

基于示踪试验求解岩溶含水层水文地质参数

鲁程鹏¹, 束龙仓¹, 苑利波², 张蓉蓉¹, 黄币娟¹, 王彬彬¹

1. 河海大学 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098

2. 辽宁工程勘察院, 辽宁 锦州 121001

摘要: 示踪试验作为重要的水文地质试验, 长久以来以探明地下水的水力联系、测定地下水流速为主要目标。针对岩溶地区地下水流速较快的特点, 提出了一套基于对流稀释作用的数学模型, 利用电导率与溶质浓度的正相关关系, 可方便准确地计算示踪试验投源井的天然径流量和地下水中示踪剂的背景浓度。根据后寨地下河流域陈旗典型试验区的计算成果, 投源井的天然径流量为 $0.2414 \text{ m}^3/\text{min}$, 辅以必要的水文地质调查, 即可估算地下水流速以及含水层的渗透系数。

关键词: 示踪试验; 天然径流量; 对流稀释; 水文地质参数

中图分类号: P641.134 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-5888(2009)04-0717-05

Determination of Hydrogeologic Parameters of Karst Aquifer Based on Tracer Test

LU Cheng-peng¹, SHU Long-cang¹, YUAN Li-bo²,
ZHANG Rong-rong¹, HUANG Bi-juan¹, WANG Bin-bin¹

1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China

2. Liaoning Institute of Engineering Exploration, Jinzhou, Liaoning 121001, China

Abstract: Tracer test as an important hydrogeology test, are widely used to explore the hydraulic connectivity underground, measure the groundwater flow velocity. According to the fast flow in karst aquifer, a mathematic model based on the dilution function of convection is proposed. By means of this model and the linear relationship between electricity conductivity and solution concentration, the authors can easily and accurately calculate the groundwater runoff of source well and the tracer concentration in the original groundwater. In this case study, the runoff of source well which in Chenqi of Houzhai underground river basin is $0.2412 \text{ m}^3/\text{min}$. Furthermore, supplemented with necessary hydrogeology investigation, the groundwater flow velocity and aquifer conductivity can be estimated.

Key words: tracer test; groundwater runoff; convection dilution; hydrogeological parameters

岩溶地区由于地下空间复杂, 地下水示踪试验 导流向、计算地下水流速最为常用的技术手段之一。成为探明地下水的水力联系^[1-2]、确定地下水的主 以示踪试验为基础的含水层系统的敏感性问题^[3-4]

收稿日期: 2008-10-24

基金项目: 国家“973”计划项目(2006CB403200); 高等学校学科创新引智计划项目(B08048); 教育部长江学者和创新团队发展计划(IR T0717)

作者简介: 鲁程鹏(1984-), 男, 安徽肥东人, 博士研究生, 主要从事多重介质水流运动规律研究、水文不确定性研究, E-mail: thebest@hhu.edu.cn

通讯联系人: 束龙仓(1964-), 男, 安徽无为, 教授, 博士生导师, 主要从事地下水系统模拟及控制、地下水与地表水相互作用研究, E-mail: lcsu@hhu.edu.cn

和地下水数值模型参数率定^[5-6]等研究的日趋成熟,使得示踪试验的功能被极大地开发。示踪试验中最基本的待求参数是地下水流的流速^[7],根据观测井浓度时间曲线的峰值和起涨点可以判断出区间的地下水流动状态。一般认为,示踪元素初现时的初始流速为地下水的最大流速,高峰出现时的流速为平均流速^[8]。本次研究根据投放井浓度的自然衰减曲线可以初步估算含水层的补给速度和天然径流量,结合现场测定的水力坡度则可以确定井附近含水层的渗透系数。

1 示踪剂的选择

目前在实际工作中使用的示踪剂主要有以下 4 类^[9]: 化学染料示踪类; 固形漂浮物; 放射性同位素类; 化学检测示踪类。其中化学检测示踪类包括食盐 (NaCl) 和钼酸铵 [$(\text{NH}_4)_6 \cdot \text{MO}_7 \text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$] 等。

本文所采用的示踪剂为食盐 (NaCl)。以食盐为示踪剂进行示踪试验,主要考虑食盐具有以下优点^[10]: 具有很好的水溶性(溶解度仅决定于温度); 对环境基本没有污染; 不易被土壤吸附和生物降解; 便于野外检测,精度高; 测量成本低。

实验证明,水溶液的电导率和溶解盐的浓度成正比,水溶液中电导率的变化反映了溶解的 NaCl 的变化情况^[11]。本次试验通过自动化监测仪器(雷磁 DDBJ - 350)记录水溶液中电导率随时间的变化,反映水中溶解的 NaCl 随时间的变化情况。

选取贵州后寨河流域陈旗某次示踪试验中电导率与水溶液中溶质浓度的变化以验证电导率与溶质浓度的一致性。后寨地下河位于贵州省普定县南部,整个流域面积为 74 km²,为我国西南典型喀斯特小流域。流域出露地层为三叠系中统关岭组 (T_2g) 的白云岩、石灰岩、泥质灰岩、泥质白云岩和泥质页岩。断裂构造主要以北东向为代表,同时还发育有大量的高角度构造节理裂隙。陈旗位于该流域上游,已有资料^[10]表明陈旗处于峰林盆地相对稳定时期,地下空间结构系统不甚发育。以本次研究野外观测为基础,认为该区段以岩溶裂隙发育为主,试验区段内不发育岩溶管道。

试验中除投源井外,另有两眼观测井。分别绘制 3 井的电导率 (EC) 与总溶解固体 (TDS) 浓度时间曲线(图 1 - 3)。

从图中可知三井中电导率 (EC) 与总溶解固体

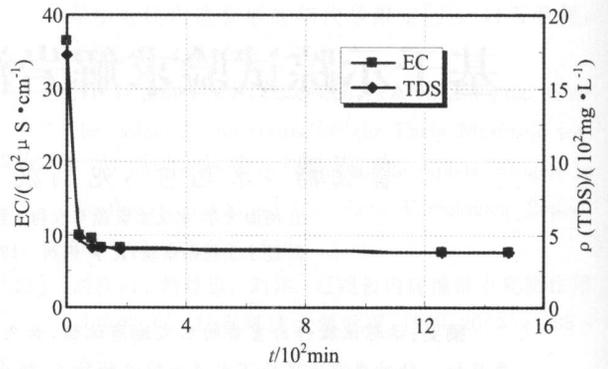


图 1 投源井电导率与总溶解固体浓度时间曲线

Fig. 1 The concentration time curves of EC and TDS in the injected well

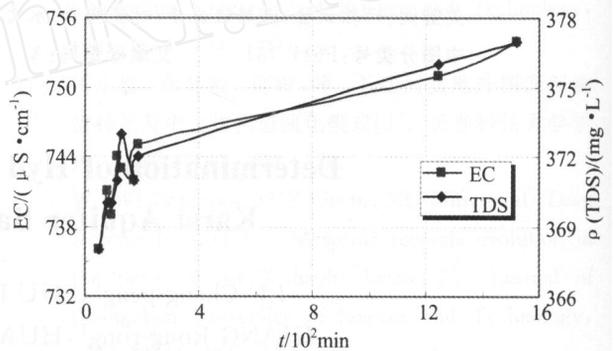


图 2 1 号观测井电导率与总溶解固体浓度时间曲线

Fig. 2 The concentration time curves of EC and TDS in No. 1 observation well

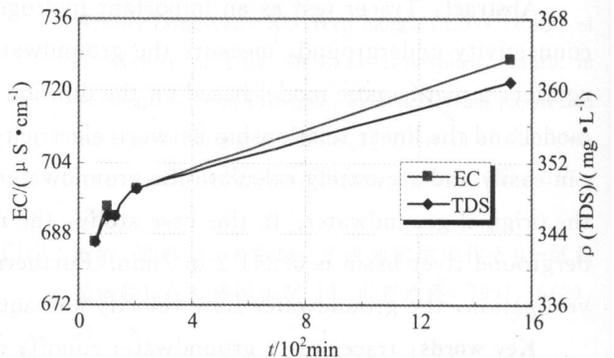


图 3 2 号观测井电导率与总溶解固体浓度时间曲线

Fig. 3 The concentration time curves of EC and TDS in No. 2 observation well

(TDS) 具有良好的一致性,在现场监测中可以利用 EC 的变化趋势代替 TDS,进而反映溶质浓度的变化规律。

2 计算方法与结果

2.1 考虑扩散与对流作用

地下水溶质运移过程又称为水动力弥散过

程^[12],其主要驱动力为对流、机械弥散及分子扩散作用。针对示踪试验,示踪剂瞬时注入时的溶质运移的定解条件如式(1)所示:

$$\begin{cases} \frac{\partial C}{\partial t} = D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_T \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - u \frac{\partial C}{\partial x}; \\ C(x, y, 0) = 0, & x, y \geq 0; \\ C(\pm \infty, y, t) = 0, & t > 0; \\ C(x, \pm \infty, t) = 0, & t > 0; \\ \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} nC dx dy = m. \end{cases} \quad (1)$$

式中: D_L 和 D_T 分别为纵向弥散系数和横向弥散系数; u 为地下水流速; n 为介质孔隙度; m 为投放示踪元素的总质量。该定解问题的解为

$$C(x, y, t) = \frac{m}{4nt\sqrt{D_L D_T}} \times \exp\left[-\frac{(x-ut)^2}{4D_L t} - \frac{y^2}{4D_T t}\right]. \quad (2)$$

针对投放源其浓度时间曲线符合如下双曲线型:

$$C(t) = \frac{m}{4n\sqrt{D_L D_T}} t^{-1} = Wt^{-1}, \quad (3)$$

另外考虑若天然流场静止,则该示踪试验过程可以认为是纯扩散作用,定解条件如下:

$$\begin{cases} \frac{\partial C}{\partial t} = \frac{D}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial C}{\partial r} \right); \\ C(r, 0) = 0, & r > 0; \\ \lim_{r \rightarrow \infty} C(r, t) = 0, & t > 0; \\ \int_0^{\infty} 4r^2 C dr = m, & t > 0. \end{cases} \quad (4)$$

上述定解问题的解为

$$C(r, t) = \frac{m}{8(Dt)^{3/2}} \exp\left(-\frac{r^2}{4Dt}\right). \quad (5)$$

针对投放源其浓度时间曲线符合如下双曲线型:

$$C(t) = \frac{m}{8(Dt)^{3/2}} = Wt^{-3/2}, \quad (6)$$

分别绘制式(3)、式(6)两种类型的双曲线(图4),并与该次示踪试验主井浓度时间曲线对比,可以发现快速下降段和后期的缓慢衰退段不能同时与实测曲线取得一致。图中3条曲线在后期基本一致,但是在开始阶段两个数学模型的解远大于实测值,以至在图中不能显示数学模型的完整曲线。

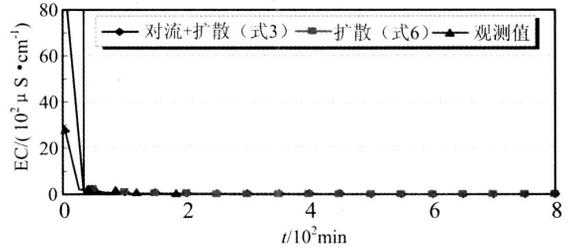


图 4 理论解析解与实测值拟合结果

Fig. 4 The fitting results of analytic solutions and observed values

通过上面两种条件的分析,可以得出考虑扩散作用不能很好地拟合典型岩溶地区的示踪试验主井的浓度时间曲线。

2.2 仅考虑对流稀释作用

下面考虑在天然地下水流场中,在对流作用影响下主井浓度的稀释过程,按不同假定条件分别进行计算。首先假定投放井内为有限溶质,随时间增长无限稀释的情景。具体是指示踪剂溶质质量不变,天然补给并不增加溶质质量,在天然补给的对流作用下,溶质浓度逐渐稀释,并且能够瞬时与下泄水体浓度一致。结合上文中分析结果,溶质浓度衰减过程与电导率衰减过程有极好的一致性,所以在下面推导过程中的溶质浓度在实际计算中均用溶液电导率代替。在该假定下,用模型一对对流稀释过程进行描述:

$$\begin{cases} C_0 V_0 = C_t (V_0 + V_t), \\ V_t = QT. \end{cases} \quad (7)$$

式中: C_0 为投放初始时刻溶质与井水完全混合后的溶质浓度; V_0 为井筒内水体体积; C_t 指其后某一时刻井内溶质浓度; V_t 表示补充水体的总体积; Q 则是井内天然径流量; T 为时间。通过率定 C_t 过程与实测过程,可以得到投源井的天然径流量,进而估计井附近的渗透系数。

整理得到 C_t 的计算公式如式(8)所示:

$$C_t = C_0 V_0 / (V_0 + V_t). \quad (8)$$

调整变量 Q ,所得结果见图5。

由图5可见,对数学模型中未知变量 Q 进行调整,不能很好地拟合计算与实测曲线。归其原因,发现本数学模型中尚未考虑到补给水体的示踪剂浓度背景值。所以在上述模型的基础上,增加背景值的影响因素,得到模型二:

$$C_0 V_0 + C_b V_t = C_t (V_0 + V_t). \quad (9)$$

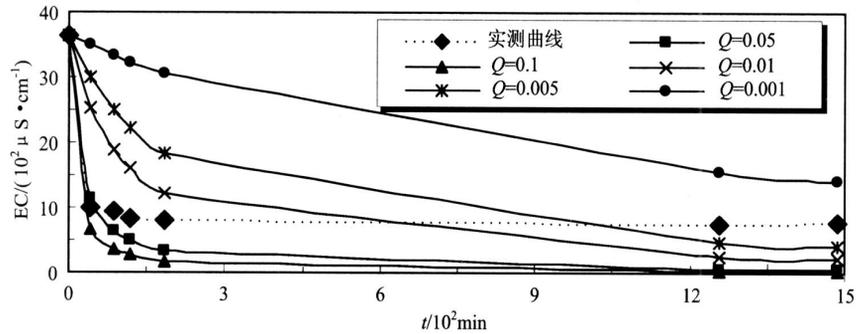


图 5 模型一的拟合结果

Fig. 5 The fitting results of model 1

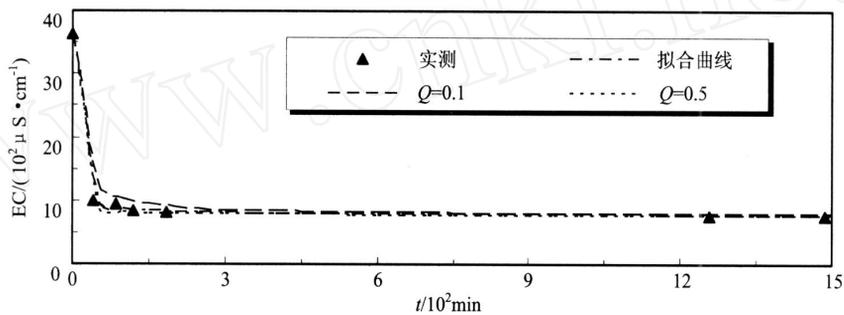


图 6 模型二的拟合结果

Fig. 6 The fitting results of model 2

式中: C_b 为补充水体的浓度背景值;其余符号意义同式(7)。解得

$$C_i = (C_0 V_0 + C_b V_t) / (V_0 + V_t) \quad (10)$$

利用公式(9),对实测曲线和计算曲线按照最小二乘原理进行拟合,进而求得模型参数 Q 和 C_b 。该模型参数的率定结果可以与具有物理意义的测量参数进行对比,来分析其合理性。本文利用 matlab7 求解曲线拟合问题,其结果如下:

$Q = 0.2414 \text{ m}^3/\text{min}$, $C_b = 761.1$, 在 95% 置信区间下, $Q \in [0.1446, 0.3382]$, $C_b \in [714.1, 761.1]$, 模型决定系数 $R^2 = 0.9993$ 。模型拟合曲线如图 6 所示。

由于数学模型中仅考虑溶质的对流稀释作用,与实际水流条件还是有一定的差异。从观测数据可以得知天窗内溶质成分还未恢复到投源前的背景值。模型率定的背景电导率为 $761.1 \mu\text{S}/\text{cm}$, 实测背景值为 $468 \mu\text{S}/\text{cm}$, 前者是后者的 1.6 倍。试验初始测量值为 $3640 \mu\text{S}/\text{cm}$, 虽然模型率定值较测量初值要小很多,但是从系统恢复原状的角度而言,这种误差不可忽略,需在喀斯特地区水岩相互

作用中进一步进行研究。

本解析模型中并未充分注重这种缓慢的浓度下降过程,只是旨在通过对浓度快速衰减段进行拟合,以获取天然径流(补给)量 Q ;进而结合辅助的水文地质资料对含水层导水性质以及地下水天然流速进行较为准确的估计。

3 结论

(1) 计算结果可以表明基于对流稀释作用的数学模型和实测结果拟合较好,但并未考虑溶质的弥散作用,其结果反映了公式的良好适用性;同时表明该喀斯特地区地下水流沿着主干裂隙运动,与多孔介质中普遍存在的低速渗流和机械弥散作用不同,溶质弥散作用较多孔介质要弱。

(2) 按照本文所提出的数学模型,通过示踪试验主孔的溶质浓度衰减曲线可以进行试验并天然径流量的计算。通过天然径流量的计算,一方面增加对区域水文地质情况的了解,另一方面通过辅助的水文地质调查工作,可以获得渗透系数的估计值以及地下水流速等重要水文地质参数。

(3)该方法以食盐为原料,不需要进行大型的工程性试验,耗资小,获取参数准确性高,是已有各类参数计算方法的有益补充。

参考文献(References):

- [1] 邓振平,周小红,何师意.西南岩溶石山地区岩溶地下水示踪试验与分析[J].中国岩溶,2007,26(2):163-169.
DENG Zhenping, ZHOU Xiao-hong, HE Shi-yi. Analysis and tracing-test to karst groundwater in Southwest China karst rocky mountain area[J]. Carsologica Sinica, 2007, 26(2):163-169.
- [2] 蔡荣,梁媛,马亿刚,等.横河煤矿底含放水孔与井田内供水井连通试验研究[J].吉林大学学报:地球科学版,2004,34(1):102-105.
CAI Rong, LIANG Yuan, MA Yi-gang, et al. Study on connection test between drain bores of bottom aquifer and supplying wells in Henghe coal mine[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2004, 34(1):102-105.
- [3] Bloomfield K K, Moore J N, Adams M C. Tracer test design and sensitivity studies of the cove fort geothermal resource tracer test[J]. Geothermal Resources Council Transactions, 2001, 25(8):26-29.
- [4] Hartmann S, Odling N E, West L J. A multi-directional tracer test in the fractured chalk aquifer[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2007, 94:315-331.
- [5] Bill X Hu, Jiang Xiaowei, Wan Li. Integration of tracer test data to refine geostatistical hydraulic conductivity fields using sequential self-calibration method[J]. Journal of China University of Geosciences, 2007, 18(3):242-256.
- [6] Worthington R H Stephen, Smart Christopher C. Empirical determination of tracer mass for sink to spring tests in karst[C]//Beck F Barry. Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts on Karst, Geotechnical Special Publication No. 122. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2003:287-295.
- [7] 朱学愚,徐绍辉,司进辉.示踪试验在淄博裂隙岩溶水污染治理中的应用[J].中国岩溶,1997,16(2):131-138.
ZHU Xue-yu, XU Shao-hui, SI Jin-hui. Application of tracing test to the remediation of contaminated fracture-karst water in Zibo City[J]. Carsologica Sinica, 1997, 16(2):131-138.
- [8] 裴建国,谢运球,章程,等.湘中溶蚀丘陵区示踪试验[J].中国岩溶,2000,19(4):366-371.
PEI Jian-guo, XIE Yun-qiu, ZHANG Cheng, et al. Tracing test in corrosional hill area[J]. Carsologica Sinica, 2000, 19(4):366-371.
- [9] 咸云尚.岩溶水示踪理论与应用研究[D].南京:河海大学,2006:2-4.
XIAN Yun-shang. Study of the groundwater tracing and its application in karst area[D]. Nanjing: Hohai University, 2006:2-4.
- [10] 杨剑明,张兆干,王祥,等.贵州普定后寨地下河流域地下含水空间结构特征[J].中国岩溶,1996,15(3):246-252.
YANG Jian-ming, ZHANG Zhao-gan, WANG Xiang, et al. The feature of aquifer spatial structure of Houzhai underground watershed, Pudding, Guizhou[J]. Carsologica Sinica, 1996, 15(3):246-252.
- [11] 汪进良,姜光辉,侯满福.自动化监测电导率在盐示踪试验中的应用[J].地球学报,2005,26(4):371-374.
WANG Jin-liang, JIANG Guang-hui, HOU Man-fu. Application of electric conductivity to the tracing test[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2005, 26(4):371-374.
- [12] 刘再华,Chris Groves,袁道先,等.水-岩-气相互作用引起的水化学动态变化研究——以桂林岩溶试验场为例[J].水文地质工程地质,2003,30(4):13-18.
LIU Zai-hui, Chris Groves, YUAN Dao-xian, et al. Study on the hydrochemical variations caused by the water-rock-gas interaction - an example from the Guilin karst experimental site[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2003, 30(4):13-18.
- [13] 王秉忱,杨天行,王宝金,等.地下水污染地下水水质模拟方法[M].北京:北京师范大学出版社,1985:157-180.
WANG Bing-chen, YANG Tian-xing, WANG Bao-jin, et al. Groundwater pollution and the methods of groundwater quality simulation[M]. Beijing: Beijing Normal University Press, 1985:157-180.