

文章编号: 1001-1986(2008)03-0048-04

# 数值法模拟赵油坊水源地深层地下水允许开采量

李贵明<sup>1,2</sup>

(1. 中国地质大学, 北京 100083; 2. 河南省地质矿产勘查开发局第十一地质队, 河南 商丘 476000)

**摘要:** 通过抽水试验, 确定了拟建水源地——赵油坊的水文地质参数: 平均导水系数  $878.27 \text{ m}^2/\text{d}$ , 弹性释水系数为  $6.85 \times 10^{-4}$ , 压力传导系数为  $1.55 \times 10^6 \text{ m}^2/\text{d}$ , 水跃值为  $3.44 \text{ m}$ ; 根据水文地质参数把水源地划分为 6 个单元。选用合理的计算模型, 模拟不同开采条件下地下水水位下降情况, 确定以  $24\,000 \text{ m}^3/\text{d}$  的开采方案较为合理。

**关键词:** 水文地质参数; 允许开采量; 深层含水层; 赵油坊

**中图分类号:** P641.8 **文献标识码:** A

## Numerical simulation for evaluating allowed water exploitation from deep aquifer in Zhaoyoufang

LI Gui-ming<sup>1,2</sup>

(1. China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. The No. 11 Geological Team, Henan Provincial Geology and Mineral Resources Development Bureau, Shangqiu 476000, China)

**Abstract:** Hydrological parameters of groundwater resources zone in Zhaoyoufang are attained by pump experiment. The mean conductivity coefficient, elastic storage coefficient, pressure conductivity coefficient, hydraulic jump value are  $878.27 \text{ m}^2/\text{d}$ ,  $6.85 \times 10^{-4}$ ,  $1.55 \times 10^6 \text{ m}^2/\text{d}$ ,  $3.44 \text{ m}$ , respectively. Based on those parameters, the groundwater resources zone is divided into 6 units. Selecting the proper model to simulate groundwater level change under different exploitation condition, it shows that No.1 exploiting  $24\,000 \text{ m}^3/\text{d}$  design is more reasonable.

**Key words:** hydrological parameters; allow exploitation; deep aquifer; Zhaoyoufang

随着人口的增加以及工业的发展, 商丘市目前水厂能力已难于满足城市生产和生活用水需求, 为此迫切需要寻找新的、合适的水源地, 建立新的水厂。商丘市位于黄河冲积平原, 地下水资源丰富, 储量稳定, 水质优良, 据初步勘察, 水源地选址在赵油坊。本文意在通过数值法, 模拟赵油坊水源地深层地下水允许开采量, 为城市远景规划及供水规划提供科学佐证。

### 1 水源地水文地质条件

赵油坊水源地位于商丘市, 属黄河冲积平原, 地表岩性以亚砂土和亚粘土为主, 多年平均降水量为  $709 \text{ mm}$ , 多年平均蒸发量为  $1\,805.7 \text{ mm}$ , 区内有多条河流分布, 均属季节性河流, 且多数河流常年无水<sup>[1]</sup>。

研究目标为深层地下水, 深度在  $350\sim 500 \text{ m}$ 。该含水层赋存于新近系冲湖积层中, 岩性以细砂为主, 中砂和粉砂次之, 可见 3~4 层, 砂层累计厚度

$50.50\sim 89.10 \text{ m}$ 。考虑含水层厚度, 结合单位涌水量的大小(见表 1), 换算成单井降深  $10 \text{ m}$  出水量, 可将水源地划分为两个富水单元: 强富水区和富水区, 强富水区内降深  $10 \text{ m}$  时单井出水量大于  $80 \text{ m}^3/\text{h}$ , 富水区内降深  $10 \text{ m}$  时单井出水量在  $60\sim 80 \text{ m}^3/\text{h}$ <sup>[1-2]</sup>。

表 1 深层水抽水试验结果

Table 1 The result of pump-experiment on deep aquifer

井号	试段/m	水位降深/m	单位涌水量/ $\text{m}^3\cdot(\text{h}\cdot\text{m})^{-1}$
S <sub>3</sub>	420.0~436.0	6.60	9.09
S <sub>4</sub>	330.0~508.0	6.45	11.63
S <sub>6</sub>	360.0~492.3	8.34	11.15
S <sub>7</sub>	343.0~492.5	7.38	12.35
S <sub>8</sub>	341.0~492.5	7.17	10.60

由于深层地下水埋藏深, 不能直接得到大气降水的补给, 而且上覆有较厚的粘土和亚粘土层, 因此它与上部含水层水力联系微弱。天然状态下, 近似于静止的封闭水形式, 由于降落漏斗的形成, 径流方向改为向漏斗中心流动。人工开采是深层地下

收稿日期: 2007-10-22

作者简介: 李贵明(1967—), 男, 河南虞城人, 总工程师, 博士研究生, 长期从事水文地质勘察工作。

水的主要排泄方式。深层地下水在漏斗中心埋深 57.50 m, 一般约 34.23~35.20 m, 深层地下水主要受开采强度的影响, 水动态呈周期性变化, 总体水位呈下降趋势。水化学类型为  $\text{HCO}_3\text{-Cl-Na}$  和  $\text{HCO}_3\text{-Na}$  型。

## 2 深层地下水水文地质参数的选择

水源地勘察区内 6 个深孔分别进行了单孔稳定流、单孔非稳定流、孔组非稳定流以及群孔干扰抽水试验<sup>[3-5]</sup>。稳定流抽水试验采用“裘布依承压完整井”计算:

$$S = \frac{Q}{2\pi KM} \ln \frac{R}{r},$$

$$R = 10S\sqrt{K},$$

式中  $M$  为含水层厚度, m;  $K$  为渗透系数, m/d;  $Q$  为涌水量,  $\text{m}^3/\text{d}$ ;  $S$  为抽水孔降深, m;  $r$  为抽水孔半径, m;  $R$  为影响半径, m。

非稳定流抽水试验采用“泰斯无越流承压完整井”计算公式:

$$T = \frac{Q}{4\pi S} W(u),$$

$$\mu_e = \frac{4Tt}{r^2 \frac{1}{u}},$$

$$a = \frac{r^2}{4t} \cdot \frac{1}{u},$$

$$T = 0.183 \frac{Q}{i},$$

式中  $T$  为导水系数,  $\text{m}^2/\text{d}$ ;  $Q$  为涌水量,  $\text{m}^3/\text{d}$ ;  $W(u)$  为井函数;  $\mu_e$  为弹性释水系数;  $S$  为降深, m;  $t$  为抽水延续时间, d;  $r$  为观测孔距主孔距离, m;  $a$  为压力传导系数;  $i$  为直线图解法  $s\text{-lgt}$  曲线的斜率。

根据以上公式, 可求得弹性释水系数、渗透系数和导水系数等(见表 2)。

由表 2 可见, 各类抽水试验所求得的水文地质参数较为接近, 因此实际计算中采用平均导水系数

$878.27 \text{ m}^2/\text{d}$ , 弹性释水系数  $6.85 \times 10^{-4}$ , 压力传导系数  $1.55 \times 10^6 \text{ m}^2/\text{d}$ 。根据  $S_5$  孔稳定流两次降深抽水试验, 按《供水水文地质手册》公式:

$$\Delta h = \frac{bQ^2}{78.96M^2r_w},$$

$$b = \frac{78.96M^2r_w}{Q_2 - Q_1} \left( \frac{S_{0-2}}{Q_2} - \frac{S_{0-1}}{Q_1} \right),$$

式中  $\Delta h$  为水跃值, m;  $M$  为含水层厚度, m;  $r_w$  为主孔滤水管半径, m;  $b$  为加坡系数,  $\text{d}^2/\text{m}^2$ ;  $S_{0-1}$ 、 $S_{0-2}$  为主孔第一次、第二次抽水降深, m;  $Q_1$ 、 $Q_2$  为主孔第一次、第二次抽水的涌水量,  $\text{m}^3/\text{d}$ 。计算得出水跃值 3.44 m。

## 3 数值法模拟深层地下水允许开采量

### 3.1 含水层概化<sup>[5-6]</sup>

深层含水层是指埋深 350~500 m 之间的新近系含水孔隙地层, 含水层厚度 50.5~89.1 m, 岩性以细砂为主。单井抽水资料显示, 研究区北部富水性较差, 南部富水性较好, 即含水层具有非均质性, 而且局部有地下漏斗, 漏斗中心水位标高 -8 m, 东部边界水位标高 15~20 m, 地下水具有承压性。资料报道, 深层地下水上部为矿化度 2.5~3.3 g/L 的微咸水, 在深层水与微咸水之间普遍存在有致密的粘土层, 其平均厚度达 20.5 m, 垂向渗透系数  $5.2 \times 10^{-4} \text{ m/d}$ 。依据深层水单井非稳定流抽水试验数据, 水位降深时间曲线接近泰斯曲线, 故认为深层水越流较弱, 概化为无越流补给含水层。将工作区外界当作深层含水层的计算边界, 概化为流量边界, 深层水计算面积  $225 \text{ km}^2$ 。

综上所述, 将计算区深层含水层概化为: 隔水顶底板水平, 非均质各向同性, 无越流补给的平面二维流承压水水文地质模型。

表 2 深层水抽水试验所得水文地质参数  
Table 2 The hydrological parameters resulted from pump experiment of deep aquifer

孔号	导水系数/ $\text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$	弹性释水系数/ $10^{-4}$	导压系数/ $10^6 \text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$	渗透系数/ $\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$	影响半径/m	抽水试验类型
$S_3$	742.45					单孔非稳定流
$S_4$	808.35					
$S_5$				4.99	191.89	单孔稳定流
$S_6$	965.9	5.40	1.76			孔组非稳定流
$S_7$	945.4	4.46	2.11			
$S_8$	916.0					单孔非稳定流
干扰抽水	1 029.5	12.60	0.82			干扰抽水试验
范庄孔	740.3	4.94	1.50			孔组非稳定流

### 3.2 含水层源汇项及地下水流初始条件

计算区深层水水文地质模型为：含水层隔水顶板水平，具非均质各向同性，地下水流受二类边界限制，为无越流补给的承压二维非稳定流模型。

### 3.3 数学模型

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( T \cdot \frac{\partial H_2}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( T \cdot \frac{\partial H_2}{\partial y} \right) - \sum_i Q_1 \cdot \delta(x - x_i) \cdot \delta(y - y_i) = \mu_e \left( \frac{\partial H_2}{\partial t} \right),$$

$$H_2(x, y, t)_{t=0} = H_2(x, y),$$

$$T \left( \frac{\partial H_2}{\partial n} \right) \bigg|_{\frac{1}{2}} = Q_2(x, y, t),$$

$$(x, y) \in G, t \geq 0,$$

式中  $H_2$  为深层地下水位, m;  $T$  为深层地下水导水系数,  $\text{m}^2/\text{d}$ ;  $\mu_e$  为深层含水层释水系数;  $Q_2$  为边界单宽流量,  $n$  为边界外法线。

采用三角网络有限差分法求解, 将计算区划分为 491 个单元, 269 个节点, 其中内节点 224 个, 边界节点 45 个。在空间、时间离散基础上, 依据均衡原理和达西定律, 建立任一时刻任一节点均衡域的隐式差分方程, 采用迭代法求解。

### 3.4 模型识别

模型识别主要依据群孔抽水试验观测结果。群孔连续抽水 15 d, 水位恢复 3 d, 共 18 d, 总抽水量  $10\,197.6 \text{ m}^3/\text{d}$ 。将抽水井流量和现有开采井流量加在模型上运行, 输出节点计算水位降深, 与抽水孔、观测孔水位降深进行拟合(见图 1、图 2)。从拟合曲线看, 抽水孔的降深曲线拟合程度较高, 如  $S_4$  抽水孔; 而外围观测孔拟合程度相对较差, 如  $S_3$  观测孔, 主要差别是外围观测孔在抽水期间水位几乎不变, 而拟合计算结果外围观测孔降深  $0.1 \sim 0.2 \text{ m}$ 。其他抽水孔或观测孔水位降深均呈现  $S_4$ 、 $S_3$  类似的现象。

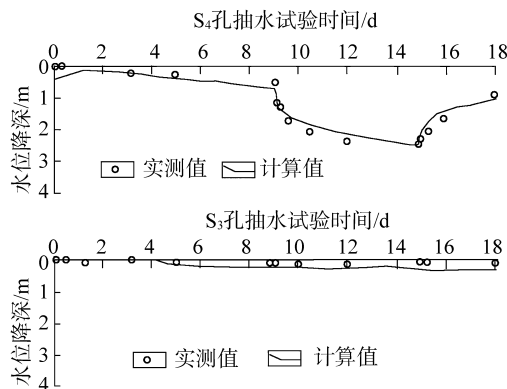


图 1 群孔抽水试验水位降深

Fig. 1 The water level change during pump experiment

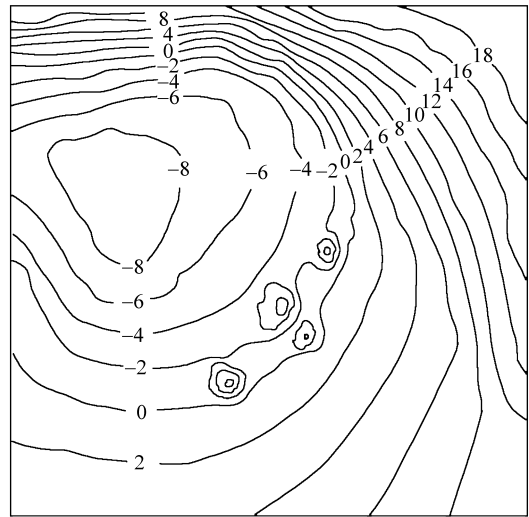


图 2 干扰抽水最大降深流场拟合图

Fig. 2 The most descending water level of pump experiment

根据深层含水层的导水系数  $T$  和释水系数  $\mu_e$ , 计算区可分为 6 个小区(图 3), 处于中部的第 4 区导水系数和释水系数均为最大, 分别为  $1\,360 \text{ m}^2/\text{d}$  和  $8.9 \times 10^{-3}$ , 但此区面积相对较小。其他 5 区的释水系数相差不大, 均为  $10^{-4}$  数量级, 导水系数中以第 3 区最大, 达  $1\,340 \text{ m}^2/\text{d}$ , 其他 4 区较为相近, 处于  $550 \sim 880 \text{ m}^2/\text{d}$ 。

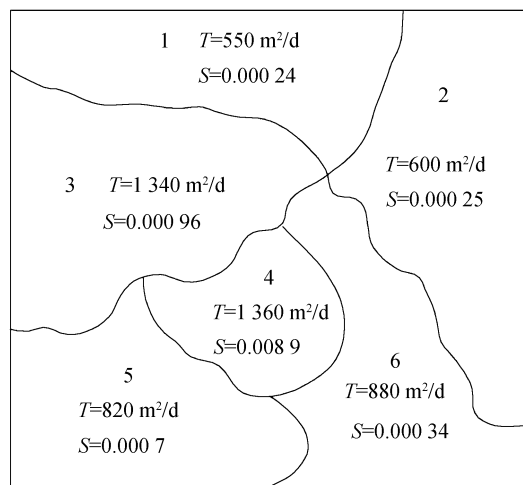


图 3 深层含水层参数分区图

Fig. 3 The different parameters of deep aquifer

井群干扰抽水试验末时段水均衡量, 边界补给量  $67\,344.29 \text{ m}^3/\text{d}$ , 人工开采量  $67\,683.70 \text{ m}^3/\text{d}$ , 均衡差  $-339.10 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

### 3.5 允许开采量计算与水位预测

按照设计, 共分 3 套方案开采地下水。第 1 方案  $24\,000 \text{ m}^3/\text{d}$ , 第 2 方案  $48\,000 \text{ m}^3/\text{d}$ , 第 3 方案  $30\,000 \text{ m}^3/\text{d}$ , 分别需布设井 10 眼、20 眼和 13 眼。根据验证的模型计算和评价允许开采量。第 1 方案

表 3 第 20 a 末水源地中心点各参数变化  
Table 3 The parameters in the middle of groundwater resources zone after 20 years

方 案	1		2		3	
现有开采量/ $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$	67 683.7		67 683.7		67 683.7	
边界开采量/ $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$	67 344.29		67 344.29		67 344.29	
增加开采量/ $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$	24 000		48 000		30 000	
激发开采量/ $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$	24 274		48 307.43		30 306.9	
均衡差/ $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$	-65.41		-31.98		-32.51	
节点号*	143	54	143	54	143	54
节点水位标高/m	-47.64	-50.83	-107.81	-104.14	-62.95	-64.47
井壁水位标高/m	-50.23	-53.72	-110.4	-107.03	-65.54	-67.36
井壁水位降深/m	49.93	45.32	110.1	98.63	65.24	58.96

\*143 节点为拟建水源地中心点, 54 节点为老水源地中心点。

增加开采量 24 000  $\text{m}^3/\text{d}$ , 第 20 a 末老水源地中心井井壁水位标高-53.72 m, 水位埋深约 103.72 m, 拟建水源地水位标高-50.23 m, 水位埋深 99.23 m 左右, 平均水位下降约 2.5 m/a, 补给量与排泄量基本持平, 因此, 该方案可行。第 2 方案增加开采量 48 000  $\text{m}^3/\text{d}$ , 第 20 a 末老水源地中心井井壁水位标高-110.40 m, 水位埋深 160.40 m 左右, 补给量与排泄量基本持平, 但由于新老水源地最大水位埋深远大于设计降深, 故此方案不可行。第 3 方案增加 30 000  $\text{m}^3/\text{d}$  开采量, 第 20 a 末老水源地中心井井壁水位标高-65.54 m, 水位埋深 114.54 m 左右, 平均水位下降速度约 3.3 m/a, 补给量与排泄量基本持平, 新老水源地埋深均小于设计降深, 此方案可行(表 3), 综合考虑各方面条件, 应以第 1 开采方案为宜。

4 结语

通过抽水试验, 确定了深层地下水水文地质条

件, 由此把拟建水源地划分为 6 个单元; 采用数值法, 选择合理的数学模型, 计算出深层地下水允许开采量, 并评价 3 个方案的可行性, 结果显示第 1 和第 3 方案可行, 其中第 1 方案较优。

参考文献

[1] 李贵明, 任红雨, 冯斌, 等. 河南省商丘县赵油坊水源地供水水文地质勘探报告[R]. 2003.

[2] 沈照理. 水文地质学[M]. 北京: 科学出版社, 1985.

[3] 陈崇希. 地下水动力学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1999.

[4] 地矿部水文地质工程地质研究所. 地下水资源评价理论与方法的研究[M]. 北京: 地质出版社, 1982.

[5] 李俊亭. 地下水数值模拟[M]. 北京: 地质出版社, 1989.

[6] 孙讷正. 地下水流的数字模型和数值方法[M]. 北京: 地质出版社, 1981.

(上接第 47 页)

经济效益为 1 666.56 万元/a; 建立的 9 座污水处理厂, 总处理污水能力 4.2 万  $\text{t}/\text{d}$ , 废水复用率达到 80%, 实现水资源的节约与保护。

e. 矸石山逐渐消失。岩巷万  $\text{t}$  掘进率由 52 m 降低到 13 m,  $\text{t}$  煤出矸石率由 20%降低到 5%,其中井下处理矸石约 50%, 矸石发电 40%, 地面矸石回填约 10%。矸石山的消失, 杜绝了矸石山淋洗对土壤和水体的污染。矸石发电 43.6 亿  $\text{kW}\cdot\text{h}$ , 盈利 1.744 亿元。

f. 促进地方经济发展和社会稳定。矿区大规模生态建设每年为社会提供了近 50 万个就业岗位, 为矿区分流人员创造了较大的再就业空间, 减轻了社会就业负担, 促进了地方经济发展和社会稳定。

参考文献

[1] 刘志斌. 大型露天煤矿闭矿后的生态环境问题及对策[J]. 采矿工程, 2003(3): 1-3.

[2] 韩建国, 鹿志发, 华泽桥, 等. 神华煤炭[M]. 北京: 中国标准出版社, 2003.

[3] 张发旺, 周俊业, 侯新伟, 等. 神府矿区煤炭开发面临的地质生态环境问题及对策研究[J]. 地球学报, 2002, 23(增刊): 59-64.

[4] 李世民, 王义, 张成虎, 等. 神东矿区环境建设规划[R]. 2006.

[5] 李林, 寇贵德. 神东矿区生态保护技术措施[J]. 煤田地质与勘探, 2005, 33(增刊): 147-150.

[6] 王安. 神东矿区生态环境防治体系构建及其效果[J]. 中国水土保持科学, 2007, 5(5): 83-87.