

# 在大泉边进行多孔多阶段非稳定流抽水试验水文地质参数的计算及水位预报

孙其昌

(湖南省地矿局水文一队)

**摘要** 在岩溶大泉边进行多孔多阶段非稳定流抽水试验, 视泉水为一早年开始的开采井, 并假设泉水的排泄时间  $t$ 。近似等于泉水排泄和抽水延续时间之和  $t$ , 用流量阶梯状变化的泰斯公式计算其水文地质参数, 进行水位预报。

我国岩溶分布广泛, 出露的岩溶大泉比较多, 一些靠近城市或工矿企业的大泉可以作为水源地加以人工开发利用。其开采量一般要经过抽水试验计算出水文地质参数加以确定。有了参数和开采量, 可进一步进行水位预报。

## 一、水文地质参数计算

在大泉边或泉中进行多孔多阶段定流量非稳定流抽水试验, 各阶段涌水量  $Q$  是恒定值。泉水排泄量  $Q_0$  也可近似认为是一个恒定值, 抽水时当  $Q \geq Q_0$  时, 泉水断流 (即  $Q_0 = 0$ )。而且该地段符合含水层均质、等厚、呈水平分布; 地下水天然水力坡度近似等于零; 边界远离泉点和抽水孔, 无垂向越流补给; 抽水量  $Q$  随时间  $t$  呈阶梯状变化等水文地质条件, 则可用流量阶梯状变化的泰斯公式计算水文地质参数。泰斯公式一般形式为:

$$S = 1/4 \pi T \int_0^t Q(\tau) \frac{e^{-\frac{r^2}{4a(t-\tau)}}}{t-\tau} d\tau$$

经过变量置换, 积分后得流量阶梯状变化公式:

$$\begin{aligned} S &= 1/4 \pi T \{ Q_0 [W(r^2/4at) - W(r^2/4a(t-t_0))] \\ &+ Q_1 [W(r^2/4a(t-t_0)) - W(r^2/4a(t-t_1))] + \dots \\ &+ Q_{n-1} [W(r^2/4a(t-t_{n-2})) - W(r^2/4a(t-t_{n-1}))] \\ &+ Q_n W(r^2/4a(t-t_{n-1})) \} \\ &= (1/4 \pi T) Q_0 W(r^2/4at) + (1/4 \pi T) \sum_{i=1}^n (Q_i - Q_{i-1}) W(r^2/4a(t-t_{i-1})) \\ &\dots\dots\dots (1) \end{aligned}$$

式中  $t_0 \neq 0$ ,  $Q_0 \neq 0$ 。

故尚不能把抽水试验的数据代入 (1) 式进行计算, 因  $t_0$  未知, 降深  $S$  值的起算点 (即  $Q_0 = 0$  时原始水位标高) 也不知。由于:

1. 抽水试验前一般都要先观测稳定水位, 即原始水位标高。但往往由于各种原

泉水堵住使其不流来观测稳定水位，故可在泉水  $Q_0$  自然排泄状态下测定抽水孔或泉及观测孔的相对稳定水位。

2. 泉水的天然排泄可以看作是一个早年开始开采的水井，开采量为  $Q_0$ ，降深值为  $S_0$ ，开采时间为  $t_0$ （即泉水形成以后排泄至今的延续时间）。泉水形成的年代无法确切知道，但  $t_0$  是个相当大的数是可以肯定的。

3.  $t$  是泉水排泄和抽水试验总的延续时间，它可以分为两部分，即  $t = t_0 + t'$ ， $t'$  是抽水试验的延续时间，同理， $t_i = t_0 + t'_i$ ， $t'_i$  是抽水试验开始至第  $i$  阶段的延续时间。抽水试验的时间以及今后开采地下水的的时间和  $t_0$  相比都是很小很小的，在这种情况下可以假设  $t \approx t_0$ ，则对计算参数大为便利，且误差很小，可以忽略不计（见后面误差检验）。

4.  $S$  值是在泉水排泄量  $Q_0$  和抽水量  $Q$  作用下在  $t$  时间内形成的总降深，它也可以分为两部分，即  $S = S_0 + S'$ 。 $S_0$  是由泉水排泄量  $Q_0$  在  $t_0$  时间内形成的降深，它相当于  $Q_0 = 0$  时水位高出平常排泄量  $Q_0$  时的水头值； $S'$  是在抽水试验过程中形成的降深，亦即抽水试验实测降深值。

则将（1）式右边第一项中的  $t$  假设近似等于  $t_0$  得：

$$(1/4\pi T) Q_0 W(r^2/4at) \approx (1/4\pi T) Q_0 W(r^2/4at_0) = S_0$$

（1）式可写为

$$S = S_0 + (1/4\pi T) \sum (Q_i - Q_{i-1}) W(r^2/4a(t - t_{i-1}))$$
$$S' = S - S_0 = (1/4\pi T) \sum (Q_i - Q_{i-1}) W(r^2/4a(t - t_{i-1})) \dots\dots\dots (2)$$

当  $r^2/4a(t - t_{i-1}) \leq 0.05$  时，（2）式可近似简化为

$$S' = (0.183/T) \sum (Q_i - Q_{i-1}) lg(2.25a(t - t_{i-1})/r^2) \dots\dots\dots (3)$$

（2）式、（3）式中  $t$ 、 $t_{i-1}$  都包含了  $t_0$ 。

$t - t_0 = t'$ ； $t_{i-1} - t_0 = t'_{i-1}$ 。 $t'$ ， $t'_{i-1}$  如图 1 所示，将图 1(a) 中的纵轴向右移， $t_0$  时段变为图 1(b) 的形式。 $t'_i$  ( $i = 1 - n$ ) 就是抽水试验开始至  $i$  阶段的延续时间。

我们将  $t'_i$  仍用  $t_i$  代之，只不过起始时间不是从泉水形成时算起，而是从抽水试验开始时算起。 $S'$  仍用  $S$  代之，但不是泉水形成时的降深，而是抽水试验开始时的降深值。

当  $i = 1$  时， $Q_{i-1} = Q_0 \neq 0$ ，这一点不可忽略，计算时必须考虑进去。那么（2）、（3）式可写为

$$S = (1/4\pi T) \sum (Q_i - Q_{i-1}) W(u) \dots\dots\dots (4)$$

$$\text{其中 } u = r^2/4a(t - t_{i-1}) \dots\dots\dots (5)$$

$$S = (0.183/T) \sum (Q_i - Q_{i-1}) tg(2.25a(t - t_{i-1})/r^2) \dots\dots\dots (6)$$

如此建立了  $Q_0$ 、 $S_0$ 、 $t_0$  的概念，就可以得到这样的结论，在大泉边打井或泉中进行多阶段定流量非稳定流抽水试验，可以直接用抽水试验的时间、流量和降深，代入流量阶梯状变化的泰斯公式(4)或(6)中，进行水文地质参数计算，进而作水位预报。但此时  $t_0 = 0$ ， $Q_0 \neq 0$ 。计算水文地质参数时，要从抽水第一阶段  $Q_1$  中减去泉水排泄量  $Q_0$ 。作水位预报时要从起始的开采量中减去  $Q_0$ 。

同样这种概念可以运用到起始抽水量  $Q > Q_0$ （泉水排泄量）的其他流量阶梯状变化的情况中去，如有直线隔水边界、直线供水边界、利用恢复水位计算参数等等情况。也可以用到起始抽水量  $Q > Q_0$ 、而后抽水量呈线性变化的情况中去。但一定要从起始阶段的抽水量中减去  $Q_0$ 。

## 二、实际应用

以湖南省海泉为例。该泉现为某市主要水源地之一，泉水出露在下石炭统石磴子灰岩中，常年涌水量5000至10000立方米/日。在供水勘察时曾作了较多的工作。该地段溶蚀裂隙发育，且比较均匀，30多个钻孔中绝大部分都迁到溶洞，含水段在孔深 11—112 米之间，水力坡度比较小，基本适合无限承压含水层完整井泰斯公式的条件。在泉边施工了主井A 和主井B，进行了大规模的多孔抽水试验，采用深井泵定流量抽水，自记水位仪自动记录水位。主井及观测孔的分布如图 2。现将有关阶段的试验资料归纳简述如下：泉水自然排泄阶段（ $S_0$ 阶段）排泄量  $Q_0 = 6613$  立方米/日，主井A 及各观测孔的相对稳定水位见表 1；第一人工降深  $S_1$  阶段  $Q_1 = 20852$  立方米/日，开动主井A 中的泵，主井A 及各观测孔的降深值及水位也见表 1。主井A 至观测孔的距离见表 2。

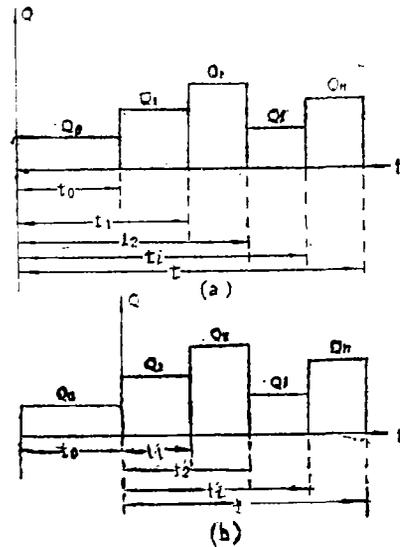


图 1 时间 (t) 变换示意图  
Fig. 1 Variation of time (t)

表 1 抽水试验有关孔的水位标高及降深表

Tab. 1 Elevation and drawdown of water level of concerned wells in pumping test.

抽水阶段 水位标高及降深 (米)	孔号	$Q_0 = 6613 \text{米}^3/\text{日}$	$Q_1 = 20852 \text{米}^3/\text{日}$	
		水位标高	实际降深值	水位标高
044		175.63	2.41	173.22
主井A		175.50	3.31	172.19
	1	174.57	0.72	173.85
	2	174.71	0.98	173.73
	3	175.55	1.51	174.04
	4	176.82	0.73	176.09
	5	176.12	1.80	174.32
	6	175.59	2.80	172.79
	8	176.98	1.34	175.64

现利用  $S_0$ 、 $S_1$  阶段的抽水试验资料计算水文地质参数。

### 1) $\lg s - \lg t$ 量板法求 $a$ 、 $T$

由 (4)、(5) 式得：

$$\lg s = \lg W(u) + \lg((Q_1 - Q_0)/4\pi T)$$

$$\lg t = \lg(1/u) + \lg(r^2/4a)$$

式中：S—— $t_1$ 时段的降深(米)

$W(u)$ ——井函数(无量纲)

$u$ ——井函数自变量(无量纲)

$T$ ——导水系数(米<sup>2</sup>/日)

$Q_1$ —— $t_1$ 时段的抽水量(米<sup>3</sup>/日)

$Q_0$ ——泉水排泄量(米<sup>3</sup>/日)

$t$ ——即为 $t_1$ (日)

$a$ ——导压系数(米<sup>2</sup>/日)

$r$ ——各观测孔至主井A的距离(米)

a、T计算结果见表3。

2) S—lgt直线图解法求a、T

由(b)式得：

$$S = (0.183/T)(Q_2 - Q_0) \lg(2.25a/r^2) + (0.183/T)(Q_1 - Q_0) \lg t$$

式中各符号意义同前，a、T计算结果见表3。

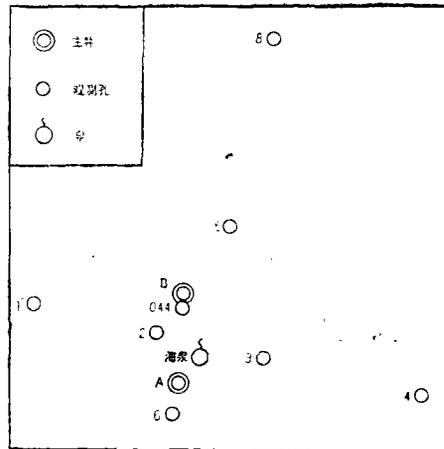


图2 海泉多孔抽水主井和观测孔分布示意图  
Fig. 2 Distribution of multiple observation wells and main pumping wells of Haiquan.

表2 观测孔至主井A的距离表

Tab. 2 Distance from the main well A to observation wells.

观测孔号	距离(米)	观测孔号	距离(米)	观测孔号	距离(米)
1	88.54	4	139.29	8	273.12
2	23.75	5	94.95	044	33.89
3	40.00	6	14.86	主井B	39.07

表3 a、T计算结果表

Tab. 3 Calculation results of parameters a and T.

孔号	lgS—lgt法		S—lgt法		备注
	T	a	T	a	
044	2712	$1.80 \times 10^5$	2895	$2.37 \times 10^5$	有“Δ”符号者，因偏离众值太远舍去
1	$9113^{\Delta}$	$14.11 \times 10^5$	$11329^{\Delta}$	$50.17 \times 10^5^{\Delta}$	
2	$8762^{\Delta}$	$0.92 \times 10^5$	$8985^{\Delta}$	$1.06 \times 10^5$	
8	3974	$1.44 \times 10^5$	4272	$2.05 \times 10^5$	
4	$8136^{\Delta}$	$13.97 \times 10^5$	$7445^{\Delta}$	$11.29 \times 10^5$	
5	3635	$9.02 \times 10^5$	4272	$18.03 \times 10^5$	
6	2589	$0.50 \times 10^5$	2928	$0.94 \times 10^5$	
8	4272	$44.76 \times 10^5^{\Delta}$	4272	$49.22 \times 10^5^{\Delta}$	
总平均	T=3582米 <sup>2</sup> /日		a=5.97×10 <sup>5</sup> 米 <sup>2</sup> /日		

由于海泉地段岩溶发育程度总的来说是均匀的,各孔都能见到溶蚀现象。但溶蚀有裂隙状、管道状,粗管、细管之别,就个别局部地段而言又有其不均一性,这是岩溶地区的普遍现象。地下水在不同的岩溶通道中运移,其水力坡度和流速是不相同的,少数观测孔与主井之间十分畅通,计算出的  $a$ 、 $T$  值就很大。再者观测读数和作图总不免会产生一些误差,使计算结果偏大或偏小。同时郴州地区其他岩溶地段的参数  $T$  值一般不超过  $4000 \text{米}^2/\text{日}$ ,  $a$  值在  $10 \times 10^6 \text{米}^2/\text{日}$  以下,故将海泉地段  $T > 5000 \text{米}^2/\text{日}$ 、 $a > 20 \times 10^6 \text{米}^2/\text{日}$  的数值剔除,取其余各数的平均值作为海泉地段参数的代表值。

### 三、水位预报

044号孔与主井A和主井B连通比较好,因而选择该孔作为水位预报点。

开采方案很多,现考虑最优的二种情况:(1)单独开采主井A,水泵出水量  $20852 \text{米}^3/\text{日}$ ;(2)单独开采主井B,水泵出水量  $10000 \text{米}^3/\text{日}$ 。主井B至预报点044号孔的距离  $r = 5.35 \text{米}$ 。

水位预报公式:

$$S = (0.183/T) (Q - Q_0) \lg(2.25at/r^2)$$

式中:  $S$ ——预报的水位降深(米)

$t$ ——预报水位的时间(日)

$Q$ ——主井的开采水量( $\text{米}^3/\text{日}$ )

$Q_0$ ——泉水排泄量( $\text{米}^3/\text{日}$ )

$r$ ——主井A或主井B至预报点044号孔的距离(米)

$T$ ——导水系数,采用平均值( $\text{米}^2/\text{日}$ )

$a$ ——导压系数,采用平均值( $\text{米}^2/\text{日}$ )

预报结果见表4。

### 四、误差检验

假设  $t \approx t_0$ , 使  $S_0$  产生微小的误差,但误差究竟有多大?是否在允许范围?现利用海泉抽水试验的实际资料和参数进行检验。

实际资料和参数:

$$Q_0 = 6613 \text{米}^3/\text{日}$$

$$r = 33.89 \text{米} \text{ (主井A至044号孔的距离)}$$

$$a = 597000 \text{米}^2/\text{日}$$

$$T = 3582 \text{米}^2/\text{日}$$

设泉水的排泄时间  $t_0 = 1000$  年,抽水试验时间为  $0.1$  年 ( $36.5$  日),今后开采时间为  $20$  年。

利用公式  $S_0 = (1/2\pi T) Q_0 W(r^2/4at_0)$ , 计算结果见表5。

从表5可以看出,假设  $t \approx t_0$  在抽水试验阶段没有产生误差,在开采阶段(设20年)产生的误差只有  $0.001$  米。况且泉的排泄时间要大于或远远大于  $1000$  年,误差会更小,因此  $S_0$  的误差完全可以忽略。退一步说,设泉水排泄时间  $t_0 = 100$  年,开采时间仍为  $20$  年,其误差

表4 水位预报结果表

Tab. 4 Results of the forecasting ground water level.

水位降低(米) 时间(日)	开采量	B井10000	A井20852	备注
		(米 <sup>3</sup> /日)	(米 <sup>3</sup> /日)	
1		0.81	2.23	抽水时, A井Q = 20852 米 <sup>3</sup> /日, t = 1日时, 实测 S = 2.30米。1984年实际开 采水量(B井) 9000— 11000米 <sup>3</sup> /日, 水位降低 1.03—1.29米
2		0.86	2.45	
5		0.93	2.74	
10		0.98	2.96	
20		1.03	3.18	
30		1.06	3.31	
60		1.12	3.53	
90		1.15	3.65	
120		1.17	3.74	
150		1.18	3.81	
180		1.20	3.87	
210		1.21	3.92	
240		1.22	3.96	
270		1.23	4.00	
300		1.24	4.03	
330		1.24	4.06	
365		1.25	4.10	

表5 S<sub>0</sub>误差检验计算表Tab. 5 Calculation of the error S<sub>0</sub> examination.

t <sub>0</sub> (日)	u	W(u)	$\frac{Q_0}{4\pi T}$ (米)	S <sub>0</sub> (米)	误差	
					绝对值(米)	%
1000×365	1.3175×10 <sup>-9</sup>	20.0183	0.1469	2.941	/	/
1000.1×365	1.3174×10 <sup>-9</sup>	20.0183	0.1469	2.941	0	0
1020×365	1.2917×10 <sup>-9</sup>	20.0286	0.1469	2.942	0.001	0.03
100×365	1.3175×10 <sup>-8</sup>	17.7157	0.1469	2.602	/	/
120×365	1.0979×10 <sup>-8</sup>	17.8041	0.1469	2.615	0.013	0.5

为0.013米(见表5下边两行), 相对误差也只有0.5%。

## 五、结 语

以往在泉中或泉边打井进行抽水试验, 计算水文地质参数的方法很不一致。有的不考虑泉水的天然排泄量和静止水位(即本文中所指的Q<sub>0</sub>和S<sub>0</sub>) , 只采用抽水时涌水量Q和降深值S用传统的水动力学法或经验公式计算水文地质参数, 这与实际情况不符, 忽略了不该忽略的因素。有的将Q<sub>0</sub>和抽水试验的Q、S一起作曲线, 用图解法得出S<sub>0</sub>, 然后计算水文地质参数, 由于抽水时涌水量Q的大小对S<sub>0</sub>影响很大, 误差可达一倍甚至几倍, 降低了参数的准确性。也有的不计算参数, 而用延长Q~S曲线的办法直接推算可开采量, 这种做法不仅使可

开采量不准,而且抽水试验资料在这一地区也没有多大利用价值。本文提出的方法主要想弥补上述各种方法的不足,是从实际情况出发,将客观存在的各种因素充分加以考虑,使计算出的参数更加接近真实,提高了水位预报的精度。

注:罗照华、陈核来、李声立同志参加了本文的计算和绘图。

### 参 考 文 献

- [1] 杨天行等 《地下水流向井的非稳定运动的原理及计算方法》地质出版社,1980年,

## CALCULATION OF HYDROGEOLOGIC PARAMETERS —MULTIPLE-STAGE MULTIPLE-WELL UNSTEADY FLOW PUMPING TEST BESIDE A LARGE KARST SPRING

Sun Qichang

(First Hydrogeological Party, Hunan Bureau of Geology and Mineral Resources)

### Abstract

In an unsteady flow pumping test conducted simultaneously in many observation wells at different stages beside a large karst spring, the spring is regarded as a pumping well being operated in early years, and the drainage time  $t_0$  of the spring is assumed approximately equal to the time  $t$  which is the sum of the drainage time plus the continuous pumping time. Then the hydrogeological parameters can be calculated by using the Theis Formula with Step-Like Outflow, and the water level can be thus predicted.