

天津地区含水层类型判别与参数分析^①

杨建民^{1,2}, 孟凡宪¹, 李梦洋³

(1. 天津大学建筑工程学院土木工程系, 天津 300072;

2. 滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室(天津大学), 天津 300072;

3. 石家庄市白求恩医务士官学校, 河北 石家庄 050081)

摘要:根据含水层数学模型的降深-时间双对数和半对数曲线特征,可以确定含水层类型;依据选定的含水层模型,调整其中水文地质参数以拟合抽水试验中观测井降深-时间实测数据,可以反演水文地质参数。将以上方法应用于天津地区 6 组工程抽水试验,获得试验含水层类型及其水文地质参数。该方法可用于其他相关工程,天津地区和工程建设有关的 50 m 埋深范围内含水层属性及其水文地质参数取值范围,可参考借鉴本文计算结果。

关键词:含水层;水文地质参数;数学模型;对数曲线;天津地区

中图分类号:P641

文献标志码:A

文章编号:1000-0844(2015)增刊 1-0074-08

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2015.02.0563

Classification and Parameter Analysis of Aquifers in Tianjin Area

YANG Jian-min^{1,2}, MENG Fan-xian¹, LI Meng-yang³

(1. Department of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Key Laboratory of Coast Civil Structure Safety (Tianjin University), Ministry of Education, Tianjin 300072, China;

3. Bethune Medical NCO School, Shijiazhuang, Hebei 050081, China)

Abstract: The log-log and semi-log plots of the theoretical time-drawdown relationships for confined, unconfined, and leaky aquifers possess different characteristics, which can be used to identify the type of aquifer. By adjusting hydrogeological parameters, the calculated values of time-drawdown can best-fit with observed data from pumping tests, then the nearest hydrogeological parameters of pumping field can be obtained. This method was applied to six pumping tests in Tianjin area, which resulted in determination of the types of aquifers and the value range of their hydrogeological parameters. For the similar pumping tests and engineering, especially in Tianjin area, the method and values specified in this paper can be used for reference.

Key words: aquifer; hydrogeological parameters; mathematical model; logarithmic curve; Tianjin area

0 引言

近些年,我国地下工程建设中越来越多地涉及到含水层和地下水问题,如 20~30 m 深度的高层建筑基坑、地铁车站基坑和区间隧道等,天津、上海等城市当工程施工深度达 20 m 以上时会遇到承压含水层。

当地下工程涉及到含水层时,需要界定含水层的类型,确定水文地质参数。界定含水层类型,方法之一是根据各种类型含水层定义揭示的特征做定性分析,但因存在主观因素往往导致应用中产生争议;方法二是根据各种类型含水层数学模型中变量间的函数关系做定量分析,同时可以确定含水层的水文

① 收稿日期:2015-04-21

基金项目:天津大学北洋学者-青年骨干教师计划资助项目

作者简介:杨建民(1979-),男,山西原平人,博士,副教授,硕士生导师,主要从事工程地下水方面的研究与教学工作。

E-mail: yangjianmin@tju.edu.cn

地质参数,具有普适性。目前常规实验数据分析方法仅能得到渗透系数 K 和影响半径 R 等有限指标,难以满足复杂计算分析的需要,方法二所得指标可以更全面描述含水层特性。

本文针对孔隙介质含水层,应用方法二对天津地区地下工程常见含水层进行界定并确定相应的水文地质参数。

1 含水层数学模型

地下工程施工时,从地表到施工深度范围可能遇到的含水层分为三种类型:潜水层、承压含水层和越流承压含水层。以下列出这三种含水层的经典数学模型。

1.1 承压含水层

1935 年 Theis^[1]建立了无越流承压含水层完整井非稳定流公式:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u) = \frac{Q}{4\pi T} \int_u^\infty \frac{1}{y} e^{-y} dy \quad (1)$$

$$u = \frac{r^2 \mu^*}{4Tt} \quad (2)$$

式中, s 为抽水影响范围内任一点任一时刻的水位降深; Q 为抽水井流量; T 为导水系数; t 为自抽水开始到计算时刻的时间; r 为计算点到抽水井的距离; μ^* 为含水层的贮水系数。

1.2 越流承压含水层

1955 年 Hantush 和 Jacob^[1]建立了有越流补给的承压含水层完整井非稳定流公式:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W\left(u, \frac{r}{B}\right) = \frac{Q}{4\pi T} \int_u^\infty \frac{1}{y} e^{-y - \frac{r^2}{4By}} dy \quad (3)$$

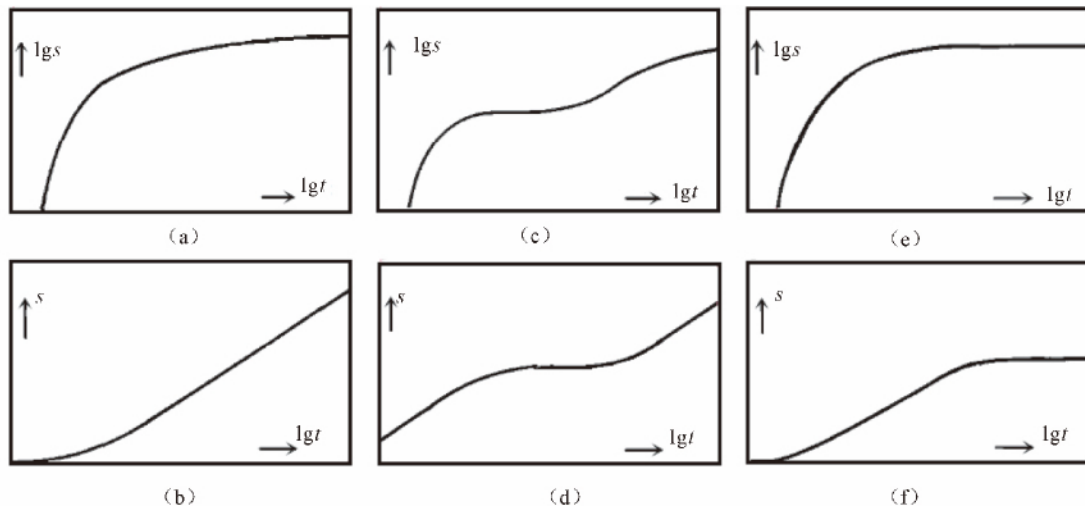


图 1 承压、潜水、越流类型含水层的 $s-lgt, lgs-lgt$ 曲线

Fig. 1 $s-lgt, lgs-lgt$ curves of the confined, unconfined and leaky aquifers

$$B = \sqrt{T/(K'b')} \quad (4)$$

式中, K' 为弱透水层的渗透系数; b' 为弱透水层厚度; T 为越流承压含水层的导水系数; B 为越流因数。

1.3 潜水层

1963 年 Boulton 提出考虑迟后疏干的潜水完整井抽水时的三阶段解^[2]:

$$\text{抽水早期: } s = \frac{Q}{4\pi T} W\left(u_a, \frac{r}{D}\right) \quad (5)$$

$$\text{抽水中期: } s = \frac{Q}{2\pi T} K_0\left(\frac{r}{D}\right) \quad (6)$$

$$\text{抽水晚期: } s = \frac{Q}{4\pi T} W\left(u_y, \frac{r}{D}\right) \quad (7)$$

$$\text{其中: } u_a = \frac{r^2 \mu^*}{4Tt} \quad (8)$$

$$u_y = \frac{r^2 \mu}{4Tt} \quad (9)$$

式中, $D = \sqrt{\frac{T}{\alpha\mu}}$ 为疏干因素; μ 为给水度; $\frac{1}{\alpha}$ 为延迟指数; μ^* 为贮水系数; $K_0\left(\frac{r}{D}\right)$ 为虚宗量第二类 Bessel 函数。

2 含水层类型识别与参数反演方法

2.1 含水层类型识别方法

以上孔隙介质承压含水层、潜水层和越流承压含水层,其数学模型的降深(s)-时间(t)理论解全对数和半对数曲线关系见图 1^[3]。每一种类型含水层数学模型理论解的全对数、半对数曲线关系成对地展示,更明显突出了含水层抽水时 $s-t$ 反应的差异,有利于被正确判别含水层类型。

图1(a)、(b)显示,在一均质、各向同性的理想承压含水层中以恒定流量从小口径完整井中抽水时,相较于 $\lg s\text{-}\lg t$ 曲线, $s\text{-}\lg t$ 曲线特征性更强。抽水前期 $s\text{-}\lg t$ 曲线显示非线性,抽水后期 $s\text{-}\lg t$ 曲线呈线性。

图1(c)、(d)显示,在一均质、各向同性、有迟后疏干的潜水层中, $\lg s\text{-}\lg t$ 曲线和 $s\text{-}\lg t$ 曲线都具有明显特征。抽水前期图1(c)中, $\lg s\text{-}\lg t$ 曲线与图1(a)相似,抽水中期曲线呈一水平段,显示上覆渗透性较差含水层补水暂时平衡了井中抽水流量,抽水后期 $\lg s\text{-}\lg t$ 曲线又与图1(a)相似。图1(d)特征性更明显,在抽水前期和后期具有两端平行直线段。

图1(e)和图1(f)显示的是越流承压含水层的曲线。抽水早期曲线类似于图1(a)和(b),抽水中期弱透水层对承压含水层补水越来越多,直到抽水后期补给量与抽水量达到平衡,渗流进入稳定状态,在 $\lg s\text{-}\lg t$ 曲线和 $s\text{-}\lg t$ 曲线中都表现为平直线段。

由抽水试验时得到的降深(s)-时间(t)数据绘制 $\lg s\text{-}\lg t$ 曲线和 $s\text{-}\lg t$ 曲线,根据两曲线对照上述特征可以判别含水层类型。

2.2 含水层参数反演方法

根据抽水试验数据反演含水层参数的传统方法中,包括公式法如潜水和承压水的稳定井流 Dupuit、Thiem 公式,潜水非稳定井流仿 Theis 公式;图形特征法如承压水非稳定井流 Theis 配线法、Jacob 直线图解法、水位恢复法,承压水非稳定井流拐

点法等。

本文参数反演方法为抽水阶段的曲线拟合法,类似肖长来^[4]等提出的全程拟合法。具体做法为先根据抽水试验降深(s)-时间(t)数据绘制 $\lg s\text{-}\lg t$ 、 $s\text{-}\lg t$ 曲线,进而根据曲线特征判断含水层类型,然后对文中“1 含水层数学模型”对应模型中的参数进行修正,使降深的计算值与实测值之间的误差平方和最小,达到计算水位过程线与实测曲线的最佳拟合,即可获得试验场地含水层水文地质参数。

3 天津地区的工程应用

3.1 天津市土层与含水层分布

天津市地基土按年代成因层序排列划分为 15 个成因标准层,见表 1^[5]。其中③、⑥、⑦、⑧和⑨层中的粉土和粉砂层是对工程影响较大的承压含水层。工程建设涉及到的约 50 m 埋深范围内,在市区存在三个承压含水层,分别位于埋深 10 m、20 m 和 30 m 处,各层厚度约 5 m,水位埋深约 1~3 m;在滨海新区埋深约 30~50 m 处存在一厚度约 20 m 的承压含水层,水位埋深约 3~5 m。

3.2 抽水实验概述与典型试验计算

本文选取 6 组位于天津地区的工程抽水试验案例,其工点分布见图 2。阐明含水层类型判断及水文地质参数反演方法的应用,并判定该 6 组抽水试验所涉及的含水层类别及水文地质参数取值范围。

表 1 天津市地基土标准层排序

Table 1 The standard soil layers in Tianjin

层序		成因	成因代号	标准层序代码	地层名称	一般层底埋深/m
统	组					
全新统 Q_4	上组 Q_4^3	人工堆积	Qml	①	人工填土层	0~≥4
		坑底淤积	Q_4^{3N} si	②	新近沉积层	1~8
		古河道、洼淀冲积	Q_4^{3N} al	③		2~16
	中组 Q_4^2	河床-河漫滩相沉积	Q_4^2 al	④	第I陆相层	4~8
		湖沼相沉积	Q_4^2 l+h	⑤	第I海相层	11~15
		浅海相沉积	Q_4^2 m	⑥	第II陆相层	14~17
		沼泽相沉积	Q_4^2 h	⑦	第II海相层	18~22
	下组 Q_4^1	河床-河漫滩相沉积	Q_4^1 al	⑧	第III陆相层	28~31
		河床-河漫滩相沉积	Q_4^1 al	⑨	第III海相层	32~35
		滨海-潮汐带相沉积	Q_4^1 mc	⑩	第IV陆相层	47~54
上更新统 Q_3	三组 Q_3^3	河床-河漫滩相沉积	Q_3^3 al	-	第III海相层	55~62
	二组 Q_3^2	浅海-滨海相沉积	Q_3^2 m	-	第IV陆相层	73~79
	一组 Q_3^1	河床-河漫滩相沉积	Q_3^1 al	-	第IV海相层	95~103
	中组 Q_3^2	海三角洲相沉积	Q_3^2 mc	-	第VI陆相层	>155
中更新统 Q_2	上组 Q_2^3	海三角洲相沉积	Q_2^3 mc	-	-	-
	中组 Q_2^2	河床-河漫滩相沉积	Q_2^2 al	-	-	-

6 组抽水试验 A~F 分别是:A-南开区某建筑工程抽水试验;B-西青区某建筑工程抽水试验;C-红桥

区某市政工程抽水试验;D-河东区某建筑工程抽水试验;E-滨海新区某市政工程抽水试验;F-滨海新区某



图 2 6 组抽水试验工点分布

Fig. 2 Location of sites in the 6 pumping tests

市政工程抽水试验II。

以实验 A 为例,说明含水层类型判别与参数反演过程。其他试验采用与试验 A 相同的方法,不再赘述。6 组抽水试验概况和反演结果汇总表 2 与表 3。

实验 A 位于天津市南开区,试验场地抽水井和观测井井位布置如图 3,试验井井身结构与含水层关系如图 4 所示。试验中 b1 井抽水流量 $Q=2.7 \text{ m}^3/\text{h}$,a1 井抽水流量 $Q=2.5 \text{ m}^3/\text{h}$,第一降深非稳定流试验段各观测井的水位降深-时间试验数据见图 5~图 8。根据图中观测井 $s\text{-}lgt$ 、 $lgs\text{-}lgt$ 曲线特征,判断 b1 抽水的标高为 $-21.5 \sim -26.5 \text{ m}$ 。⑦。粉土层为

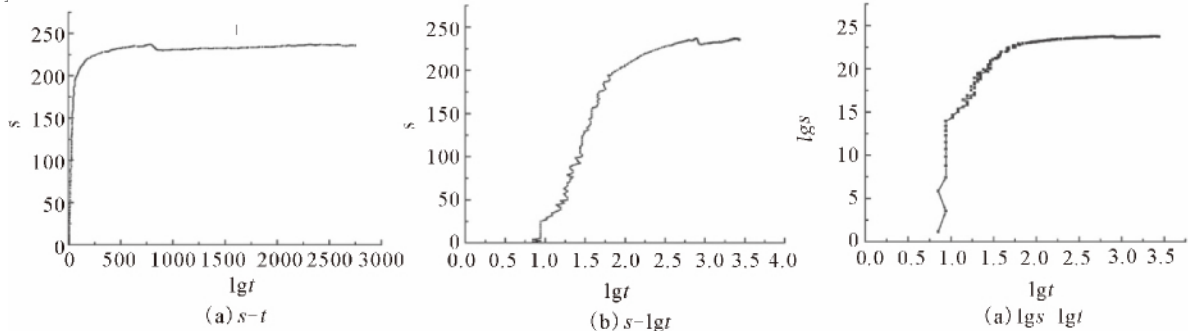


图 5 a2 观测井水位降深-时间试验数据

Fig. 5 Test data of time-drawdown in observation well a2

无越流承压含水层;a1 抽水的标高为 $-31.5 \sim -36.5 \text{ m}$ 。⑨。粉砂层为越流承压含水层。含水层类型确定后,选用相应的数学模型反演水文地质参数,同时拟合试验水位降深数据,结果见图 9。

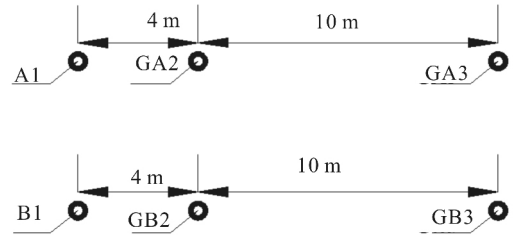


图 3 试验 A 抽水井与观测井井位布置图

Fig. 3 Location of pumping wells and observation wells in pumping test A

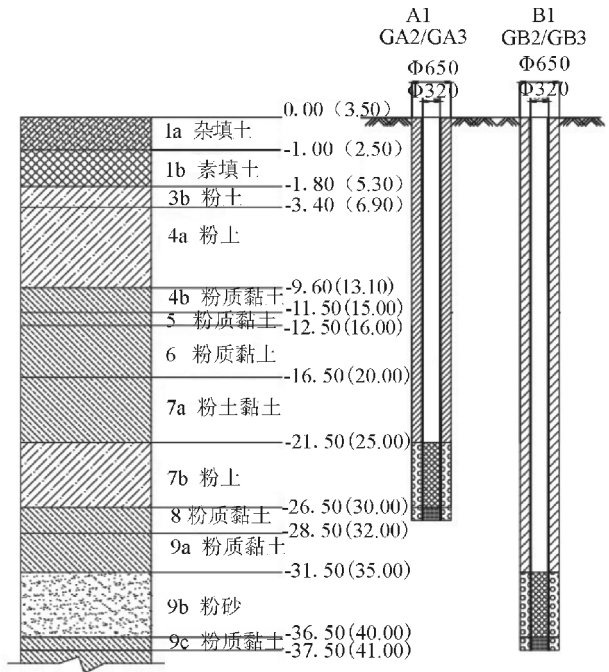


图 4 A 试验抽水井与观测井井身结构与地层关系图

Fig. 4 Relationship between soil layers and structure of pumping wells and observation wells in pumping test A

表 2 6组抽水试验案例基本信息

Table 2 General information of 6 pumping tests

试验序号	试验层标高/m	地层编号	土质	抽水井类型	流量/ (m ³ ·h ⁻¹)	观测孔 I 距离/m	观测孔 II 距离/m	观测孔 III 距离/m	观测孔 IV 距离/m	观测孔 V 距离/m
A	-21.5 ~ -26.5	⑦ ₂	粉土	完整井	2.70	4.0	14.0	-	-	-
A	-31.5 ~ -36.5	⑨ ₃	粉砂	完整井	2.50	4.0	14.0	-	-	-
B	-8.53 ~ -14.48	③	粉砂	完整井	1.96	6.6	17.6	30.6	-	-
C	-17.27 ~ -30.27	⑥	粉土	完整井	14.8	24.54	49.37	-	-	-
C	-34.17 ~ -38.77	⑦ ₂	粉土	完整井	9.70	15.58	-	-	-	-
D	-19.45 ~ -29.47	⑨ ₃	粉砂	完整井	1.29	5.0	10.0	-	-	-
D	-19.45 ~ -29.47	⑨ ₃	粉砂	完整井	3.56	16.88	26.88	-	-	-
E	-28.89 ~ -56.24	⑧ ₄	粉砂	完整井	26.50	13.37	16.12	25.09	45.06	-
E	-28.89 ~ -56.24	⑧ ₄	粉砂	完整井	53.42	13.37	16.12	25.09	45.06	-
F	-28.00 ~ -55.00	⑦ ₂	粉砂	完整井	142.00	14.5	14.5	14.5	25.1	29.0

表 3 6组抽水试验含水层类型判别与参数反演结果

Table 3 Aquifer types and hydrogeological parameters calculated from 6 pumping tests

序号	测井编号	流量 Q (m ³ ·min ⁻¹)	井距 r /m	导水系数 T (m ² ·min ⁻¹)	贮水系数 S(V)	K'/b' (1/min)	深度/m	土质	渗透系数 K (m·d ⁻¹)	释水系数 S' (1·m ⁻¹)	含水层类型
A	ga-2	0.042 0	4	1.00E-05	4.50E-05	8.40E-07	20~30	粉土	0.001	4.50E-06	越流承压层
A	ga-3	0.042 0	14	1.00E-04	2.00E-04	6.50E-07	20~30	粉土	0.014	2.00E-05	越流承压层
A	gb-2	0.043 0	4	3.20E-04	9.00E-06	-	35~40	粉砂	0.092	1.80E-06	承压含水层
A	gb-3	0.043 0	14	1.90E-02	1.10E-03	-	35~40	粉砂	5.472	2.20E-04	承压含水层
B	gc-1	0.032 7	6.6	1.90E-02	1.10E-03	-	25~35	粉砂	2.736	1.10E-04	承压含水层
B	gc-2	0.032 7	17.6	2.40E-02	1.50E-03	-	25~35	粉砂	3.456	1.50E-04	承压含水层
B	gc-3	0.032 7	30.6	2.00E-02	1.30E-03	1.70E-06	25~35	粉砂	2.880	1.30E-04	越流承压层
C	g-1	0.247 0	24.54	3.20E-02	1.20E-03	-	20~30	粉土	4.608	1.20E-04	承压含水层
C	g-2	0.247 0	49.37	3.50E-02	7.50E-04	-	20~30	粉土	5.040	7.50E-05	承压含水层
C	g-3	0.247 0	15.58	1.80E-02	3.50E-03	-	35~40	粉土	5.184	7.00E-04	承压含水层
D	s5-2	0.021 4	5	1.50E-03	4.00E-03	-	20~25	粉砂	0.432	8.00E-04	承压含水层
D	s5-3	0.021 4	10	2.30E-03	2.00E-03	-	20~25	粉砂	0.662	4.00E-04	承压含水层
D	s6-1	0.059 3	26.88	5.50E-03	2.00E-06	-	20~25	粉砂	1.584	4.00E-07	承压含水层
D	s6-2	0.059 3	16.88	5.50E-03	2.00E-06	-	20~25	粉砂	1.584	4.00E-07	承压含水层
E	g-1	0.442 0	25.09	1.50E-01	2.50E-04	-	33~50	粉砂	12.706	1.47E-05	承压含水层
E	g-2	0.442 0	45.06	1.50E-01	5.00E-04	-	33~50	粉砂	12.706	2.94E-05	承压含水层
E	k-2	0.442 0	13.37	1.50E-01	3.00E-04	-	33~50	粉砂	12.706	1.76E-05	承压含水层
E	k-3	0.442 0	16.12	1.50E-01	2.00E-04	-	33~50	粉砂	12.706	1.18E-05	承压含水层
E	g-1	0.890 3	25.09	1.20E-01	5.00E-04	-	33~50	粉砂	10.165	2.94E-05	承压含水层
E	g-2	0.890 3	45.06	1.35E-01	6.00E-04	-	33~50	粉砂	11.435	3.53E-05	承压含水层
E	k-2	0.890 3	13.37	1.40E-01	3.50E-04	-	33~50	粉砂	11.859	2.06E-05	承压含水层
E	k-3	0.890 3	16.12	1.35E-01	5.00E-03	-	33~50	粉砂	11.435	2.94E-04	承压含水层
F	g-1	2.367 0	14.5	2.00E-02	1.50E-03	-	33~50	粉砂	1.694	8.82E-05	承压含水层
F	j1-2	2.367 0	14.5	2.00E-02	1.00E-03	-	33~50	粉砂	1.694	5.88E-05	承压含水层
F	j1-3	2.367 0	14.5	2.00E-02	3.00E-03	-	33~50	粉砂	1.694	1.76E-04	承压含水层
F	j1-4	2.367 0	29	2.00E-02	1.00E-03	-	33~50	粉砂	1.694	5.88E-05	承压含水层
F	j1-5	2.367 0	25.1	1.60E-02	1.60E-03	-	33~50	粉砂	1.355	9.41E-05	承压含水层

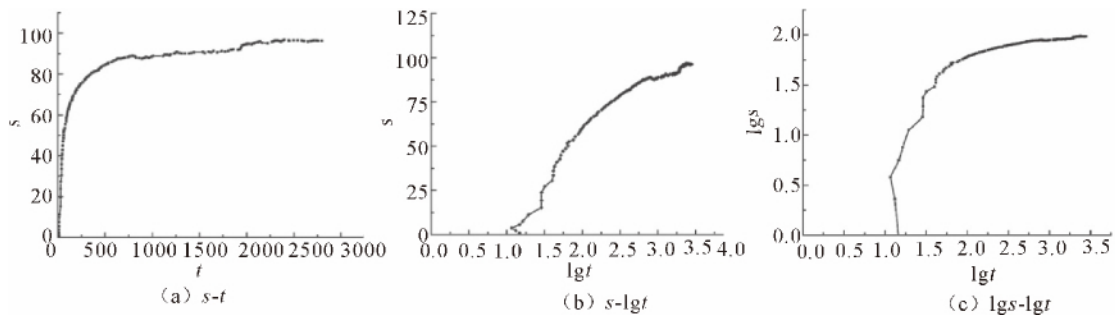


图 6 a3 观测井水位降深-时间试验数据

Fig. 6 Test data of time-drawdown in observation well a3

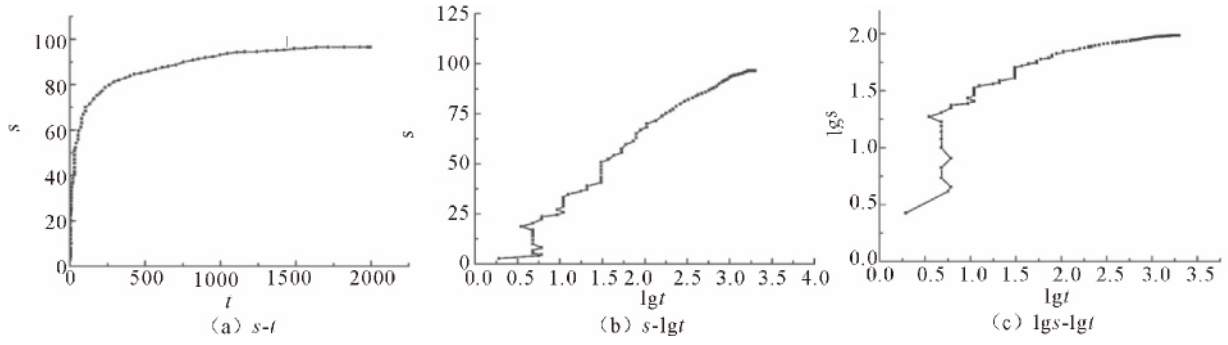


图 7 b2 观测井水位降深-时间试验数据

Fig. 7 Test data of time-drawdown in observation well b2

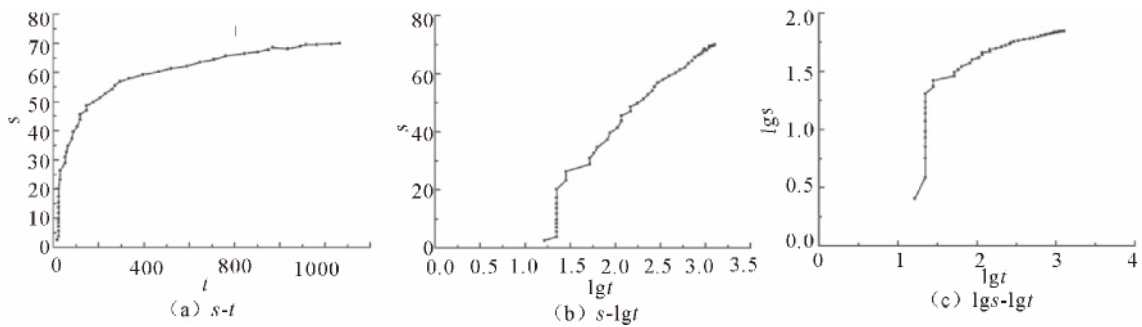


图 8 b3 观测井水位降深-时间试验数据

Fig. 8 Test data of time-drawdown in observation well b3

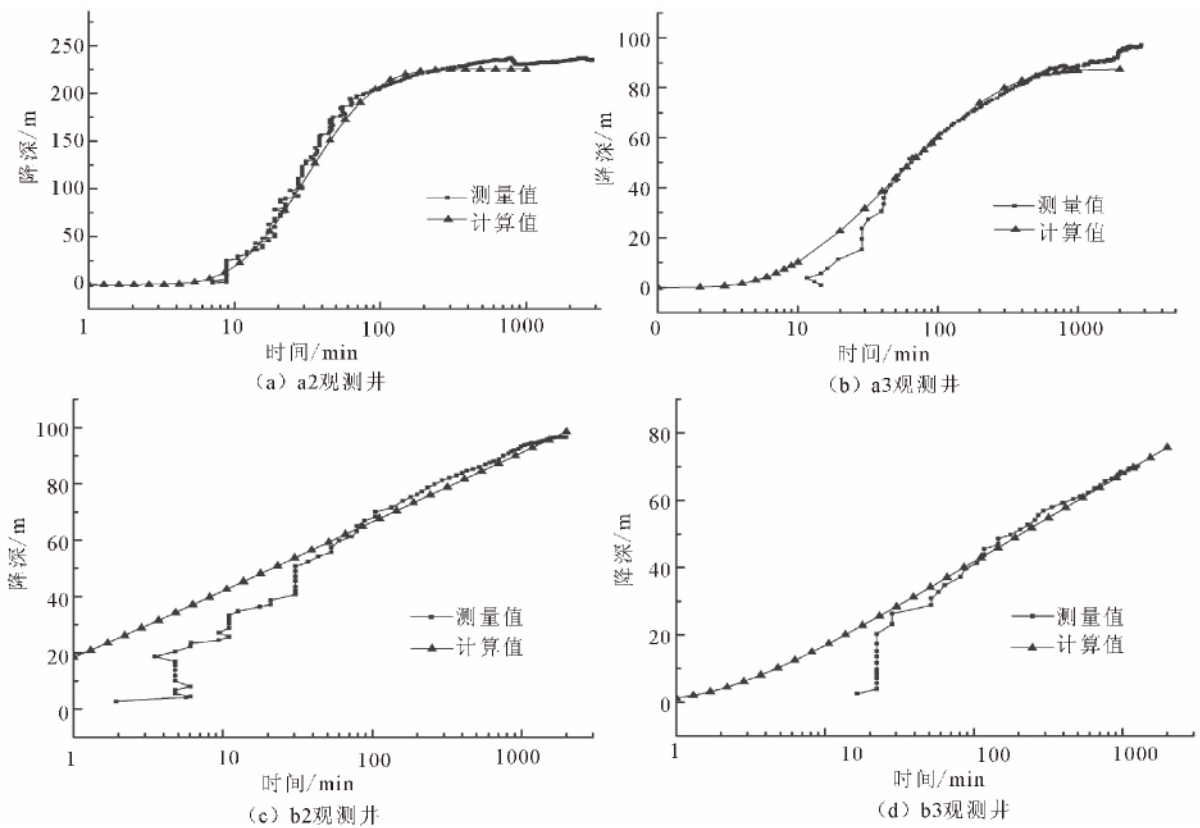


图 9 观测井水位降深-时间试验数据拟合结果

Fig. 9 Fitting curves of data of drawdown-time in observation wells

3.3 抽水实验计算结果汇总

以下汇总出各组抽水试验的基本信息、地层分布和水文地质参数反演结果,见表2、表3,以及图10~图12。

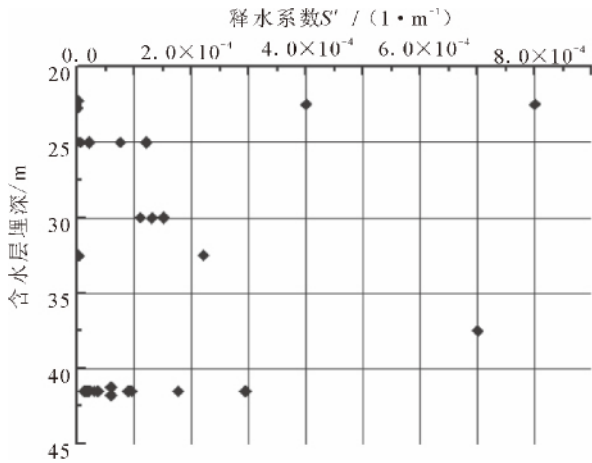


图10 含水层各埋深位置释水系数取值

Fig. 10 Determination of storage coefficient at different depth of the aquifer

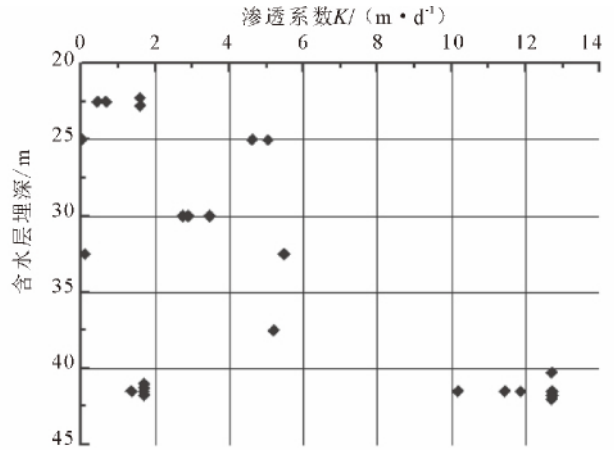


图11 含水层各埋深位置渗透系数取值

Fig. 11 Determination of permeability coefficient at different depth of the aquifer

4 总结

根据抽水试验降深(s)-时间(t)数据的 $lg s - lg t$ 、 $s - lg t$ 曲线特征判断含水层类型,然后应用相应的含水层数学模型拟合试验降深数据,从而反演获得试

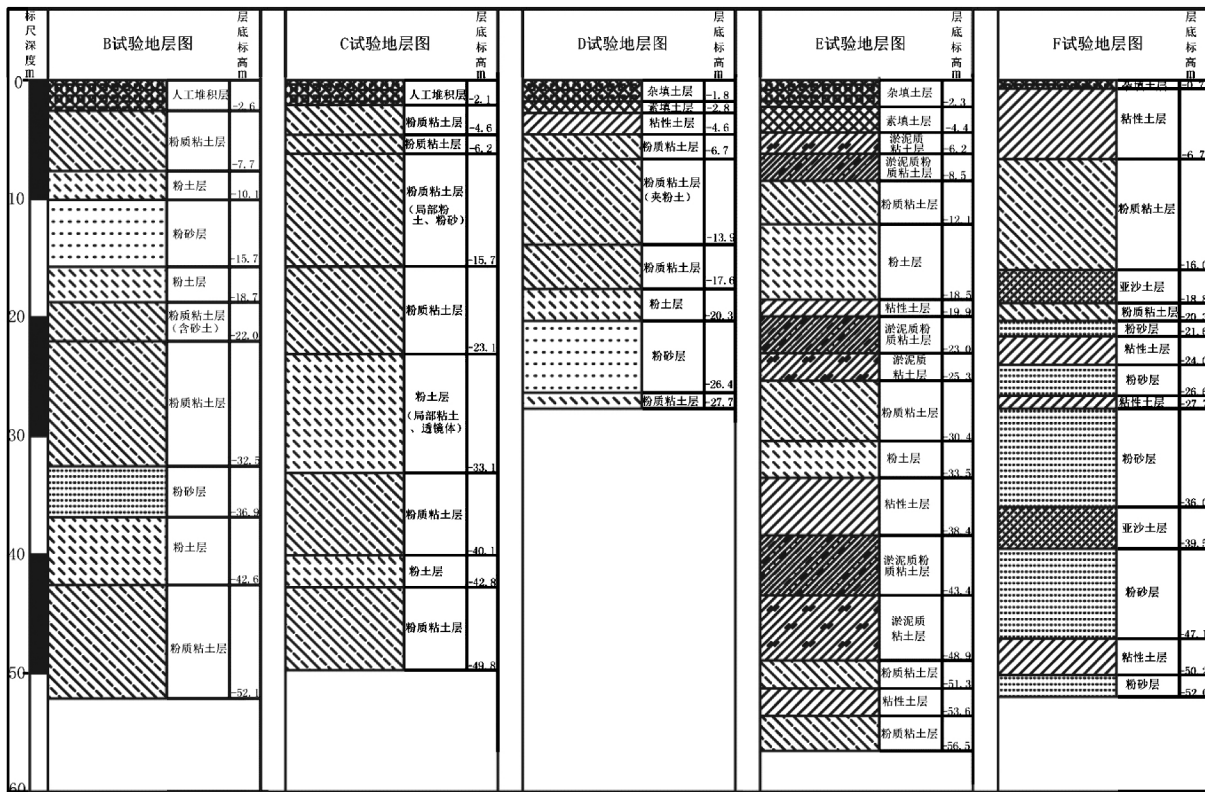


图12 5组抽水试验工点地层图

Fig. 12 Geologic log of sites in the 5 pumping tests

验场地含水层水文地质参数。以上方法用于判定含水层类型和反演水文地质参数是可行的。

基于天津市4块场地和滨海新区2块场地、6组抽水实验共27份水位降深观测数据的分析,基本

判定天津地区 50 m 埋深范围内含水层为无越流承压含水层,渗透系数可在 $0.5 \sim 15$ (m/d) 范围内取值,弹性释水系数可在 $4 \times 10^{-7} \sim 8 \times 10^{-4}$ (1/m) 范围内取值。

以上确定含水层类型和水文地质参数的方法可供类似工程参考。天津地区 50 m 埋深范围内含水层类型和水文地质参数取值可参考本文研究成果。

参考文献(References)

- [1] 薛禹群. 地下水动力学[M]. 北京:地质出版社,1997.
- [2] 周志芳,王锦国. 地下水动力学[M]. 北京:科学出版社,2013.
- [3] G P Kruseman, N A. de Ridder. Analysis and Evaluation of Pumping Test Data[M]. Wageningen, Netherlands: International Institute for Land Reclamation and Improvement,1994.
- [4] 肖长来,梁秀娟,崔建铭,等. 确定含水层参数的全程曲线拟合法[J]. 吉林大学学报:地球科学版,2005,35(6):751-755.
- [5] 天津市建设管理委员. 天津市地基土层序划分技术规程(GB/T29-191-2009)[S]. 2009.