

抽水含水层对非抽水含水层水位影响的效应分析

高业新¹, 吴庆华¹, 韩玉英¹, 靳晓颖¹, 王贵玲^{1*}, 梁建军², 金晓路³

(1. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北石家庄 050061; 2. 河北省邢台市地质工程勘察院, 河北邢台 054000;
3. 河北省衡水市钻井公司, 河北衡水 053000)

摘要: 利用自动水位计记录的抽水试验过程中不同层位含水组之间的动态水位, 分析了在抽水试验最初阶段时抽水含水组与非抽水含水组之间的水力联系。研究表明: (1) 抽水含水层对非抽水含水层存在水位影响效应, 在抽水初期, 水位影响效应较大; 当抽水含水层水位达到稳定或缓慢下降时, 水位影响效应随之消失。(2) 单位降深水位影响效应显示, 上部含水层距离抽水含水层越远, 水位影响效应越大; 下部含水层距离抽水含水层越远, 水位影响效应越小。(3) 利用三维地下水流数值模拟方法和应力应变对含水层水位动态影响的原理对水位影响效应机理进行分析, 发现水位影响效应与含水层的固体骨架压缩系数(α)、水体积压缩系数(β)、孔隙度(n)和边界控制系数(C_m)等参数有关。

关键词: 抽水试验; 地下水流; 数值模拟; 应力变化原理; 水位影响效应

中图分类号: P641.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8527(2009)01-0164-07

Waterlevel Effect of Pumping Aquifer on Nonpumping Aquifers

GAO Ye-xin¹, WU Qing-hua¹, HAN Yu-ying¹, JIN Xiao-ying¹, WANG Gui-ling^{1*}, LIANG Jian-jun², JIN Xiao-lu³

(1. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, CAGS, Shijiazhuang, Hebei 050061, China;

2. Geology and Mine Geological Engineering & Exploration Institute of Xingtai, Xingtai, Hebei 054000, China;

3. Hengshui Drilling Company, Hengshui, Hebei 053000, China)

Abstract: Based on the water level data of different deep aquifers recorded by automatic water gauge in the pumping test, the hydraulic connection between pumping aquifer and nonpumping aquifer in the early pumping stage was analyzed in this paper. The results show that (1) the water levels in nonpumping aquifers were affected as the target aquifer was pumping, and in the early pumping stage, the effect was large, then the effect disappeared as the water level in the target pumping aquifer was stable or slowly down; (2) the further the distance between the target pumping aquifer and the nonpumping aquifer, the less effect to the water levels in nonpumping aquifers; (3) the water level effect in multi-aquifer test was related to the parameters α , β , n and C_m according to the numerical simulation of groundwater flow and the stress change principle.

Key words: pumping test; groundwater flow; numerical simulation; stress change principle; water level effect

0 引言

地下水是华北平原具有战略意义的资源, 对其不合理开采导致了一系列环境地质问题^[1-2]。如何合理开采地下水, 许多专家学者曾开展了深入研究, 但是, 对于深层地下水的补给来源还有不同认识, 如陈梦雄^[3]认为开采资源量主要是越

流补给和侧向补给两部分, 其中越流补给占主导地位。郭永海^[4]认为越流量是通过咸水层下移耗竭深层水的储存量而实现的, 净储量占总开采量的97%, 剩余的3%是侧向补给量。陈宗宇^[5-6]认为, 深层地下水是不可更新的地下水资源。因此, 若要合理开采地下水, 必需查明地下水的补给来源, 特别是不同层位含水组地下水之间的关系, 为

收稿日期: 2008-08-11; 改回日期: 2008-11-28; 责任编辑: 潘令枝。

基金项目: 中国地质调查局区域地质调查项目(1212020634106); 中国地质科学院水文地质环境地质研究所基本科研项目(SK2007-15)。

作者简介: 高业新, 男, 副研究员, 博士, 1971年出生, 地质工程专业, 主要从事水文地质、环境地质方面的研究。

Email: Goofy2004@163.com。

*通信作者: 王贵玲, 男, 研究员, 博士, 1964年出生, 地质工程专业, 主要从事地热及水资源研究。Email: wguling@heinfo.net。

此，笔者在国土资源部衡水地下水科学试验基地开展了大规模抽水试验工作，试图查明不同层位含水组之间的关系，进一步明确地下水的补给来源。

抽水试验过程中，利用自动水位计以同样的时间间隔同时观测 5 个不同层位含水组的水位动态。观测结果显示，5 个含水组水位动态既有相同点，也有较大差异。本文利用三维地下水数值模拟方法和应力变化对含水层水位的影响原理对观测结果进行了研究，提出了抽水含水层水位对非抽水含水层水位存在影响效应，并解释了其机理。

1 试验区概况

试验区位于河北衡水市北约 25 km，隶属于河北省深州市护驾迟镇。试验区处于山前堆积平原与冲积低平原的交接地带，面积约 24 000 m²。试验区地层揭露深度为 600 m，根据沉积特征和水文地质条件，将含水岩系划分为 5 个含水组，各含水组特征见表 1。每一含水组成分成抽水井和观测井各 1 眼，井分布、井结构和井参数如图 1、图 2 和表 2 所示。

表 1 试验区含水组基本信息

Table 1 Information of aquifers in the research area

地层	含水组	底板埋深/m	隔水层岩性	含水层岩性	
全新统	I	50	灰黄色亚粘土	粉砂、粉细砂	
					第
	上更新统	II	175	黄棕色、灰黄色粘土	细砂、粉细砂
中更新统	III	304	棕褐色、黄棕色粘土	中砂、中粗砂	
					系
下更新统	IV	384	棕红色粘土	细砂、中粗砂	
新近系	明化镇组	V	524	紫红色粘土	细砂、中细砂

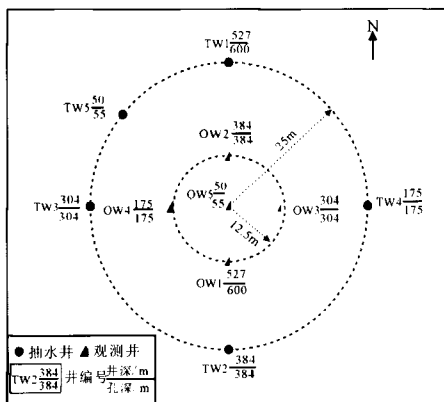


图 1 抽水井和观测井布置图

Fig. 1 Layout plan of test wells and observation wells

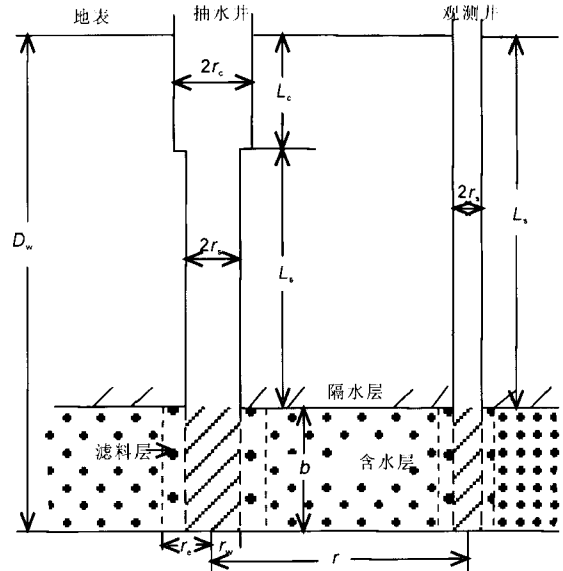


图 2 抽水井和观测井结构图

Fig. 2 Construction plan of the test well and the observation well

D_w 井深； L_c 变径管长度； L_s 滤水管以上的井管； b 含水层的厚度； r 抽水井与观测井的距离； r_c 变径管半径； r_s 滤水管以上的井管半径； r 滤水管半径； r_e 有效半径； r_w 滤水管半径

表 2 井结构参数

Table 2 Construction parameters of wells

井编号	含水组	D_w/m	L_c/m	L_s/m	b/m	r/m	r_c/mm	r_s/mm	r_w/mm	r_e/mm
TW5	I	50	-	50.0	12	-	154.5	154.5	154.7	-
OW5		50	-	50.0	12	-	79.5	79.5	79.6	-
TW4	II	175	-	139.0	36	-	154.5	154.5	154.7	-
OW4		175	-	139.0	36	-	79.5	79.5	79.6	-
TW3	III	308	120.3	151.7	36	34.0	154.5	101.5	101.5	101.7
OW3		308	-	272.0	36		-	79.5	79.5	79.6
TW2	IV	384	119.0	235.1	30	-	154.5	101.5	101.5	101.7
OW2		384	-	354.0	30	-	79.5	79.5	79.6	-
TW1	V	527	120.1	377.3	30	-	154.5	101.5	101.5	101.7
OW1		527	-	497.0	30	-	79.5	79.5	79.6	-

注：TW 为抽水井；OW 为观测井。参数说明见图 2。

2 试验结果分析

在承压含水层非稳定流抽水过程中，不同深度的含水层地下水位将会受到影响而发生水位上升或下降，水位上升，称为 Noordbergum effect^[7]，汪成民^[8]将水位下降现象称为邻层抽水效应。Hsieh^[9]、Kim 等^[7]利用 Boit 固结理论分析这些弱透水层的水头波动与含水介质变形的关系，并进行了有限元计算；王旭升^[10]利用井流-盖层弯曲效应对此做了深入的理论分析；张昭栋^[11-12]论述了地表荷载对承压含水层水位变化的影响。本次抽水过程中，观测到了非抽水含水层水位随抽水含水层水位的降低而降低的现象，且二者水位表现

为同步变化,没有时间上的差异。这种现象既不同于 Noordbergum effect,也与邻层抽水效应不同。

下文将以第IV含水组抽水为例,说明5个不同层位含水组在第IV含水组抽水期间水位的变化(图3),其特点是:(1)在抽水初期,非抽水含水组水位均表现出随抽水含水组水位下降而下降;(2)水位下降是同步的,没有时间差;(3)非抽水含水组水位经过一段时间后开始回升,与抽水含水组水位变化再也没有关系;(4)不同层位非抽水含水组水位达到最大降深的时间不同,第I、II、III、V含水组达到最大水位降深的时间分别是993 min、108 min、185 min和1 005 min;(5)非抽水含水组水位下降幅度不同,第I、II、III、V含水组水位下降幅度分别为213 mm、143 mm、157 mm和202 mm。当第II、III、V含水组分别抽水时,也有同样的现象(表3)。

关于产生这种现象的原因,目前主要有两种观点:第一种观点认为是5个含水组之间水力联系密切,由越流引起;另一种观点则认为是由压力变化引起。本文将第IV含水组抽水试验资料为例,利用数值模拟对上述现象给出解释。

3 三维地下水流数值模拟

3.1 水文地质概念模型

3.1.1 含水组系统概化

试验区属多层结构沉积,水文地质条件复杂,并非一个独立的水文地质单元。在概化建模时,将每一个含水组视为一个独立的水文地质单元,同时将每一个含水组都视为水平、均质、等厚且无限延伸的含水层。把含水层中的地下水流视为水平二维流动,而将弱透水层内的水流视为一维垂向流动。

3.1.2 边界条件概化

在非稳定流系统中,只要在模拟时可以肯定流场的负荷不会到达边界,即假设模拟时边界邻近的水头或水流不会受到改变,此时即可把该位置定义为模型的边界。因此,垂向上,以每一含水组底板作为下部边界,同时也是下部含水组的上部边界;弱透水层概化到下部含水组中,将第I含水组上部和第V含水组下部处理为不透水边界。侧向上,采用以抽水孔为中心,以2 km为半径的方形区域构成的已知水头边界。

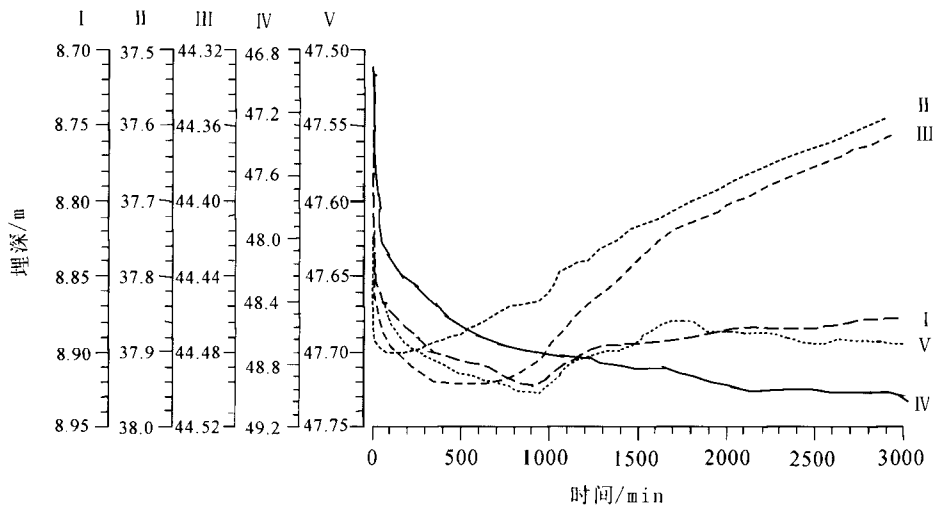


图3 第IV含水组抽水试验期间各含水组水位动态

Fig. 3 Water level dynamic curves of different depth aquifers in observation wells as the 4th aquifer being pumped

表3 观测井中不同层位含水组抽水时非抽水含水组的动态水位

Table 3 Dynamic water levels of unpumped aquifers as one aquifer pumped in observation wells

抽水井	抽水井对应的含水组	观测井最大水位降深/mm					观测井水位达最大降深时间/min.				
		OW5(I)	OW4(II)	OW3(III)	OW2(IV)	OW1(V)	OW5(I)	OW4(II)	OW3(III)	OW2(IV)	OW1(V)
TW4	II	192	-	144	82	96	995	-	295	245	284
TW3	III	-	-	-	-	77	-	-	-	387	
TW2	IV	213	143	157	-	202	993	108	185	1 005	
TW1	V	202	-	64	51	-	2 530	-	95	123	

注:第III含水组抽水时,因仪器故障,未能取得理想结果;TW5含水层为高矿化度水,因排水困难,没有做抽水试验。

3.2 数学模型

根据水文地质概念模型，将试验区地下水系统概化为 5 层结构的承压准三维非稳定地下水流系统。模拟区地下水运动的数学模型可以概化为非均质、各向同性、三维、非稳定地下水流数学模型，用如下微分方程的定解问题来描述：

$$\begin{cases} \text{div}(T_m \cdot \text{grad}h_m) + c_{paM-1}(h_{h-1} - h_m) + \\ c_{paM}(h_{M+1} - h_m) - q_m = S_m \frac{\partial h_m}{\partial t} & \hat{x} \in \Omega, t > 0 \\ \text{div}(T_M \cdot \text{grad}h_M) + c_{paM-1}(h_{M-1} - h_M) + \\ c_{paM}(h_{M+1} - h_M) - q_M = S_M \frac{\partial h_M}{\partial t} & \hat{x} \in \Omega, t > 0 \\ h_m(\hat{x}, t)|_{t=0} = h_m^0(\hat{x}) & \hat{x} \in \Omega, t = 0 \\ T_m \cdot \text{grad}h_m \cdot \vec{n}_m - C_{bm}(H_{bm} - h_m) - Q_{bm}|_{\Gamma_m} = 0 \\ m = 1, 2, \dots, M & \hat{x} \in \Omega, t > 0 \end{cases}$$

式中： \hat{x} ，空间坐标， m ， $\hat{x} = (x, y)$ ； h_m ，第 m 含水层水位标高， m ， $h_m = h_m(\hat{x}, t)$ ， $m = 1, 2, \dots, M$ ； $h_m^0(\hat{x})$ ，各含水层的初始水位， m ； H_{bm} ，第 m 含水层一类边界水位标高， m ； T_m ，第 m 含水层非均质导水系数， m^2/d ， $T_m = T_m(\hat{x})$ ； c_{paM} ，第 m 含水层越流因子， d^{-1} ， $m = 1, 2, \dots, M - 1$ ； Q_m ，第 m 含水层抽水强度， m/d ； S_m ，第 m 含水层的释水系数(无量纲)； Γ_m ，含水层边界； \vec{n} ，含水层正法线方向； C_{bm} ，各层边界控制系数； Ω ，虚数空间。

上述的微分方程描述了承压含水层地下水运动、含水层初始条件以及各含水层边界条件。当

$C_{bm} = 0$ 时，为二类边界条件，这时 Q_{bm} 为边界单宽流量， m^2/d ；当 $C_{bm} \rightarrow \infty$ 时，为一类边界条件，这时为 h_{bm} 水位边界值， m ；当 $0 < C_{bm} < \infty$ 时，为混合边界条件。

3.3 模型的求解及其识别

选用有限差不等距网格进行剖分，在井群分布区域内网格加密。因为试验区面积小，水头值变化不大，故选择抽水前各含水组水头值为初始水位，且以抽水前时刻为初始时刻。采用 MODFLOW 软件对模型进行求解。

调整水平渗透系数 K 、贮水率 S_s 和垂向渗透系数 K_z ，抽水含水组水位降深曲线得到了很好的拟合，但是无论如何调整上述参数，非抽水含水组的水位动态曲线均不能得到拟合(图 4)。参数拟合值与参数计算值比较接近(表 4)，说明 5 个含水组之间没有明显的越流补给关系。下面利用应力应变原理分析该现象产生的原因。

表 4 拟合值与计算值对比

Table 4 Contrast between fitted value and calculated value

含水组	数值类型	$K/(m/d)$	$K_z/(m/d)$	S_s
II	计算值	7.7	2.59×10^{-4}	1.0×10^{-3}
	拟合值	6.5		1.0×10^{-3}
III	计算值	28.5	3.52×10^{-4}	9.3×10^{-5}
	拟合值	26.8		4.1×10^{-4}
IV	计算值	23.6		9.1×10^{-4}
	拟合值	22.0		4.0×10^{-4}
V	计算值	8.5	2.73×10^{-4}	1.8×10^{-3}
	拟合值	7.6		3.1×10^{-3}

注： K 为水平渗透系数； K_z 为垂向渗透系数； S_s 为贮水率。

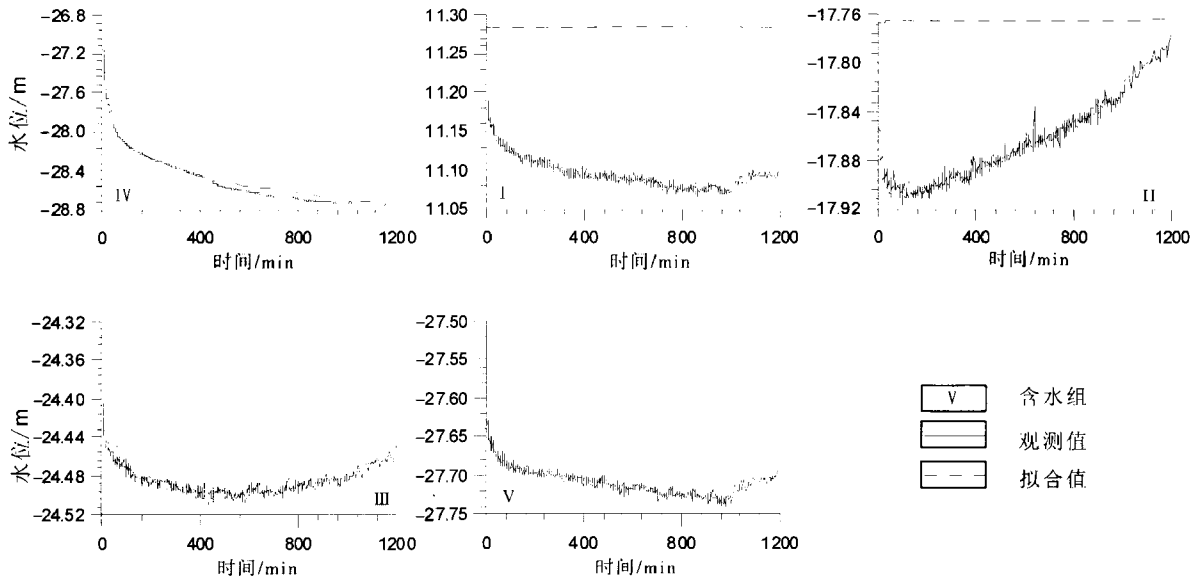


图 4 第 IV 含水组抽水时观测井中 5 个含水组的观测和拟合曲线

Fig. 4 Observation and calculated value curves of the five aquifers in observation wells as the 4th aquifer being pumped

4 水位影响效应机理分析

水位影响效应是指某一含水层抽水时, 在没有发生水量交换的情况下, 非抽水含水层水位随抽水含水层水位下降而下降的现象, 其本质是地层压力变化引起。水位影响效应在抽水初期表现比较明显, 随着抽水含水层水位变化越来越小, 即地层压力变化越来越小, 水位影响效应逐渐消失。

4.1 水位影响效应原理

下部含水层抽水时减小了对上部地层的顶托力, 相当于对上部含水层施加了一个向下的拉力, 使其水位降低。当上部含水层抽水时, 相当于减小了对下部含水层的压力, 使其水体积发生膨胀, 孔隙压力降低, 使水位降低^[8]。

4.2 水位影响效应的偏微分方程

假设试验区含水层产状水平, 在水力学性质上可看成均匀、各向同性, 其上、下隔水层可看成不透水层, 沿水平方向向四周无限延伸。在弹性力学性质上为均匀的完全弹性介质。含水层水流满足达西流, 且当受到压力变形时, 水位瞬间释放。应用弹性理论分析应力变化规律, 抽水时应力变化对承压含水层水位影响的偏微分方程组为^[11-12]:

$$\begin{cases} K \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + K \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + K \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = S_s \frac{\partial h}{\partial t} - \alpha \frac{\partial \sigma_z}{\partial t} \\ h(x, y, z) |_{t=0} = h_0(x, y, z) \quad x, y, z \in \Omega \\ \sigma_z(x, y, z) |_{t=0} = 0 \quad x, y, z \in \Omega \\ h(x, y, z) |_{\Gamma_1} = h_1(x, y, z) \quad x, y, z \in \Gamma_1 \\ \sigma_z(x, y, z) |_{\Gamma_1} = 0 \quad x, y, z \in \Gamma_1 \end{cases} \quad (1)$$

式中: h 为承压含水层的水头, m; S_s 为含水层的贮水率, m^{-1} , $S_s = \rho g(\alpha + n\beta)$; α 为含水层固体骨架的压缩系数, cm^2/kg ; β 为含水层内水体积的压缩系数, cm^2/kg ; n 为孔隙度, 无量纲; ρ 为水的密度, kg/m^3 ; g 为重力加速度, $9.8 m/s^2$; K 为含水层的渗透系数, m/d ; σ_z 含水层所受的垂向

应力, kPa, $\sigma_z = q \left[1 - \left(1 + \frac{R}{Z} \right)^2 \right]^{-\frac{3}{2}}$, q 为单位面积上的压力变化, 是与水头 h 有关的量, kPa; R 为压力变化分布区半径, m; Z 为距压力变化面的距离, m。

4.3 非抽水含水层与抽水含水层水位降深的关系

经过傅立叶变换和逆变换, 且把由抽水作用

引起的压力变化看成点变化时, 从式(1)得到非抽水含水层与抽水含水层水位降深的关系可近似表示为:

$$s = \frac{\alpha}{\rho g(\alpha + n\beta)} \cdot \rho g H(1 - C_m) \left[\operatorname{erf} \left(\frac{R}{\omega} \right) \right]^2 \quad (2)$$

式中: s 为非抽水含水层的水位降深, m; H 为抽水含水层水位降深, m; $1 - C_m$ 为含水层上覆层与下伏层的平均应力传递系数, $0 < 1 - C_m \leq 1$; C_m 为含水层上覆层与下伏层的平均应力衰减系数; $\omega = 2\sqrt{a(t-t_0)}$, t 为抽水持续时间, t_0 为抽水开始时间, a 为含水层压力传导系数。

由(2)式可知, 在其他条件相同时, 抽水含水层的水位降深越大, 非抽水含水层的水位降深也就越大。

(2)式中有 4 个未知量, 即 α 、 β 、 n 和 C_m 。只有当 4 个量全都知道时, 才能准确地求出非抽水含水层的水位降深 s 。根据土力学原理^[13], 土的体积压缩系数不是一个定值, 与土的各种性质有关, 一般情况下该数据需试验测定。这里对该式做一些假定以拟合水位降深。通常水的体积压缩系数变化不大, 根据试验结果, β 值为 $4.69 \times 10^{-10} cm^2/kg$ ^[8]; 本课题组实测孔隙度值见表 5。假定垂直作用力在传递过程中不变, 即 $1 - C_m = 1$ 。那么, 在这种情况下, 只需调整土体积压缩系数 α 的值即可。

对(2)式通过编程计算, 非抽水含水层在不考虑水量交换的情况下, 水位动态曲线都得到了很好的拟合(图 5)。保持 β 、 n 和 C_m 3 个参数不变拟合的各含水层的 α 值见表 5。需要说明的是, α 值是在假设条件下计算出来的, 是否符合实际情况, 需要通过试验验证。但是一般情况下, 土体积压缩系数比水体积压缩系数大两个数量级, 计算结果不失一般性。

表 5 固定 β 、 n 、 $1 - C_m$ 拟合的 α 值
Table 5 Fitted values of α based on unvarying β , n and $1 - C_m$

含水组	岩性	深度/m	n^*	$\beta/$ (cm^2/kg)	$1 -$ C_m	S_s	$\alpha/$ (cm^2/kg)
I	粉砂	57	0.410			4.8×10^{-4}	7.1×10^{-8}
II	粉细砂	173	0.415			3.2×10^{-5}	1.4×10^{-8}
III	粉砂	320	0.405	$4.69 \times$ 10^{-10}	1.0	1.6×10^{-5}	1.9×10^{-8}
IV	细砂	431	0.385			6.7×10^{-5}	5.9×10^{-8}
V	细砂	550	0.315			7.2×10^{-5}	7.4×10^{-8}

注: * 本课题组实测值; n 为孔隙度, β 为水体积压缩系数, C_m 为边界控制系数, S_s 为贮水率, α 为含水层骨架压缩系数。

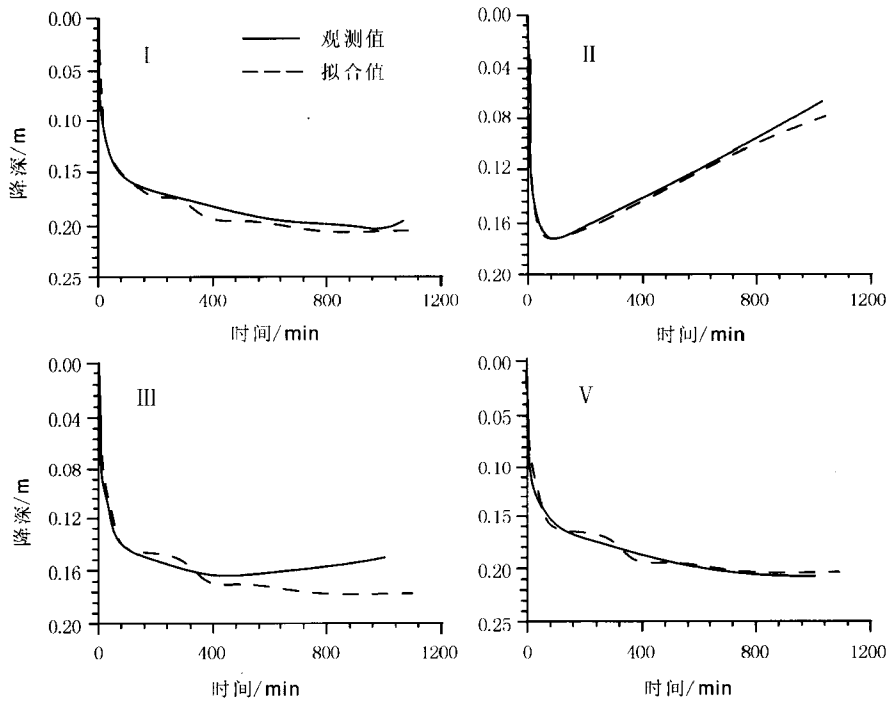


图 5 第 IV 含水组抽水时的水位影响效应拟合曲线

Fig. 5 Drawdown fitted curves showing water level effect as the 4th aquifer being pumped

4.4 水位影响效应

水位影响效应用符号 B 表示。根据误差函数性质，当 $t \rightarrow t_0$ 时，其数学表达式可近似表示为：

$$B = \frac{S_{\max}}{H} = \frac{\alpha}{\rho g(\alpha + n\beta)} \cdot \rho g(1 - C_m) \quad (3)$$

式中： S_{\max} 是非抽水含水层由抽水含水层抽水引起的最大水位降深，m； H 为非抽水含水层达到最大降深时抽水含水层的水位降深，m； B 为水位影响效应，mm/m。

根据(3)式计算抽水含水组单位降深引起的非抽水含水组的水位影响效应，显示出如下规律：对于抽水含水组的上部含水组来说，距离越远，水位影响效应越大；对于抽水含水组的下部含水组来说，距离越远，水位影响效应越小(表 6)。

表 6 不同层位含水组单位降深的水位影响效应
Table 6 Pumping effect of unit drawdown in different aquifers

抽水含水组	非抽水含水组的水位影响效应/(mm/m)				
	I	II	III	IV	V
II	0.87	-	0.42	0.15	0.10
IV	1.94	0.79	0.44	-	0.83
V	1.45	0.85	0.23	0.13	-

水位影响效应的大小可做如下解释：抽水过程中，抽水含水层上部地层压力的变化属于位能变化，非抽水含水层距抽水含水层距离越大，位

能越大，水位影响效应越大。对于抽水含水层下部地层来说，水位影响效应使含水介质压缩，距离抽水含水层越远，水位影响效应越小。

5 讨论与结论

华北平原衡水地区的抽水试验结果表明：当某一含水层抽水时，非抽水含水层地下水位随抽水含水层水位下降而下降，在抽水初期，该现象表现明显，当抽水含水层水位达到稳定或缓慢下降时，这种现象随之消失，我们把这种现象称为抽水含水层对非抽水含水层的水位影响效应，简称为水位影响效应。

利用数值模拟和数学模型的方法，对水位影响效应产生机理进行了分析，取得了如下认识：水位影响效应不是由含水层的越流引起的，而是因为含水层抽水时使得地层压力减小而引起的水位变动，其间并无水量的交换，其实质是地层压力的变化。

单位降深的水位影响效应显示：上部含水层距离抽水含水层越远，该效应越大；下部含水层距离抽水含水层越近，该效应越大。

由于尚缺乏足够的资料，对水位影响效应的研究还存在一些问题，比如：(1)在不同的试验场地中，是否都具有水位影响效应，其大小是否一

样; (2) 水位影响效应的影响范围有多大, 在影响范围内, 与观测孔的距离有无关系; (3) 水位影响效应与抽水量有无关系等。

总之, 水位影响效应属于地下水微动态范畴, 是在抽水试验过程中偶然发现的, 对其存在的诸多问题尚需进一步研究。

参考文献:

- [1] 张宗祜, 沈照理, 薛禹群, 等. 华北平原地下水环境演化 [M]. 北京: 地质出版社, 2000.
- [2] 施雅风. 华北地区水资源合理开发利用 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1990.
- [3] 陈梦雄. 中国地下水研究论文选集 [M]. 北京: 中国大地出版社, 2007.
- [4] 郭永海, 沈照理, 钟佐燊, 等. 从地面沉降论河北平原深层地下水资源属性及合理评价 [J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 1995, 20(4): 415-420.
- [5] 陈宗宇, 张光辉, 聂振龙, 等. 中国北方第四系地下水同位素分层及其指示意义 [J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2002, 27(1): 97-103.
- [6] Chen Zongyu, Nie Zhenlong, Zhang Zhaoji, et al. Isotopes and sustainability of groundwater resources, North China Plain [J]. Groundwater, 2005, 43(4): 485-493.
- [8] Kim J M, Parizek R R. Numerical simulation of the Noordbergum effect resulting from groundwater pumping in a layered aquifer system [J]. Journal of Hydrology, 1997, 202: 1-4.
- [8] 汪成民, 车用太, 万迪堃, 等. 地下水微动态研究 [M]. 北京: 地震出版社, 1988.
- [9] Hsieh P A. Deformation induced changes in hydraulic head during groundwater withdrawal [J]. Groundwater, 1996, 35(6): 1082-1089.
- [10] 王旭升, 陈崇希, 焦赳赳. 承压含水层井流-盖层弯曲效应的解析理论 [J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2003, 28(5): 545-550.
- [11] 张昭栋, 郑金涵, 冯初刚, 等. 深井水位的地表荷载效应及其与含水层物理力学参数关系初探 [J]. 地震学刊, 1990(1): 27-32.
- [12] 张昭栋, 郑金涵, 冯初刚. 水井水位的气压效率和降水荷载效率之间的定量关系 [J]. 地震, 1989(6): 38-44.
- [13] 庄乐和. 土力学 [M]. 北京: 地质出版社, 1982.