

华北东部平原深层抽水井水跃值计算方法及其规律研究

吴庆华¹, 高业新¹, 蔺文静¹, 张薇¹, 靳晓颖², 韩玉英², 王贵玲¹

(1. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 石家庄 050061; 2. 中国地质大学(武汉), 武汉 430074)

摘要: 文章分析了目前常用的几种水跃值计算方法的适用性与不足, 认为在华北东部平原地下水位变化强烈的漏斗区, 这些方法均难以应用。同时提出了 C-G 法, 即一次定流量抽水同步观测抽水井和观测井的水位, 合理地解决了区域背景水位对水跃值计算的影响。研究表明, 与修正后的多次定流量试验法——两次定流量抽水法相比, C-G 法计算结果可靠。然后探讨了如何间接获取抽水期间抽水层区域背景水位动态资料的方法, 校正背景水位波动对抽水水位的影响, 采用自动水位计(DIVER)同步监测井中大气压对地下水水位的影响。最后分析水跃值随时间和抽水井水位降深的变化规律。

关键词: 降落漏斗; 抽水试验; 水位校正; 水跃值; C-G 法

中图分类号: P641.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2008)06-0029-04

抽水试验是获取水文地质参数最直接、最有效的手段, 几十年来一直受到水文地质工作者的高度关注。抽水试验一般是为了获取含水层渗透系数、含水层最大涌水量、井损系数等参数, 用以确定含水层的给水能力、最大开采量等。通常利用抽水井水位降深资料计算参数时都没有考虑水跃值的影响, 这样所计算的参数与其真实值相差甚远, 如利用裘布依公式计算参数时就没有考虑水跃值的影响, 导致在抽水井附近实际漏斗曲线高于裘布依理论曲线^[1]。因此, 利用抽水井水位降深资料计算各参数时, 需要考虑抽水井水跃值的存在。正确求取以上各参数是合理管理抽水井正常运行的有力保证^[2]。

井壁水位明显高于井中水位时的现象称为水跃, 两水位之差为水跃值。关于水跃值的研究主要集中在 20 世纪 60~80 年代, 最近 20 多年研究相对较少。国内有不少学者对水跃值的形成机制进行了研究, 认为水跃值主要受抽水井周围开启程度的好坏、抽水井结构以及抽水设备等的影响。高秋惠等认为抽水水泵类型不同、抽水井口径不同, 所获得的水跃值也不同^[3]; 牛志刚等详细介绍了抽水孔水跃值计算方法及其优缺点, 提出水跃值对求取水文地质参数的影响很大^[4]; 郭增玉等研究了黄土地区潜水含水层深井水跃值变化特性, 分析了水跃值随时间和抽水量的变化规律^[5]。由

于水跃值受众多因素影响, 其计算精度较差, 如何寻找更简洁、更准确的计算方法以及查明水跃值变化规律是将来研究水跃值的重要方向之一。

1 研究区概况与试验设计

研究区位于河北省衡水市南张家庄村南中国地质科学院水文地质环境地质研究所衡水地下水科学试验场, 地理坐标为 115°40′44.3″E, 37°54′23.0″N。该区属于半湿润半干旱大陆性季风气候区, 年均降水量为 526mm, 多集中在 6~9 月。年均气温 4~13℃, 冬季寒冷, 夏季炎热。年蒸发量为 1253~2038mm。

研究区处于华北东部平原衡水漏斗区, 漏斗中心水位埋深达 95.7m(2006 年), 年内水位变幅达 27.0m, 并以 1.2m/a 的速率持续下降。研究区主要开采层为 150~400m 深含水层, 地下水水位变化主要受该地区农业灌溉用水与降雨情况的影响, 3 月份达到年内最高水位 43.2m(2006 年), 5 月中旬水位下降至年内最低水位 61.2m(2006 年), 6~9 月降雨集中, 开采量减少, 水位恢复至 49.7m(2006 年), 10 月上旬水位有小幅度下降, 随后水位恢复至第二年 3 月份。试验场共有 5 组抽水井—观测井, 分别用于开展 50, 200, 300, 400, 525m 深地下水含水层的相关研究。本文选取 525m 抽水井—观测井进行抽水试验。

抽水井为完整井, 位于第四系下更新统(Q₁)地层。含水层由厚 25m 的中粗砂亚含水层和厚 17.5m 的中细砂亚含水层组成, 两个亚含水层中间是厚 45.5m 的粘土弱透水层, 含水层上下顶板分别是厚 21m 的粘土和厚 13m 的亚粘土隔水层。抽水井外径为 323mm, 内

收稿日期: 2007-05-25; 修订日期: 2007-09-07

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(1212010534801)

作者简介: 吴庆华(1981-), 男, 硕士研究生, 主要从事地下水资源评价和土壤水研究。

径为 316mm, 观测孔外径为 167mm, 内径为 163mm。观测孔中心离抽水井中心的距离为 34.91m。抽水期间采用人工导线测量法和由荷兰生产的自动水位计(DIVER)同步测量抽水井和观测井水位埋深。本次试验进行了流量为 83.55m³/h 和 49.68m³/h 两次定流量抽水, 抽水持续时间约为 7320min 和 8000min, 抽水井流量采用自制标准三角堰箱测量。

试验期间区域地下水处在两个完全不同的时期。第一次抽水时, 区域水位持续下降; 而第二次抽水时, 区域水位持续回升。在抽水试验中无法直接观测该含水层区域背景水位变化情况。本试验则通过同步观测深度为 400m 的深含水层水位变化情况, 分析两含水层之间水位变化的相关性, 推求目标含水层区域水位背景变化规律, 用于校正所观测的水位降深值。同时在抽水期间, 在观测井中水面上放置一个 DIVER 测量井中大气压, 用于校正大气压变化对地下水水位的影响。

2 水跃值计算方法及其适用性分析

2.1 传统水跃值计算方法及其适用性分析

抽水井水跃值一般由井壁瞬时水头损失、滤水管阻力水头损失和管道摩擦水头损失三部分组成, 与抽水井流量成指数关系:

$$\Delta H = CQ^p \quad (1)$$

式中: ΔH ——抽水井水跃值(L);

C ——井损系数(T²/L⁵);

P ——常数, 介于 1.5 ~ 3.5 之间^[9], 但一般取 2^[7]。

目前计算水跃值的方法主要有直接测量法、S-lgr 图解法、多次定流量抽水试验、阶梯流量井流试验等, 这些方法都有其适用条件: ①直接测量法原理简单, 但由于抽水井附近存在紊流区, 副井必须布置在紊流区与稳定流区分界处, 如何合理布置副井位置是该方法准确确定水跃值最关键的因素。如果增大(或减小)抽水井的水位降深, 抽水井附近紊流区也会扩大(或缩小), 则副井将处在紊流区内(或之外一定距离), 导致水跃值计算失效或偏大。对变流量抽水适用性差。② S-lgr 法要求观测孔较多且应按一定的原则布置, 观测井数量影响水跃值的准确性。且在沉井时抽水井附近含水层受到扰动, 其渗透性发生了一定的变化, 导致结果偏大或偏小(图 1), 在此试验中仅有一观测孔, 则该方法无法应用。③多次定流量抽水试验法需要做多次(一般为 8 次)独立的抽水试验, 每次定流量抽水时间短, 水跃值难以达到稳定, 且相邻两次抽水之间水位要

求完全恢复。由于本试验处于区域水位动态变化期, 故该方法无法应用。④多降程抽水试验法在地下水水位变化强烈的漏斗区, 需要对抽水并降深进行校正, 受区域水位变动的影响, 在短时期内改变抽水井流量需要昂贵的特殊辅助设备。从实际可操作性和计算准确性角度考虑, 以上方法均难以适用于此抽水试验水跃值计算。

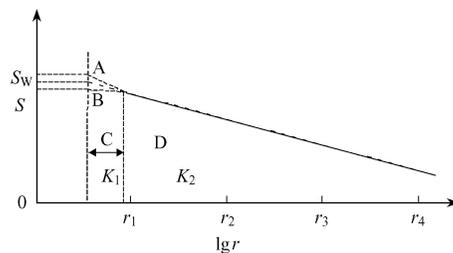


图 1 S-lgr 法求解抽水井水跃值

Fig. 1 Well loss value calculated with the S-lgr method

注: K_1 、 K_2 分别为抽水井填料区(C)与未扰动区(D)含水层的渗透系数, 如果 $K_1 < K_2$ 则交汇点将向上偏移(A), 实测水跃值偏大。如果 $K_1 > K_2$ 则直线延长线与抽水井井壁交汇点将向下偏移(B), 实测水跃值偏小。 $r_1 \sim r_4$ 为观测井离抽水井中心的距离。

2.2 两次定流量抽水法

将常规的多次定流量抽水方法修正为两次定流量抽水, 适当延长抽水时间, 使水跃值基本稳定。用公式(2)计算井损系数:

$$C = \frac{S_2(t) / Q_2 - S_1(t) / Q_1}{Q_2 - Q_1}, \Delta H = CQ^2 \quad (2)$$

式中: $S_1(t)$, $S_2(t)$ ——分别为以流量 Q_1 、 Q_2 抽水时 t 时刻抽水井水位降深(L);

C 、 ΔH 意义同式(1)。

从式(2)不难看出, 井损系数随抽水时间而变化。与多次定流量抽水, 该方法提供与实际情况接近的稳定水跃值。该方法大大减少了抽水次数, 并提高了参数的计算精度。但仍没有解决背景水位的问题, 用于本次抽水井水跃值计算存在较大误差; 当背景水位变化较小时, 该方法是一种比较理想的计算方法。

2.3 C-G 法

为了寻求在区域水位动态变化强烈的情况下水跃值的计算方法, 本文提出了 C-G 法(抽水井—观测孔法)。C-G 法是指一次定流量抽水中, 利用抽水井与观测井水位降深资料计算抽水井水跃值。采用公式(3)、(4)计算含水层参数与水跃值:

$$S_0(t) = \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{2.25at}{r_w^2} + \Delta H,$$

$$S_1(t) = \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{2.25at}{r^2} \quad (3)$$

$$\text{则 } S_0(t) - S_1(t) = \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{r}{r_w} + \Delta H,$$

$$\Delta H = CQ^2 \quad (4)$$

式中： $S_0(t)$ 、 $S_1(t)$ ——分别为抽水井、观测井水位降深(L)；

r_w 、 r ——分别为抽水井有效半径、观测井与抽水井中心的距离(L)；

a 、 t ——分别为压力传导系数、导水系数(L²/T)；

Q ——抽水流量(L³/T)；

3 数据校正

3.1 试验期间抽水层区域背景水位动态资料获取

该试验属于深层抽水试验，而试验场周边的开采层为150~400m，无法在抽水期间对抽水层区域水位动态进行直接同步监测。为了解决此问题，本试验利用抽水前对400m(I)和525m(II)含水层水位133d的同步监测资料，分析两个含水层水位变幅的相关性。经研究表明，两个含水层水位大部分时段同时上升或下降，具有相似的变化趋势(图2)。水位变幅增大则说明该含水层水位上涨；水位变幅减小，则说明该含水层水位下降。在含水层同时上升或下降阶段，其水位变幅均呈现非常显著的线性关系(图3)，但在两个含水层水位变化趋势不完全同步期间，其水位变幅将呈现复杂的非线性关系。图3中(a)表示区域开采条件下两个含水层水位同时上升时，其变幅呈显著的线性关系： $\Delta S_1 = 0.58\Delta S_2$ ，相关系数 $R^2 = 0.99$ ；图3中(b)反映的是两含水层水位同时下降时其变幅呈现线性关系： $\Delta S_1 = 0.49\Delta S_2$ ， $R^2 = 0.98$ 。由于两次抽水试验均处在两个含水层同时上升或同时下降时期，需观测抽水时II含水层水位资料，分析其变幅规律 $\Delta S_2 = f(t)$ ，则可以依据上述线性回归方程计算抽水期间I含水层区域背景地下水对抽水试验的影响，即：

$$\Delta S_2 = 0.58f_1(t) \text{ 或 } \Delta S_2 = 0.49f_2(t) \quad (5)$$

以流量 Q 为 $83.55\text{m}^3/\text{h}$ 和 $49.86\text{m}^3/\text{h}$ 抽水时，区域背景水位分别处于下降和上升阶段，II含水层水位变幅 ΔS_2 与时间的关系为： $\Delta S_2 = 0.03e^{0.96\lg t}$ ， $R^2 = 0.98$ ； $\Delta S_2 = -7 \times 10^{-5}t$ ， $R^2 = 0.99$ ，时间单位均为 min。

3.2 校正背景水位波动和大气压对抽水水位的影响

在大规模开采条件下形成的深大漏斗区，其地下水受天然补径排以及人工采补等因素的影响，呈现较为复杂的关系。在此情况下开展抽水试验研究，抽

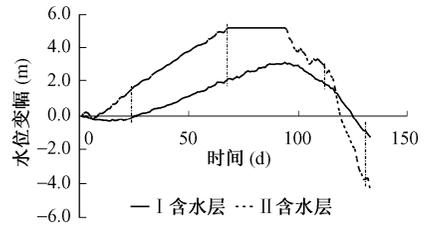


图2 I、II含水层水位变幅动态曲线

Fig. 2 Groundwater level fluctuation of the I and II aquifers

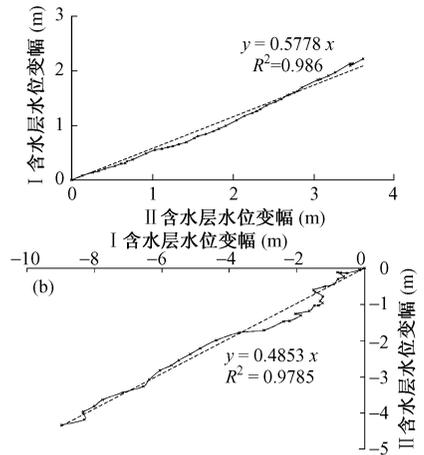


图3 I、II含水层之间水位变幅动态关系曲线

Fig. 3 Relation of groundwater level fluctuation of the I and II aquifers

水期间所获得水位降深变化是抽水试验、区域水位背景变化、大气压变化以及观测测量误差共同影响的结果，由公式(6)表示：

$$S = S_g + \Delta S_d - \Delta S_b \quad (6)$$

式中： S ——由抽水试验引起的水位降深；

S_g ——抽水期间所观测的水位降深；

ΔS_d ——井中水面上大气压变化对地下水的影响，大于0则表示井中大气压增加；

ΔS_b ——区域背景水位降深变幅，大于0则表示区域地下水水位上升。

4 计算结果

两次定流量法：将抽水期间所观测的抽水井水位降深按公式(5)进行校正，代入公式(1)计算不同时刻的井损系数，计算结果如图4实线所示。从图中可以看出，井损系数随时间变化而变化，由0增大，最后基本到达稳定，此次试验的稳定井损系数为 $4.4 \times 10^{-6} \text{d}^2/\text{m}^5$ ，利用 $\Delta H = CQ^2$ 确定稳定水跃值为 17.7m。

C-G法：利用公式(5)、(6)计算I含水层导水系数 $T = 235.2 \text{m}^2/\text{d}$ ，稳定井损系数为 $5.9 \times 10^{-6} \text{d}^2/\text{m}^5$ ，

稳定水跃值为 23.7m, 与上述方法求取的水跃值相差 6.0m, 产生此差异的原因主要是两次定流量抽水试验中水位无法恢复到原始状态。

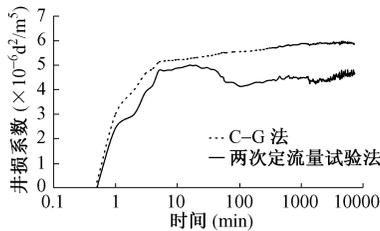


图 4 井损系数随时间变化动态曲线

Fig. 4 Changes in the well loss coefficient with time

5 水跃值变化规律分析

抽水井水跃值受抽水井的结构、沉井工艺、水泵类型、抽水流量、含水层给水能力等因素影响。当这些因素一定时, 水跃值随抽水时间和抽水井水位降深发生变化。

从井中抽取的水量源于井中储存水量和含水层涌水量两部分。抽水试验开始阶段, 抽取的水主要来自于井中储存水量, 少量来自于含水层补给, 则井中水位下降迅速(以 $Q=83.55\text{m}^3/\text{h}$ 抽水时, 在前 10min 抽水井降深达 30m), 井壁水位下降缓慢, 使得水跃值在短时期内迅速增大。随着试验进行, 抽取的水来自于含水层的补给, 最后达到潜水泵抽水量与含水层涌水量相当, 井壁与井中水位达到平衡, 水跃值增至最大, 如图 4 虚线。图 4 中实线是采用两次定流量抽水法计算井损系数的结果, 井损系数出现波动, 这可能由区域大规模开采条件下, 水位无法完全恢复所致, 这也是传统多次定量抽水法确定水跃值的缺陷, 但改进的两次定流量抽水法减少了工作量, 与其传统方法相比提高了精度。

图 5 反映了水跃值随抽水井水位降深变化的情况。在抽水开始大约 25min, 水跃值随抽水井水位降深增加而逐渐变大, 呈显著的抛物线关系: $\Delta H = 0.0085S^2 + 0.418S, R^2 = 0.99$ 。随后水跃值随水位降深缓慢增加, 总体上呈较显著的线性关系: $\Delta H = 0.35S, R^2 = 0.98$ 。最后水跃值达到最大且基本保持稳定不变。

6 结论

(1)传统水跃值计算方法均存在一定的局限性, 不适用于地下水位变化强烈的华北平原东部漏斗区。改进的两次定流量抽水试验与传统方法相比, 大大减少

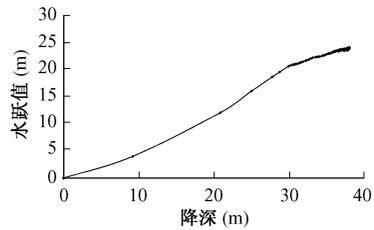


图 5 水跃值随抽水井水位降深变化关系图

$$(Q=83.55\text{m}^3/\text{h})$$

Fig. 5 Relation of well loss value and drawdown of the pumping well ($Q=83.55\text{m}^3/\text{h}$)

了抽水次数, 并提高了精度, 但与本文提出的 C-G 法计算结果相差甚远, 其主要原因是抽水期间背景水位变化对两次定流量抽水试验影响比较大。

(2)在区域背景水位变化强烈的漏斗区进行抽水试验, 需要校正区域背景水位波动和井中大气压变化抽水试验的影响。并利用两含水层之间水位变幅关系, 间接获得抽水层在抽水期间背景水位与时间的关系: 第一次抽水(区域上两含水层同步上升) $S_g = 0.0174e^{0.96gt}$, 第二次抽水(区域上两含水层同步下降) $S_g = 3.43 \times 10^{-5}t$ 。

(3)水跃值在抽水开始迅速增加, 随后缓慢增加至最大值, 达到稳定状态。水跃值在达到稳定前与抽水井降深呈较显著的不同线性关系。

参考文献:

- [1] 陈崇希, 林敏. 地下水动力学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1999.
- [2] Madan K Jha, Gaurav Nanda, Manoj P. Samuel. Determining hydraulic characteristics of production wells using genetic algorithm [J]. Water Resources Management, 2004, 18: 353-377.
- [3] 高秋惠, 肖红, 王岩. 孔隙潜水井水跃值影响因素及相关方程的探讨[J]. 黑龙江水专学报, 2002, 29(2): 39-42.
- [4] 牛志刚, 赵保生, 杜海威. 抽水孔水跃值计算方法及其对稳定流法求参的影响[J]. 中州煤炭, 2003(4): 8-9.
- [5] 郭增玉. 黄土潜水含水层深井抽水式水跃值变化特性[J]. 水利与建筑工程学报, 2004, 2(1): 29-32.
- [6] Charbement R J. Groundwater Hydraulics and Pollutant Transport [M]. New Jersey: Prentice Hall, Inc., 2000 91-178.
- [7] Jacob C E. Drawdown test to determine effective radius of artesian well [J]. Transactions of ASCE, 1947, 1047-1070.

(下转第 37 页)

- 征及其意义[J]. 资源与环境, 2006(5): 178-179.
- [12] 王永利, 贾疏源, 张成江. 雅砻江某电站稀土元素水文地球化学特征[J]. 地质灾害与环境保护, 2003, 14(2): 73-75.
- [13] 胡勤海, 金明亮. 稀土元素, 在水体中的环境化学行为及其生物效应[J]. 农业环境保护, 2000, 19(5): 274-275.
- [14] 刘英俊, 曹励明. 元素地球化学导论[M]. 北京: 地质出版社, 1987. 61.
- [15] 唐宾, 刘楚雄, 郝维城. 贵州中三叠世盘县动物群产出地层的稀土元素特征及其地质意义[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2007, 43(2): 190-197.
- [16] 赵志根. 不同球粒陨石平均值对稀土元素参数的影响[J]. 标准化报道, 2000, 21(3): 15-16.

Hydrogeochemistry of trace elements in groundwater from Makeng district, Fujian Province

DU Xin^{1,2}, CHEN Zhi-hua², LIN Rong-rong^{1,2}, QIN Song-bai^{1,2}

(1. Graduate School of China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;

2. School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: On the basis of regional geological investigation, field samples and measurement indoor, the paper studied on the hydrogeochemical characteristics of groundwaters in Makeng district, pointed out that some trace elements could be used for distinguishing different kinds of groundwater, analyzing the cause of abnormality of trace elements in groundwater, and judging the activity level of groundwater and characteristics of rare earth elements (REE), providing the credible reasons for judging the source of groundwater bursting.

Key words: iron mine; trace element; REE; tracer

责任编辑: 汪美华

(上接第 32 页)

Calculation methods and characteristic analyses of deep well loss values in the eastern plain of northern China

WU Qing-hua¹, GAO Ye-xin¹, LIN Wen-jing¹, ZHANG Wei¹, JIN Xiao-ying², HAN Yu-ying², WANG Gui-ling¹

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

2. China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: This paper discusses the applicability and disadvantage of methods for calculation of the well loss values, such as the direct method, s-lg r method, repeated steady flow pumping test method and multi-drawdown-pumping test method. In the eastern plain of northern China, the area depression cone is huge and the change in groundwater level is obvious, making it difficult to calculate the well loss values by conventional methods. This paper presents a method, namely the C-G method, to address the issue. Compared with the modified repeated steady flow pumping test - double steady flow pumping, the result of the C-G method is more reliable. A method to correct the influence of the atmospheric pressure by a DIVER in the well and regional groundwater level variation on well loss values is introduced in this paper. The change in the well loss value with time and with groundwater level drawdown is also discussed.

Key words: cone of depression; pumping test; correction of groundwater level; well loss value; C-G method

责任编辑: 汪美华