

doi:10.3799/dqkx.2017.060

江汉平原典型含水层水文地质参数反演

陈 晨, 文 章*, 梁 杏, 李 霞

中国地质大学环境学院, 湖北武汉 430074

摘要:含水层参数对于定性分析区域地下水资源评价、数值模拟及预报、开发利用与保护及科学管理具有重要意义,而江汉平原水文地质参数求解的研究却相对较少。2015年江汉平原1:50 000水文地质调查项目完成杨林尾图幅与陆溪口图幅,选择杨林尾图幅和陆溪口图幅中的4个代表性钻孔,分别做了3组抽水试验和一组压水试验,对抽水数据使用Dupuit公式法结合抽水稳定阶段数据求解含水层参数,同时利用Aquifer Test软件中Theis标准曲线法、直线图解法对抽水试验中非稳定条件下抽水数据对含水层参数求解,得到孔隙水含水层渗透系数及弹性给水度;利用压水试验工程规范求解基岩裂隙含水层的渗透系数,探讨了利用非稳定抽水试验条件下求解含水层参数方法的可行性及该方法的优势。计算结果表明:杨林尾镇浅层(20.2~64.55 m)含水层渗透系数为0.075 m/d,弹性给水度为 5.8×10^{-2} ;深层(138~160 m)含水层渗透系数为9.89 m/d,弹性给水度为 2.3×10^{-5} ;陆溪口镇浅层(19.4~36.4 m)含水层渗透系数1.26 m/d,弹性给水度为 1.1×10^{-1} ;基岩渗透系数为0.012 m/d。通过结果对比分析发现对于单孔非稳定抽水试验,对前期水位降深数据筛选分析,同样可以利用非稳定井流理论反演含水层参数,结果比较可靠。

关键词:抽水试验;压水试验;解析法;水文地质。

中图分类号: P641.6

文章编号: 1000-2383(2017)05-0727-07

收稿日期: 2016-12-22

Estimation of Hydrogeological Parameters for Representative Aquifers in Jianghan Plain

Chen Chen, Wen Zhang*, Liang Xing, Li Xia

School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: Hydrogeological parameter inversion is very important for the analysis, numerical simulation and forecast, utilization and protection of regional groundwater resource evaluation. However, the relevant researches of Janhan plain are not enough. The Yanglinwei map and the Luxikou map of the Jianghan plain 1:50 000 hydrogeology survey projects were completed in 2015. The widely distributed boreholes had provided reliable information for exploring the local hydrogeological conditions. In this study, pumping test was conducted in three representative boreholes and packer test was conducted in one representative borehole. The software Aquifer Test associated with Theis model and Cooper & Jacob model were used to estimate the aquifer parameters associated with the transient pumping test data. In addition, the Dupuit model was also used to calculate the aquifer parameters with the quasi steady-state pumping test data. Finally, the feasibility and advantages of different methods proposed in this study are also thoroughly discussed. The results show that the hydraulic conductivity of the shallow aquifer in Yanglinwei is 0.075 m/d and the corresponding storage coefficient is 5.8×10^{-2} . The hydraulic conductivity and the storage coefficient of the deep aquifer are 9.89 m/d and 2.3×10^{-5} . The hydraulic conductivity and the storage coefficient of the shallow aquifer in Luxikou are 1.26 m/d and 1.1×10^{-1} . The average hydraulic conductivity of the fractured rocks is 0.012 m/d. It was also found that for a pumping test without an observation well, the selected drawdown data inside the well can also be used to estimate the aquifer parameters and the results are reliable.

Key words: pumping test; packer test; analytical method; hydrogeology.

基金项目:国家自然科学基金项目(No.41372253);中国地质调查局项目(Nos.12120114069301, DD20160255);中央高校基本科研业务费专项资金项目(No.CUG140503)。

作者简介:陈晨(1993—),男,硕士研究生,主要从事地下水数值模拟工作。ORCID:0000-0003-3701-1371.E-mail:frustratedchen@outlook.com

***通讯作者:**文章,ORCID:0000-0001-9672-3219.E-mail:wenz@cug.edu.cn

引用格式:陈晨,文章,梁杏,等,2017.江汉平原典型含水层水文地质参数反演.地球科学,42(5):727—733.

江汉平原位于湖北省中南部的长江中游地区,面积约为 4.6 万 km²,气候属北亚热带温暖湿润气候带,多年平均气温在 16 ℃,多年平均降雨量为 1 100 mm,该平原是伴随构造盆地的沉降所发生的河流相与内陆湖泊相沉积而形成的,地下水资源丰富。江汉平原第四系分布面积广、厚度大、层次全,是湖北省第四系集中发育的地区(康悦林,1987;张玉芬等,2016)。进入第四纪以来,江汉盆地继承了古近纪、新近纪构造运动的特点,在中、新生代内陆河湖相沉积盆地的基础上,仍以沉降为主体,沉积厚度为 200~300 m(王秋良和李长安,2008)。

抽水试验是野外求取含水层参数的重要方法,Neuman(1975)利用抽水试验求取重力释水滞后条件下含水层参数,对于不同地区、不同性质的含水层参数的求解方法也存在多样化(Thrailkill,1988;Christensen *et al.*,2009;刘颖等,2015)。对于含水层参数求解的方法已经比较成熟(薛禹群和朱学愚,1999;Raymond *et al.*,2011)。对于非稳定流抽水试验,目前国内外常采用标准曲线匹配法与直线图解法,如潇湘峰(1987)研究了求解含水层参数的通用标准曲线法;肖明贵等(2003)和郭建青等(2008)研究了直线图解法在非稳定抽水条件下含水层参数求解中应用,陈晓恋等(2016)同时运用解析法与数值法对水电站防渗墙做出效果评价。非稳定流求解含水层参数方法目前主要存在的问题是求解程序过繁,计算精度难以保证(巩彦文等,2008)。对于稳定流抽水试验,常利用裘布衣井流理论进行求参(周志芳等,1999),这也是目前水文地质调查过程中常采用的计算方法。对于稳定井流理论求参,在实际抽水试验过程中需要较长时间,抽水试验成本较高。非稳定流抽水试验和稳定流抽水试验求解含水层参数各有优缺点,需具体问题具体分析。

江汉平原地下水资源丰富,目前国内对于江汉平原区水文相关领域的研究主要集中于水资源保护及可持续发展研究上,曾昭华等(1996)对江汉平原地区地下水资源做了分析评价。然而,关于江汉平原水文地质参数求解的研究却相对较少,求解含水层参数对于定性分析区域地下水资源评价、数值模拟及预报、开发利用与保护及科学管理具有重要意义(聂庆林等,2009)。为解决江汉平原部分地区含水层参数不明的问题,本文在已选取的水文钻孔中进行抽水试验及压水试验,在试验数据的基础上运用多种解析法对不同深度含水层进行参数求解,得到第四系浅层、深层含水层及下伏第三系基岩裂隙层的含水层参数结果范围,为杨林尾图幅及陆溪口图幅覆盖范围地下水评价与利用提供有效的理论依据。

1 研究区概况与试验场地介绍

江汉平原 1:50 000 水文地质调查项目 2015 年地质调查图幅杨林尾图幅及陆溪口图幅位于仙桃市、洪湖市、咸宁市交界范围,其中水文地质钻孔主要分布于仙桃市和洪湖市。洪湖全境属于江汉平原,整体呈南北高、中间低、广阔而平坦的地貌,海拔大多在 23~28 m 之间。仙桃市位于湖北省中部的江汉平原,仙桃市地质结构绝大部分地区为新生代第四系全新世的松散堆积层,仅在沙湖以南地区有第四系晚更新世的松散堆积层。

杨林尾镇地处仙桃东南部,位于武汉、仙桃、洪湖交汇处,东荆河环绕其间(图 1)。陆溪口镇地处于长江中下游南岸,位于陆水河流入长江的交汇处,是嘉鱼、赤壁、洪湖三地交界处。本文所选取代表性水文钻孔 YLW01、YLW02、LXK02,具体分布位置如图 1。剖面起于通顺河,至于王家墩,其中 YLW01、

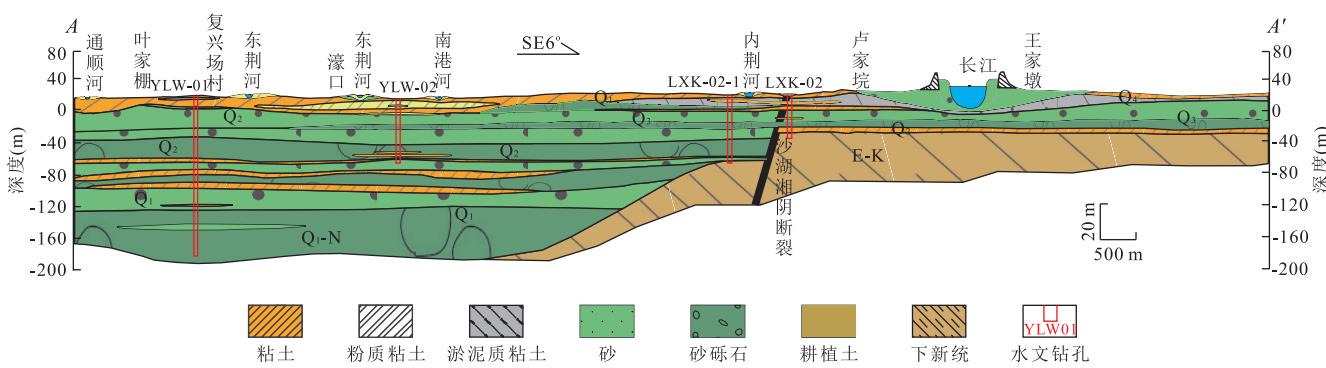


图 1 江汉平原钻孔分布剖面

Fig.1 Locations of the boreholes in Jianghan plain

表 1 杨林尾、陆溪口水文钻孔信息

Table 1 The information of the boreholes in Yanglinwei and Luxikou Town

钻孔编号	位置	孔径(cm)	孔深(m)	滤水管(m)	含水层岩性
YLW01	复兴水厂	33	201.00	138.00~160.00	粗砂、中砂
YLW02	南套村	16	81.00	20.20~64.55	细砂夹少量中砂
LXK01	硚口村	16	50.38	30.38~50.38	第三系灰岩
LXK02	石桥村	16	56.00	19.40~36.40	中砂夹细砂

YLW02 号孔第四系厚约 190 m, 0~20 m 岩性主要为粘土、粉质粘土; 20~100 m 岩性为粘土层、细砂层、粗砂层及砂砾石层交替; 100~180 m 岩性为粗砂、砂砾石层; 180 m 以下揭露第三系, 主要为泥岩、砂岩(隔水底板); LXK02 揭露第三系较早, 80 m 处边揭露基岩。

水文钻孔所在位置地势较为平坦, 覆盖范围较广, 钻孔深度 50~200 m 不等, 揭穿多个含水层, 包括深层(100~200 m)、浅层含水层(0~100 m), 杨林尾、陆溪口图幅具体钻孔信息见表 1。

根据钻孔岩性, 表中水文钻孔滤水管所在含水层上下层均为粘土层, 可近似视为隔水层, 因此在本研究中含水层可近似视为承压含水层, 且地下水的流动方向可近似认为是水平的, 整个含水层垂直剖面都是均匀分布的。

2 野外试验基本情况

本文主要选取(杨林尾图幅和陆溪口图幅(中国地质大学(武汉), 2015, 江汉平原 1:50 000 水文地质调查 杨林尾(H49E012023)图幅—陆溪口(H49E013023)图幅))中 4 个代表性钻孔开展了抽水和压水试验, 其中 YLW02、LXK02 号孔代表第四系浅层含水层, YLW01 号孔代表第四系深层含水层, LXK01 号孔代表第三系灰岩含水层。野外抽水试验过程中, 使用秒表、带标记水桶以 1 min、2 min、5 min、10 min、30 min 为间隔记录抽水过程流量值。试验现场无观测孔, 将抽水井直接作为观测孔处理, 使用自计水位计以 10 s 为间隔记录抽水井水位变化。具体抽水试验过程记录如表 2 所示。

压水试验过程中, 将阻水塞安置在钻杆底部, 阻水塞长为 1 m, 即全部安放于试验段顶部。施加压力, 按照 0.3 MPa、0.6 MPa、1.0 MPa、0.6 MPa、0.3 MPa 分别进行试验, 在实际压水试验过程中, 机器震动会产生压力波动, 造成压力值无法稳定, 因此需实时记录。在每个压力值下通过水表读取流量值, 每隔 5 min 读取一次直至流量相对稳定为止。在试验过程中, 每隔 5 m 为一个压水试段, 重复以上步骤。

3 含水层参数反演

3.1 抽水试验参数反演

对本项目抽水试验数据首先采用 Dupuit 公式法求解含水层参数。其次, 利用 Aquifer Test 软件中标准曲线匹配法和直线图解法获取对应含水层参数。将两种方法求解结果对比, 得到对应含水层参数。

Dupuit 公式法是水文地质调查过程中常用的求取含水层参数方法, 薛禹群和朱学愚(1999)对以稳定流为基础的 Dupuit 公式、影响半径问题以及可持续开采量等问题都有详细的见解。根据 Dupuit 公式, 可知含水层导水系数可以如下计算:

$$T = 0.366 \frac{Q \lg \frac{R}{r_w}}{s_w}, \quad (1)$$

式中: Q 为稳定抽水井涌水量; T 为含水层导水系数; R 为抽水井影响半径; r_w 抽水井半径; s_w 为抽水井中的水头降深。

根据影响半径计算吉哈尔特经验公式(刘璟和李辉, 2012):

$$R = 10s_w \sqrt{K}, \quad (2)$$

表 2 抽水试验过程记录

Table 2 Details of the pumping tests

孔号	开泵时间	停泵时间	初始流量(m^3/d)	稳定流量(m^3/d)	最大降深(m)
YLW01	8:00	11:30	984.0	984.0	5.50
YLW02	10:15	13:50	213.0	122.4	23.50
LXK02	9:00	11:52	285.0	201.6	19.10

表 3 Dupuit 公式法含水层参数反演结果
Table 3 Parameters calculated by Dupuit method

孔号	孔径 r_w (cm)	流量 Q (m^3/d)	含水层厚度 M (m)	降深 s_w (m)	影响半径 R (m)	渗透系数 K (m/d)
YLW01	16.5	984.0	22.00	5.3	164.82	8.98
YLW02	8.0	122.4	44.35	23.5	84.73	0.13
LXK02	9.0	201.6	17.00	19.1	94.47	1.93

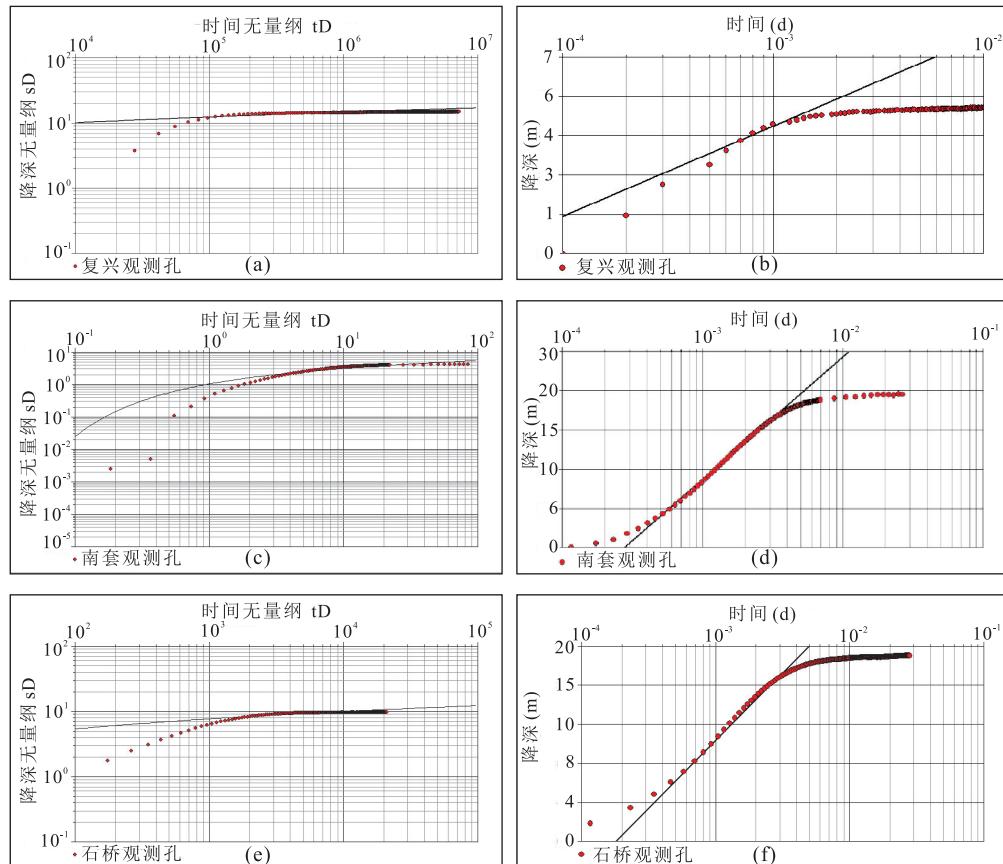


图 2 标准曲线法与直线图解法拟合结果

Fig.2 Result of the type curve matching method and the straight line method

a.YLW01 号孔标准曲线拟合结果;b.YLW01 直线图解法拟合结果;c.YLW02 号孔标准曲线拟合结果;d.YLW02 直线图解法拟合结果;e.LXK02 号孔标准曲线拟合结果;f.LXK02 直线图解法拟合结果

式中: K 为含水层渗透系数.将公式(2)代入公式(1),方程变为只与 K 有关的求解问题,方程求解较为复杂,本文采用试算法求解,在求解过程中,由于 Dupuit 所利用的是最终达到“稳定”阶段的水位数据,因此抽水流量采用最终稳定流量,计算结果如表 3 所示.

本文抽水试验均为无观测孔条件下,以主孔试验数据为基础求解参数,因此,抽水井井储(Jacob, 1947)及表皮效应(Van Everdingen, 1949, 1953)的影响需要在数据处理过程中修正.对于前期非稳定数据,受损井和水泵扬程等影响流量变化较快,因此,对前期变化较快数据进行筛选,剔除部分变化影响较大数据并以 1 min 为一个单位选取抽水量及其

对应降深数据,利用 Aquifer Test 中 Theis 模型求解其对 YLW01、YLW02、LXK02 号孔抽水数据处理,运用 Theis 曲线拟合及 Cooper & Jacob 线性拟合分别求解含水层参数,拟合结果如图 2.

参数拟合过程中,在系统自动拟合的基础上,通过手动微调将数据拟合到最佳形态,参数求解结果如表 4 所示.

3.2 压水试验参数求解

本文压水试验数据采用压水试验工程规范方法,用高压方式把水压入钻孔,根据岩体吸水量计算了解岩体裂隙发育情况和透水性.压水试验利用止水设备把一定长度的钻孔试验段隔离出来,然后固

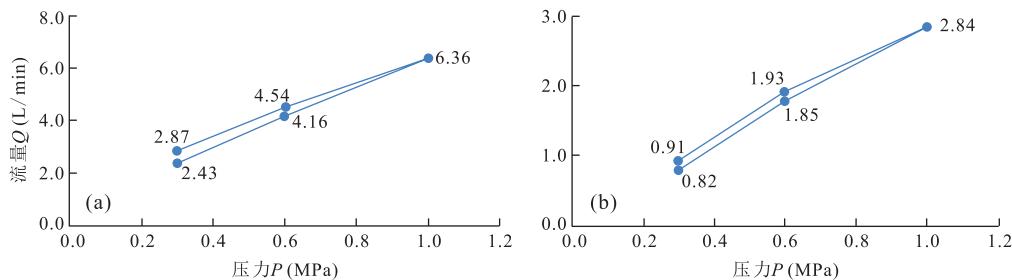


图 3 压水试验 P-Q 曲线

Fig.3 The P-Q curve of packer test

a.LXK01 号孔 40.38~45.38 m 试段压水试验 P-Q 曲线关系; b.LXK01 号孔 35.38~40.38 m 试段压水试验 P-Q 曲线

表 4 非稳定抽水试验数据拟合参数结果

Table 4 Estimated aquifer parameters with the transient pumping test data

孔号	滤水管深(m)	标准曲线拟合结果		线性拟合结果		K 平均值(m/d)	S 平均值
		渗透系数 K(m/d)	弹性给水度 S	渗透系数 K(m/d)	弹性给水度 S		
YLW01	138.00~160.00	9.90	4.55×10^{-5}	11.72	2.40×10^{-6}	10.810	2.3×10^{-5}
YLW02	20.20~64.55	0.03	3.83×10^{-2}	0.02	7.77×10^{-2}	0.025	5.8×10^{-2}
LXK02	19.40~36.40	0.48	1.09×10^{-3}	0.15	1.08×10^{-1}	0.580	1.1×10^{-1}

表 5 岩层渗透系数计算值

Table 5 Results of rock permeability

压力阶段(MPa)	流量(L/min)	试段长度(m)	渗透率(mD)	渗透系数 K(m/d)
0.3	2.37	5.0	0.0227	0.014
0.6	3.85	5.0	0.0183	0.012
1.0	6.36	5.0	0.0182	0.011

定地向这一段钻孔压水,水通过孔壁周围的裂隙向岩体内渗透,最终渗透水量会趋于一个稳定值。根据压水水头试验长度,稳定渗入水量,可以判断岩体透水系数大小。

LXK01 孔揭穿当地第四系,钻孔至第三系灰岩 20 m 深处,裂隙发育一般,按压力变化绘制各阶段流量变化曲线,结果如图 3 所示。

根据一个回次的压水试验图像可知,在按照 0.3 MPa、0.6 MPa、1.0 MPa、0.6 MPa、0.3 MPa 进行压水时,压水流量逐渐趋于稳定,流量变化较小,数据可靠。根据《水利水电工程钻孔压水试验规程》(DL/T 5331-2005)(中华人民共和国水利电力部,1979),计算方法如下:

$$k = \frac{Q}{P \times L}, \quad (3)$$

式中:k 为渗透率,单位:吕荣(Lu),为方便比较,在后续计算中渗透率均换算为国际单位毫达西(mD);Q 为压入流量,单位 L/min;P 为作用于试验段内的全压力,单位 MPa;L 为试验长度,单位 m。

通过压水试验求取水力学参数目前运用最广的

是采用巴布什金公式由吕荣值(Lu)换算得到渗透系数(K)(许光森,1992):

$$K = 0.525k \cdot \lg \frac{al}{r}, \quad (4)$$

式中:a 为换算系数,通常取 0.66;l 为压水试验段长度;r 为钻孔半径.其中,l=5 m,r=0.066 5 m.

计算得到 LXK01 号孔基岩裂隙含水层渗透系数如表 5 所示,由表 5 可知第三系基岩裂隙渗透系数为 0.012 m/d.

4 结论

依托江汉平原 1:50 000 水文地质调查项目,运用不同的含水层参数求解方法,得到研究区域含水层参数(对渗透系数采取平均值),结果表明:杨林尾镇第四系孔隙水深层(138~160 m)含水层水文地质参数,渗透系数为 9.89 m/d,弹性给水度为 2.3×10^{-5} .杨林尾镇浅层(20.2~64.55 m)含水层渗透系数为 0.075 m/d,弹性给水度 5.8×10^{-2} .陆溪口镇浅层(19.4~36.4 m)含水层渗透系数 1.26 m/d,

弹性给水度为 1.1×10^{-1} , 陆溪口镇硚口村研究区基岩裂隙含水层渗透系数为 0.012 m/d 。

对于 Dupuit 公式法求解,方法较为成熟,但其所需条件要求野外抽水试验时间长,且该方法浪费前期大量数据,成本较高,利用效率低。对于利用 Aquifer Test 中 Theis 标准曲线法拟合法求解,可有效利用抽水试验前期数据,节约成本,但在求解过程中随意性较大。两种方法求解过程中均有利弊,在未来利用抽水试验求解含水层参数时选择方法需具体问题具体分析。对比抽水试验两种求解含水层参数方法,利用 Aquifer Test 中 Theis 模型、Cooper & Jacob 模型对非稳定条件下变流量抽水拟合的参数结果与 Dupuit 模型求解结果存在一定误差,但此数据变化并不大,因此是可信的,由此说明在野外抽水试验中,利用非稳定条件下变流量抽水数据同样可以求解含水层参数。这个结果可以帮助大家在以后的野外抽水试验中提供一种新的思路。

5 讨论及意义

在探求杨林尾图幅、陆溪口图幅水文地质参数的过程中,现场试验及求解含水层参数过程均遇到诸多问题值得讨论。

首先,在野外抽水试验中,遇到以下问题:(1)钻井中原有井储水量对于非稳定抽水试验的影响,抽水试验前期抽水量变化较快,因此井中原有水量对参数求解的影响有待分析;(2)观测孔的缺失,对于现场未设置相应观测孔的抽水试验,以单一抽水井数据作为唯一求解含水层参数的数据来源,含水层参数求解准确性缺乏数据支持;(3)抽水泵难以稳定地调节抽水量以达到多个降深落程,无法得到多组实验数据,求解结果缺乏对比对象;(4)依照规范要求,抽水试验时间周期较长,成本较高。这些问题都是实际现场常遇到的问题,在今后的工作中需要探寻合理的方法去解决。

其次,在求解过程中,对于 Aquifer Test 求解,其拟合过程中存在较大随意性,在系统拟合的基础上,人为调节拟合结果,存在误差;并且 Dupuit 公式法求解渗透系数是建立在一定条件下,非稳定抽水试验条件不完全符合,因此存在误差。YLW01 号孔渗透系数比较接近,但浅层 YLW02、LXK02 号孔拟合结果比 Dupuit 公式法结果小,且含水层渗透系数误差均在 20% 以上,分析原因为: YLW01 号孔抽水量稳定在 $984 \text{ m}^3/\text{d}$, 变化微弱, 可视为定流量抽水,Dupuit 公式

法是稳定流求解,因此求解结果接近;然而, YLW02、LXK02 号孔抽水流量都是由大变小的渐变过程,在实际抽水试验过程中, YLW02 抽水井前期水量较大,但在抽水过程持续一段时间后,水量减小逐渐达到稳定状态,因此在数据处理求参过程中,采用最终稳定流量并对于前期数据变化较大的部分数据筛选剔除,在拟合的过程中有意识地将标准曲线与相对变化较小的部分数据相匹配,以提高拟合结果的准确性。LXK02 抽水井位于长江边缘,为基岩裂隙孔,使用流量较小的抽水泵进行试验,在抽水试验开始约 20 min 时基本达到抽水量稳定状态,以此部分数据为基础数据拟合求解含水层参数。此外,影响半径 R 的取值也是参考经验公式求解,因此存在二次误差。此外, Dupuit 公式法求解出含水层影响半径及渗透系数,但无法求解含水层弹性给水度的不足,无法与 Theis 模型拟合求解的弹性给水度进行对比分析。以上问题对于确定研究区含水层参数范围具有一定影响,值得进一步深入研究。

References

- Chen, X.L., Wen, Z., Hu, J.S., et al., 2016. Application of Numerical Simulation and Analytical Methods to Estimate Hydraulic Parameters of Foundation Pit in Hydropower Stations. *Earth Science*, 41(4): 701–710 (in Chinese with English abstract).
- Christensen, S., Zlotnik, V.A., Tartakovsky, D.M., 2009. Optimal Design of Pumping Tests in Leaky Aquifers for Stream Depletion Analysis. *Journal of Hydrology*, 375 (3–4): 554–565. doi:10.1016/j.jhydrol.2009.07.006
- Gong, Y.W., Zhang, L.W., Teng, K., 2008. A New Method of Calculating Hydrological Parameter Based on Some Data of the Unsteady Flow Pumping Water Test. *Groundwater*, 30 (4): 16–17, 26 (in Chinese with English abstract).
- Guo, J.Q., Zhou, H.F., Li, Y., 2008. Multi Straight Line Analytical Method for Estimating Aquifer Parameters from Recovery Test Data. *Rock and Soil Mechanics*, 29(12): 3246–3250 (in Chinese with English abstract).
- Jacob, C.E., 1947. Drawdown Test to Determine Effective Radius of Artesian Well. *Trans. Am. Soc. Civ. Eng.*, 112, 1047–1070.
- Kang, Y.L., 1987. The Stratigraphic Division and Palaeoclimate-Divided Stage of Quaternary Period in Jianghan Plain. *Hubei Geology*, 1(1): 1–10 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J., Li, H., 2012. Method to Calculate Confined Aquifer Hydrogeological Parameter by Single Pumping Test. *West-China Exploration Engineering*, 24(7): 186–188

- (in Chinese).
- Liu, Y., Shao, J. L., Chen, C. S., 2015. Hydrogeological Parameter Estimations for Slug Test in Sloping Confined Aquifer. *Earth Science*, 40(5):925—932 (in Chinese with English abstract).
- Ministry of Water Resources and Electric Power of the People's Republic of China, 1979. Water Pressure Test Code for Water Conservancy and Hydropower Engineering SDJ16-78. Water Resources and Electric Power Press, Beijing (in Chinese).
- Neuman, S. P., 1975. Analysis of Pumping Test Data from Anisotropic Unconfined Aquifers Considering Delayed Gravity Response. *Water Resources Research*, 11(2): 329—342. doi:10.1029/wr011i002p00329
- Nie, Q. L., Gao, G. D., Xue, H. S., et al., 2009. Methods of Determining Parameters of a Confined Aquifer with Pumping Tests. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 36(4):37—40, 49 (in Chinese with English abstract).
- Raymond, J., Therrien, R., Gosselin, L., et al., 2011. A Review of Thermal Response Test Analysis Using Pumping Test Concepts. *Ground Water*, 49(6):932—945. doi:10.1111/j.1745-6584.2010.00791.x
- Thrailkill, J., 1988. Drawdown Interval Analysis: A Method of Determining the Parameters of Shallow Conduit Flow Carbonate Aquifers from Pumping Tests. *Water Resources Research*, 24(8):1423—1428. doi:10.1029/wr024i008p01423
- Van Everdingen, A. F., 1953. The Skin Effect and Its Influence on the Productive Capacity of a Well. *Journal of Petroleum Technology*, 5(6):171—176. doi:10.2118/203—g
- Wang, Q. L., Li, C. A., 2008. Markov Chain in Quaternary Sedimentary Environment of Jianghan Plain. *Geological Science and Technology Information*, 27(1):38—41, 46 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, M. G., Chen, X. J., Liu, B. C., 2003. Hydrogeology Parameter Calculation in Water Gushing Test of Constant Drawdown Yield in Infinite Confined Aquifer Where Gushing in the Main Hole is Observed from Several Other Holes. *Earth Science*, 28(5):575—578 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, X. F., 1987. Application of Microcomputer in Analysing Parameters of Water-Bearing Formation: A Method of Common Standard Curve. *China Karst*, 6(2):101—110 (in Chinese with English abstract).
- Xu, G. S., 1992. Simplified Methods of Calculating Permeability. *Northeast China Water Conservancy and Hydropower*, 10(12):21—23, 7 (in Chinese).
- Xue, Y. Q., Zhu, X. Y., 1999. Groundwater Dynamics. Geological Publishing House, Beijing, 66—72 (in Chinese).
- Zeng, Z. H., 1996. The Exploitation, Utilization and Protection of Groundwater Resource in the Eastern Area of Jianghan Plain. *Resources and Environment in the Yangtze Valley*, 5(4):375—378 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. F., Li, C. A., Sun, X. L., et al., 2016. Sediment Magnetism Characteristics and Its Climatic Environment Significance of Northeast Margin of Jianghan Plain. *Earth Science*, 41(7): 1225—1230 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, Z. F., Tang, R. L., Wang, B., 1999. Determination of Hydrogeological Parameters of Leakey Aquifer Based on Pumping Test Data of Partially Penetrating Well near the Boundary. *Journal of Hohai University*, 27(3):5—8 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 陈晓恋,文章,胡金山,等,2016.解析法与数值法在水电站防渗墙效果评价中的运用.地球科学,41(4):701—710.
- 巩彦文,张丽伟,滕凯,2008.利用非稳定流抽水试验资料求解水文地质参数的新方法.地下水,30(4):16—17,26.
- 郭建青,周宏飞,李彦,2008.分析含水层水位恢复数据的多次直线解析法.岩土力学,29(12):3246—3250.
- 康悦林,1987.江汉平原第四纪地层划分与古气候分期.湖北地质,1(1):1—10.
- 刘璟,李辉,2012.单井抽水试验计算承压含水层水文地质参数方法探讨.西部探矿工程,24(7):186—188.
- 刘颖,邵景力,陈家洵,2015.基于微水试验倾斜承压含水层水文地质参数的推估.地球科学,40(5):925—932.
- 中华人民共和国水利电力部编,1979.水利水电工程钻孔压水试验规程 SDJ16-78.北京:水利电力出版社.
- 聂庆林,高广东,轩华山,等,2009.抽水试验确定承压含水层参数方法探讨.水文地质工程地质,36(4):37—40,49.
- 王秋良,李长安,2008.马尔柯夫链在江汉平原第四纪沉积环境分析中的应用.地质科技情报,27(1):38—41,46.
- 肖明贵,陈学军,刘宝臣,2003.无限承压含水层中主孔涌水多孔观测降深井流试验水文地质参数计算.地球科学,28(5):575—578.
- 潇湘峰,1987.微机在分析含水层参数中的应用——通用标准曲线法.中国岩溶,6(2):101—110.
- 许光森,1992.渗透系数的简易计算方法.东北水利水电,10(12):21—23,7.
- 薛禹群,朱学愚,1999.地下水动力学.北京:地质出版社,66—72.
- 曾昭华,1996.江汉平原东部地区地下水资源的开发利用与保护.长江流域资源与环境,5(4):375—378.
- 张玉芬,李长安,孙习林,等,2016.江汉平原东北缘麻城剖面磁化率特征及气候环境意义.地球科学,41(7):1225—1230.
- 周志芳,汤瑞凉,汪斌,1999.基于抽水试验资料确定含水层水文地质参数.河海大学学报(自然科学版),27(3):5—8.