

# 傍河型地下水源地的数值模拟 ——以河南三门峡市辛店水源地为例

曹友杰<sup>1,2</sup>, 周 训<sup>1</sup>, 张 勇<sup>2</sup>

(1. 中国地质大学, 北京 100083; 2. 河南省有色金属地质矿产局, 郑州 450052)

**摘要:** 本文通过对三门峡辛店水源地地质、水文、气象条件的正确分析和对水文地质概念模型的正确认识及边界条件的合理概化, 建立地下水流二维非稳定流数学模型进行数值计算, 对开采性抽水试验地下水位变化进行模拟。结果表明, 该模型适用于刻画傍河型水源地地下水流场的变化, 用来对水源地开采动态进行预测也取得了良好的效果。对同类地下水源地的数值模拟具有一定借鉴意义。

**关键词:** 地下水源地; 数值模拟; 预测

中图分类号: P641.8

文献标识码: A

## Numerical simulation of groundwater resource areas along river-taking Xindian groundwater resource areas in Sanmenxia as the example

Cao Youjie<sup>1,2</sup>, Zhou Xun<sup>1</sup>, Zhang Yong<sup>2</sup>

(1. China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2. Henan Provincial Non-ferrous Metals geological and Mineral Resources Bureau, Zhengzhou 450052, China)

**Abstract:** Through analyzing and researching on the data of the geology, hydrology and climatic phenomenon for Xindian groundwater resource areas in Sanmenxia, the mathematics model of 2-D transient seepage is established and used to estimate the change of groundwater under the condition of the exploitation pump tests. The results show that the evaluation model is fit for depicting the changes on the transient seepage of groundwater resource areas along river. The model is used for the prediction of the exploited trends of groundwater resource areas and the practical results are obtained, which provides the valuable experience for the evaluation of the same type groundwater resource areas.

**Key words:** groundwater resource area; numerical simulation; prediction

### 0 引言

三门峡市扩建热电联产工程, 厂址选在原惠能电厂西侧, 供水水源拟采用地下水, 需水量  $2.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

原电厂辛店水源地施工探采结合孔 10 眼 (T6 孔已冲坏), 经近 6 年来开采资料统计, 其开采量有逐年增大的趋势, 年开采过程中, 一般 10 月份至次年 1 月份开采量较大, 其它月份开采量较小。平均开采量  $0.607 \sim 1.3573 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。实测漏斗面积扩大  $0.415 \text{ km}^2$ , 漏斗中心水位比预测值多降  $2.0 \sim 4.0 \text{ m}$ , 并且实际开采量未达到预计开采量<sup>[1]</sup>。究其原因主要是黄河三门峡水库近年来蓄水位降低, 以及实测水位比预测水位多近一年时间所致。

扩大开采水源地是原辛店水源地在黄河南岸河漫滩及一级阶地上向上、下游东、西两端的自然延伸, 地质地貌及水文地质条件基本类同, 均属典型傍河型水源地<sup>[2]</sup>, 补给条件良好。区内全部开发利用地下水, 现有农用开采井 513 眼, 平均机井密度  $5.6 \text{ 眼}/\text{km}^2$ 。农业开采量  $1432.308 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ , 生活开采量  $82.8478 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ ; 工业自备井 54 眼, 地下水开采大户主要有惠能电厂、神力集团、铁路三门峡西站、县自来水公司、县化肥厂、豫西机床厂等, 年开采地下水  $1298.177 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。工农业开采井深度一般为  $85 \sim 150 \text{ m}$ , 均为混合开采。20 世纪

收稿日期: 2008-09-03; 修订日期: 2009-03-31

作者简介: 曹友杰 (1970 - ), 男 (汉族), 河南杞县人, 高级工程师, 博士研究生。

50年代以来,区内曾先后作过不同比例尺的地质、水文地质工作,积累了较为丰富的基础资料。

本文拟在前人研究成果的基础上,通过该水源地水文地质条件的分析,建立其水文地质概念模型及数值模型,利用所建模型对水源地现状及扩大开采后的区内水均衡状况进行模拟,为合理开采利用地下水资源提供科学指导。

## 1 水源地概况

### 1.1 自然地理

水源地位于三门峡市陕县大营镇辛店村北,隶属于三门峡市陕县大营镇、张湾乡、原店镇及灵宝

市大王镇的部分地区(见图1)。

该区地貌单元属于汾渭地堑盆地东南缘。纵观全区,地势南高北低。南部属张汭—阳店黄土塬与崤山东延余脉组成的残山,沟谷发育,地形陡峻,台塬支离破碎,地形起伏不平;北为黄河及漫滩和多级内叠阶地,地形平坦开阔,阶地与阶地及塬区为陡坎相接。阶地由南向北倾斜于黄河河床。一级阶地阶面高程318~322m。构造属华北陆台南缘灵陕断陷盆地,基岩构造裂隙发育,对于降水入渗,地下水赋存、运移以及深层热水运移、上升起着重要作用。加之古气候和动力条件的变更、河流摆动迁移,形成不同的阶地、古冲洪积扇等有利储水条件。

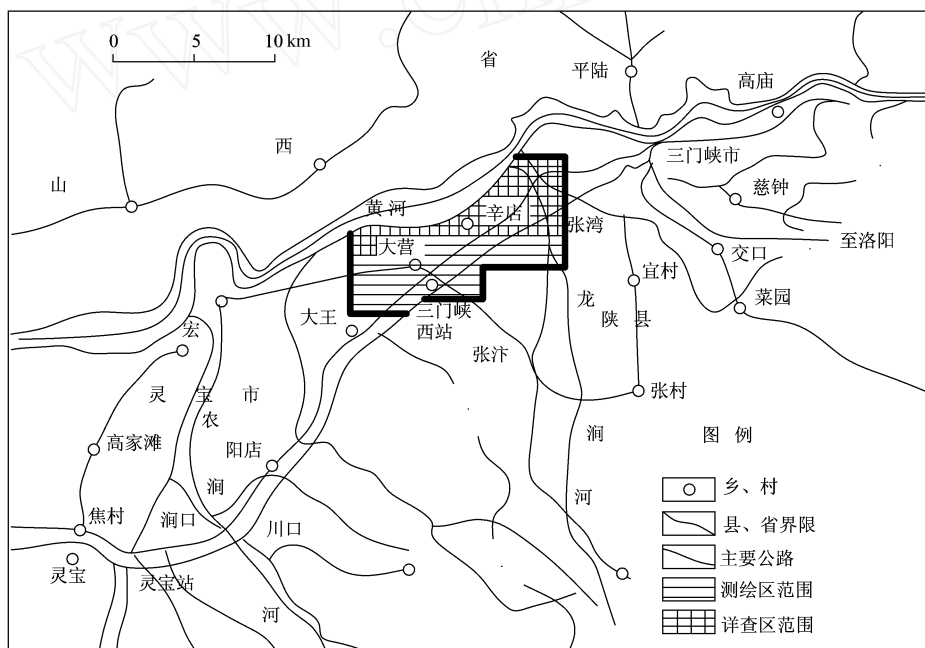


图1 交通位置

地层主要是中更新统、晚更新统和全新统冲洪积中粗砂与粘土互层沉积物复合体。

区内气候属大陆性半湿润季风气候。多年平均气温13.6℃。多年平均降水量547.00mm,6~9月份4个月总降水量占多年平均年降水量的63%。多年平均蒸发量2051.5mm。黄河多年平均径流量420亿m<sup>3</sup>。三门峡水库多年平均水位311.98m。

### 1.2 水文地质条件

区域范围内广布第四系松散堆积物。地下水类型为:碳酸盐岩类裂隙岩溶水,碎屑岩类裂隙孔隙水、黄土孔隙裂隙水,松散岩类孔隙水。地下水富水性以松散岩类为好,其它岩类较差。松散岩类孔隙水是区域内地下水的主要类型,主要分布在黄河及其支流的河谷阶地区,含水介质为第四系冲积、

冲洪积、冲湖积形成的砂卵砾石、中粗砂、粉细砂层,具多层结构(见图2)。不同地貌单元,含水层的厚度、埋藏分布规律及富水性差异较大。

### 1.3 地下水的补给、迳流、排泄条件

现状条件下,降水入渗补给占总补给量的10.57%,不同地质地貌单元降水补给强度不同。滩地和一级阶地,包气带岩性主要为粉土、粉质粘土、粉砂透镜体,水位埋深浅,降水补给条件差,降水入渗系数为0.05。二、三级阶地包气带岩性为粉质粘土,结构疏松,垂直节理发育,地下水位埋深大,降水入渗系数为0.07。黄土塬岗区,包气带岩性为粉质粘土,垂直节理发育,水位埋深大,降水入渗系数为0.05。

三门峡水库蓄水期(11月至次年6月,相当于工程勘察 Geotechnical Investigation & Surveying 41

枯水季节), 库水位升高, 使支流河沟溯源倒流, 漫滩淹没, 水深达 5~10m, 黄河水明显侧向补给地下水, 影响宽度 1~2km, 影响幅度 0.3~6.0m, 现状条件下, 黄河侧向补给占总补给量的 49.72%。在开采条件下, 地下水将常年接受黄河水的激发补给。

东部的苍龙涧河, 西部的南曲河也断续渗漏补给地下水; 化纤厂、化肥厂污水沟及电厂煤灰场同样渗漏补给地下水, 其量占总补给量的 8.54%。

其它补给: 南部基岩低山区 (包括热矿泉水)、黄土塬区以及东西边界地下水的侧向迳流补给, 其补给量占总补给量的 29.21%。此外, 还有农田灌溉回渗补给, 仅占 1.95%。

由于黄土塬与三、二级阶地高差达 200m, 且组成从南向北阶梯状倾斜斜坡地形, 故水力坡度大、地下水侧向迳流迅速。除漏斗局部地下水流向有所改变 (向漏斗中心汇流), 测区总体流向: 西部从西南流向东北, 东部从东南流向西北, 中部从南向北。水库蓄水期, 滩地水位升高, 地下水从一级阶地向二级阶地前缘迳流; 泄水期, 西部二级阶

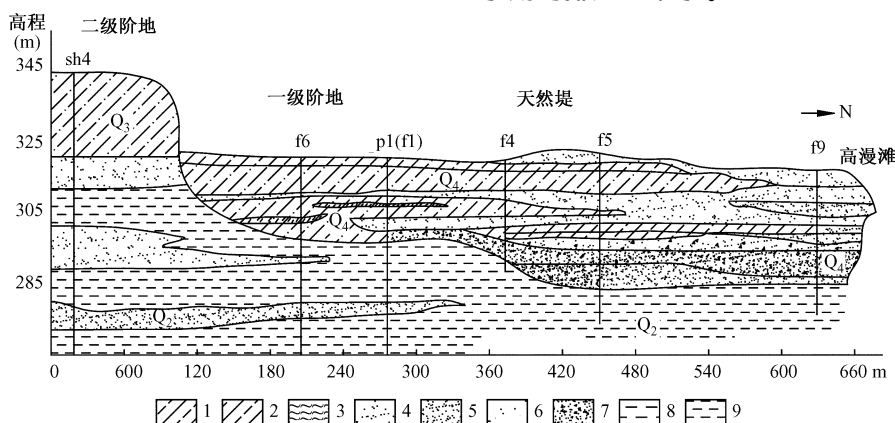
地前缘, 在老马谢—东官庄老村—禹王庙岭一带形成地下分水岭, 地下水向南北两侧迳流; 中部电厂原辛店水源地仍接受黄河水侧向迳流补给。

人工开采是区内地下水的主要排泄形式, 据统计 2003 年 11 月~2004 年 10 月, 年地下水总开采量  $2813.3328 \times 10^4 \text{ m}^3$ , 占总排泄量的 84.72%。

泉水溢出是地下水排泄的另一途径。黄河岸边的冯佐村北、七里等河道切割出露砂砾石层, 水库泄水期可见有较多泉水从二级阶地前缘陡坎下溢出。

蒸发排泄, 仅在黄河漫滩及部分一级阶地不同时段存在。

地下水向黄河的侧向排泄, 区内黄河河床底标高 298~305m, 是区内最低排泄基准面, 也是南部黄土塬及阶地区迳流排泄的最低区。河床沉积厚度 ( $Q_4$ ) 约 15m。黄河水直接与地下水接触, 蓄水期河库水补给地下水, 泄水期地下水补给河水, 两者可互相转化, 但因各段含水层岩性不同, 水力联系密切程度各异, 就总体而言, 西部较差、东部较好。现状条件下, 除电厂原水源地外, 其它地段泄水期均排泄地下水。



1 亚粘土 2 亚砂土 3 砂质淤泥 4 粉细砂 5 细中砂 6 中粗砂 7 砂卵砾石 8 泥质砾石 9 粘土

图 2 水文地质剖面

## 2 水文地质概念模型

从地下水流动系统理论出发, 研究区孔隙含水系统渗流场数值模拟的范围应取至流动系统的自然边界, 即天然分水岭或汇水线处<sup>[5]</sup>。区内浅层含水层组为第四系冲积、冲洪积、冲湖积砂卵砾石、中粗砂、粉细砂层, 其间无稳定隔水层存在, 故将其概化为具有统一水力联系的各向同性单层潜水含水层; 含水层下部为厚层粘土, 厚度达 50m 以上, 隔水性能好, 含水层下部无越流, 可视为水平隔水底板; 故将该地下水流系统概化为潜水二维均质非稳

定流动系统<sup>[2,6]</sup>。

黄河水直接与地下水接触, 蓄水期河库水补给地下水, 泄水期地下水补给河水, 两者可互相转化, 因三门峡水库的存在, 将之视作定水头边界; 其余边界条件均按已知流量边界处理, 其中上边界取为开放边界, 接受降水、灌溉等入渗补给和蒸发排泄; 区内在埋深 120~150m 处存在较厚且连续分布的粘土层, 而且开采井深度在 150m 以上, 因此下边界取为该稳定粘土层的顶面, 为隔水边界。

## 3 水文地质参数的选取

本次数值模拟计算选取的初始渗透系数  $K$  值系

利用抽水试验资料，采用水位恢复法计算的导水系数除以含水层厚度取得。

给水度主要是综合前人成果<sup>[1,4]</sup>，本次水位变动带的重力给水度取值分别为黄河漫滩及一级阶地为 0.05、二级阶地到三级阶地为 0.07、黄土塬为 0.06。

降水入渗系数根据区内地下水动态长观资料、降水量以及不同区域水位动态变动带的岩性及重力给水度资料，选取合适的时段求得，灌溉回渗系数取值参考《辛店水源地扩大开采供水水文地质详查报告》。

4 地下水数值模拟

4.1 地下水数学模型

依据概化的水文地质模型，采用二维均质非稳定流数学模型对研究区地下水渗流场进行模拟。

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(K_{xx}h_{xx}\frac{\partial H}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(K_{yy}h_{yy}\frac{\partial H}{\partial y}\right)+\mu_d\frac{\partial H}{\partial t}-K_{xx}h\frac{\partial H}{\partial n}\Big|_{(x,y)}=q(x,y,z)$$
$$K_{yy}h\frac{\partial H}{\partial n}\Big|_{(x,y)B}=0$$
$$H|_{t=0}=H_0(x,y)$$

式中： $K_{xx}$ 和  $K_{yy}$  分别为  $x$  和  $y$  方向的渗透系数<sup>[L/T]</sup>， $K_{xx}=K_{yy}$ ； $h$  为潜水含水层的厚度 [L]； $H$  为水头值 [L]； $q$  为源汇项 [L/T]； $\mu_d$  为潜水重力给水度； $n$  为边界面的外法线方向； $\frac{\partial H}{\partial n}$  为侧边界； $B$  为底边界； $H_0$  为初始水头。

4.2 模型识别

以 2003 年 11 月 1 日作为初始时刻，2004 年 4 月 1 日和 8 月 1 日的统测水位作为调整参数空间分布的依据。采用 Kriging 空间插值方法得到每个剖分单元的初始水头值<sup>[7]</sup>。

根据长观孔的空间分布，选取 13 个观测孔的水位动态对模型参数进行识别，多数观测孔计算值与实际值拟合较好，S59 和 S64 观测孔模拟水位与实测水位对比见图 3。从动态拟合曲线可以看出，模拟水位没有实测水位的变化幅度大，这主要是由于在模型概化时对各种源汇项在时空上的平均处理造成的。模型识别后确定的含水层渗透系数在 0.86 ~ 3.08m/d 之间，给水度在 0.06 ~ 0.09 之间，均为有效合理范围值。

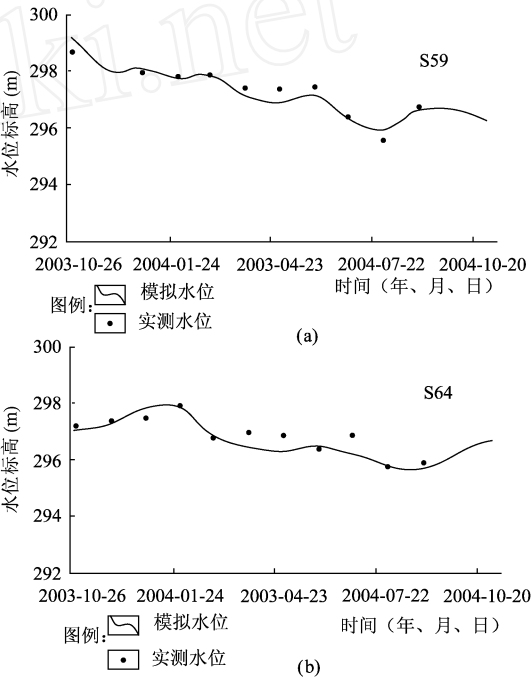


图 3 观测孔 S59 和 S64 模拟水位与实测水位对比

4.3 水均衡对比分析

对水源地现状的各项水均衡要素观测值和模拟值进行对比如表 1、表 2。

| 现状年均衡计算结果                                |   |            |      | 表 1                                     |        |
|--|---|------------|------|---|--------|
| 补给项                                      | 补给量 (10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> /a) | 比例 (%)     | 排泄项  | 排泄量 (10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> /a) | 比例 (%) |
| 黄河补给                                     | 1575.3006                               | 49.72      | 黄河排泄 | 421.5173                                | 12.69  |
| 河渠入渗                                     | 270.6314                                | 8.54       | 工业开采 | 1298.1770                               | 39.09  |
| 灌溉回渗                                     | 61.8858                                 | 1.95       | 农业开采 | 1432.3080                               | 43.13  |
| 东西南侧向补给                                  | 925.6270                                | 29.21      | 生活用水 | 82.8478                                 | 2.49   |
| 降水入渗                                     | 335.0367                                | 10.57      | 蒸发   | 85.8171                                 | 2.58   |
| 合 计                                      | 3168.4814                               | 100.00     | 合 计  | 3320.6672                               | 100.00 |
| 均衡结果 (10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> /a) |   | - 152.1858 |      |   |        |

现状年模拟均衡结果

表 2

| 补给项  | 补给量 ( $10^4\text{m}^3/\text{a}$ ) | 比例 (%) | 排泄项  | 排泄量 ( $10^4\text{m}^3/\text{a}$ ) | 比例 (%) |
|------|-----------------------------------|--------|------|-----------------------------------|--------|
| 边界流量 | 936.35                            | 29.12  | 人工开采 | 2812.29                           | 82.39  |
| 黄河补给 | 1611.07                           | 50.11  | 黄河排泄 | 482.08                            | 14.12  |
| 入渗补给 | 667.56                            | 20.76  | 蒸发   | 85.29                             | 2.50   |
|      |                                   |        | 侧向排泄 | 33.59                             | 0.98   |
| 合 计  | 3214.98                           | 100.00 | 合计   | 3413.25                           | 100.00 |
| 均衡差  |                                   |        |      | - 198.27                          |        |

可以看出,数值模拟结果与长期观测均衡计算结果基本一致,表明地下水年超采量在  $150 \times 10^4 \text{m}^3 \sim 200 \times 10^4 \text{m}^3$  左右。

## 5 水位动态预测

### 5.1 初始条件及时段划分

初始水位场及预测时段以 2003 年 11 月 1 日的地下水位作为初始水位。预测时间为 10 年。为了模拟 7 月和 10 月由于水库的蓄泄水引起的地下水响应过程,将这两个月各分为 2 个时段,其余各月作为一个时段,预测时间共划分为 140 个时段。

### 5.2 边界条件及源汇项

水源地开采后,东西南边界性质基本不变,故开采期间边界补给量不变;北部边界视黄河水位变化而发生流量变化,预报时取黄河现状年的实测水位,且依据电厂设计要求黄河最高蓄水位不超过 316m;降雨入渗和蒸发采用近 50 年的多年平均资料;灌溉入渗及河渠入渗量采用平水年资料;农业开采采用枯水年资料,工业及居民生活用水量均按现状条件下用水量给出。

### 5.3 水位预测

为了满足扩建后热电机组生产用水的需要,在原辛店水源地的基础上需要增加 18 眼开采井,增加开采量  $25000 \text{m}^3/\text{d}$ 。为对供水水源地进行合理开采,将新老水源地作为一个整体进行研究,这样总开采井为 27 眼,其中 4 眼备用,共有 23 眼进行开采。总开采量为  $45000 \text{m}^3/\text{d}$ 。利用数值模拟模型对该水源地开采后的地下水渗流场的变化和开采井所处单元地下水位动态进行预报分析。

水源地扩大开采后,东西南边界性质基本不变,故开采期间边界补给量不变;北部边界视黄河水位变化而发生流量变化,预报时取黄河现状年的实测水位,其它源汇项不变。利用数值模型对该水源地开采后的地下水渗流场的变化和开采井所处单元地下水位动态进行预报分析(图 4)。可以看出,尽管各开采井所处单元的水位呈持续下降趋势,但

是由于靠近黄河,扩大开采激发黄河测向补给,水位下降趋势越来越小,开采第 10 年时的水位下降速率在  $0.04 \sim 0.39 \text{m/a}$  之间,平均下降速率为  $0.16 \text{m/a}$ ,水位基本达到了稳定。

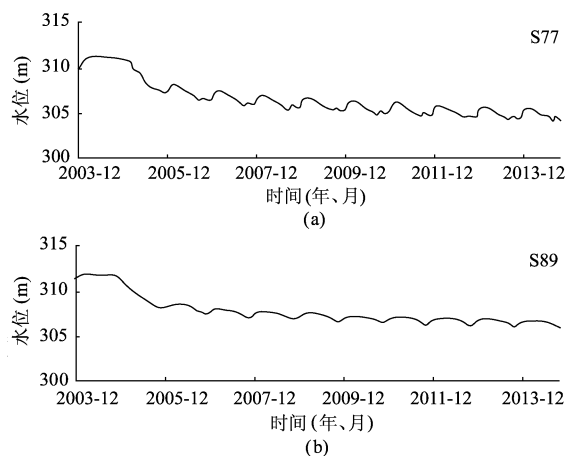


图 4 增加开采 10 年内的原观测孔 S77 和 S89 所处单元水位动态曲线

## 6 结语

(1) 目前,数值模拟方法是对地下水资源评价的主要手段,进行数值模拟时可以通过调整多个参数或某些边界条件达到拟合<sup>[7]</sup>。本文根据研究区含水系统特征确定初始及边界条件,建立二维非稳定流数学模型进行数值模拟计算,对观测井水位进行拟合,取得了满意的拟合效果。

(2) 利用该数值模型和识别取得的参数值对该水源地开采后的地下水渗流场的变化和开采井所处单元地下水位动态进行的预报分析表明,尽管各开采井所处单元的水位呈持续下降趋势,但是由于靠近黄河,水位下降趋势越来越小,开采第 10 年时的水位下降速率在  $0.04 \sim 0.39 \text{m/a}$  之间,平均下降速率为  $0.16 \text{m/a}$ ,水位基本达到了稳定。

(下转第 94 页)

道走向。

经过工程地质的验证,地下水网管道的顶部埋深,中心埋深,底部埋深,形状,范围和上述推断基本吻合。从而也验证了高密度电阻率法在地下水网管道探测中的可行性。

通过不同电极排列方式,对同一测线视电阻率断面及反演电阻率断面的对比,可以看出不同电极排列方式采集数据的反演结果基本都能反应地下电性不均匀体的存在,具有较好的对应性。两种装置探测结果反演电阻率断面结合分析可以很容易,清晰的判断出管道的位置和规模。

### 3 结语

通过本次在某城市地下水网管道的实测结果,得到以下结论:

(1) 本次高密度电法探测结果可以较清楚的反应地下水网管道的具体位置、直径、走向、埋深,并取得了预期的效果。

(2) 通过本次野外实际探测验证,温纳装置对横向局部不均匀体分辨率不高。但可以大致的分析、判断异常体的大致位置、走向。而偶极装置

对横向不均匀体具有较高的灵敏度,分辨率也较高。可以用于准确的判断地下异常体位置、规模、直径、埋深等。

(3) 根据本次探测显示,用高密度电阻率法探测城市地下水网管道是可行的,值得推广。

(4) 在实际工作中还要多结合当地的地电条件,具体情况具体分析,选取最适合当地地电条件的装置及方法,从而取得最佳的物探效果。

### 参 考 文 献

- [1] 肖宏跃,雷宛.地电学教程[M].北京:地质出版社,2008.
- [2] 雷宛,肖宏跃,邓一谦.工程与环境物探教程[M].北京:地质出版社,2006.
- [3] 肖宏跃,雷宛,雷行健.高密度电阻率法中几种装置实测效果比较[J].工程勘察,2007,(9),65~69.
- [4] 秦福刚,戴隆沛,李磊,张平松.高密度电阻率法的装置特点及其在水源勘察中的应用[J].工程地球物理学报,2007,4(4),323~326.
- [5] 刘万恩,蔡克俭.利用高密度电法探查城市地下管道[J].物探装备,2003,13(4),260~262.
- [6] 王爱国,马巍,王大雁.高密度电法不同电极排列方式的探测效果对比[J].工程勘察,2007,(1),72~75.

(上接第44页)

(3) 对该傍河型水源地的评价及预测表明,傍河水源地在黄河侧向补给的保障下,对电厂的供水开采量是有保证的。通过对该项目的跟踪回访,水源地开采量能够满足设计用水要求。在今后的实际开采过程中应加强地下水动态观测,并进行地下水三维非稳定流数值模拟和预测计算<sup>[8~11]</sup>,指导水源地的开采。

### 参 考 文 献

- [1] 河南省有色金属地质勘查总院.辛店水源地扩大开采供水水文地质详查报告[R],2005.
- [2] 殷昌平,孙庭芳,金良玉等.地下水源地勘查与评价[M].北京:地质出版社,1993.
- [3] 河南省地质局水文地质二队.河南省三门峡西能源基地供水方案研究报告[R],1986.
- [4] 河南省地矿厅第二水文地质工程地质队.河南省陕县热电

厂辛店水源地供水水文地质勘探报告[R],1998.

- [5] 李俊亭,王愈吉.地下水动力学[M].北京:地质出版社,1987.
- [6] 张人权.地下水资源特性及其合理开发利用[J].水文地质工程地质,2003,(6):1~5.
- [7] 陈崇希,唐仲华.地下水流动问题的数值解法[M].武汉:中国地质大学出版社,1990.
- [8] 周训,陈明佑,李慈君.深层地下热水运移的三维数值模拟[M].北京:地质出版社,2001.
- [9] 周训,陈明佑,吴胜军等.天津市深层基岩地下热水系统数值模拟中若干问题的处理[J].地球科学,2002,27(2),163~167.
- [10] 周训,陈明佑,方斌等.埋藏型地下水源地的三维数值模拟[J].中国岩溶,2006.
- [11] Zhou Xun, Chen Mingyou, Ju Xiumin. Numerical simulation of seawater intrusion near Beihai, China, Environmental Geology, 2000, 40 (1/2): 223~233.