(t, x) dt / 2k \right] [x - v(s)x] \right\} \quad (5)$$

式中, $v(s) = U^{-1}(U^2 + 4Ks)^{1/2}$

一阶时间矩表示溶质在流体中的平均滞留时间, 根据 J. M. Wraith 等人推出的结论^[9], 可知:

$$\bar{t} = \frac{\int_0^{\infty} C(t, x) t dt}{\int_0^{\infty} C(t, x) dt} = \frac{\sum_{i=2}^m 0.5(t_i^n c_i + t_{i-1}^n c_{i-1})(t_i - t_{i-1})}{\sum_{i=2}^m 0.5(c_i + c_{i-1})(t_i - t_{i-1})} \quad (6)$$

同时用泰勒级数将(3)式中的 e^{-st} 展开, 得

$$c(s, x) = \int_0^{\infty} (1 - ts) C(t, x) dt \quad (7)$$

根据(4), (7)式可得下式

$$-\frac{\partial F(s, t)}{\partial s} = \frac{\int_0^{\infty} C(t, x) t dt}{\int_0^{\infty} C(t, x) dt} \quad (8)$$

由(5), (8)式可求解出 \bar{t} 的近似值为

$$\bar{t} = x/U + 2k/U^2 \quad (9)$$

2 示踪试验

2.1 试验区概况

试验研究区位于陕西省礼泉县与淳化县交界的泾河下游(图1)。本区地处渭北中西部, 属于暖温带半干旱或半湿润地区, 降雨量为 500~700 mm, 受山地影响分布不均。地貌形态基本上受地质构造控制, 北高南低, 最高海拔 1 599 m(钻天岭), 最低 430 m(泾河峡谷出口), 自北向南呈阶梯状排列, 依次为北东向和近东西向展布的中低山、黄土丘陵和黄土台塬。

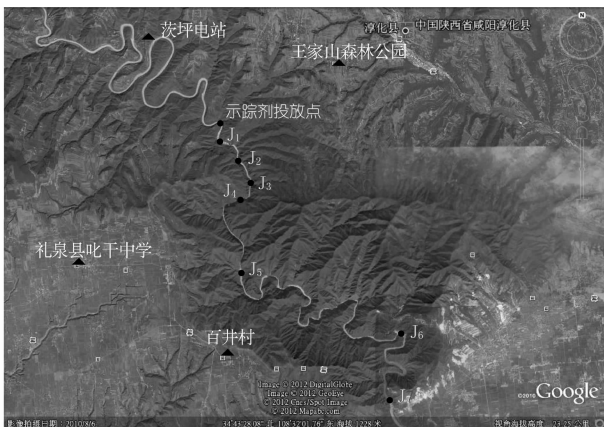


图1 示踪试验投放点和取样点布置

2.2 试验方法

项目研究组于 2011 年 3, 4 月份对试验区进行了现场调查, 2011 年 5 月 12 号开始进行示踪试验。由于试验时间为枯水季节, 研究区河段绝大多数支流干枯, 仅剩黑沟及徐家山上游约 2 km 处的 1 条支流, 但流量很小, 相对泾河流量可以忽略, 根据条件判断可以使用费克公式。示踪试验选择了 1 个投放点和 7 个接受点(图 1), 接受点编号为 J₁, J₂, J₃, J₄, J₅, J₆, J₇, 分别位于投放点下游 0.5, 1.2, 3, 4.5, 12, 24, 26.5 km。示踪剂选用钼酸铵。该示踪剂物理化学性质较稳定, 毒性较低。由于示踪试验河段及上下游的居民居住地距河流较远, 居民生活用水为地下水, 且地下水位高于试验河段水位, 试验对居民生命健康无影响。2011 年 5 月 12 号投放钼酸钠 1 000 kg, 然后定期将采样送回实验室使用多功能极谱仪测试。

表 1 为试验基本情况, 图 2 为其中几个断面示踪剂浓度与时间的关系。

表 1 示踪试验的基本情况

点 位	至投放 点距离/ km	本底浓度/ ($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	起始时间	结束时间	结束浓度/ ($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)
J ₁	0.5	14.6	5月12日9:00	5月25日9:00	26.0
J ₂	1.2	14.6	5月12日9:00	5月25日9:00	14.8
J ₃	3.0	11.6	5月12日9:00	5月27日19:00	11.6
J ₄	4.5	11.2	5月12日9:00	5月24日9:00	44.8
J ₅	12.0	12.2	5月12日9:00	6月2日9:00	12.5
J ₆	24.0	12.2	5月12日9:00	6月12日9:00	11.8
J ₇	26.5	10.1	5月12日9:00	6月13日10:00	11.8

3 数据分析

3.1 回收率计算

岩溶水单管流场的回收浓度公式为

$$C(x, t) = \frac{M}{\sqrt{4\pi D_d t}} \exp \left\{ -\frac{(x - vt)^2}{4D_d t} \right\} \quad (10)$$

式中, C 为回收点的示踪剂浓度; x 为投剂点至回收点间的距离; v 为水流平均流速; D_d 为纵向弥散系数; M 为投放示踪剂质量。

回收率计算公式为^[10]

$$P = QA/M \times 100\% \quad (11)$$

$$A = \int_0^{\infty} C(t) dt \quad (12)$$

式中, Q 为回收点水流流量; A 为示踪剂浓度曲线与背景值曲线围成的面积。

由于野外实际条件限制, 本研究没有现场实测河流断面流量, 示踪剂回收率计算根据位于泾惠渠首下游约 200 m 处的张家山水文站 5 月 17 日至 5 月 26 日

10 d 的实测流量作为泾惠渠首断面流量进行。张家山水文站实测流量见表 2。

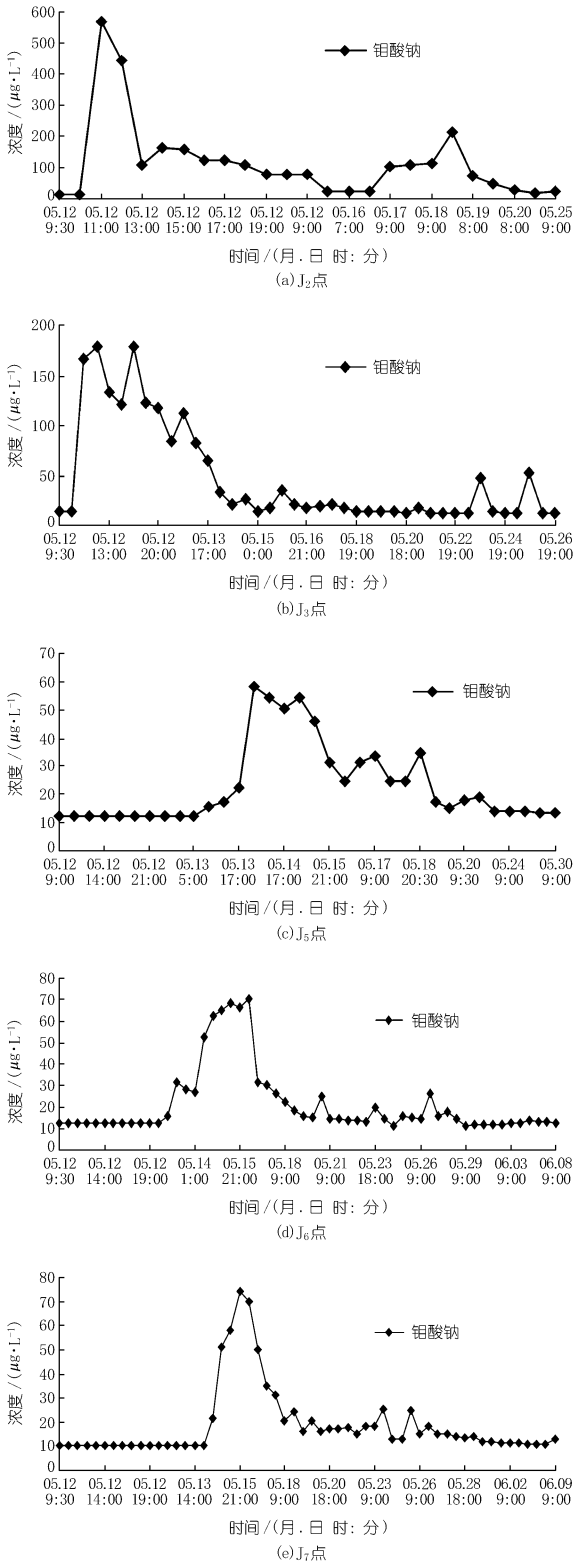


图 2 各点示踪剂穿透曲线

试验期间日平均流量之和为 102 m³/s, 即泾河日平均流量为 10.2 m³/s。

根据式 (12) 求示踪剂浓度曲线与背景值围成的

面积, 利用辛普森数值积分可以算出示踪剂钼酸钠的浓度曲线与背景值所围成的面积 (A), $A = \int_0^{\infty} C(t) dt = 14\,491.6 \text{ ppb} \cdot \text{h}$, 即得到接受点的示踪剂回收率为 $P = QA/M = 53.2\%$ 。从回收率来看, 本次示踪接收效果较好。河水流动过程中, 由于河道节理裂隙发育, 水流含沙量偏大等原因, 可能会导致一些示踪剂损失, 影响接受效果。

表 2 张家山水文站实测日平均流量

日期/(月.日)	流量/(m ³ ·s ⁻¹)	日期/(月.日)	流量/(m ³ ·s ⁻¹)
05.17	10.1	05.22	11.0
05.18	10.1	05.23	11.2
05.19	9.5	05.24	10.0
05.20	9.8	05.25	10.2
05.21	9.9	05.26	10.2

3.2 弥散系数计算

由于取样原因, J₁ 和 J₄ 两点数据丢失太多, 本文不作讨论。利用前面推导的矩分析公式, 各点的平均

$$\text{径流时间 } \bar{t} = \frac{\int_0^{\infty} C(t, x) t dt}{\int_0^{\infty} C(t, x) dt} = \frac{\sum_{i=2}^m 0.5(t_i^n c_i + t_{i-1}^n c_{i-1})(t_i - t_{i-1})}{\sum_{i=2}^m 0.5(c_i + c_{i-1})(t_i - t_{i-1})}$$

将 J₂, J₃, J₅, J₆, J₇ 各点数据代入公式可得各点的平均运移时间为: $t_2 = 92.4 \text{ h}$, $t_3 = 131.1 \text{ h}$, $t_5 = 200.6 \text{ h}$, $t_6 = 288.4 \text{ h}$, $t_7 = 287 \text{ h}$ 。由以上 5 点可以作出距离时间的散点图, 见图 3。通过相关分析得出趋势线函数和相关系数 $\bar{t} = 7.5614x + 99.032, R^2 = 0.9789$ 。

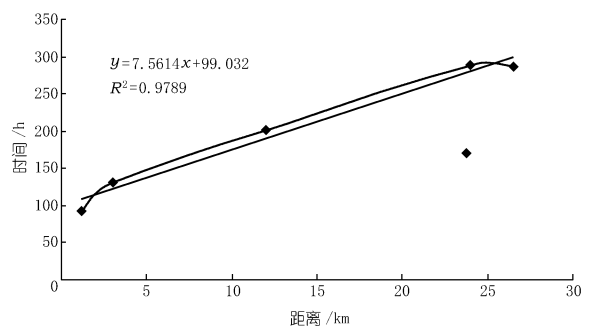


图 3 相关分析拟合曲线

根据一维扩散方程 (8) 的解 $\bar{t} = x/U + 2k/U^2$ 与趋势函数相拟合, 可知 $1/U$ 为图 3 中直线的斜率, $2k/U^2$ 为直线中的截距, 即 $1/U = 7.5614, 2k/U^2 = 99.032$, 可以得到 $U = 0.03675 \text{ m/s}$, $k = 240.75 \text{ m}^2/\text{s}$ 。由经验公式可以知道, 河流水流平均速度为距离与示踪曲线

峰值对应时间的比值,对 J_6 、 J_7 两曲线,根据经验公式算得的河流平均流速分别为 0.060 m/s 和 0.055 m/s,经验公式和矩分析二者结果对比相差不大,说明矩分析结果可信。

4 结 语

弥散系数是评价水体对突发性污染事故的承受能力的重要参数,研究水流的弥散系数对水质保护和环境治理具有重要意义。本次试验是在 5 月份枯水季节进行的,所求河流平均流速 U 为 0.036 75 m/s,弥散系数 k 为 240.75 m^2/s ,表明枯水季节泾河对突发性污染的承受能力极低,一旦遭受污染,会对下游水质产生巨大影响。本次试验所得数据仅反映枯水季节的情况,若要更全面准确地了解泾河河流污染物弥散情况,需在丰水期和平水期补充试验,以便得出更全面的结论。

参考文献:

[1] Suh K S, Kim K C, Jung S H, et al. Determination of dispersion coefficients using radioisotope date in river environment[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2009, 67(7-8): 1499-1502.

- [2] 张文静,梁秀娟.确定河流纵向弥散系数的正态分布图解法[J].吉林大学学报:地球科学版,2004,(S1):83-86.
- [3] 宋松柏,蔡焕杰,粟晓玲.专门水文学概论[M].杨凌:西北农林科技大学出版社,2005.
- [4] 汤成友,缪初.基于小波变换的水文时间序列分解及周期识别[J].人民长江,2006,37(12):33-34.
- [5] Stagnitti F, Allinson G, Morita M, H. II, et al. Temporal moments analysis of preferential solute transport in soils[J]. Environmental Modelling and Assessment, 2000, (5): 229-236.
- [6] 王秉忱,杨天行.地下水污染和地下水水质模拟方法[M].北京:北京师范学院出版社,1985.
- [7] 王季震.水力学水质学[M].北京:中国水利水电出版社,1998.
- [8] Carl F, Nordin J M, Troutman B. Longitudinal dispersion in rivers: the persistence of skewness in observed data[J]. Water Resource Research, 1980, 16(1): 123-128.
- [9] Das B S, Wraith J M, Kluitenberg G J, et al. Evaluation of Mass Recovery Impacts on Transport Parameters Using Least-Squares Optimization and Moment Analysis[J]. Soil Sci. Soc. Am. J. 2005, 69: 1209-1216.
- [10] 张禛武,吕文星.岩溶水管流场与分散流场示踪识别研究[J].工程勘察,1997,(3):42-26.

(编辑:常汉生)

Tracing test on pollutant dispersion coefficient in Jinghe River of Shaanxi Province

WANG Heng^{1,3}, YANG Qiyong², CAO Xingwang¹, DENG Biorong¹

(1. College of Environmental Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China; 2. Institute of Karst Geology, CAGS, Guilin 541004, China; 3. Guangdong Institute of Chemical Engineering and Geological Survey, Guangzhou 510800, China)

Abstract: In order to conduct a field research on pollutant dispersion coefficient under different river conditions, the flow condition of Jinghe River in Shaanxi Province in dry season is taken as the research object, and the tracing test with Sodium molybdate is made. According to the measured data and corresponding hydrological data, the relation of dispersion coefficient with average flow velocity and propagation distance is analyzed by correlation analysis method. The analysis result shows that the flow and dispersion coefficient of Jinghe River in dry season are all small and the pollutant purification capacity is very low.

Key words: tracing test; moment analysis; correlation analysis; dispersion coefficient; dry season flow; Jinghe River

(上接第 69 页)

Hydraulic experimental study of hollow - type separation levee of approach channel in hydropower station

WANG Bo, CHENG Zibing, JIN Feng

(Department of Hydraulics, Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

Abstract: The hollow - type separation levee of approach channel in the hydropower station will cause an adverse effect on the flow conditions at the parking section of approach channel even if it can adjust the velocity distribution of the channel entrance area and improve the poor flow pattern. Therefore, the hydraulic characteristics with different hollow - type separation levee of downstream approach channel in downstream of Goupitan Hydropower Station are studied by adopting the hydraulic model test and ship model test, with the consideration of engineering practice of the station. The result shows that the flow conditions of the parking section of downstream approach channel and the entrance area can meet navigation requirements by adopting the plane angle of 45°, 9 permeable channels with the total permeable area of 75.6 m^2 .

Key words: entrance area; hollow - type; ship model test; navigation flow condition; separation levee