

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2019.01.002

# 一种求解承压含水层水文地质参数的新配线法

周志芳<sup>1</sup>, 王萍<sup>1</sup>, 李雅冰<sup>1</sup>, 吴建<sup>1</sup>, 夏文俊<sup>2</sup>, 王峻<sup>2</sup>, 方忠强<sup>3</sup>

(1. 河海大学地球科学与工程学院, 江苏南京 210098; 2. 江苏省交通工程建设局, 江苏南京 210004;  
3. 中设设计集团股份有限公司, 江苏南京 210014)

**摘要:** 为了能充分利用抽水试验规范所规定的连续性抽水试验数据资料, 原位确定承压含水层不同水头降落漏斗范围的渗透系数( $K$ )、导水系数( $T$ )和储水系数( $\mu^*$ ), 基于 Theis 井流公式及叠加原理导出一种流量变化时无量纲形式的承压含水层降深随时间变化的解析解, 提出一种含有参变量的一组无量纲降深-时间标准曲线及相应的配线方法。将变流量抽水试验得到的降深随时间变化的实测曲线与标准曲线进行配线, 选择任一匹配点记录其在标准曲线、实测曲线中的坐标值和配线的参变量值, 将这些记录值代入相关公式, 确定对应某一流量时承压含水层的水文地质参数。以苏锡常南部高速无锡境内的场地抽水试验为例进行实例验证, 运用配线法分阶段完成, 最终求得该场地 2-3 粉土层承压含水层在变流量下的渗透系数分别为  $5.12 \times 10^{-4}$  cm/s、 $2.54 \times 10^{-3}$  cm/s、 $2.83 \times 10^{-3}$  cm/s。

**关键词:** 连续性抽水试验; 承压含水层; Theis 井流; 叠加原理; 参数解析解; 配线法; 参变量; 水文地质参数; 苏锡常南部高速公路; 无锡境内场地

中图分类号: P64; TU443

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2019)01-0007-06

## A new type curve method for estimating hydrogeological parameters of confined aquifers

ZHOU Zhifang<sup>1</sup>, WANG Ping<sup>1</sup>, LI Yabing<sup>1</sup>, WU Jian<sup>1</sup>, XIA Wenjun<sup>2</sup>,  
WANG Jun<sup>2</sup>, FANG Zhongqiang<sup>3</sup>

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;  
2. Jiangsu Provincial Traffic Engineering Construction Bureau, Nanjing 210004, China;  
3. China Design Group Co., Ltd., Nanjing 210014, China)

**Abstract:** In order to make full use of the continues pumping test data to estimate the hydraulic conductivity ( $K$ ), the transmissivity ( $T$ ) and the storage coefficient ( $\mu^*$ ) of different head depression cones in a confined aquifer, a dimensionless analytical solution of drawdown transients with variable pumping rates was derived based on the Theis formula and the principle of superposition. Furthermore, a new type curve method was proposed. The in-situ pumping test was conducted to obtain the drawdown record perturbed by stepwise rates. Then, the drawdown curve was used to match the corresponding type curve. After that, this method selects one match point and records its coordinate values on both the type curve and the real drawdown curve. By substituting these recorded values into related formulas, the hydraulic parameters of the confined aquifer can be determined. This method was applied to a field pumping test conducted at a southern highway in Wuxi, Jiangsu Province, China. The type curve matching process is implemented in stages. Field test results reveal that the hydraulic conductivity of the confined aquifer with the 2-3 silt layer are  $5.12 \times 10^{-4}$  cm/s,  $2.54 \times 10^{-3}$  cm/s and  $2.83 \times 10^{-3}$  cm/s respectively, which are corresponding to three-stage stepwise pumping rates.

**基金项目:** 国家重点研发计划(2016YFC0402803); 国家自然科学基金(41572209)

**作者简介:** 周志芳(1962—), 男, 教授, 博士, 主要从事水文地质研究工作。E-mail: zhouzf@hhu.edu.cn

**引用本文:** 周志芳, 王萍, 李雅冰, 等. 一种求解承压含水层水文地质参数的新配线法[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2019, 47(1): 7-12.

ZHOU Zhifang, WANG Ping, LI Yabing, et al. A new type curve method for estimating hydrogeological parameters of confined aquifers [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2019, 47(1): 7-12.

**Key words:** continues pumping test; confined aquifer; Theis formula; the principle of superposition; parametric analytical solution; type curve method; valuable parameters; aquifer parameters; Southern SuXiChang highway; field in Wuxi

水文地质参数对于地下工程抗浮设计、基础工程围护结构设计与施工、工程安全运行评价等有着至关重要的作用<sup>[1-2]</sup>。确定水文地质参数的方法一般分为经验数据法、经验公式法、室内试验法和现场试验法<sup>[3-5]</sup>等,其中抽水试验常用来求取水文地质参数<sup>[6-9]</sup>,是最直接、最实用的一种现场试验方法,也是工程前期水文地质勘察相关规范中的实物工作。水文地质工作者基于抽水试验数据,依赖解析模型<sup>[10-12]</sup>确定水文地质参数常用的公式有 Dupuit 公式、Theim 公式、Theis 公式<sup>[13-14]</sup>等。而 Jacob 直线图解法、配线法<sup>[15-16]</sup>、水位恢复法<sup>[17]</sup>等都是由 Theis 公式派生出来的确定承压含水层水文地质参数的方法。Jacob 直线图解法处理非稳定流抽水试验数据,其计算结果稳定,能充分利用抽水后期的资料,但存在一定的适用条件,否则计算参数的相对误差较大;配线法能充分利用抽水试验的全部资料,避免个别资料的偶然误差。文章提出一种新配线法,基于流量变化时水位降深的无量纲计算公式,利用各个阶段的试验数据单独进行参数求解,结果表明,该方法求解参数过程不仅直观快捷,而且可以通过上一阶段的参数计算结果引导下一阶段的配线过程。该方法具有以下优点:

**a.** 充分利用抽水试验规范中规定的 3 个定流量过程的降深随时间变化数据确定含水层水文地质参数<sup>[18]</sup>。规范中规定利用第一阶段定流量过程的降深随时间变化数据,基于 Theis 公式计算含水层非稳定流水文地质参数或根据 3 个定流量对应的抽水井、观测井稳定降深数据,基于 Theim 公式或稳定流 Dupuit 公式计算含水层水文地质参数。而对于后 2 个定流量过程的降深随时间变化数据没有被利用分析确定含水层水文地质参数。

**b.** 分析含水层渗透性的不均匀性。可将传统的连续性阶梯状抽水试验的各个阶段划分成不同定流量下的抽水试验,通过分析不同井流量下水头降落漏斗的影响范围,可计算出同一含水层在不同阶段不同流量下水文地质参数的变化,以此来判断该含水层渗透性的不均匀性。

**c.** 试验效率高。相对传统的单井抽水试验,每次改变流量后的试验不需要等水位恢复到初始水位后再进行二次试验,可直接进行变流量抽水试验,大幅度缩短了试验时间,提高工作效率,降低试验费用。

本次抽水试验区为江苏省苏锡常南部高速公路常州至无锡段的太湖隧道场地,基于水文地质抽水试验规范对该场地试验井进行变流量连续抽水试验,依据新配线法确定场地勘察范围内 2-3 粉土层的水文地质参数,结合地质勘察报告,为后续高速公路隧道基础施工提供必需的技术参数资料。

## 1 参数确定原理

在承压含水层完整井变流量连续抽水试验中,由 Theis 公式根据叠加原理推导出流量变化时水位降深的计算公式:

$$s = \frac{1}{4\pi T} \sum_{i=1}^n (Q_i - Q_{i-1}) W(u_i) \quad (t_{i-1} < t < t_i) \quad (1)$$

其中

$$u_i = \frac{r^2 \mu^*}{4T(t - t_{i-1})}$$

式中: $s$ ——抽水影响范围内任一点任意时刻的水位降深,  $m$ ;  $T$ ——承压含水层的导水系数,  $m^2/d$ ;  $Q_i$ —— $t_{i-1} < t < t_i$  时段的抽水量,  $m^3/d$ ;  $Q_{i-1}$ ——上一时段的抽水量,  $m^3/d$ ;  $W(u_i)$ ——Theis 井函数;  $r$ ——计算点到抽水井的距离,  $m$ ;  $\mu^*$ ——承压含水层的储水系数;  $t_{i-1}$ ——上一时段抽水的结束时间,  $d$ 。

在连续性抽水情况下,不同阶段流量差可取正值,也可取负值,在此假设流量  $0 < Q_1 < Q_2 < Q_3 < \dots < Q_{i-1} < Q_i$ 。以下对不同时段定流量下的抽水试验进行分阶段讨论。

**a.** 当  $0 < t \leq t_1$  时,即抽水初始阶段,定流量下水位降深随时间变化的计算公式就是著名的 Theis 公式:

$$s = \frac{Q_1}{4\pi T} W(u) \quad u = \frac{r^2 \mu^*}{4Tt} \quad (2)$$

对式(2)两端同时取对数得

$$\lg s = \lg W(u) + \lg \frac{Q_1}{4\pi T} \quad \lg t = \lg \frac{1}{u} + \lg \frac{r^2 \mu^*}{4T} \quad (3)$$

根据配线法原理,将模数相同的  $s$ - $t$  实测曲线和  $W(u)$ - $1/u$  标准曲线进行匹配(该阶段标准曲线如图 1(a)所示),找到一个最佳配合位置,使 2 条曲线重合度最好,任意选取合适匹配点,记录对应的坐标值: $W(u)$ 、 $1/u$ 、 $s$ 、 $t$ ,代入式(2)确定导水系数  $T$ 、储水系数  $\mu^*$ 、导压系数  $a$  和渗透系数  $K$ <sup>[13]</sup>。

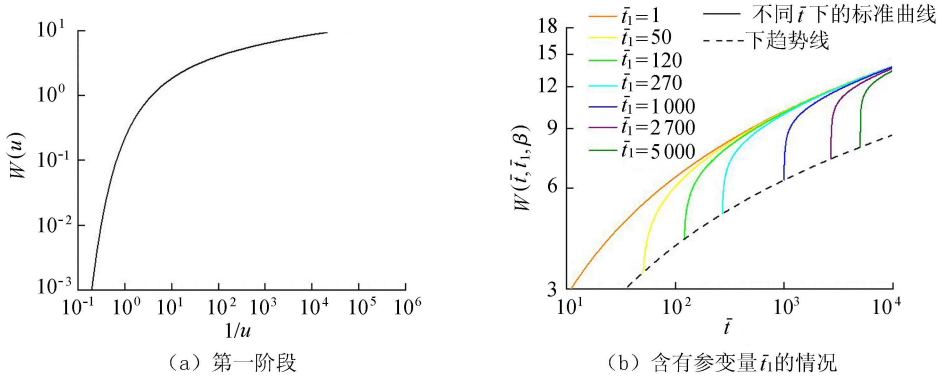


图 1 不同阶段的标准曲线

Fig.1 Type curves of different stages

b. 当  $t_1 < t \leq t_2$  时,根据叠加原理应用 Theis 公式得到定流量  $Q_2$  下的降深随时间变化的计算公式:

$$s = \frac{Q_1}{4\pi T} W\left(\frac{r^2 \mu^*}{4Tt}\right) + \frac{Q_2 - Q_1}{4\pi T} W\left[\frac{r^2 \mu^*}{4T(t - t_1)}\right] = \frac{Q_1}{4\pi T} \left( \int_{\frac{r^2 \mu^*}{4Tt}}^{\infty} \frac{e^{-y}}{y} dy - \int_{\frac{r^2 \mu^*}{4T(t-t_1)}}^{\infty} \frac{e^{-y}}{y} dy \right) + \frac{Q_2}{4\pi T} \int_{\frac{r^2 \mu^*}{4T(t-t_1)}}^{\infty} \frac{e^{-y}}{y} dy \quad (4)$$

引入无量纲参数,令无量纲时间  $\bar{t}$  和无量纲降深  $\bar{s}$  如下:

$$\bar{t} = \frac{4Tt}{r^2 \mu^*} \quad (5)$$

$$\bar{s} = \frac{4\pi T s}{Q_1} \quad (6)$$

将前一阶段结束时刻  $t_1$  代入式(5),得  $t_1$  时刻无量纲时间:

$$\bar{t}_1 = \frac{4Tt_1}{r^2 \mu^*} \quad (7)$$

为了使配线过程曲线的匹配度更高,假设一组不同的参变量  $\bar{t}_1$  的值,得到一簇含参变量  $\bar{t}_1$  的标准曲线(图 1(b))。

将式(5)(6)(7)代入式(4),得

$$\bar{s} = \int_{\frac{1}{\bar{t}}}^{\infty} \frac{e^{-y}}{y} dy - \int_{\frac{1}{\bar{t}_1}}^{\infty} \frac{e^{-y}}{y} dy + \frac{Q_2}{Q_1} \int_{\frac{1}{\bar{t}_1}}^{\infty} \frac{e^{-y}}{y} dy \quad (8)$$

设  $W\left(\bar{t}, \bar{t}_1, \frac{Q_2}{Q_1}\right) = \int_{\frac{1}{\bar{t}}}^{\infty} \frac{e^{-y}}{y} dy - \int_{\frac{1}{\bar{t}_1}}^{\infty} \frac{e^{-y}}{y} dy + \frac{Q_2}{Q_1} \int_{\frac{1}{\bar{t}_1}}^{\infty} \frac{e^{-y}}{y} dy$ , 令  $\beta = \frac{Q_2}{Q_1}$ , 则

$$\bar{s} = W\left(\bar{t}, \bar{t}_1, \frac{Q_2}{Q_1}\right) = W(\bar{t}, \bar{t}_1, \beta) \quad (9)$$

对式(5)(6)(9)两端同时取对数得

$$\lg s = \lg W(\bar{t}, \bar{t}_1, \beta) - \lg \frac{4\pi T}{Q_1} \quad (10)$$

$$\lg t = \lg \bar{t} - \lg \frac{4T}{r^2 \mu^*} \quad (11)$$

式(10)和式(11)右边第二项在同一次抽水试验中都是常数。因此,在双对数坐标系内,模数相同的  $s$ - $t$  实测曲线和  $W(\bar{t}, \bar{t}_1, \beta)$ - $\bar{t}$  标准曲线在形状上是相同的,只是纵横坐标平移了  $4\pi T/Q_1$  和  $4T/(r^2 \mu^*)$  的距离。具体计算步骤如下:依据配线法原理,将实测曲线置于标准曲线上,在保持对应坐标轴彼此平行的条件下相对平移,直至模数相同的两曲线重合,选取合适的匹配点,记下对应的坐标值: $W(\bar{t}, \bar{t}_1, \beta)$ 、 $\bar{t}$ 、 $s$ 、 $t$ ,代入对应公式求出该阶段的导水系数  $T$ 、储水系数  $\mu^*$ 、渗透系数  $K$  和导压系数  $a$ ,即

$$T = \frac{Q_1 [W(\bar{t}, \bar{t}_1, \beta)]}{4\pi s} \quad \mu^* = \frac{4Tt}{r^2 \bar{t}} \quad K = \frac{T}{M} \quad a = \frac{T}{\mu^*} \quad (12)$$

将第二阶段观测数据进行独立分析研究,先画出与该阶段实测曲线对应的标准曲线。假定一系列不同参变量  $\bar{t}, \bar{t}_1$  的值,变化范围可从  $0 \sim +\infty$ ,实际工程中可根据该试验区水文地质条件进行适当范围调整,然后计算  $1/\bar{t}, 1/(\bar{t}-\bar{t}_1)$  值,根据 Theis 井函数  $W(u)$  求解对应的  $W(1/\bar{t}), W[1/(\bar{t}-\bar{t}_1)]$  值,求解过程中若井函数  $W(u)$  中的项交错级数项  $u^n/(n \cdot n!)$  小于  $10^{-7}$  时,可忽略不计,最后在 Origin 软件中绘制双对数坐标轴的  $W(\bar{t}, \bar{t}_1, \beta) - \bar{t}$  的标准曲线。根据现场试验情况,取部分  $\bar{t}_1$  的值进行作图,见上图 1(b)。

c. 新配线法可将连续性变流量抽水试验等效成不同阶段的独立性单井抽水试验,将各个阶段的实测曲线与对应的标准曲线进行匹配,分别求出该承压含水层的水文地质参数。

当  $t_{i-1} < t \leq t_i$  时,根据叠加原理应用 Theis 公式得到定流量  $Q_i$  下的降深随时间变化的计算公式:

$$s = \frac{Q_1}{4\pi T} W\left(\frac{r^2 \mu^*}{4Tt}\right) + \frac{Q_2 - Q_1}{4\pi T} W\left[\frac{r^2 \mu^*}{4T(t - t_1)}\right] + \dots + \frac{Q_i - Q_{i-1}}{4\pi T} W\left[\frac{r^2 \mu^*}{4T(t - t_{i-1})}\right] = \frac{Q_1}{4\pi T} \left( \int_{\frac{r^2 \mu^*}{4Tt}}^{\infty} \frac{e^{-y}}{y} dy - \int_{\frac{r^2 \mu^*}{4T(t-t_1)}}^{\infty} \frac{e^{-y}}{y} dy \right) + \frac{Q_2}{4\pi T} \int_{\frac{r^2 \mu^*}{4T(t-t_1)}}^{\infty} \frac{e^{-y}}{y} dy + \dots + \frac{Q_i - Q_{i-1}}{4\pi T} \int_{\frac{r^2 \mu^*}{4T(t-t_{i-1})}}^{\infty} \frac{e^{-y}}{y} dy \quad (13)$$

按照第二阶段配线原理可得  $t_{i-1} < t \leq t_i$  时间段内无量纲形式的承压含水层降深解析解:

$$\bar{s} = \int_{\frac{1}{t}}^{\infty} \frac{e^{-y}}{y} dy - \int_{\frac{1}{t-t_1}}^{\infty} \frac{e^{-y}}{y} dy + \frac{Q_2}{Q_1} \int_{\frac{1}{t-t_1}}^{\infty} \frac{e^{-y}}{y} dy + \dots + \frac{Q_i}{Q_1} \int_{\frac{1}{t-t_{i-1}}}^{\infty} \frac{e^{-y}}{y} dy - \frac{Q_{i-1}}{Q_1} \int_{\frac{1}{t-t_{i-1}}}^{\infty} \frac{e^{-y}}{y} dy \quad (14)$$

在实际工作中,可能遇到长期连续变流量开采地下水,当需要了解长期开采地下水以后含水层参数值时,只要已知不同阶段的开采量和开采延续时间,通过改变开采井流量并记录对应降深随时间变化的数据,就可运用上述新配线法的原理确定含水层的水文地质参数。

## 2 现场试验

以苏锡常南部高速公路常州至无锡段太湖隧道场地为例。太湖隧道起点位于无锡市马山镇陆马公路与十里明珠大堤交叉口附近,终点位于无锡市南泉镇亮河湾附近。勘察资料揭示场地地层主要为全新统黏性土层及上更新统黏性土、粉土、粉砂层。研究区存在多个含水层,其中 2-3 粉土层为研究区最主要的承压含水层,该层岩性为灰色及灰黄色的粉土,部分为粉砂层、夹粉质黏土及粉砂薄层,局部互层状连续分布,层厚为 1.00 ~ 12.60 m,抽水井附近含水层的变化如图 2 所示。

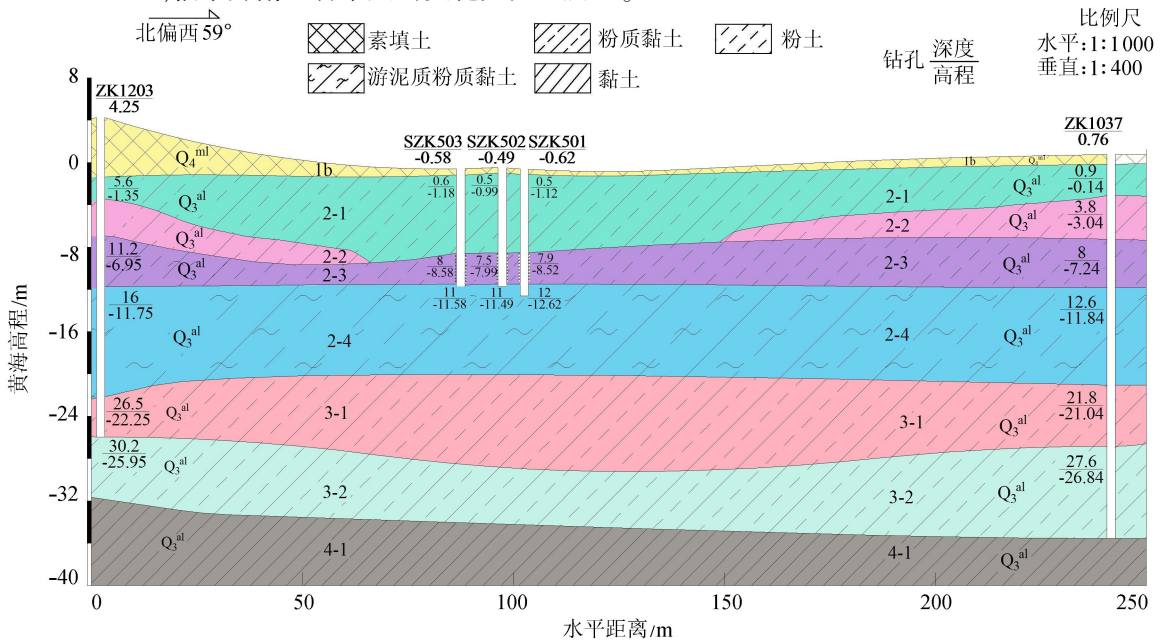


图 2 钻孔剖面(单位:m)

Fig. 2 Hydrogeological cross-section of boreholes (units: m)

现场试验在 2-3 粉土层设置了 1 个抽水主孔 SZK501, 2 个观测孔 SZK502 和 SZK503 分别距主孔间距为 5 m 和 15 m, 各孔在研究区的相对位置、对应含水层厚度及黄海高程如图 2 所示。试验采用不同定流量下的 3 阶梯连续性抽水, 根据观测孔 SZK502 和 SZK503 的观测数据运用新配线法进行实例验证。

在抽水主孔 SZK501 涌水量保持阶梯流量变化非稳定流抽水试验过程中, 观测孔动水位按照抽水试验规范要求观测<sup>[18]</sup>。试验前静水位标高-0.933 m, 静水位深度 0.43 m, 水位深度均指从套管口向下长度, 降深为动水位埋深与静水位深度的差值。根据抽水试验观测数据绘制 3 个阶段降深随时间变化曲线  $s-t$  和单位出水量随时间变化曲线  $Q-t$  关系, 如图 3 所示。

根据观测孔 SZK502 和 SZK503 的 3 个抽水阶段的观测资料, 基于新配线法, 在配线图(图 4(a)(b))中选取合适的匹配点, 记录对应坐标值, 代入式(12)计算 2-3 粉土层承压含水层的渗透系数  $K$ 、导水系数  $T$  和储水系数  $\mu^*$ , 见表 1。

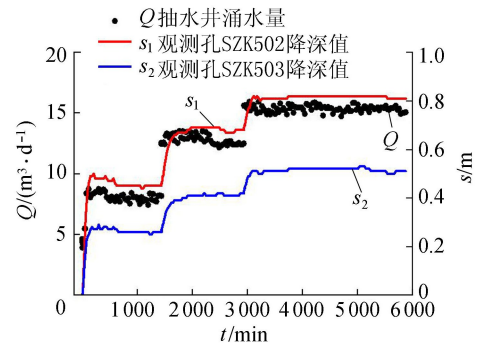


图 3 观测孔  $Q-t$  曲线及  $s-t$  曲线  
Fig. 3  $s-t$  curve and  $Q-t$  curve of observing hole

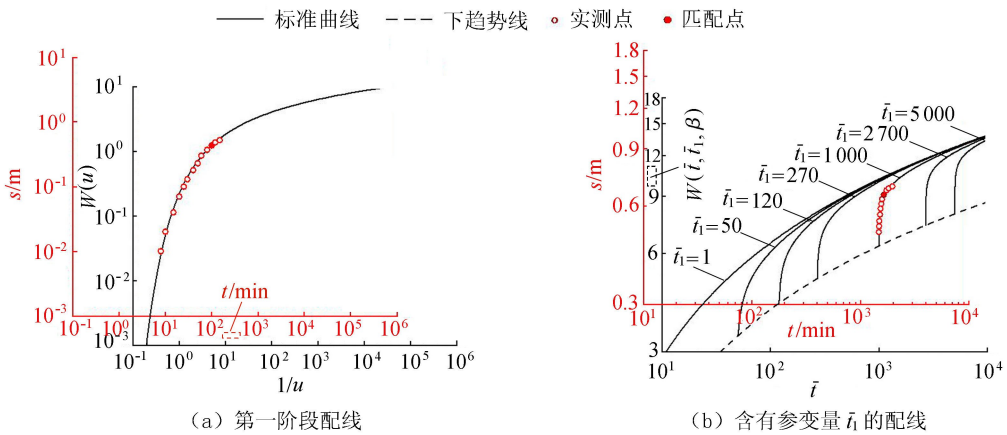


图 4 观测孔 SZK502 不同阶段的配线

Fig. 4 Data of observing hole SZK502 matched with the type curves of different stage

表 1 观测孔 SZK502 和 SZK503 在 2-3 层承压含水层水文地质参数

Table 1 Aquifer parameters at the 2-3 layer confined aquifer of observing holes, SZK502 and SZK503

抽水阶段	$Q/$ ( $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ )	观测孔 SZK502					观测孔 SZK503				
		匹配点坐标		$T/$ ( $\text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$ )	$\mu^*$	$K/$ ( $10^{-3} \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	匹配点坐标		$T/$ ( $\text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$ )	$\mu^*$	$K/$ ( $10^{-3} \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )
		标准曲线数据	实测数据				标准曲线数据	实测数据			
1	8.003	1.225	0.43	1.814	0.00402	0.512	2.034	0.27	4.789	0.00635	1.35
		5.012	100.00				12.589	150.00			
2	12.823	9.168	0.65	8.610	0.00143	2.540	9.445	0.39	15.423	0.00248	4.35
		1154.782	1650.00				1223.207	1770.00			
3	15.366	12.133	0.77	10.035	0.00164	2.830	12.280	0.49	15.960	0.00253	4.51
		2059.889	3020.00				2113.489	3020.00			

注: 观测孔 SZK502 和 SZK503 在 3 个抽水阶段的主孔含水层厚度皆为 4.1 m。

新配线法计算得到的不同流量下的渗透系数存在一定的差异, 观测孔 SZK502 的 3 个阶段的渗透系数  $K$  分别为  $5.12 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ 、 $2.54 \times 10^{-3} \text{cm/s}$  和  $2.83 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ ; 观测孔 SZK503 的 3 个阶段的渗透系数  $K$  分别为  $1.35 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ 、 $4.35 \times 10^{-3} \text{cm/s}$  和  $4.51 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ 。单独从一个钻孔的不同阶段分析渗透性存在差异的原因主要是: 随着承压含水层降落漏斗范围的不断扩大, 不同漏斗影响范围内的渗透系数存在差异, 原因主要有 2 个方面, 其一是 2-3 粉土层承压含水层渗透性本身的不均一性; 其二是 2-3 粉土层承压含水层厚度在不同位置上变化较大, 计算时均采用抽水孔 SZK501 所对应的含水层厚度。计算结果表明, 随着承压漏斗范围的不断扩大, 渗透系数逐渐增大, 表现出 2-3 粉土层承压含水层渗透性或厚度在空间展布上的不均一性。根

据勘察阶段不同位置抽水试验结果显示,该区 2-3 粉土层渗透系数变化范围为  $1.52 \times 10^{-4} \sim 8.18 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ , 基于新配线法计算得到的渗透系数位于该范围之内。

### 3 结 论

a. 基于 Theis 井函数及叠加原理提出了一种变流量非稳定流抽水试验求解承压含水层水文地质参数的新配线法。

b. 根据无锡地区 2-3 粉土层承压含水层变流量抽水试验资料,应用新配线法确定了含水层水文地质参数,现场试验结果表明新配线法计算的含水层参数合理,计算公式简单。

c. 借助 Origin 软件进行实测曲线  $s-t$  和标准曲线拟合时需要注意的是抽水后期曲线比较平缓,与标准曲线不易拟合精确,所以在配线和选取匹配点时应尽量选取实测曲线的弯曲部分。

### 参考文献:

- [ 1 ] 周志芳,李鸣威,庄超,等. 溪洛渡水电站谷幅变形成因与形成条件[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2018,46(6): 497-505. (ZHOU Zhifang, LI Mingwei, ZHUANG Chao, et al. Impact factors and forming conditions of valley deformation of Xiluodu Hydropower Station[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2018,46(6): 497-505. (in Chinese))
- [ 2 ] 李明远,周志芳,杨蕴,等. 新干航电枢纽工程右岸浸没评价与控制[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2018,46(3): 203-210. (LI Mingyuan, ZHOU Zhifang, YANG Yun, et al. Immersion assessment and control of the right bank of Xingan Navigation and Power Junction[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2018,46(3): 203-210. (in Chinese))
- [ 3 ] SHEN Shuilong, WU Yongxia, XU Yehuang, et al. Evaluation of hydraulic parameters from pumping tests in multi-aquifers with vertical leakage in Tianjin[J]. Computers and Geotechnics, 2015, 68(7): 196-207.
- [ 4 ] PECHSTEIN A, ATTINGER S, KRIEG R, et al. Estimating transmissivity from single-well pumping tests in heterogeneous aquifers[J]. Water Resources Research, 2016, 52(1): 495-510.
- [ 5 ] BIRSOY Y K, SUMMERS W K. Determination of aquifer parameters from step tests and intermittent pumping data[J]. Groundwater, 1980, 18(2): 137-146.
- [ 6 ] KOLLET S J, ZLOTNIK V A. Influence of aquifer heterogeneity and return flow on pumping test data interpretation[J]. Journal of Hydrology, 2005, 300(1): 267-285.
- [ 7 ] 周志芳,汤瑞凉,汪斌. 基于抽水试验资料确定含水层水文地质参数[J]. 河海大学学报(自然科学版), 1999, 27(3): 5-8. (ZHOU Zhifang, TANG Ruiliang, WANG Bin. Determination of hydrogeological parameters of leaky aquifer based on pumping test data of partially penetrating[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 1999,27(3): 5-8. (in Chinese))
- [ 8 ] JACOB C E. Drawdown test to determine effective radius of artesian well[J]. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1947, 112: 1047-1064.
- [ 9 ] 聂庆林,高广东,轩华山,等. 抽水试验确定承压含水层参数方法探讨[J]. 水文地质工程地质, 2009, 36(4): 37-40. (NIE Qinglin, GAO Guangdong, XUAN Huashan, et al. Methods of determining parameters of a confined aquifer with pumping tests[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2009, 36(4): 37-40. (in Chinese))
- [ 10 ] SETHI R. A dual-well step drawdown method for the estimation of linear and non-linear flow parameters and wellbore skin factor in confined aquifer systems[J]. Journal of Hydrology, 2011, 400(1): 187-194.
- [ 11 ] AVCI C B, CIFTCI E, SAHIN A U. Identification of aquifer and well parameters from step-drawdown tests[J]. Hydrogeology Journal, 2010, 18(7): 1591-1601.
- [ 12 ] MEIER P M, CARRERA J, SÁNCHEZ-VILA X. An evaluation of Jacob's method for the interpretation of pumping tests in heterogeneous formations[J]. Water Resources Research, 1998, 34(5): 1011-1026.
- [ 13 ] 周志芳,王锦国. 地下水动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [ 14 ] THEIS C V. The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground-water storage[J]. Eos Transactions American Geophysical Union, 1935, 16(2): 519-524.
- [ 15 ] 庄超,周志芳,韩江波. 一种长期观测资料确定弱透水层参数的方法[J]. 岩土力学, 2017,38(5): 1359-1364. (ZHUANG Chao, ZHOU Zhifang, HAN Jiangbo. A method for estimating aquitard parameters using long-term monitoring data[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017,38(5): 1359-1364. (in Chinese))
- [ 16 ] ZHUANG Chao, ZHOU Zhifang, ZHAN Hongbin, et al. A new type curve method for estimating aquitard hydraulic parameters in a multi-layered aquifer system[J]. Journal of Hydrology, 2015, 527: 212-220.
- [ 17 ] SINGH S K. Storage coefficient and transmissivity from residual drawdowns[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 129(8): 637-644.
- [ 18 ] 中华人民共和国发展和改革委员会. 水电水利工程钻孔抽水试验规程:DL/T 5213—2005[S]. 北京:中国电力出版社, 2005.