

doi: 10.3724/SP.J.1201.2013.03132

分层监测孔现场分级联合试验确定含水层参数

李亚美, 成建梅, 崔莉红, 路万里

(中国地质大学(武汉) 环境学院, 武汉 430074)

摘要: 以华北平原中部咸淡水过渡带的多层含水系统(第 N 含水组底部至第 0 含水组顶部的含水系统)为研究对象,建立了地下水位-水质分层监测系统。通过在多层含水系统开展分层分级抽水试验、微水试验以及分层示踪试验等现场综合试验,借助解析法和数值模拟识别法等多种手段确定各分层水文地质参数。求参结果表明:第 N 含底部含水层渗透系数为 $4.320\sim 7.550$ m/d, 储水系数为 $4.53\times 10^{-4}\sim 2.19\times 10^{-3}$;弱透水层渗透系数为 $2.20\times 10^{-3}\sim 7.65\times 10^{-3}$ m/d, 纵向弥散系数为 $0.023\sim 0.428$ m²/d, 纵向弥散度为 $0.010\sim 0.051$ m;第 0 含水层顶部含水层渗透系数为 $0.142\sim 0.929$ m/d, 储水系数为 $4.53\times 10^{-4}\sim 2.19\times 10^{-3}$ 。

关键词: 多层含水系统; 分层监测系统; 抽水试验; 微水试验; 示踪试验; 水文地质参数

中图分类号: P641 文献标识码: A 文章编号: 1672-1683(2013)03-0132-06

Determination of Aquifer Parameters from Comprehensive In situ Pumping and Tracing Test in the Multi-layer Monitoring Boreholes

LI Ya mei, CHENG Jian mei, CUI Li hong, LU Wan li

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

Abstract: A multi-layer groundwater level-water quality monitoring system has been developed to investigate the aquifer-aquitard system that is located from the bottom of 1st aquifer to the top of 2nd aquifer, across the saltwater-freshwater transitional zone in the North China Plain. Based upon those boreholes, a series of in situ tests have been carried out such as the pumping test, slug test, as well as tracer test in different layers. The hydrogeological parameters in the aquifer-aquitard system have been obtained using the analytical method and numerical simulation method. The results show that the hydraulic conductivity and the storage coefficient at the bottom layer of 1st aquifer are $4.320\sim 7.550$ m/d and $4.53\times 10^{-4}\sim 2.19\times 10^{-3}$, respectively, the hydraulic conductivity, the longitudinal dispersion, and the longitudinal dispersivity in the aquitard are $2.20\times 10^{-3}\sim 7.65\times 10^{-3}$ m/d, $0.023\sim 0.428$ m²/d, and $0.010\sim 0.051$ m, respectively, and the hydraulic conductivity and the storage coefficient at the top layer of 2nd aquifer are $0.142\sim 0.929$ m/d and $4.53\times 10^{-4}\sim 2.19\times 10^{-3}$, respectively.

Key words: multi-layer aquifer-aquitard system; multi-layer monitoring system; pumping test; slug test; tracer test; hydrogeological parameters

确定含水层水文地质参数是一个非常复杂的过程。目前常用的水文地质参数确定方法主要包括室内实验法、野外现场试验方法以及基于数值模拟的参数识别法等。野外现场试验主要包括抽水试验、微水试验及示踪试验等,是获取水文地质参数最重要的手段之一。长期以来,现场试验求参时主要使用解析公式法^[1],最常见确定水流参数的解析方法包括基于稳定井流的裘布依公式和基于非稳定井流的泰斯公式及其改进方法^[2-4],还有基于潜水井流的 Boulton 法、

Neuman 法和基于越流理论的 Hantush 法等^[1]。示踪试验是求解含水层弥散系数的重要水文地质试验,其主要原理是利用浓度穿透曲线数据,采用多种估算方法计算含水层弥散度,常用的估算方法有最小二乘法、最大似然法、斜率法和等斜率法等^[5-6]。微水试验是在单孔中进行的一种简易抽注水试验,由于其简便经济,近年来已成为一项重要的评价含水层渗透性空间变化以及低渗岩体渗透特征的水文地质试验方法^[7]。目前较成熟的微水试验数学模型主要有: Hvorslev 模型、

收稿日期: 2012-11-12 修回日期: 2013-04-22 网络出版时间: 2013-05-18

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20130518.1016.006.html>

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)(2010CB428802)

作者简介: 李亚美(1987-),女,河南商丘人,硕士,主要从事地下水溶质运移方面的研究。E-mail: lymandly@163.com

通讯作者: 成建梅(1971-),女,新疆博乐人,教授,博士,从事地下水水流和污染数值模拟技术、盆地流体-岩石相互作用研究。E-mail: jnrcheng@cug.edu.cn

Cooper 模型、Bouwer 和 Rice 模型及 KGS 模型等四种^[8-10]。

然而目前,现场试验主要针对单一含水层进行的单孔抽水试验,而对试验过程的监测也主要利用该含水层的单孔或者多个钻孔开展,极少见涉及到多层含水系统的情况。本文选取华北平原中部咸淡水过渡带的多层含水层系统为研究对象,在建立地下水水位-水质分层监测系统的基础上,开展分层分级联合抽水试验、微水试验和示踪试验,综合运用多种手段确定研究区多层含水系统水文地质参数,为进一步开展华北平原中部咸淡水过渡带研究提供参数依据。

1 实验区概况及试验安排

1.1 试验区水文地质概况

华北平原第四系含水组自上而下划分为四个含水组^[11-12]:第 \bar{N} 含水组,底界埋深 40~60 m,含水层多为条带状分布,颗粒细,层间无良好的隔水层,透水性较好;第 $\bar{0}$ 含水组底界埋深一般 120~170 m,有较稳定的隔水层,水头有明显的承压性;第 $\bar{0}$ 含水组,底界埋深 250~350 m;第 $\bar{0}$ 含水组,底界埋深 350~450 m。本文研究的多层含水系统为第 \bar{N} 含水组底部含水层,第 \bar{N} 含水组与第 $\bar{0}$ 含水组之间所夹弱透层及第 $\bar{0}$ 含水组顶部含水层(见图 1)。其中,第 \bar{N} 含水组底部含水层主要岩性为粉细砂及亚砂土,矿化度较高,一般为咸水;第 \bar{N} 含水组与第 $\bar{0}$ 含水组间弱透层岩性为亚砂土、亚黏土和黏土互层,隔水性较差,上部为咸水,下部为淡水;第 $\bar{0}$ 含水组顶部含水层岩性为细砂、亚砂土,矿化度较小,一般为淡水。

1.2 地下水水位-水质分层监测系统

本次试验是在衡水地下水科学试验场新建立的地下水水位-水质分层监测系统的基础上进行的。分层监测系统位于研究区咸淡水过渡带,于 2011 年 6 月-7 月在试验场新打四口钻井组成的,四口新打钻井分别位于第 \bar{N} 含水组底部含水层(XK1)、第 \bar{N} 含水组第 $\bar{0}$ 含水组之间弱透层(XK2、XK3)及第 $\bar{0}$ 含水组顶部含水层(XK4),其剖面及平面位置见图 1。

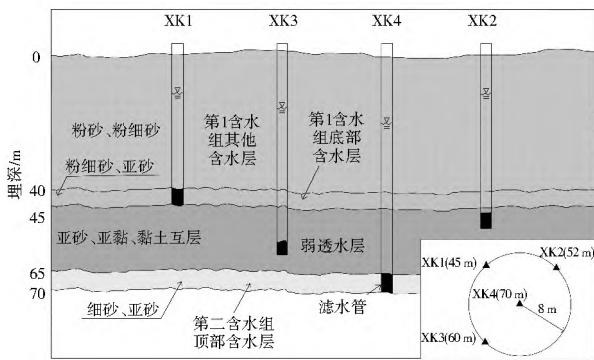


图 1 分层观测孔位置示意图

Fig. 1 Location of the multi-layer monitoring boreholes

1.3 分层分级联合现场试验

多层含水系统分层分级抽水试验,是以多层含水系统为研究对象,利用地下水水位-水质分层监测系统,对该系统中含水层及弱透层分别进行抽水试验和微水试验,观测各分层观测孔水位变化,利用观测信息综合确定多层含水系统的

水文地质参数。分层示踪试验是在多层含水系统分级系列抽水试验过程中,于上部含水层投放示踪剂,在下部含水层监测示踪剂浓度变化,分析计算各层弥散参数。

本次分层分级联合现场试验的设计方案如下。

在 XK1 井进行非稳定流定流量抽水试验,抽水流量为 71.67 L/min,抽水时间为 530 min;待 XK1 及其他各井恢复到天然水位后,在 XK2 及 XK3 井依次进行微水试验,观测时间分别为 1 280 min 和 1 322 min。试验过程均采用 DIVER 三参数 LTC(水位、电导率、温度)探头及人工观测记录数据。

待各井恢复到天然水位后,在 XK1、XK2 及 XK3 井分别投放罗丹明 B、荧光增白剂及荧光素钠三种示踪剂,而后对 XK4 井进行非稳定流抽水试验,抽水流量 48.92 L/min,抽水时间为 5 468 min。试验过程中采用 DIVER 三参数 LTC(水位、电导率、温度)探头及人工观测记录试验过程中各井水位变化;GGUN-FL 野外用荧光光度计监测示踪剂浓度。

2 抽水及微水试验求参数

综合运用解析法及数值法确定多层含水系统的渗透系数,储水系数,弥散系数等水文地质参数。

2.1 解析法

2.1.1 第 \bar{N} 含水组底部含水层

综合分析认为,第 I 含水组底部含水层抽水试验近似满足 Theis 井流假设条件:等厚、均质、各向同性、含水层侧向无限延伸。本次定流量抽水试验采用标准曲线对比法^[1]及基于 Thies 公式的直线图解法^[1]求解参数。

直线图解法^[1]求参过程如下:作出 $s \lg t$ 直线,直线的斜率 $m = 0.50$,截距 $s_0 = 2.07$ 。由此求得导水系数 $T = 37.77 \text{ m}^2/\text{d}$,压力传导系数 $a = 4.71 \times 10^4 \text{ m}^2/\text{d}$,渗透系数 $K = 7.55 \text{ m}/\text{d}$,弹性给水度 $\mu_e = 8.02 \times 10^{-4}$ 。

选取 XK1 井前期观测数据,利用 Aquifer Test 软件中的泰斯(Theis)分析进行求解,经将实测 $s-t$ 曲线与泰斯标准曲线对比,计算可得 $T = 22.12 \text{ m}^2/\text{d}$, $K = 4.42 \text{ m}/\text{d}$, $\mu_e = 4.38 \times 10^{-4}$, $a = T/\mu_e = 5.05 \times 10^5 \text{ m}^2/\text{d}$ 。

2.1.2 第 \bar{N} 含水组与第 $\bar{0}$ 含水组之间弱透层

微水试验是利用某种方式引起井中水位瞬时变化,通过观测井中水位恢复过程估算井附近含水层水文地质参数的方法。

综合分析认为,弱透层中微水试验近似满足 Hvoslev 模型及 Cooper 模型的假设条件:均质、各向同性、无限延伸;水流通过井孔时的水头损失可以忽略。本次微水试验利用 Hvoslev 模型^[7]解析式和基于 Cooper 模型的标准曲线对比法求参。

Hvoslev 模型给出解析式^[7]:

$$K_r = \frac{r_c^2 \ln(R_c/r_w)}{2BT_0} \quad (1)$$

式中: K_r 为弱透层渗透系数; r_c 为钻孔套管半径; R_c 为微水试验的影响半径; r_w 为过滤管半径; B 为含水层厚度; T_0 为滞后时间,即当动水头 H_t 与初始水头 H_0 的比值等于 0.368 时所对应的时间。XK2、XK3 井中微水试验数据处理所用参数取值见表 1。

表 1 微水试验计算参数取值

Table 1 The values of hydraulic parameters used in the slug test

| 抽水井 | r_c /m | R_e /m | r_w /m | B /m | T_0 /s | H_t /m | H_0 /m | K_r /($m \cdot d^{-1}$) |
|-----|-------------|-------------|-------------|-----------|-------------|-------------|-------------|--------------------------------|
| XK2 | 0.055 | 11 | 0.055 | 20 | 1 800 | 5.19 | 14.09 | 0.019 |
| XK3 | 0.055 | 11 | 0.055 | 20 | 900 | 5.05 | 13.71 | 0.038 |

注:取 $R_e = 200r_w$ [13]

选取 Aquifer Test 软件中的 Cooper 模型 [8] 拟合弱透水层微水试验,其拟合曲线见图 2。经计算得弱透水层水流参数为: $T = 4.44 \times 10^{-2} \sim 0.153 \text{ m}^2/\text{d}$, $K = 2.22 \times 10^{-3} \sim 7.65 \times 10^{-3} \text{ m/d}$, $\mu_e = 1.94 \times 10^{-5} \sim 2.42 \times 10^{-6}$, $a = 2.29 \times 10^3 \sim 6.32 \times 10^4 \text{ m}^2/\text{d}$ 。

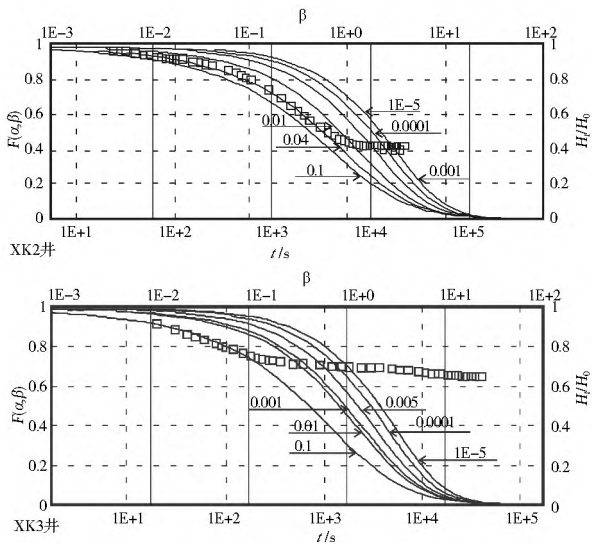


图 2 弱透水层实测数据与标准曲线拟合图

Fig. 2 Comparison between the standard curves and observed values in the aquitard

2.1.3 第 0 含水组顶部含水层

合分析认为第 0 含水组顶部含水层抽水试验近似满足第一类越流系统假定条件:均质、各向同性、无限延伸;弱透水层弹性储释水忽略不计;主含水层抽水期间相邻含水层水头不变。由抽水试验观测数据可知,抽水过程中有补给源对第 0 含水组底部含水层进行补给,结合 XK2 和 XK3 井观测数据,进一步可以推断出该含水层有越流补给。本次定流量抽水试验采用基于第一类越流系统的 Hantushr Jacob 公式的拐点法及标准曲线对比法求解参数。

由抽水试验数据可知, XK4 井抽水过程中最大降深为 21.72 m, 拐点处降深为最大降深的一半即为 10.86 m。根据第一类越流条件非稳流拐点法原理 [1], 在拐点处作出切线, 斜率 $m_i = 13.47$, 拐点处对应的 $t_i = 4.5 \text{ min}$, $f(r/B) = 2.3 \text{ s}/m_i = 1.718$, 查表可得 $r/B = 0.30$, 因此可得 $T = 0.708 \text{ m}^2/\text{d}$, $a = 1.57 \times 10^3 \text{ m}^2/\text{d}$, $K = 0.142 \text{ m/d}$, $\mu_e = 4.53 \times 10^{-4}$ 。

选取 Aquifer Test 软件中的 Hantushr Jacob 标准曲线进行配比,其拟合曲线见图 3。经计算得, $K = 0.157 \text{ m/d}$, $T = 0.785 \text{ m}^2/\text{d}$, $\mu_e = 2.19 \times 10^{-3}$, $a = 3.58 \times 10^2 \text{ m}^2/\text{d}$ 。

2.2 数值模拟识别

利用数值模拟软件 FEFLOW 建立多层含水系统模型模

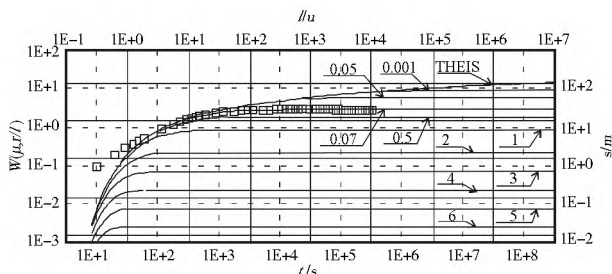


图 3 XK4 井实测数据与标准曲线拟合图

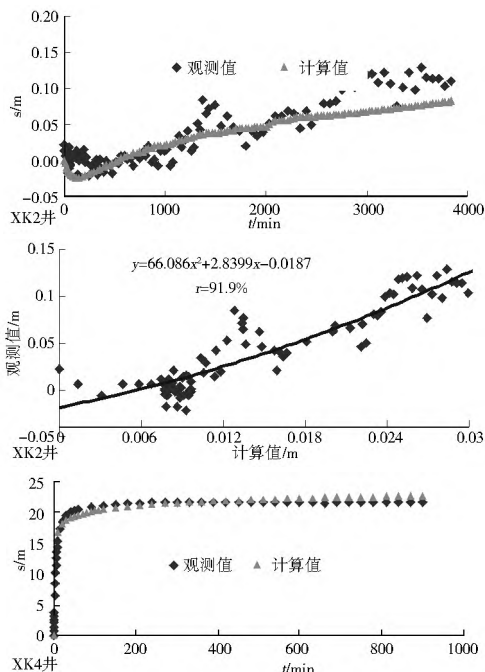
Fig. 3 Comparison between the standard curves and observed values in the well XK4

拟所进行的抽水试验,根据分层观测孔观测数据进行水文地质参数识别和校正。所建模型包括四层:把第 \tilde{N} 含水组其他含水层划为模型的第一层,第 \tilde{N} 含水组底部含水层为第二层,第 1 含水组与第 0 含水组之间弱透水层为第三层,第 0 含水组顶部含水层为第四层。模型的研究区域为以抽水井 (XK4 井) 为中心,半径为 1 km 均质、各向同性的圆形区域,采用井附近密集而向边界方向逐渐稀疏的不等间距网格剖分;模拟计算起点为抽水试验开始时刻;边界条件近似处理为定水头边界。分别选用 XK2、XK4 井观测数据进行拟合,经过识别和校正可得各层水文地质参数(见表 2),含水层及弱透水层中观测孔数据拟合曲线见图 4,含水层降深拟合误差在 2 m 之内的占 80% 以上,其降深拟合度大于 95%;弱透水层降深拟合误差值在 0.05 m 之内的占 80% 以上,其降深拟合度大于 90%。

表 2 通过数值模拟拟合校正得出的各层参数

Table 2 The calibrated aquifer parameters obtained from the numerical simulation

| 层数 | 底界埋深/m | K /($m \cdot d^{-1}$) | K_z /($m \cdot d^{-1}$) | T /($m^2 \cdot d^{-1}$) | μ_e | 孔隙度 |
|-----|--------|------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------|------|
| 第一层 | 40 | 5.789 | 8.64×10^{-4} | 231.560 | 8.40×10^{-3} | 0.20 |
| 第二层 | 45 | 4.320 | 0.078 | 21.600 | 9.00×10^{-3} | 0.18 |
| 第三层 | 65 | 6.91×10^{-3} | 2.59×10^{-5} | 0.138 | 5.00×10^{-6} | 0.07 |
| 第四层 | 70 | 0.929 | 0.043 | 4.645 | 5.00×10^{-4} | 0.21 |



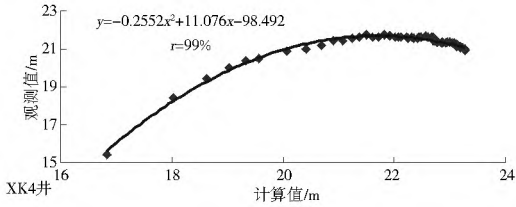


图4 XK4井抽水时的计算降深与观测降深对比曲线(XK2和XK4)

Fig. 4 Comparison between the observed and calculated drawdown in the wells XK2 and XK4 when the well XK4 is pumping

3 示踪试验求参数

XK4井抽水前在XK1、XK2及XK3井中分别投放罗丹明B、荧光增白剂及荧光素钠三种示踪剂。由于本次是初次示踪试验,为了防止下层监测不到示踪剂,示踪剂的投放量较大,因此该试验可以看成一维稳定流动—维弥散问题。各井示踪剂浓度变化见图5。

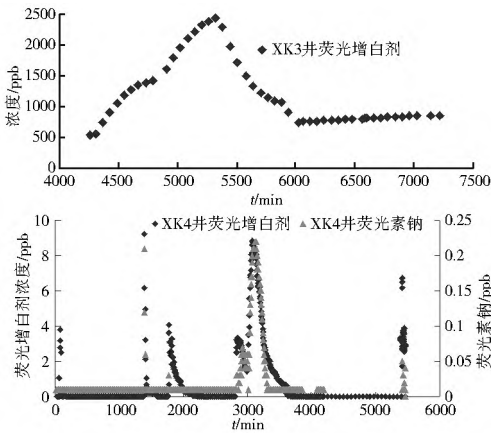


图5 XK3和XK4井中示踪剂浓度曲线图

Fig. 5 Observed concentrations of the tracers in the wells XK3 and XK4

由图5可知,在示踪试验过程中,在XK3井中监测到XK2井投放的荧光增白剂示踪剂;而在XK4井中也监测到XK2井投放的荧光增白剂及XK3井投放的荧光素钠示踪剂。此外在XK2、XK3及XK4井中均监测到XK1井投放的罗丹明B(初次试验,仪器准备不足,对罗丹明B取样监测,没有连续监测)。由此可知多层含水系统之间存在一定的水力联系,示踪剂通过一定途径进入下层含水层,结合抽水试验过程中XK3井及XK4井水位及电导率的观测可知,有较大水头差的条件下多层含水系统中上层咸水有下移补给下层淡水的趋势。近年来,由于深层淡水不断开采导致深层地下水水位持续下降,浅层咸水层与深层淡水层间形成较大水头差,从而可能导致上层咸水向下迁移。

3.1 直线图解法

本次试验利用直线图解法^[14]求解弥散系数 D_L 及平均流速 v ,

$$\ln X = \frac{(t - t_m)^2}{t} \quad Y = 2 \ln \frac{C_m \sqrt{t_m}}{C \sqrt{t}} + \frac{t - t_m}{t} \quad (2)$$

$$\text{其中 } Y \text{ 与 } X \text{ 为线性关系,其斜率 } R = \frac{11^2 t_m}{x^2 - v^2 t_m} \quad (3)$$

$$\text{则 } D_L = \frac{x^2}{2t_m(Rt_m + 1)}; \alpha_L = \frac{D_L}{v} \quad (4)$$

3.1.1 XK3井数据分析

根据XK3井荧光增白剂浓度监测数据,选择4 259~5 325 min浓度上升及5 325~6 021 min浓度下降两段来计算弥散参数;由式(2)计算 X 、 Y 其关系曲线见图6, $R_1 = 0.00238$, $R_2 = 0.0106$;根据式(4)计算弥散参数见表3。

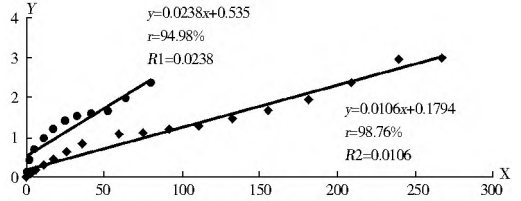


图6 XK3井中荧光增白剂对应的X-Y关系图

Fig. 6 The X-Y plot of the fluorescent brightener in the well XK3

表3 由XK3井求取的弥散参数

Table 3 The dispersion parameters obtained from the data in the well XK3

| 示踪剂种类 | 直线斜率 R /(min^{-1}) | 峰值时间 t_m /min | 纵向弥散系数 D_L /($\text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$) | 实际流速 v /($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$) | 纵向弥散度 α_L /m |
|-------|------------------------------------|--------------------|---|---|------------------------|
| 荧光增白剂 | 0.0106 | 5325 | 0.1506 | 2.1445 | 0.0702 |
| 平均 | / | / | 0.1092 | 2.1497 | 0.0508 |

3.1.2 XK4井数据分析

根据图5 XK4井示踪剂浓度监测数据,选择1 777~2 002 min荧光增白剂浓度下降段及1 822~2 032 min荧光素钠浓度下降段计算弥散系数;根据式(2)计算 X 、 Y 其关系曲线见图7, $R_1 = 0.0894$, $R_2 = 0.0977$;根据式(4)计算弱透水层弥散参数结果见表4。

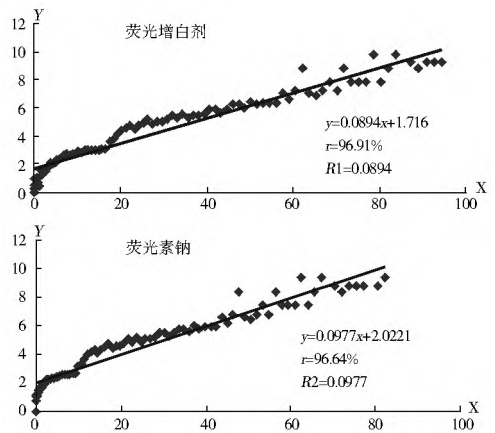


图7 XK4井中示踪剂对应的X-Y直线图

Fig. 7 The X-Y plot of the tracers in the well XK4

表4 由XK4井求取的弥散参数

Table 4 The dispersion parameters obtained from the data in the well XK4

| 示踪剂种类 | 直线斜率 R /(min^{-1}) | 峰值时间 t_m /min | 纵向弥散系数 D_L /($\text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$) | 实际流速 v /($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$) | 纵向弥散度 α_L /m |
|-------|------------------------------------|--------------------|---|---|------------------------|
| 荧光增白剂 | 0.0894 | 1777 | 0.4283 | 14.8515 | 0.0288 |
| 荧光素钠 | 0.0977 | 1822 | 0.1413 | 8.9167 | 0.0158 |

3.2 等斜率法

根据等斜率法原理^[15], XK3 井选取 4 400~ 6 000 min 段 4 组数据; XK4 井选取 3 000~ 4 000 min 段 5 组数据计算弥散参数, 其计算结果见表 5。

表 5 弥散参数求解结果

Table 5 The dispersion parameters obtained from the data in the wells XK3 and XK4

| 示踪剂种类 | 纵向弥散系数 $D_L/(m^2 \cdot d^{-1})$ | 实际流速 $v/(m \cdot d^{-1})$ | 纵向弥散度 a_L/m |
|-----------|---------------------------------|---------------------------|---------------|
| XK3 荧光增白剂 | 0.037 1 | 1.079 3 | 0.034 4 |
| XK4 荧光增白剂 | 0.023 3 | 2.264 3 | 0.010 3 |
| XK4 荧光素钠 | 0.035 7 | 2.298 6 | 0.015 6 |

表 6 各种方法求得的多层含水系统水流参数

Table 6 Summary of the hydraulic parameters of the multi layer aquifer-aquitard system determined by all methods

| 监测孔 | 求参方法 | 导水系数 $T/(m^2 \cdot d^{-1})$ | 渗透系数 $K/(m \cdot d^{-1})$ | 储水系数 μ_e | 压力传导系数 $al/(m^2 \cdot d^{-1})$ |
|---|---------|-----------------------------|--|--|--|
| XK1 | 直线图解法 | 37.770 | 7.550 | 8.02×10^{-4} | 4.71×10^4 |
| | 标准曲线对比法 | 22.120 | 4.420 | 4.38×10^{-4} | 5.05×10^5 |
| | 数值法 | 21.600 | 4.320 | 9.00×10^{-3} | / |
| 第 \tilde{N} 含水组底部含水层 | | 21.600~ 37.77 | 4.320~ 7.550 | $4.38 \times 10^{-4} \sim 9 \times 10^{-3}$ | |
| XK2 | 公式法 | / | 0.019 | / | / |
| | 标准曲线对比法 | 0.044 | 2.2×10^{-3} | 1.94×10^{-5} | 2.29×10^3 |
| XK3 | 公式法 | / | 0.038 | / | / |
| | 标准曲线对比法 | 0.153 | 7.65×10^{-3} | 2.42×10^{-6} | 6.32×10^4 |
| | 数值法 | 0.138 | 6.91×10^{-3} | 5.00×10^{-6} | / |
| 第 $\tilde{0}$ 含水组第 $\tilde{0}$ 含水组间弱透水层 | | 0.044~ 0.153 | $2.20 \times 10^{-3} \sim 7.65 \times 10^{-3}$ | $2.42 \times 10^{-6} \sim 1.94 \times 10^{-5}$ | $2.29 \times 10^3 \sim 6.32 \times 10^4$ |
| XK4 | 拐点法 | 0.785 | 0.157 | 2.19×10^{-3} | 3.58×10^2 |
| | 标准曲线对比法 | 0.708 | 0.142 | 4.53×10^{-4} | 1.57×10^3 |
| | 数值法 | 4.645 | 0.929 | 5.00×10^{-4} | / |
| 第 $\tilde{0}$ 含水组顶部含水层 | | 0.709~ 4.645 | 0.142~ 0.929 | $4.53 \times 10^{-4} \sim 2.19 \times 10^{-3}$ | $3.58 \times 10^2 \sim 1.57 \times 10^3$ |

表 7 各种方法求得的弱透水层弥散参数

Table 7 Summary of the dispersion parameters of the aquitard determined by all methods

| 监测孔 | 求解方法 | 示踪剂 | 纵向弥散系数 $D_L/(m^2 \cdot d^{-1})$ | 实际流速 $v/(m \cdot d^{-1})$ | 纵向弥散度 a_L/m |
|------|-------|-------|---------------------------------|---------------------------|---------------|
| XK3 | 直线图解法 | 荧光增白剂 | 0.109 | 2.150 | 0.051 |
| | 等斜率法 | | 0.037 | 1.079 | 0.034 |
| XK4 | 直线图解法 | 荧光增白剂 | 0.428 | 14.852 | 0.029 |
| | | 荧光素钠 | 0.141 | 8.917 | 0.016 |
| | 等斜率法 | 荧光增白剂 | 0.023 | 2.264 | 0.010 |
| | | 荧光素钠 | 0.036 | 2.299 | 0.016 |
| 弱透水层 | 参数选择 | / | 0.023~ 0.428 | 1.079~ 14.852 | 0.010~ 0.051 |

究成果对比(见表 8)后发现, 前人主要是以含水层组为整体进行研究, 这些含水层组由一系列小规模含水层-弱透水层组成, 因此人们求出的参数是含水层组内部多个子含水层-弱透水层单元水文地质参数的综合反映。而本次试验对象的单元是最小的含水层或弱透水层, 其内部不再含有夹层。由表 8 可知, 本试验中第 \tilde{N} 含水组底部含水层所求的渗透系数及储水系数均落在前人研究成果范围之内; 而所求的弱透水层渗透系数大于前人的研究成果, 原因是所用处理方法不同: 前人是利用在第 \tilde{N} 含水组及第 $\tilde{0}$ 含水组进行抽水试验求参, 而本文把弱透水层看作独立的一层, 对其进行微水试验求参; 弥散系数求解方法也不同, 前人是利用室内土柱弥散

4 参数小结

本次研究中, 利用直线图解法、拐点法、标准曲线对比法及数值法得到含水层水文地质参数; 而利用解析公式法、标准曲线对比法、数值法得到了弱透水层的渗透系数, 以上各种方法求参结果, 如表 6、7 所示。对比不同方法得到的结果, 可以看出, 运用解析公式求取的渗透系数 K 比其它两种方法的结果偏大, 这是因为微水试验影响半径 R_w 的选择具有一定的人为性。因此, 选择第 \tilde{N} 含水组与第 $\tilde{0}$ 含水组之间弱透水层渗透系数时, 应根据标准曲线对比法及数值法确定, 而弥散参数的选取则根据直线图解法及等斜率法确定。

将前人对华北平原水文地质参数的研究结果与本次研

究结果对比, 本文是利用野外示踪试验求解; 本试验所求的第 $\tilde{0}$ 含水组顶部含水层参数比前人研究结果相差较大, 原因是第 $\tilde{0}$ 含水组以中细砂为主, 而其顶部含水层以粉砂为主。

5 结论

本文以华北平原中部咸淡水过渡带多层含水系统为研究对象, 建立地下水水位-水质分层监测系统, 利用多层含水系统分级系列抽水试验、微水试验及分层示踪试验观测数据联合求参。综合直线图解法、拐点法、标准曲线对比法及数值模拟识别法求得的多层含水系统的水文地质参数如下: 第 I 含水组底部含水层渗透系数为 4 320~ 7 550 m/d, 储水系数

表 8 多层含水系统水文地质参数与前人数据对比

Table 8 Comparison between the previous and calculated hydrogeological parameters of the multi layer aquifer-aquitard system

| 含水层 | 渗透系数/(m·d ⁻¹) | 储水系数 | 纵向弥散系数 D _L /(m ² ·d ⁻¹) | 纵向弥散度 a _L /m |
|-------------------------------------|---|---|---|-------------------------|
| 浅层含水组(第Ⅰ含水组)(据张兆吉 ^[16]) | 1~ 10 | 0~ 0.05 | / | / |
| 第Ⅰ含水组底部含水层(本文) | 4.320~ 7.550 | 4.38× 10 ⁻⁴ ~ 9× 10 ⁻³ | / | / |
| 弱透土层(前人) | 1.33× 10 ⁻⁴ (据高业新 ^[17]) | / | 0.022~ 0.482 6(据王平 ^[14]) | / |
| (本文) | 2.20× 10 ⁻³ ~ 7.65× 10 ⁻³ | / | 0.023~ 0.428 | 0.010~ 0.051 |
| 深层含水组(第Ⅱ含水组)(前人) | 5~ 10(据张兆吉 ^[16]) | 8.4× 10 ⁻³ (据高业新 ^[17]) | / | / |
| 第Ⅱ含水组顶部含水层(本文) | 0.142~ 0.929 | 4.53× 10 ⁻⁴ ~ 2.19× 10 ⁻³ | / | / |

为 4.53× 10⁻⁴~ 2.19× 10⁻³;弱透土层渗透系数为 2.20× 10⁻³~ 7.65× 10⁻³ m/d;第Ⅱ含水组顶部含水层渗透系数为 0.142~ 0.929 m/d,储水系数为 4.53× 10⁻⁴~ 2.19× 10⁻³。利用直线图解法及等斜率法求得的弱透水层的弥散系数为 0.023~ 0.428 m²/d,弥散度为 0.010~ 0.051 m。

前人对该区水文地质参数研究大多以含水层组整体为对象进行研究,因此利用多层含水系统分层系列联合试验求参,为今后水文地质参数的研究提供了新思路,也为本地区开展浅层咸水运移规律研究提供了支持。

参考文献(References):

[1] 陈崇希,林敏.地下水动力学[M].武汉:中国地质大学出版社,1999.(CHEN Chong xi, LIN Min. Groundwater dynamics [M]. Wuhan: China University of Geosciences press, 1999. (in Chinese))

[2] 赵宝峰,康卫东,祝田多娃,等.抽水试验和长观水位联合模拟确定含水层参数[J].吉林大学学报(地球科学),2009,39(3): 482-486. (ZHAO Bao feng, KANG Wei dong, ZHUTIAN Duowa, et al. Aquifer Parameter Recognition by Combining Simulation of Pumping Test and Water Level of Long term Observation Well[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2009, 39(3): 482-486. (in Chinese))

[3] 张建中,安建龙.不同边界条件下非完整井抽水试验渗透系数计算方法研究[J].工程勘察,2012,4: 47-50. (ZHANG Jianzhong, AN Jianlong. Study on the Permeability Coefficient Calculation of Pumping Test of Partial Penetrating Well under Different Boundary Conditions[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2012, 4: 47-50. (in Chinese))

[4] 郭建青,周宏飞,李彦,等.分析非稳定流抽水试验数据的改进直线解析法[J].中国农村水利水电,2009,(4): 18-21. (GUO Jianqing, ZHOU Hongfei, LI Yan, et al. The Linear-analytical Method of Estimating Aquifer Parameters from Unsteady Pumping Test Data[J]. China Rural Water Conservancy and Hydropower, 2009, (4): 18-21. (in Chinese))

[5] 郭建青,郑西来.分析一维弥散试验数据的直线图解法[J].工程勘察,1997,1: 42-44. (GUO Jianqing, ZHENG Xilai. A Straight Line Illustration Method by Analysis the Data of Dispersion Test [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 1997, 1: 42-44. (in Chinese))

[6] 杨强,高幼龙,丁伟翠,等.溶质运移弥散系数反演数值方法初步研究[J].水资源与水工程学报,2009,20(2): 133-136. (YANG Qiang, GAO Youlong, DING Weicui, et al. Preliminary Research on Inversion Numerical Method of Solute Transport Dispersion Parameters[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2009, 20(2): 133-136. (in Chinese))

[7] Buler JR JJ. The design performance and analysis of slug tests

[M]. New York: Lewis Publishers, 1997: 133-136.

[8] Cooper H H, Bredehoeft J D, Papadopoulos I S. Response of a finite diameter well to an instantaneous charge of water[J]. Water Resources Research, 1967, 3(1): 263-269.

[9] Bouwer H, Rice R C. A slug test for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells[J]. Water Resources Research, 1976, 12(3): 423-428.

[10] Hyder Z, Butler JR JJ, McElwee C D, et al. Slug tests in partially penetrating wells[J]. Water Resources Research, 1994, 30(11): 2945-2958.

[11] 张宗祜,张光辉,任福弘,等.华北平原区域地下水演化过程及其与相邻圈的相互作用[J].北京:中国地质学会,2006: 39-40. (ZHANG Zong-hu, ZHANG Guang hui, REN Fu hong, et al. The Process of Evolution in North China Plain and Its Interaction with the Adjacent Spheres[J]. Beijing: geological society of china, 2006: 39-40. (in Chinese))

[12] 张宗祜,施德鸿,任福弘,等.论华北平原第四系地下水系统之演化[J].中国科学(D辑:地球科学),1997,27(2): 168-193. (ZHANG Zong hu, SHI De hong, REN Fu hong, et al. Evolution of Quaternary Groundwater System in North China Plain [J]. Science of China (Series D: Earth Science) 1997, 27(2): 168-193. (in Chinese))

[13] 陈则连,原国红,赵丙君.微水试验技术的应用研究[J].工程勘察,2009,7: 31-37. (CHEN Ze lian, YUAN Guo hong, ZHAO Bing jun. A Study on Application of Slug Test [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2009, 7: 31-37. (in Chinese))

[14] 王平.咸水通过粘性土层的弥散作用实验研究[D].北京:中国地质大学,2010. (WANG Ping. Experimental Study on Dispersion during Saline Water Flow Through Clay-bearing Soil [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2010. (in Chinese))

[15] 唐莲,白丹,蒋任飞等.土壤溶质运移关键参数的确定方法评述[J].宁夏农学院学报,2004,25(3): 45-50. (TANG Lian, BAI Dan, JIANG Ren fei et al. Study Tendency of Solute Transport Parameters [J]. Journal of Ningxia Agricultural College, 2004, 25(3): 45-50. (in Chinese))

[16] 张兆吉,费宇红.华北平原地下水可持续利用图集[M].北京:中国地图出版社,2009,2: 72-79. (ZHANG Zhao ji, FEI Yu hong. Atlas of Groundwater Sustainable Utilization in North China Plain [M]. Beijing: China Cartographic Pressing House, 2009, 2: 72-79. (in Chinese))

[17] 高业新.华北平原典型地区大规模开采条件下不同层位含水组地下水互动关系研究[D].北京:中国地质科学院,2008. (GAO Ye xin. Study on Groundwater Hydraulic Connection in Different Aquifers under Mass Pumped Conditions in Typical Area North China Plain [D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2008. (in Chinese))