黑龙江水专学报 1994年第4期
J. of HLJ. Hydr. Eng. Col. No. 4, 1994

抽水试验中的参数计算问题

杜绍敏 姜英俊

（黑龙江水利高等专科学校） （黑龙江省水利工程局）

王国春

（汤原县水利局）

摘 要 本文讨论了抽水试验中参数确定存在的问题，提出了用水位回升值确定含水层参数的原理和方法。

关键词 抽水试验 渗透系数 导水系数 影响半径 水位恢复实验

1 前 言

用抽水试验方法查明水文地质特征和确定含水层参数是水文地质勘察的重要环节和主要手段。近30年来在这方面虽然有了很大进步，尤其是电子计算机在模拟、正反演中的应用，但实际工作中还普遍存在着水文地质参数测算不准的问题，其原因是多方面的，主要是对计算公式的理解、选取问题。

井孔的抽水试验揭示了抽水井流量(Q)、降深(S)在时间(t)空间(径向距离r、含水层厚度M、井孔半径r_w)上的变化规律，但与其含水层参数——渗透系数(K)、导水系数(T)、释水系数(μ^*)或给水度(μ)及抽水井的影响半径(R)存在着极其密切的联系。除抽水试验设备外，含水层厚度、水文地质参数也制约着抽水井流量的多少和降深的大小，反之抽水井流量和降深也为计算参数提供了依据。

就抽水试验而言，主要是单井(不带观测孔)抽水、多孔(带观测孔)抽水、稳定流抽水和非稳定流抽水。非完整井、分层(段)抽水等在抽水试验过程中也常常可见。但抽水试验往往只重视抽水井流量和抽水井降深的观测，而忽视对抽水井降落漏斗的研究，即抽水井的影响范围问题。这在做涌水量推算时是无可非议的，但在地下水资源定量评价计算含水层水文地质参数时是极为重要的，抽水井的降深、流量等难以满足准确计算参数的需要。

修改稿收稿日期：1994-09-10

© 1994-2006 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2 稳定流抽水试验水文地质参数的计算问题

1863年裘布衣在达西定律的基础上，建立了稳定流单井抽水公式，即著名的裘布衣公式。奠定了稳定流的理论基础。裘布衣公式是以一定假设条件为基础的，把抽水现场完全理想化。然而在实践中，抽水现场条件与假设条件可能有较大偏离，导致计算结果与实际情况产生误差。裘布衣公式在生产实践中使用已有100多年的历史，并且还将为人们继续使用，但一般并不注意现场条件能否满足公式中的假设条件，而把含水层参数的计算结果的错误归结于公式应用的错误。现场条件对理论条件的任何偏离都将导致计算结果的错误，人们对偏离理论条件的大小应有明确的认识。

2.1 单井抽水试验中参数计算存在的问题

笔者认为应用裘布衣公式计算渗透系数K或确定影响半径R，总是要存在一定误差，并且这种误差随着抽水现场与理论条件的差异大小而变化。

众所周知，裘布衣公式为

承压井：$$Q=2.73KMS_w/\lg\frac{R}{r_w} \quad (1)$$

潜水井：$$Q=1.366K(2H_0-S_w)\cdot S_w/\lg\frac{R}{r_w} \quad (2)$$

式(1)和(2)中K和R是未知量。单井抽水试验常用上述二个公式求含水层的渗透系数K。尽管公式中Q、S_w、M(或H_0)、r_w为已知量，但在求渗透系数K时影响半径R怎样确定？确定正确与否不仅关系到K的可靠性，而且要影响到地下水资源量评价在量上的误差。抽水现场条件很难满足裘布衣假设"定水头补给"这一苛刻条件，因此R是一个非常难以准确确定的未知参数。尽管(1)和(2)中K和R是对数关系，R值的变化对K值的影响不明显，但毕竟要影响计算结果的精度。对任一均质含水层K可以看作常量，它不随Q、t、S_w而变化。但R是Q、S_w、K、释水系数μ^*、含水层厚度M、t、各种补给量A等的函数，这些参数控制R的变化。生产中常常采用经验公式确定R，例如承压井确定R的经验公式有：[1]、[2]

$$R=10S_w\sqrt{K} \quad (3)$$

$$R=3000S_w\sqrt{K} \quad (4)$$

潜水井确定R的经验公式有

$$R=2S_w\sqrt{KH_0} \quad (5)$$

$$R=575S_w\sqrt{KH_0} \quad (6)$$

还有其它确定影响半径的经验公式、半经验公式等。式(3)和(4)、(5)和(6)适用条件是无区别的，但得出的结果可能相差上百倍之多。这些经验公式中的R都与S_w存在一定关系，与裘布衣公式中假定R是"抽水井中心到定水头补给的水平距离"相矛盾。

从式(1)中可得

$$\lg R=2.73KMS_w/Q+\lg r_w \quad (7)$$

可见若R是常量，S_w和Q要成比例变化，但实际早以证明Q增大，S_w和Q不成比例变化，R随Q的增加而扩大，和裘布衣的理论公式产生了矛盾。可见单孔抽水试验不能准确确定R，且也难以准确确定K。由此看出，裘布衣公式中的R只能在形式上表示抽水井的影响半径，其实质是反映单井抽水的补给能力。认识这一点对稳定流抽水试验来说是重要的。

2.2 多孔抽水试验

利用单孔抽水试验确定含水层参数只能是其近似值。用经验公式计算R，受水文地质条件影响其误差大小是难以估计的，将造成评价地下水资源量的误差。

© 1994-2006 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1870年，蒂姆在裘布衣公式的基础上主张由一个孔抽水，在其附近若干井中观测抽水效果来计算含水层的水文地质参数，并定义影响半径R为“抽水井中心到降落漏斗边缘的水平距离”，这是切合实际的，反映出了抽水井降落漏斗随降深加大不断向外扩展这一事实。用观测孔的资料计算K消除了R的影响。二个观测孔的蒂姆公式为：[2]

$$\text{承压井：}Q=2.73KM(S_1-S_2)/\lg\frac{r_2}{r_1} \tag{8}$$

$$\text{潜水井：}Q=1.366K(2H_0-S_1-S_2)(S_1-S_2)/\lg\frac{r_2}{r_1} \tag{9}$$

式中S_1、S_2为观测孔1、孔2的降深；r_1、r_2为观测孔1、孔2到抽水井的距离。

在多孔抽水试验计算K时，避免了R这个未知量，只要现场条件和理论条件近似，S_1、S_2测量精确，r_1、r_2选择合理，可准确确定含水层的K。

2.3 影响半径的确定

抽水井的影响半径用多孔抽水试验来确定。这在理论上是完善的。抽水现场条件满足理论条件时，计算结果无疑是正确的。当然现场条件和理论条件总是存在差异，将会影响含水层参数的精度，但是这种方法克服了人为误差，且利用不同观测孔求出参数可以互相验证、对比，其结果总要比经验公式得到的结果合理、准确。承压井具有一个、二个观测孔的蒂姆公式为

$$\begin{cases} Q=2.73KMS_1/\lg\dfrac{R}{r_1} & (10)\\ Q=2.73KMS_2/\lg\dfrac{R}{r_2} & (11)\end{cases}$$

由式(10)和(11)可解得

$$\lg R=\frac{S_1\lg r_2-S_2\lg r_1}{S_1-S_2} \tag{12}$$

潜水井具有一个、二个观测孔的蒂姆公式求解影响半径R，也有公式

$$\lg R=\frac{S_1(2H_0-S_1)\lg r_2-S_2(2H_0-S_2)\lg r_1}{(2H_0-S_1-S_2)(S_1-S_2)} \tag{13}$$

测得观测孔降深S_i和观测孔到抽水井距离r_1无任何人为影响，其值是准确的，求得R也是准确的。

当观测孔数目较多时，也可用图解法确定R值。对承压井任一观测孔都满足

$$Q=2.73KMS_i/\lg\frac{R}{r_i} \tag{14}$$

式中S_i、r_i为任一观测孔的降深、到抽水孔的距离。

(14)可改写为

$$S_i=\frac{Q}{2.73KM}(\lg R-\lg r_i) \tag{15}$$

S_i与$\lg r_i$呈线性关系，当$S_i=0$时，$r_i=R$。以S为纵坐标，lgr为横坐标，点绘不同观测孔的S_i和r_i的关系，可求得抽水井的影响半径R，参见图1。

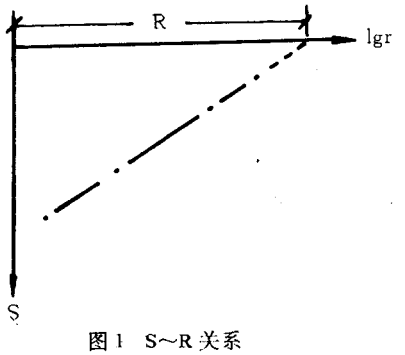

图1 S~R关系

对潜水含水层可用Δh^2代替S求出潜水井的R。对潜水井任一观测孔都满足

$$Q=1.366K(H_0^2-h_i^2)/\lg\frac{R}{r_i} \tag{16}$$

取$\Delta h_i^2=H_0^2-h_i^2$，式(16)可变换为

$$\Delta h_i^2=\frac{Q}{1.366K}(\lg R-\lg r_i) \tag{17}$$

Δh_i^2与$\lg r_i$呈线性关系，当$(\Delta h_i^2)=0$时，$r_i=R$(图2)。

受工程投资的限制，生产实际中主要还是用单孔抽水试验确定水文地质参数。在有足够的投资或精度要求较高时，以多

© 1994-2006 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

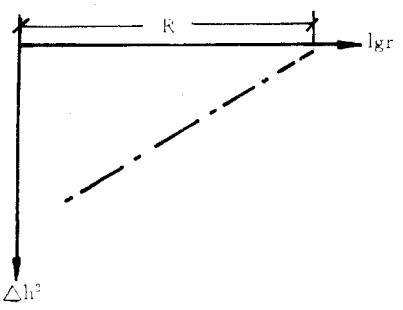

图2 $\Delta h^2 \sim R$ 关系

孔抽水试验替代单孔抽水试验为好。同时在抽水现场利用仪器测定参数，检查验证选用的方法计算影响半径的精度。

3 非稳定流抽水试验中的问题

30年代之后，形成了完整、系统、严密的非稳定流抽水试验理论和方法。非稳定流用标准曲线族来描绘含水层、弱透水层、井的完整程度、抽水延续时间与降深的关系。求解水文地质参数是标准曲线对比法或直线图解法。非稳定流的理论基础是著名的泰斯公式。相对稳定流而言非稳定流在理论上更切合实际，生产中得到了广泛的应用，求得的水文地质参数较合理。但是非稳定流理论也并没有解决抽水试验中求取水文地质参数的问题。非稳定流理论也是建立在一系列假设条件基础之上。稳定流的裘布衣公式考虑的是常水头补给，非稳定流的泰斯公式则完全不考虑补给，这些都和实际不一致，必然带来误差和使用上的局限性。例如承压完整井用标准曲线对比法求取水文地质参数时，抽水初期实测曲线与标准曲线不符，抽水后期实测曲线较平缓同标准曲线不易拟合。另外标准曲线对比法具有较大的随意性，同一实测曲线，不同人所求得的水文地质参数可以不同。直线图解法虽然避免了标准曲线对比法中的缺点，但要求抽水时间足够长，观测孔距抽水孔距离要适宜，否则所求参数也存在较大误差。非稳定流在潜水井的某些理论方面还不尽完善，公式只能适用于小的降深，各向异性、延迟释水及渗流的垂直分速度等在公式中都被忽略。

4 水位恢复试验

抽水试验中，一般比较重视对降深、流量、时间的观测，这些数据是求取水文地质参数必不可少的。但对于停止抽水后的恢复水位观测往往重视不够。恢复水位基本上不受人工、机械、动力等因素所造成的水位波动影响。笔者利用泰斯公式对水位回升值进行了研究，认为用水位回升值求取水文地质参数有优越性，数值是准确可靠的，并可对抽水期资料成果进行分析、对比和检查，研究抽水降落漏斗的恢复过程，预测任一时刻的水位回升值。

4.1 水位回升值确定含水层参数的原理

抽水停止后，抽水井或观测孔水位迅速回升。若抽水井以流量Q持续抽水 t_p 时间后停抽，恢复水位在时刻t(停抽起算时间)的剩余降深S′满足

$$S' = S_p - S^* \qquad (18)$$

式中S′为水位恢复的剩余降深；S_p 为停抽时的水位降深；S^* 为停止抽水后的水位回升值。

S与t的关系如图3所示。

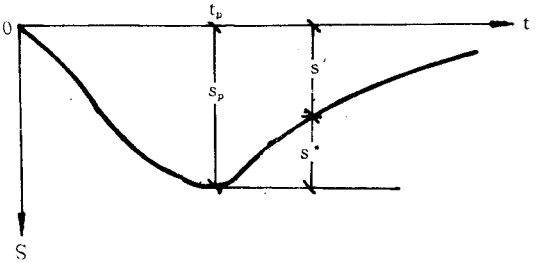

图3 S~t的关系

根据迭加原理，可将停抽后的恢复水

© 1994-2006 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

位过程当作注入同等流量的结果，二者迭加流量为零，符合抽水井停抽后的实际情况。对承压完整井水位回升值 S^* 满足泰斯公式：[2]

$$S^*=\frac{Q}{4\pi T}\int_u^{\infty}e^{-y/y}dy \qquad (19)$$

式中 S^* 为水位回升值；Q 为抽水井流量；T 为含水层导水系数；$u=\frac{r^2\mu^*}{4Tt}$ 为井函数自变量；μ^* 为含水层贮水系数；t 为停止抽水后起算时间；r 为任一点到抽水井距离，对抽水井 $r=r_w$。

在计算时也可用雅可布表达式代替式(19)：[2]

$$S^*=\frac{2.3Q}{4\pi T}\lg\frac{2.25Tt}{r^2\mu^*} \qquad (20)$$

4.2 对水位回升值 S^* 的讨论

由公式 $S^*=\frac{Q}{4\pi T}\int_u^{\infty}e^{-y/y}dy$，$u=\frac{r^2\mu^*}{4Tt}$，r 变化范围为 $r=r_w$ 到降落漏斗边缘，即 S^* 值只能在降落漏斗内回升，且 S^* 值永远小于或等于 S_P。

4.2.1 水位回升值 S^* 上升变化规律

对同一断面(即固定 r 值)，S^* 随 t 的增加而增大，当 $t=0$ 时，$S^*=0$，符合抽水井停抽时恢复水位为零的实际情况。当 $t\to\infty$ 时，S^* 不能趋近于无穷大，满足 $0\leqslant S^*\leqslant S_P$，即抽水时形成的降落漏斗随着水位恢复时间的延长逐渐向内收缩，这种收缩规律反映了恢复期内补给量贮存在含水层内的典型动态。

4.2.2 水位回升值 S^* 上升速度的变化规律

将式(19)对 t 求导数得：

$$\frac{\partial S^*}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial u}\left[\frac{Q}{4\pi T}\int_u^{\infty}e^{-y/y}dy\right]\frac{\partial u}{\partial t}$$

$$=\frac{Q}{4\pi T}\cdot\frac{1}{t}e^{-\frac{r^2\mu^*}{4Tt}} \qquad (21)$$

式(21)表明，抽水停止后初期随 r 的增大，$e^{-\frac{r^2\mu^*}{4Tt}}$ 减小，靠近抽水井水位回升速度快，远离抽水井回升速度逐渐减慢。

在式(21)中 $Q/4\pi T$ 是常数；$e^{-\frac{r^2\mu^*}{4Tt}}$ 是 r 和 t 的函数；$\frac{\partial S^*}{\partial t}$ 也是 r 和 t 的函数。$e^{-\frac{r^2\mu^*}{4Tt}}$ 变化范围在 0 与 1 之间。当 t 足够大时，$e^{-\frac{r^2\mu^*}{4Tt}}\to 1$，(21)变为

$$\frac{\partial S^*}{\partial t}\doteq\frac{Q}{4\pi T}\cdot\frac{1}{t} \qquad (22)$$

式(22)表明，t 足够大，上升速度与距离无关。换言之，停止抽水后经一段时间，一定范围内产生大致等幅上升，如图4。但上升速度随 t 的增大逐渐减少。

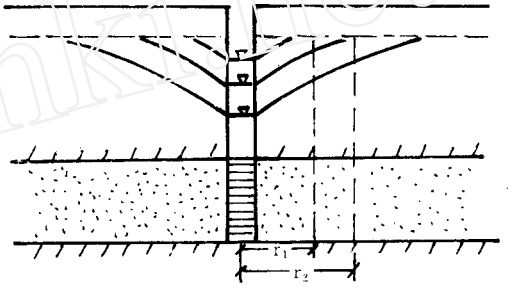

图4 停止抽水后水位回升图

4.3 利用水位回升值确定水文地质参数

式(20)可改写为

$$S^*=\frac{2.3Q}{4\pi T}\lg\frac{2.25T}{r^2\mu^*}+\frac{2.3Q}{4\pi T}\lg t \qquad (23)$$

由式(23)可求出导水系数 T。

为了求出释水系数(或贮水系数)，取 $S^*=0$ 时的 t_0，式(20)变为

$$\frac{2.3Q}{4\pi T}\lg\frac{2.25Tt_0}{r^2\mu^*}=0 \qquad (24)$$

$$\mu^*=\frac{2.25Tt_0}{r^2} \qquad (25)$$

用式(19)或(20)可以预测任一时刻的水位回升值。

5 计算实例

实例 1：浅层承压含水层中有一口完

© 1994-2006 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

整井，以 159.84m³/d 的流量进行非稳定流抽水试验，抽到 240min 停泵，在距抽水井 10m 处的水位如表 1 所示。

表 1　水位恢复资料

时间	累计(min)	240	245	250	255	260	270	280	300	330	360	420	480
	恢复(min)	停泵	5	10	15	20	30	40	60	90	120	180	240
剩余降深 S′(m)		0.95	0.73	0.61	0.55	0.50	0.44	0.40	0.34	0.29	0.26	0.22	0.19
回升高度 S*(m)			0.22	0.34	0.40	0.45	0.51	0.55	0.61	0.66	0.69	0.73	0.76

解：根据表 1 数据绘制 S* 与 lgt 关系线如图 5 所示。取一对数周期相应的水位回升值 $\Delta S^* = 0.35 = i$，i 为直线斜率（$i = \frac{2.3Q}{4\pi T}$）。求得 $T = \frac{2.3Q}{4\pi i} = 83.58(m^2/d)$。

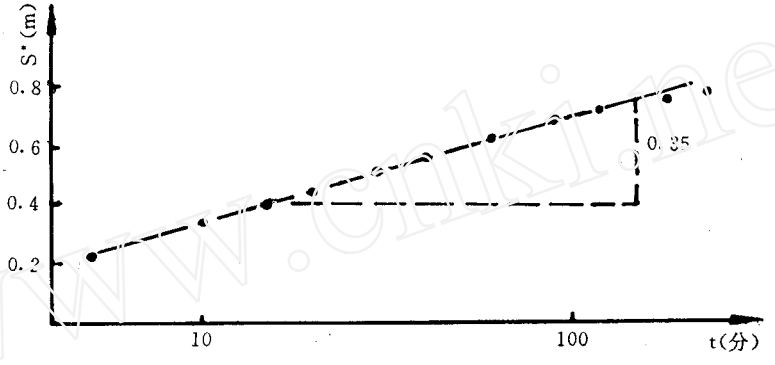

图 5　S* 与 lgt 的关系

延长 S* 与 lgt 关系和纵轴相交，对应时间 $t_0 = 1min$，$S^* = 0$ 时，$\frac{2.25Tt_0}{r^2\mu^*} = 1$，所以

$$\mu^* = \frac{2.25Tt_0}{r^2} = 1.3 \times 10^{-3}$$

利用求解出的参数，通过公式 $S^* = \frac{2.3Q}{4\pi T} \lg \frac{2.25Tt_0}{r^2\mu^*}$ 求出观测孔水位回升值与实测值对比于表 2。

表 2　实测与计算水位回升值对比表

恢复时间(min)	5	10	15	20	30	40	60	90	120	180	240
实测回升值(m)	0.22	0.34	0.40	0.45	0.51	0.55	0.61	0.66	0.69	0.73	0.76
计算回升值(m)	0.24	0.35	0.41	0.45	0.52	0.56	0.62	0.68	0.72	0.78	0.83

从表 2 可见实测值与计算值基本一致，说明所求参数基本准确。

对潜水井，当降深相对含水层厚度较小时，水流状态和承压井类似，即近似为二维流，也可用同样方法求水文地质参数。

实例 2：桦川县悦来镇 Hy10 号孔抽水试验。含水层为大厚度的孔隙潜水含水层。抽水时间从 3 日 8 时 25 分延续到次日 7 时。抽水井流量为 1 420m³/d，观测孔距抽水井 6m，停抽时观测孔水位降深为 0.085m，水位恢复资料见表 3。

© 1994-2006 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 3　Hy10 号孔观测孔水位恢复资料

恢复时间(min)	3	4	6	8	10	15	20	25	30	60	90
水位回升(m)	0.035	0.04	0.045	0.045	0.05	0.055	0.06	0.065	0.07	0.075	0.075

S* 与 lgt 关系见图 6。可求得导水系　　数 T＝8 122m²/d，给水度 μ＝0.15。

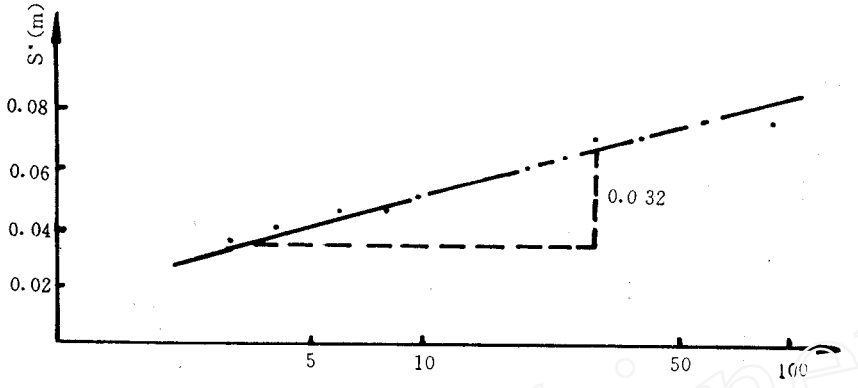

图 6　S* 与 lgt 的关系

桦川县悦来镇进行了 1∶2.5 万地下水资源勘察评价工作，计算地下水资源量时求得渗透系数 K＝84m/d，给水度 μ＝0.20。悦来镇含水层厚度 90—100m，取平均厚度，利用 K＝T/h 换算出实例 2 渗透系数 K＝85.49m/d，与计算地下水资源量所取渗透系数 K＝84m/d 完全一致。实例 2 计算的给水度值与计算资源量所用给水度为 0.15 和 0.20，差值也较小。

实例 2 实测水位回升值与计算水位回升值对比见表 4。

表 4　Hy10 号孔抽水观测孔实测、计算水位回升值对比表

恢复时间(min)	3	4	6	8	10	15	20	25	30	60	90
实测回升值(m)	0.035	0.04	0.045	0.045	0.050	0.055	0.06	0.065	0.070	0.075	0.075
计算回升值(m)	0.027	0.031	0.040	0.041	0.044	0.050	0.054	0.057	0.059	0.069	0.074

用 S* 与 lgt 关系线求取贮水系数 μ*（或给水度 μ）时，回升值 S* 取零，此时 t_0 取值是很小的，但 $t_0 \neq 0$。水位回升速度随时间增加逐渐减慢，当水位恢复到接近抽水前的静水位时，水位回升值偏离 S* 与 lgt 关系线。

5　结　语

利用水位回升值测定水文地质参数，不受机械、水位波动、人为等因素影响，原理简单、方法易行，水文地质工作者不妨一试。

参 考 文 献

1　陈雨孙，颜旺志．抽水试验原理与参数测定．北京：水利电力出版社，1985. 12，14

2　薛禹群主编．地下水动力学原理．北京：地质出版社，1986. 104，97.99，140，146

（下转第 22 页）

© 1994-2006 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

结果作比较，可以得到为测定地下水年龄所设的大前提条件(活塞流、分散、扩散等)的正确性判定有关的资料。

对地下水年龄的测定不能仅用单一的方法，为了得出正确的结论，除用上述方法之外，还必须与其它水文地质资料结合起来进行综合研究。(本刊有删节)

赵玉友译自日刊《地质基础》1993 年第 1 期　**朴昌福校**

(上接第 15 页)

On the Determination of Parameters in Pumping Test

Du Saomin
(Heilongjiang Hydraulic Engineering College)

Jiang Yingjun
(Heilongjiang Province Hydraulic Engineering Bureau)

Wang Guochun
(Water Conservancy Bureau of Tangyuan County)

Abstract

The problems raised in the determination of aquifer parameters is discussed in this paper. The principles and methods using recovery values of underground water table are introduced in the determination of aquifer hydrogeological parameters.

Key words: pumping test, coefficient of transmissibility, radius of influence, water level recovery test.

© 1994-2006 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net