

## 基于广义径向流模型的非均质孔隙含水层井流试验分析

邓祺文, 陈刚, 郑可, 施雯, 胡成

### Pumping tests analyses of a heterogeneous pore aquifer based on the Generalized Radial Flow model

DENG Qiwen, CHEN Gang, ZHENG Ke, SHI Wen, and HU Cheng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202106029>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 上新世红土微观结构参数与渗透系数的变化关系研究

A study of the relationship between the coefficient of permeability and microstructure of the Pliocene laterite

杨玉茹, 李文平, 王启庆 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 153-160

#### 颗粒级配与孔隙比对粗粒土渗透系数的影响

Effects of gradation and void ratio on the coefficient of permeability of coarse-grained soil

丁瑜, 饶云康, 倪强, 许文年, 刘大翔, 张恒 水文地质工程地质. 2019, 46(3): 108-108

#### 利用电导率测井与压水试验联合评价岩体渗透性的方法

Method of evaluating the permeability of rock mass by the combination of packer test and flowing fluid electrical conductivity log

张必昌, 胡成, 陈刚, 张, 段丹丹 水文地质工程地质. 2019, 46(3): 62-62

#### 非均匀多孔介质等效渗透率的普适表达式

A universal expression of the equivalent permeability of heterogeneous porous media

张东, 刘晓丽, 王恩志 水文地质工程地质. 2020, 47(4): 35-42

#### 荷载条件下原状与重塑泥岩渗透性试验研究

An experimental study of the permeability of undisturbed and remolded mudstones under the loading condition

王炳忠, 王起才, 张戎令, 薛彦瑾, 崔晓宁, 卓彬 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 123-123

#### 基于相关指标的裂隙岩体渗透系数估算模型研究

A model for estimating hydraulic conductivity of fractured rock mass based on correlation indexes

王玮, 钱家忠, 马雷, 王德健, 马海春, 赵卫东 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 82-89



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202106029

邓祺文, 陈刚, 郑可, 等. 基于广义径向流模型的非均质孔隙含水层井流试验分析 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(2): 17-23.  
DENG Qiwen, CHEN Gang, ZHENG Ke, *et al.* Pumping tests analyses of a heterogeneous pore aquifer based on the Generalized Radial Flow model[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(2): 17-23.

## 基于广义径向流模型的非均质孔隙含水层井流 试验分析

邓祺文, 陈刚, 郑可, 施雯, 胡成  
(中国地质大学(武汉)环境学院, 湖北武汉 430074)

**摘要:** Theis 模型、Dupuit 模型等经典井流模型分析非均质含水层井流试验数据有一定的局限性, 获取的参数不适合表征非均质含水层特性。而 GRF 模型可以获取含水层流动特性的数据。相比于 Theis 模型、Dupuit 模型, GRF 模型更能表征非均质含水层特性。以黄石东湖新村棋盘洲长江大桥的抽水试验数据为例, 采用 Theis 模型和 GRF 模型计算含水层渗透系数, 结合实际水文地质条件, 对比分析不同方法计算的水文地质参数, 并计算含水层水流维数和表观压力传导系数 ( $K_f/S_{sf}$ )。结果表明: 研究区含水层为细砂夹条带状黏土透镜体的非均质含水层, 采用 GRF 模型计算结果更符合实际情况, 渗透系数为  $4.09 \times 10^{-3}$  cm/s; 含水层水流维数为 1.61, 地下水为双线性流动状态, 含水层对抽水试验的响应主要受黏土条带控制; 观测井和抽水主井的  $K_f/S_{sf}$  呈非线性相关, 进一步验证了含水层的非均质性。在非均质孔隙含水层中, 应用多孔联合非稳定 GRF 井流试验方法不仅能确定水文地质参数, 并且能丰富对含水层特性的认知。

**关键词:** 非均质孔隙介质; 抽水试验; 渗透系数; 广义径向流模型; 水流维数

中图分类号: P641.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2022)02-0017-07

## Pumping tests analyses of a heterogeneous pore aquifer based on the Generalized Radial Flow model

DENG Qiwen, CHEN Gang, ZHENG Ke, SHI Wen, HU Cheng

(School of Environmental Studies, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China)

**Abstract:** Classical models such as the Theis model and Dupuit model have certain limitations in analyzing pumping test data of heterogeneous aquifers, and the obtained parameters are not suitable for characterizing the heterogeneous aquifers. The GRF model, however, can obtain the data of flow characteristics of aquifers, which can better characterize the characteristics of heterogeneous aquifers than the Theis model and Dupuit model do. Based on the pumping test data of the Qianchenzhou Yangtze River Bridge in East Lake New Village of Huangshi, the Theis model and GRF model are used to calculate the aquiferous water flow dimension and the apparent hydraulic diffusion coefficient ( $K_f/S_{sf}$ ), and the hydrological geological parameters calculated by different methods are combined with the actual hydrological geological conditions. The results show that the

收稿日期: 2021-06-18; 修订日期: 2021-08-14

投稿网址: [www.swdzcgdz.com](http://www.swdzcgdz.com)

基金项目: 国家自然科学基金项目(41772259)

第一作者: 邓祺文(1997-), 女, 硕士研究生, 主要从事地下水数值模拟研究。E-mail: [1459018388@qq.com](mailto:1459018388@qq.com)

通讯作者: 胡成(1976-), 男, 副教授, 硕士研究生导师, 主要从事地质环境模拟、评价及 GIS 技术的专业应用、水文地质模拟研究。

E-mail: [hu\\_cheng@cug.edu.cn](mailto:hu_cheng@cug.edu.cn)

aquifer in the study area is a heterogeneous aquifer with fine sand intercalated with banded clay lens, so it is more reasonable to use the GRF model to calculate the parameters. The coefficient of permeability is  $4.09 \times 10^{-3}$  cm/s, and the flow dimension is 1.61. The flow regime is equivalent to the bilinear one, and the aquifer response to pumping is governed by the clay strip. The non-linear correlation of  $K_f/S_{sf}$  between the observation wells and pumping wells further confirms the heterogeneity of the aquifers. In the heterogeneous pore aquifers, the application of the porous combined unstable GRF well flow test method can not only determine hydrogeological parameters, but also enrich the cognition of aquifer characteristics.

**Keywords:** heterogeneous porous medium; pumping test; coefficient of permeability; GRF model; flow dimension

多孔介质含水层一般表现出非均质性。由明宇<sup>[1]</sup>研究表明冲洪积扇含水层非均质性主要受水动力、沉积结构、地形坡度和距离 4 方面的影响。水力层析法能有效识别非均质含水层参数<sup>[2]</sup>, 林加定<sup>[3]</sup>基于水力层析法刻画冲洪积扇含水层水文地质结构, 获得含水层渗透系数空间分布。

Theis 模型、Dupuit 模型等经典模型分析井流试验时通常假定含水层是均质、各向同性、等厚且水平分布<sup>[4]</sup>, 但由于天然多孔介质含水层较为复杂, 并不完全符合理想模型的假定条件, 若利用理想化模型对非均质含水层井流试验进行分析, 计算得到的水文地质参数可能存在较大误差<sup>[5]</sup>。

Barker<sup>[6]</sup>提出“广义径向流”模型(GRF)解释裂隙非均质含水层系统井流试验, 在裂隙岩体水流维数及渗透系数求解方面得到了广泛的应用。李金轩等<sup>[7]</sup>采用广义径向流模型分析压水试验数据, 分析裂隙岩体几何特征和水力学参数, 并比较标准曲线比拟法和直线图解法对分析压水试验的适用性。Bangoy 等<sup>[8]</sup>利用观测井和抽水井降深时间的双对数曲线分析流动系统的流动维数特征并描述含水层参数各向异性, 采用  $ds/d\ln t - \lg dt$  半对数导数曲线的直线拟合法计算地下水流动分形维数和水文地质参数。Rafini 等<sup>[9]</sup>对不同含水层之间的抽水试验响应进行研究, 假设水流维数为非稳定维数, 采用数值法对研究区渗透性进行预测。Kuusela-Lahtinen 等<sup>[10]</sup>对水流维数表征裂隙岩体水力特征进行研究, 研究证明  $n=2 \sim 2.5$  时, 水流维数与裂隙相关性的相关性较为明显; Rafini 等<sup>[11]</sup>研究表明在一个特定的时间段内, 含水层对抽水的响应主要受非相交断层或条带的控制, 即水流维数为 1.5(地下水流动表现为双线性流动)。Doughty 等<sup>[12]</sup>研究证明具有中等程度的非均质性的稳定渗透性场的水流维数为 2。Verbovsek<sup>[13]</sup>研究了白云岩含水层中水流维度与含水层特性的关系, 研究证明水流维数与含水

层岩性相关性较高, 与含水层渗透系数相关性较低。Bourdet 等<sup>[14]</sup>提出在石油领域绘制压力导数  $ds/d\lg t$  曲线。Giese 等<sup>[15]</sup>研究了喀斯特地貌对水流维数的影响, Sui 等<sup>[16]</sup>, Beauheim 等<sup>[17]</sup>在边界条件对水流维数的影响做了相关研究, Ferroud 等<sup>[18]</sup>综述研究了水流维数的研究现状, 总结分析了水流维数的特性, Doughty<sup>[19]</sup>通过数值模拟方法研究了裂隙介质水流维数的特征。Tiab 等<sup>[20]</sup>, Dewandel 等<sup>[21]</sup>, Avci 等<sup>[22]</sup>, Xiao 等<sup>[23]</sup>采用导数分析方法解析试井试验数据。导数分析方法对压降的微小变化更为敏感, 得到的结果能更好地反映地下水流动状态。Le Borgne 等<sup>[24]</sup>研究证明含水层导水系数  $T=b^{3-n}K$  和储水系数  $S=b^{3-n}S_0$  值与水流维数有关。

本文利用 Theis 模型和 GRF 模型计算含水层渗透系数, 采用 GRF 模型计算含水层水流维数, 分析含水层水力特性, 验证广义径向流模型在非均质多孔介质含水层抽水试验的适用性。

## 1 研究区概况

研究区位于湖北省黄石市阳新县东湖新村内。其为冲洪积平原, 地形起伏较小, 地势宽阔、较平坦。含水层主要受到大气降水以及侧向径流补给, 地下水向河流排泄。

研究区含水层覆盖层主要为第四系全新统冲洪积( $Q_4^{al+pl}$ )粉质黏土, 局部含细砂等; 下伏基岩主要为泥质粉砂岩、泥岩, 含水层岩性主要为细砂、粉砂、卵石, 岩层内含黏土透镜体夹层, 见图 1。

在场地开展多孔联合非稳定抽水试验, 在抽水主井分别进行三次降深抽水试验, 记录附近观测井的水位变化。在研究区布设 2 口抽水主井及 3 口观测井, 抽水试验的井点布置见图 2。

共进行 2 组抽水试验, 每组试验设计 3 次不同降深的非稳定抽水试验, 试验设计降深及抽水流量数据见表 1。

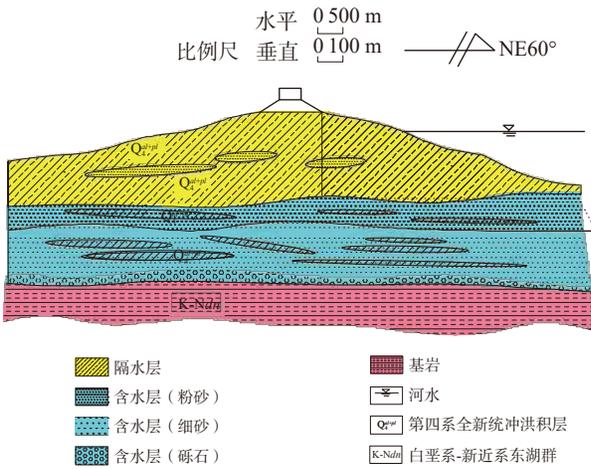


图 1 黄石东湖新村水文地质剖面  
Fig. 1 Hydrogeological profile near Huangshi Donghu new village

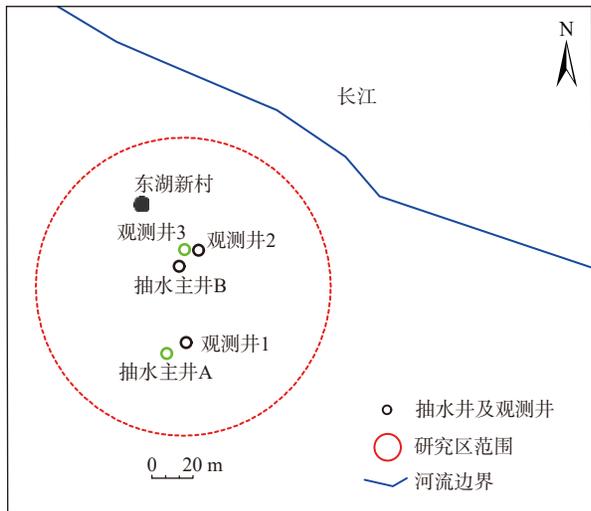


图 2 抽水试验井点布设示意图  
Fig. 2 Layout of the pumping test wells

表 1 抽水试验设计降深

Table 1 Design drawdown of the pumping test

孔号	水位埋深/m	水位降深/m	抽水流量 $Q/(m^3 \cdot d^{-1})$
主井A	7.02	5.20	227.52
	6.63	8.07	606.24
	6.90	12.70	772.08
主井B	8.43	4.98	309.12
	8.43	6.73	394.32
	8.32	9.33	463.92

## 2 研究方法

### 2.1 广义径向流流动方程

广义径向流模型满足以下假设:

- (1)地下水为径向流;
- (2)达西定律适用于整个地下水系统;

- (3)抽水井为一个半径为  $r_w$ , 储量为  $S_w$  的  $n$  维球体;
- (4)具有无限小的表皮因子;
- (5)忽略裂隙中压力计的大小和存储容量。

广义径向流模型描述渗流的连续方程为:

$$S_s \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{K}{r^{n-1}} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^{n-1} \frac{\partial h}{\partial r} \right) \quad (1)$$

式中:  $r$ ——过水断面到抽水井距离;

$h$ ——水头;

$S_s$ ——降深。

广义径向流模型的参数水流维数( $n$ )的物理意义为: 流场中过水断面的面积  $A$  与距源(汇)项距离  $r$  的方次关系。因此对于线性流( $n=1$ )时, 过水断面面积不随源距离的变化而变化( $A_c \propto r^0$ ); 圆柱流( $n=2$ )的过水断面面积与抽水井距离成线性相关; 三维球面流( $n=3$ )过水断面面积与抽水井距离的相关性表示为  $A_c \propto r^2$ 。

### 2.2 含水层水流维数分析方法

Bangoy 等<sup>[8]</sup>依据 Barker 的广义径向流模型, 提出降深与时间的关系式:

$$s(r, t) = \frac{Qr^{2N}}{4\pi^{1-N}K_f b^{3-n}} \Gamma(-N, u) \quad N < 1 \quad (2)$$

$$u = S_{sf} r^2 / 4K_f t \quad (3)$$

$$N = 1 - n/2$$

式中:  $s(r, t)$ ——抽水井在  $t$  时刻, 距离为  $r$  的降深;

$b$ ——含水层范围;

$Q$ ——抽水速率;

$\Gamma(-N, u)$ ——不完全  $\gamma$  函数;

$S_{sf}$ ——裂隙介质储水系数;

$K_f$ ——裂隙介质渗透系数。

不考虑早期近井效应, 利用 Barker 后期渐近形式, 可以得到降深和时间的关系:

$$s(r, t) = \frac{Q}{4\pi^{1-N}K_f b^{3-n}N} \left[ \left( \frac{t}{E} \right)^N - \Gamma(1-N)r^{2N} \right] \quad (4)$$

对式(4)两边取对数,  $\lg s - \lg t$  是一条斜率为  $N$  的直线, 绘制实测数据的双对数曲线, 此实测数据曲线在一定区间呈直线, 不考虑早期近井效应, 对  $\lg s - \lg t$  曲线直线段进行拟合, 计算直线段斜率, 通过  $N=1-n/2$ , 计算含水层水流维数。

### 2.3 含水层非均质性分析方法

根据 Bangoy 等<sup>[8]</sup>的研究, 当  $t=t_0$  时, 式(4)可以表示为:

$$s(r, t_0) = A(r) = A_0 - Br^{2N} \quad (5)$$

$$A_0 = \frac{Q}{4\pi^{1-N}K_f b^{3-n}N} \left(\frac{t}{E}\right)^N \quad (6)$$

$$B = A_0 \left(\frac{t}{E}\right)^N \Gamma(1-N) \quad (7)$$

$$E = S_{sf}/4K_f \quad (8)$$

式中:  $A$ ——抽水一段时间后的降深;

$A_0$ —— $r=0$  时  $A$  的值;

$B$ ——直线  $A=f(r^{2N})$  的斜率。

$t=t_0$  时,  $s(r,t_0)$  和  $r^{2N}$  是斜率为  $-B$ 、截距为  $A_0$  的直线。通过直线  $A=f(r^{2N})$ , 拟合得到  $A_0$  和  $B$ , 可以确定表观压力传导系数  $K_f/S_{sf}$  与  $K_f b^{3-n}$  的值。对于给定的流动维数,  $K_f/S_{sf}$  仅取决于  $A_0/B$ :

$$K_f S_{sf} = \frac{1}{4t_0[(A_0/B)\Gamma(1-N)]^{1/N}} \quad (9)$$

$$K_f b^{3-n} = \frac{Q\Gamma(1-N)}{4\pi^{1-N}B} \quad (10)$$

典型二维多孔介质的含水层,  $K_f/S_{sf}$  可以解释为表观压力传导系数, 描述在任意水流维数的裂隙介质中进行抽水试验时观测井的响应。对于  $K_f/S_{sf}$  恒定的

观测井, 其对应的  $A$  值为一条直线, 即  $A=f(r^{2N})$ ;  $A_0/B$  比值不同的两条直线表示两个区域的  $K_f/S_{sf}$  值不同。所以, 如果某一区域内观测井的代表性点  $(r^{2N}, A)$  为非线性, 则可以得出该区域相对于参数  $K_f/S_{sf}$  是非均质的。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 含水层水流维数

研究区浅层含水层岩石夹黏土透镜体, 将黏土透镜体概化为弱透土层, 故地下水不是充满整个含水层, 而水流维数  $n$  能表征水流充满含水层空间的程度<sup>[20,25]</sup>, 使用水流维数能较为准确地描述非均质介质中地下水的流动状态。

绘制抽水井和观测井的降深和时间的双对数曲线(图 3), 由于抽水试验时长有限, 舍弃前期受到近井效应影响的试验数据及后期受到河流边界影响逐渐趋于稳定的数据, 选取试验中间部分直线段数据进行拟合, 得到直线斜率为  $N=1-n/2$ 。计算含水层水流维数见表 2。

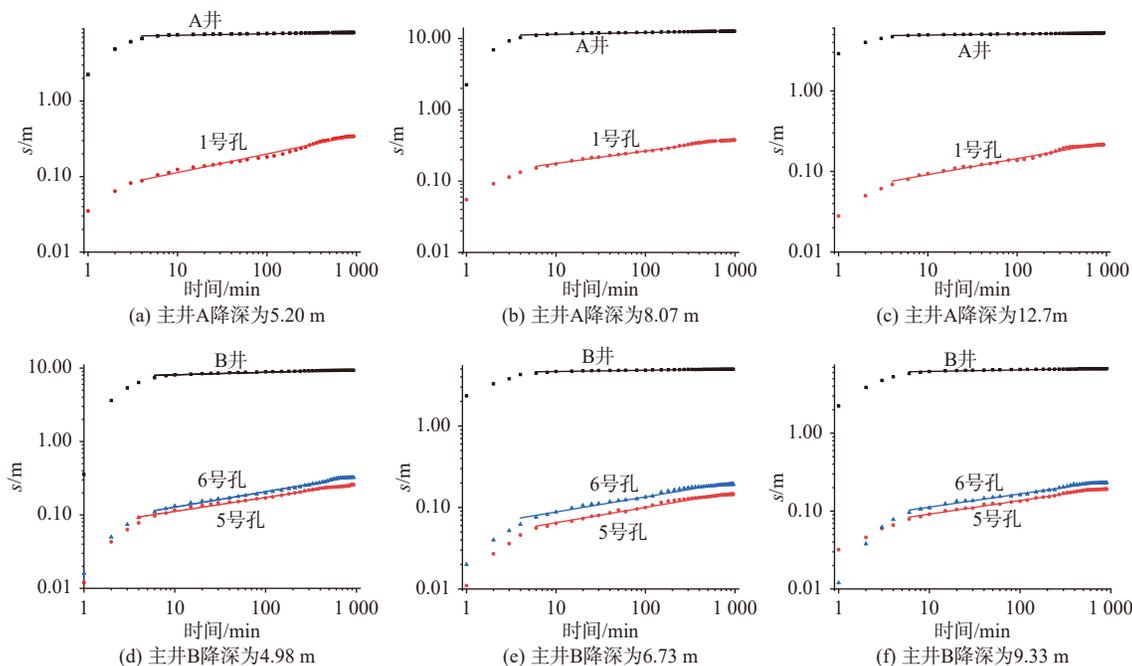


图 3 多次定降深抽水试验的  $\lg s-\lg t$  曲线

Fig. 3  $\lg s-\lg t$  curve of the multiple constant drawdown pumping tests

研究区含水层部分边界为河流边界, 为研究河流边界对含水层水流维数的影响, 推导定水头边界条件下抽水试验的广义径向流模型流动方程:

当  $u$  趋近于 0 时,  $\Gamma(-N, u)-u$  趋近于直线, 这种情

况式(2)可以表示为:

$$s(r, t) = \frac{Q_0}{4\pi^{1-N}K_f b^{3-n}N} \left[ \left(\frac{4K_f t}{S_{sf}}\right)^N - \Gamma(1-N)r^{2N} \right], N \neq 0 \quad (11)$$

表 2 含水层水流维数

Table 2 Water flow dimension of the aquifer

抽水—观测系统	主井降深/m	含水层水流维数 $n$	水流维数平均值
主井A 观测井1	5.20	1.51	1.61
	8.07	1.65	
	12.70	1.60	
主井B 观测井2 观测井3	4.98	1.58	
		1.62	
	6.73	1.63	
		1.63	
	9.33	1.66	
		1.65	

式中:  $Q_0$ ——定流量抽水速率。

式(5)积分可得:

$$s(r, t) = \frac{Q_0}{4\pi K_f b} \left[ \ln \frac{4K_f t}{S_{sf} r^2} - 7 \right] \quad n = 2 \quad (12)$$

引入定流量边界后, 抽水井降深方程可写为:

$$s(r, t) = \frac{Q_0 r^{2N}}{4\pi^{1-N} K_f b^{3-n}} \left[ \Gamma \left( -N, \frac{S_{sf} r_1^2}{4K_f t} \right) - \Gamma \left( -N, \frac{S_{sf} r_2^2}{4K_f t} \right) \right] \quad (13)$$

当  $u$  趋近于 0 时:

$$s(r, t) = \frac{Q_0}{4\pi K_f b} \left[ \left( \ln \frac{4K_f t}{S_{sf} r_1^2} - 7 \right) - \left( \ln \frac{4K_f t}{S_{sf} r_2^2} - 7 \right) \right], n = 2 \quad (14)$$

$$s(r, t) = \frac{Q_0}{2\pi K_f b} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad n = 2 \quad (15)$$

根据图 3 可以看出, 由于河流边界对抽水试验的影响, 地下水降深达到稳定的速度较快, 抽水试验降

深数据后期呈逐渐平稳趋势, 直线斜率较无限含水层抽水试验略小, 计算得到的含水层水流维数比无限含水层大。研究区含水层平均水流维数为 1.61, 表明含水层对抽水试验的响应主要受条带状黏土透镜体控制, 为双线性流。含水层水流维数计算值验证了含水层的非均质性。

### 3.2 含水层非均质性

对抽水主井 B 和观测井 2、3 不同降深试验数据的  $\lg s - \lg t$  曲线进行直线拟合, 计算直线截距, 绘制截距  $A$  与观测井距抽水井距离 ( $r^{2N}$ ) 的关系图(图 4)。抽水主井 B 与观测井之间的表观压力传导系数并不是线性相关, 可以表明抽水主井 B、观测井 2、观测井 3 所在区域的含水层是非均质的。

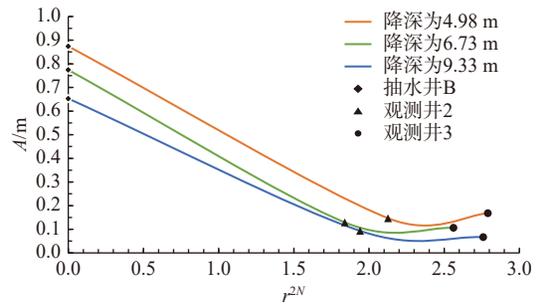


图 4 含水层非均质性评价

Fig. 4 Evaluation of the aquifer heterogeneity

### 3.3 含水层渗透系数计算

采用 AQTESOLV Pro 4.5demo 软件<sup>[26]</sup>, 分别应用广义径向流模型和 Theis 模型对研究区抽水试验数据进行拟合, 得到的含水层渗透系数见表 3。

表 3 不同方法计算的渗透系数

Table 3 Coefficient of permeability calculated by different methods

抽水—观测系统	主井降深/m	渗透系数/( $10^{-4} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )		平均渗透系数/( $10^{-4} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	
		Theis模型	GRF模型	Theis模型	GRF模型
主井A 观测井1	5.20	2.20	89.9	2.47	40.9
	8.07	2.97	47.0		
	12.7	1.54	13.5		
主井B 观测井2 观测井3	4.98	2.69	75.9		
		2.37	18.8		
	6.73	3.10	60.3		
		2.40	23.6		
	9.33	3.00	24.5		
		1.97	14.3		

由表 3 可知, GRF 模型计算渗透系数为  $4.09 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ , Theis 模型计算渗透系数为  $2.47 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ 。Theis 模型将含水层视为均质介质, 分析渗透系数时未考虑含水层非均质性, 其计算的渗透系数与 GRF 模型

计算的相比存在一定误差。在非均质孔隙含水层, Theis 模型计算所得渗透系数存在一定误差, 采用 GRF 模型计算的渗透系数较为符合场地实际情况。

## 4 结论

本文以黄石棋东湖新村含水层为研究对象,进行多孔联合非稳定抽水试验,利用广义径向流模型计算含水层水流维数,并利用 AQTESOLV 软件的 Theis 模型和 GRF 模型拟合计算研究区含水层渗透系数,结合实际的地质和水文地质条件,最终确定符合实际的含水层水文地质参数:

(1) 绘制降深和时间的双对数曲线,依托 GRF 模型计算得到研究区含水层水流维数( $n$ )为 1.61,含水层对抽水试验的响应主要受条带介质控制,为双线性流;研究区含水层抽水主井和各观测井间的表观压力传导系数呈非线性相关,验证了研究区含水层的非均质性。

(2) 通过 Theis 和 GRF 方法计算,结合研究区实际地质条件分析,含水层渗透系数为  $4.09 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ ,试验结果为棋盘洲长江大桥工程降水、防渗等工程提供基础数据。

(3) 在非均质性含水层中(如冲洪积成因的二元结构含水层)计算含水层渗透系数使用广义径向流模型较为符合实际情况。

(4) 在非均质含水层的水文地质条件调查中,可以通过抽水井—观测井多井联合非稳定抽水试验,获取非均质含水层的水文地质参数,分析含水层特性。

### 参考文献 (References):

- [ 1 ] 由明宇. 大理隐仙溪冲洪积扇含水层非均质性分布规律研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2016. [ YOU Mingyu. Study on the aquifer heterogeneity distribution of an alluvial-proluvial fan in Dali Yinxian stream, Yunnan [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2016. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 2 ] 赵瑞珏, 毛德强, 刘再斌, 等. 基于水力层析法的某煤矿承压含水层叠加放水试验分析[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(1): 1 - 9. [ ZHAO Ruijue, MAO Deqiang, LIU Zaibin, et al. An analysis of sequential water releasing tests of the confined aquifers in a coal mine based on hydraulic tomography[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(1): 1 - 9. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 3 ] 林加定. 非均质含水层水力层析扫描及其在巴音河冲洪积扇的应用[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2019: 1 - 108. [ LIN Jiading. Hydraulic tomography on heterogenous aquifer and its application in the Bayin River Alluvial Fan[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2019: 1 - 108. (in Chinese with English

abstract) ]

- [ 4 ] 沙俊强, 王为治, 欧阳平, 等. 长江底隧道抽水试验及水文地质参数计算[J]. 江苏建筑, 2017(3): 56 - 59. [ SHA Junqiang, WANG Weizhi, OUYANG Ping, et al. Pumping tests and hydrogeological parameters calculation for the surrounding rocks of conveyance tunnel under the Yangtze River[J]. Jiangsu Construction, 2017(3): 56 - 59. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 5 ] 张东, 刘晓丽, 王恩志. 非均匀多孔介质等效渗透率的普适表达式[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(4): 35 - 42. [ ZHANG Dong, LIU Xiaoli, WANG Enzhi. A universal expression of the equivalent permeability of heterogeneous porous media[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(4): 35 - 42. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 6 ] BARKER J A. A generalized radial flow model for hydraulic tests in fractured rock[J]. Water Resources Research, 1988, 24(10): 1796 - 1804.
- [ 7 ] 李金轩, 余修日. 低渗透裂隙岩体压水试验资料分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(9): 1476 - 1480. [ LI Jinxuan, YU Xiuri. Analysis of constant-pressure well test data for low-permeability fractured rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(9): 1476 - 1480. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 8 ] BANGROY L M, BIDAUX P, DROGUE C, et al. A new method of characterizing fissured media by pumping tests with observation wells[J]. Journal of Hydrology, 1992, 138(1/2): 77 - 88.
- [ 9 ] RAFINI S, CHESNAUX R, FERROUD A. A numerical investigation of pumping-test responses from contiguous aquifers[J]. Hydrogeology Journal, 2017, 25(3): 877 - 894.
- [ 10 ] KUUSELA-LAHTINEN A, NIEMI A, LUUKKONEN A. Flow dimension as an indicator of hydraulic behavior in site characterization of fractured rock[J]. Groundwater, 2003, 41(3): 333 - 341.
- [ 11 ] RAFINI S, LAROCQUE M. Insights from numerical modeling on the hydrodynamics of non-radial flow in faulted media[J]. Advances in Water Resources, 2009, 32(8): 1170 - 1179.
- [ 12 ] DOUGHTY C, KARASAKI K. Flow and transport in hierarchically fractured rock[J]. Journal of Hydrology, 2002, 263(1/2/3/4): 1 - 22.
- [ 13 ] VERBOVŠEK T. Influences of aquifer properties on flow dimensions in Dolomites[J]. Groundwater, 2009, 47(5):

- 660 – 668.
- [14] BOURDET D, WHITTLE T M, DOUGLAS A A, et al. A new set of type curves simplifies well test analysis[J]. *World Oil*, 1983, 196(6): 877 – 894.
- [15] GIESE M, REIMANN T, LIEDL R, et al. Application of the flow dimension concept for numerical drawdown data analyses in mixed-flow Karst systems[J]. *Hydrogeology Journal*, 2017, 25(3): 799 – 811.
- [16] SUI W B, MOU J Y, BI L F, et al. New flow regimes for well near constant pressure boundary[C]//All Days April 15-18, 2007. Buenos Aires: Argentina SPE, 2007: 1 – 12.
- [17] BEAUHEIM R L, ROBERTS R M. Flow-dimension analysis of hydraulic tests to characterize water-conducting features[C]//Nea Workshop on Water-conducting Features in Radionuclide Migration. Barcelona: GEOTRAP Project Workshop Proceedings, 1998: 1 – 10.
- [18] FERROUD A, RAFINI S, CHESNAUX R. Using flow dimension sequences to interpret non-uniform aquifers with constant-rate pumping-tests: a review[J]. *Journal of Hydrology*, 2019(2): 100003.
- [19] DOUGHTY C. Generating one-column grids with fractal flow dimension[J]. *Computers & Geosciences*, 2017, 108: 33 – 41.
- [20] TIAB D. Analysis of pressure derivative data of hydraulically fractured wells by the Tiab's Direct Synthesis technique[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2005, 49(1/2): 1 – 21.
- [21] DEWANDEL B, LACHASSAGNE P, ZAIDI F K, et al. A conceptual hydrodynamic model of a geological discontinuity in hard rock aquifers: Example of a quartz reef in granitic terrain in South India[J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 405(3/4): 474 – 487.
- [22] AVCI C B, ŞAHİN A U, ÇİFTÇİ E. A new method for aquifer system identification and parameter estimation[J]. *Hydrological Processes*, 2013, 27(17): 2485 – 2497.
- [23] XIAO L, XU Y X. Diagnostic analysis of pumping tests using derivative of  $dlgs/dlgt$  with case study[J]. *Ground water*, 2014, 52 (Sup 1): 208 – 217.
- [24] LE BORGNE T, BOUR O, DE DREUZY J R, et al. Equivalent mean flow models for fractured aquifers: Insights from a pumping tests scaling interpretation[J]. *Water Resources Research*, 2004, 40(3): W03512.
- [25] 王俊智, 李清波, 王贵军, 等. 近水平层状坝基岩体渗透结构及其工程意义[J]. *水文地质工程地质*, 2022, 49(1): 12 – 19. [WANG Junzhi, LI Qingbo, WANG Guijun, et al. Permeability structure of the horizontally-stratified dam foundation rock mass and its engineering significance[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(1): 12 – 19. (in Chinese with English abstract)]
- [26] DUFFIELD G M. AQTESOLV for windows version 4.5 user's guide[M]. Reston: HydroSOLVE Inc, 2007.

编辑: 张若琳