

doi:10.3799/dqkx.2016.059

# 解析法与数值法在水电站防渗墙效果评价中的运用

陈晓恋<sup>1</sup>, 文章<sup>1\*</sup>, 胡金山<sup>2</sup>, 闵勇章<sup>2</sup>, 梁杏<sup>1</sup>, 孙蓉琳<sup>1</sup>, 李润超<sup>1</sup>

1. 中国地质大学环境学院, 湖北武汉 430074

2. 中国水电顾问集团成都勘测设计研究院, 四川成都 610000

**摘要:**四川省大渡河上某水电站目前正处于施工阶段, 大坝基坑防渗墙已基本完成施工, 但基坑涌水量较大, 为评价防渗墙的防渗效果, 在两防渗墙间开展了 2 组抽水试验. 根据研究区边界条件, 利用综合井函数法初步求取了基坑砂砾层的水文地质参数, 并在此基础上采用数值法 (groundwater modeling system, GMS) 建立水流模型, 进行参数的识别、验证, 研究表明综合井函数法得到的砂砾含水层渗透系数为 19.13~32.24 m/d, GMS 拟合得到的渗透系数为 26.00 m/d. 此外, 数值模拟拟合得到的主、副防渗墙渗透系数较小 (0.01~0.02 m/d), 说明两防渗墙防渗效果较好.

**关键词:** 水电站基坑; 防渗墙; 解析法; 数值法; 地下水; 水文地质.

中图分类号: P64

文章编号: 1000-2383(2016)04-0701-10

收稿日期: 2015-05-09

## Application of Numerical Simulation and Analytical Methods to Estimate Hydraulic Parameters of Foundation Pit in Hydropower Stations

Chen Xiaolian<sup>1</sup>, Wen Zhang<sup>1\*</sup>, Hu Jinshan<sup>2</sup>, Min Yongzhang<sup>2</sup>, Liang Xing<sup>1</sup>, Sun Ronglin<sup>1</sup>, Li Runchao<sup>1</sup>

1. School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Chengdu Surveying and Designing Institute of China Hydropower Engineering Consulting Group, Chengdu 610000, China

**Abstract:** A hydropower station located on Dadu River of Sichuan Province is under construction now. The construction of its impervious walls have been completed basically, however, the discharge of water is still large in the foundation pit of hydropower station. In order to evaluate the performance of impervious walls, two pumping tests was conducted between the two impervious walls. According to the boundary conditions of this area, the comprehensive well function was used to obtain the hydrogeological parameters. On the basis, numerical model is established by using GMS (groundwater modeling system) software to obtain the aquifer parameters after identifying and verifying the model. The results indicate that the hydraulic conductivity of aquifer is between 19.13–32.24 m/d by analytical method, and 26.00 m/d by numerical simulation. In addition, the hydraulic conductivity of impervious walls is very small (0.01–0.02 m/d), it is found that the performance of impervious walls is good.

**Key words:** foundation pit of hydropower station; impervious wall; analytical method; numerical simulation; groundwater; hydrogeology.

## 0 引言

水文地质参数是研究地下水运动问题非常重要的参数, 根据现场稳定流抽水试验资料确定含水层水文地质参数是野外水文地质工作中经常采用的较

为行之有效的的方法之一 (薛禹群和朱学愚, 1979). 在抽水试验基础上评价含水层参数的方法分为 2 类: 解析法和数值法. 当抽水试验含水层满足 Theis 假设 (等厚、均质、各向同性、无限延伸等) 条件下, 常用的解析方法主要有标准曲线配比较法 (Samani and Pasandi, 2003) 和直线图解法 (肖明贵等, 2003; 郭建

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (No.41372253); 中央高校基本科研业务费专项基金项目 (No.CUG140503).

**作者简介:** 陈晓恋 (1989-), 女, 硕士研究生, 主要从事地下水数值模拟工作. E-mail: chenxiaolian105@126.com

\* **通讯作者:** 文章, E-mail: wenz@cug.edu.cn

**引用格式:** 陈晓恋, 文章, 胡金山, 等, 2016. 解析法与数值法在水电站防渗墙效果评价中的运用. 地球科学, 41(4): 701–710.

青等,2008),许多学者将这两种解析法运用于实际案例(赵凯荣,1982;Chenaf and Chapuis,2002;李伟等,2013),随着科学技术的发展,数值法成为解决地下水问题的重要方法(Liu *et al.*,2009),数值法能考虑较多影响因素,解决较复杂的问题,且有较高的精度,因此倍受国内外学者的青睐(李平等,2011),对于实际的地下水流系统,数值模型能比较精确地模拟实际地下水流系统的运动状态(白利平和王金生,2004).许多学者基于数值模拟识别了不同地区的含水层参数(赵宝峰等,2009;李贵仁等,2013;Hosseini *et al.*,2014)并解决了不同的问题(武选民等,2003;余倩等,2013;Hao *et al.*,2014),如进行地下水资源评价(刘颖等,2015)和地下水动态分析(金玮泽等,2014).目前,在众多地下水模拟软件中,GMS(groundwater modeling system)是最先进的综合性地下水模拟软件包,它具有多模块组成的可视化三维地下水模拟软件包,可进行地下水流模拟、溶质运移模拟、反应运移模拟等(谭文清等,2008).

本文在四川省大渡河上某水电站基坑抽水试验基础上,综合利用解析法(标准曲线对比法)和数值模拟(GMS)法求取研究区各含水层的渗透系数  $K$  及弹性给水度  $u_e$ .通过参数的求取判断防渗墙的防渗效果,为水电站后期的施工提供可靠依据.

## 1 研究区概况

该水电站河床覆盖层厚度为 60~70 m,局部达 80 m 左右.根据河床覆盖层成层结构特征,自下而上可分为 3 层:第①层为漂(块)卵(碎)砾石层,第②层为含泥漂(块)卵(碎)砂砾石层,第③层为漂(块)卵砾石层.基岩为花岗岩,风化作用主要沿该岩体裂隙进行,呈局部夹层式风化.根据该区地下水的赋存条件,可分为第四系松散堆积层孔隙水和基岩裂隙水两种类型.第四系孔隙水主要分布于河谷地带的松散堆积物中;基岩裂隙水分布于裂隙岩体和断层带附近,受断层或岩脉阻水而局部富集.

水电站基坑(图 1 上、下游围堰间)开挖至 1 457 m 高程,基坑面以下覆盖层深度约 50 m,采取两道混凝土防渗墙(主墙厚为 1.4 m、副墙厚为 1.2 m)全封闭防渗,两防渗墙相距 11.06 m.研究区是基坑内以两防渗墙为中心,向上游扩展 32 m、下游扩展 16 m 的区域(图 1),目前主副防渗墙已基本完成,但渗水量一直比较大,上游基坑总渗水量约为 2 500~3 000  $m^3/h$ ,下游总渗水量为 3 500~



图 1 研究区平面图

Fig.1 The plan view of the study area

4 000  $m^3/h$ .为判断防渗墙的防渗效果,在基坑内开展抽水试验,并综合利用解析法和数值法进行评价,为后期施工提供指导.

## 2 野外抽水试验设计

本文在求取基坑含水层水文地质参数基础上评价防渗墙的防渗效果,故抽水试验场地选择在水电站上下游围堰之间的基坑中进行.试验设计了 7 口

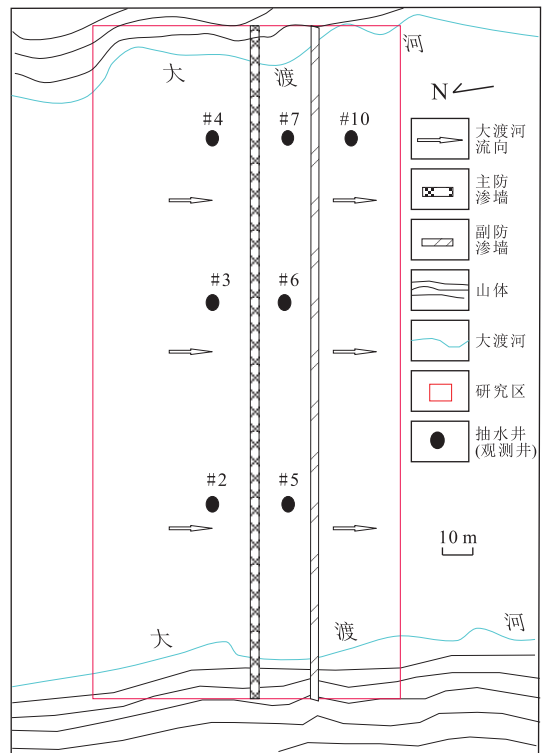


图 2 研究区示意

Fig.2 The schematic of the study area

表 1 抽水试验基本情况

Table 1 The information of the pumping test

抽水次序	抽水井	观测井	抽水时间	抽水流量(m <sup>3</sup> /h)
1	#6	#3, #5, #6, #7	2013-06-28T11:09—2013-06-28T17:30	23.10
2	#5	#2, #4, #5, #6, #7, #10	2013-07-04T15:00—2013-07-04T16:43	4.63
			2013-07-05T08:56—2013-07-05T20:17	24.11
			2013-07-05T20:18—2013-07-06T10:26	4.63

井,每口井可兼做抽水井与监测孔,各井的分布位置见图 2。

本次研究共进行了 2 次抽水试验,均在两防渗墙间进行.抽水试验的观测井和抽水井均分布在第四系砂砾含水层中,且抽水量也主要来自第四系砂砾含水层.每次抽水试验的基本情况见表 1。

### 3 基坑含水层参数求取

#### 3.1 解析法

基坑经施工后岩性自上而下依次为固结灌浆层(5 m)、第四系砂砾含水层(10~55 m)、基岩弱风化带(10~12 m)和基岩带(20~30 m),因固结灌浆层和基岩弱风化带的渗透系数  $K$  很小,故在采用解析法计算时将其分别近似作为砂砾含水层的隔水顶板和隔水底板。

基坑含水层为承压含水层,且为定流量抽水,两防渗墙渗透系数较小(近似为隔水边界),且防渗墙间含水层面积有限,故将试验区概化为具有两直线

隔水边界的承压含水层.考虑研究区特点,采用特定标准曲线对比法计算含水层水文地质参数.由于该试验区条件不完全符合 Theis 公式假设条件,严格来讲需采用反映法对两隔水边界作无穷反映,用综合井函数法求取含水层参数,本次抽水试验数据处理结合实际情况反映 5 次。

**3.1.1 特定条件标准曲线对比法** 本方法是一种通过绘制观测井实测降深( $s$ )—时间( $t$ )双对数曲线与理论曲线对比来确定含水层参数的方法。

本次抽水试验含水层区域为两直线隔水边界承压含水层,将单个井流问题通过反映法处理为无限含水层中若干等流量同时工作的多井干扰问题,根据渗流叠加原理,含水层中任意点的降深为:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \left[ W\left(\frac{r_1^2}{4at}\right) + W\left(\frac{r_2^2}{4at}\right) + \dots + W\left(\frac{r_n^2}{4at}\right) \right] = \frac{Q}{4\pi T} W_m(u_1), \quad (1)$$

式中: $Q$  为抽水流量(m<sup>3</sup>/d); $W(u)$  为  $u$  的井函数; $u = r_n^2/4at (n = 1, 2, \dots)$ ;  $r_1, r_2, \dots, r_n$  是 1, 2,  $\dots, n$  号抽水井(虚抽水井)到观测井的距离; $t$  是计算降

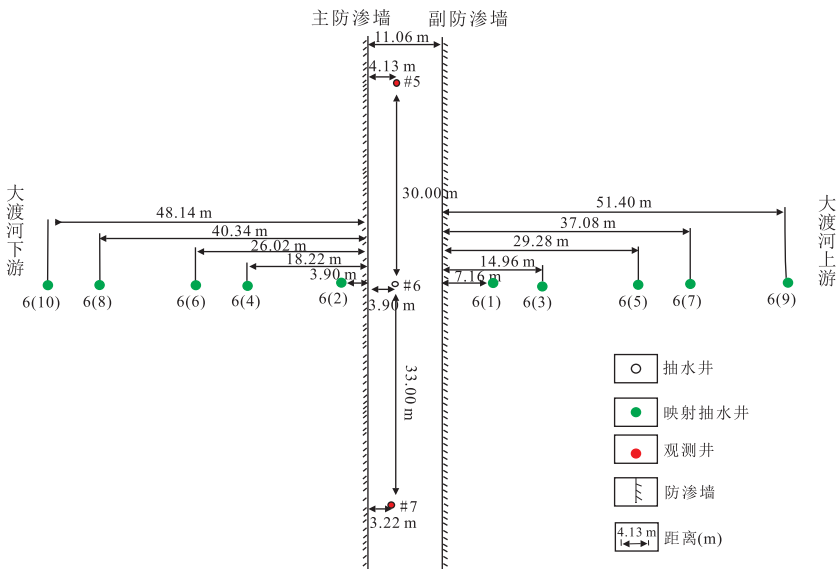


图 3 第 1 次抽水试验抽水井映射结果

Fig.3 The mapping results for the imaginary pumping wells of the first pumping test

深的时刻;  $W_m(u_1)$  表示特定条件下的综合井函数;  $T$  为导水函数( $\text{m}^2/\text{d}$ );  $a$  为导压函数( $\text{m}^2/\text{d}$ ).

该方法应用配线法求解含水层参数, 在两张相同模数的双对数坐标纸上做出  $W_m(u_1)-1/u_1$  标准曲线和实测  $s-t$  双对数曲线, 在保持两者对应坐标轴相互平行的条件下, 平移至两曲线重合为止, 找到任一匹配点, 记下对应的 4 个坐标值  $1/u_1$ 、 $W_m(u_1)$ 、 $t$ 、 $s$ , 将他们分别代入公式(2)、(3), 即可求出参数  $T$  和  $a$ :

$$T = \frac{Q}{4\pi s} W_m(u_1), \tag{2}$$

$$a = \frac{r_1^2}{4u_1 t}. \tag{3}$$

①第 1 次抽水试验. 本次试验 #6 为抽水井, #5、#7 为观测井, 抽水试验区为长宽比大于 10 的一个矩形区域. 因抽水井处最大降深小于 5 m, 降落漏斗扩散范围有限, 故忽略两侧山体对观测井降深影响, 将其近似按带状含水层进行处理. 映射后选择主井 1 眼, 虚井 10 眼, 映射情况如图 3 所示.

通过映射后, #5 的多主井综合井函数可表示为:

$$W(u_1) = W(u_1) + W(1.23u_1) + W(1.07u_1) + W(1.54u_1) + W(1.54u_1) + W(2.48u_1) + W(1.99u_1) + W(3.17u_1) + W(3.17u_1) + W(4.81u_1) + W(4.01u_1), \tag{4}$$

#7 的多主井综合井函数表示为:

$$W(u_1) = W(u_1) + W(1.19u_1) + W(1.06u_1) + W(1.45u_1) + W(1.45u_1) + W(2.22u_1) + W(1.82u_1) +$$

$$W(2.80u_1) + W(2.80u_1) + W(4.15u_1) + W(3.49u_1). \tag{5}$$

通过标准曲线配线法, 平移两曲线分别得到 #5 和 #7 的结果如图 4、图 5 所示:

通过图 4 的标准曲线匹配后得到:  $W_m(u_1) = 13, 1/u_1 = 18$ . 抽水试验的流量  $Q = 554.40 \text{ m}^3/\text{d}$ ,  $r_1 = 30 \text{ m}$ . 代入式(2)和式(3)中得:  $T = 573.82 \text{ m}^2/\text{d}$ ;  $a = 349\,920 \text{ m}^2/\text{d}$ . 又  $K = T/M$ , 取砂砾含水层平均厚度  $M = 30 \text{ m}$ , 因此  $K = 19.13 \text{ m/d}$ , 含水层弹性给水度  $u_e = T/a = 1.64 \times 10^{-3}$ . 同等, 由图 5 可得:  $W_m(u_1) = 15, 1/u_1 = 16$ , 计算后得:  $T = 662.10 \text{ m}^2/\text{d}$ ;  $a = 376\,358 \text{ m}^2/\text{d}$ ;  $K = 22.07 \text{ m/d}$ ,  $u_e = T/a = 1.76 \times 10^{-3}$ .

②第 2 次抽水试验. 第 2 次抽水时, #5 为抽水井, #6、#7 为观测井, 因抽水井离右侧山体较近, 将右侧山体作为隔水边界处理, 在带状含水层反映后的基础上整体(包括主井和虚井)再通过山体(隔水边界)反映 1 次, 映射后选择主井 1 眼, 虚井 21 眼, 具体映射情况见图 6.

类似于第 1 次抽水试验的计算方法, 通过标准曲线配线法后, 由 #6 观测井计算得到:  $T = 944.44 \text{ m}^2/\text{d}$ ;  $a = 427\,680 \text{ m}^2/\text{d}$ ,  $K = 31.48 \text{ m/d}$ ,  $u_e = T/a = 2.21 \times 10^{-3}$ ; #7 观测井计算得到:  $T = 967.47 \text{ m}^2/\text{d}$ ;  $a = 514\,382 \text{ m}^2/\text{d}$ ,  $K = 32.24 \text{ m/d}$ ,  $u_e = T/a = 1.88 \times 10^{-3}$ .

通过特定条件标准曲线对比法对两次抽水试验

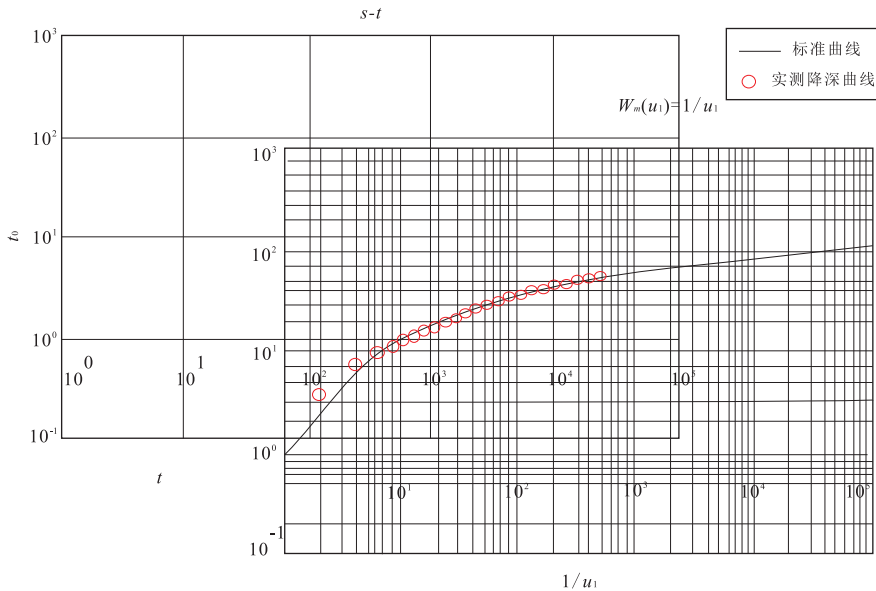


图 4 第 1 次抽水试验 #5 观测井曲线匹配

Fig.4 Fitting curve for the observation well #5 in first pumping test

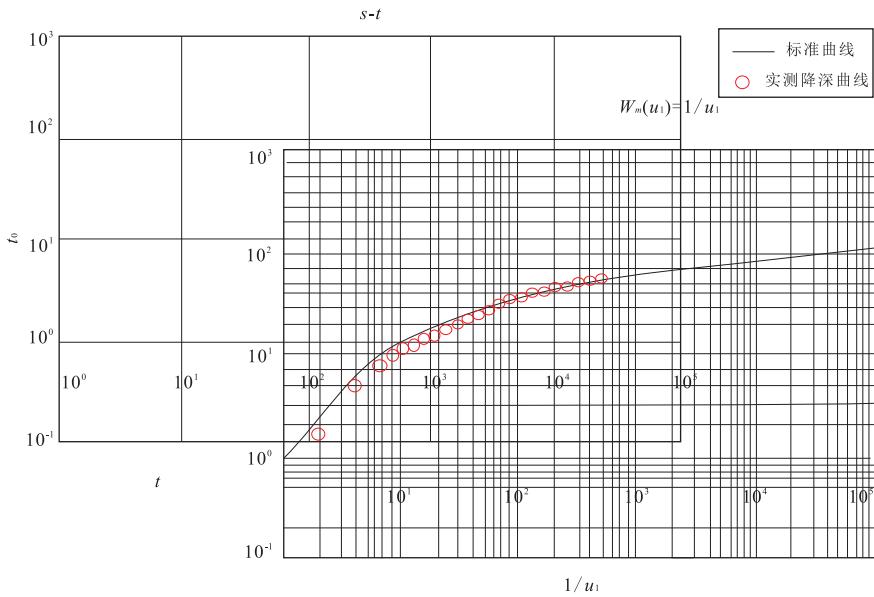


图 5 第 1 次抽水试验 #7 观测井曲线匹配

Fig.5 Fitting curve for the observation well #7 in first pumping test

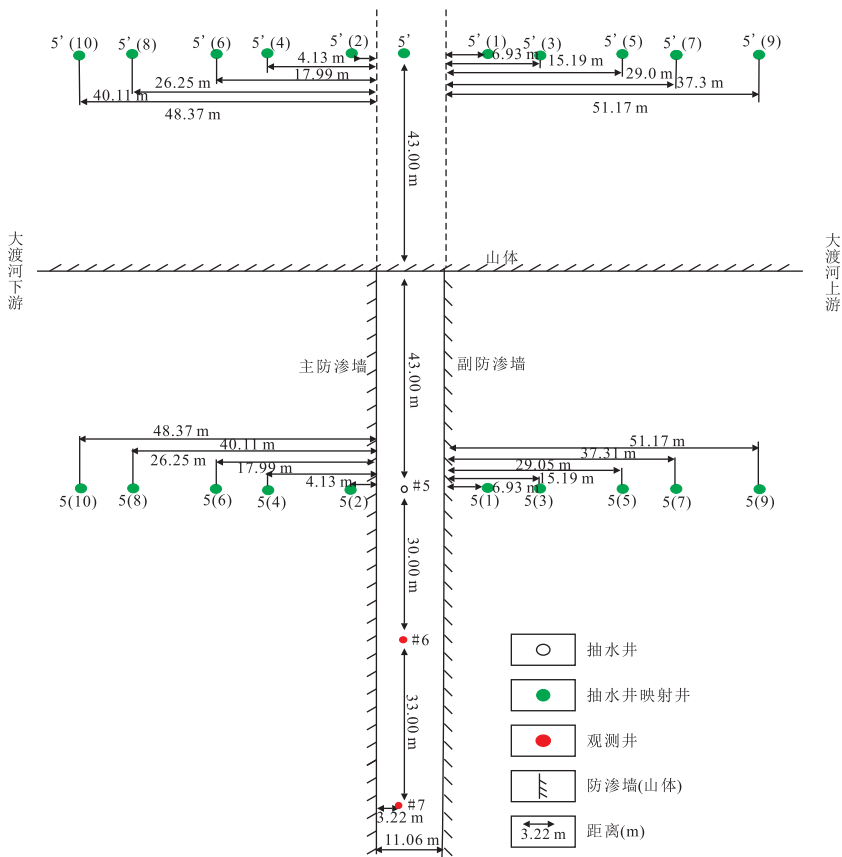


图 6 第 2 次抽水试验抽水井映射结果

Fig.6 The mapping results for the imaginary pumping wells of the second pumping test

数据的处理,最终确定含水层参数如表 2 所示。

从表 2 中可以看出:第 2 次抽水试验的含水层参数比第 1 次稍大,这是由于第 2 次抽水试验将山体作为隔

水边界处理,而第 1 次抽水试验忽略了山体的影响。

### 3.2 数值法求参数

在获得上述参数的情况下,再利用GMS软件

表 2 解析法求参结果(砂砾层)

Table 2 The results of hydrogeological parameters obtained by analytical method (sandy gravel layer)

特定条件标准曲线对比法					
试验次序	观测井	$T(m^2/d)$	$a(m^2/d)$	$K(m/d)$	$u_e$
第 1 次抽水试验	5 号观测井	573.82	$3.50 \times 10^5$	19.13	$1.64 \times 10^{-3}$
	7 号观测井	662.10	$3.76 \times 10^5$	22.07	$1.76 \times 10^{-3}$
第 2 次抽水试验	6 号观测井	944.44	$4.28 \times 10^5$	31.48	$2.21 \times 10^{-3}$
	7 号观测井	967.47	$5.14 \times 10^5$	32.24	$1.88 \times 10^{-3}$

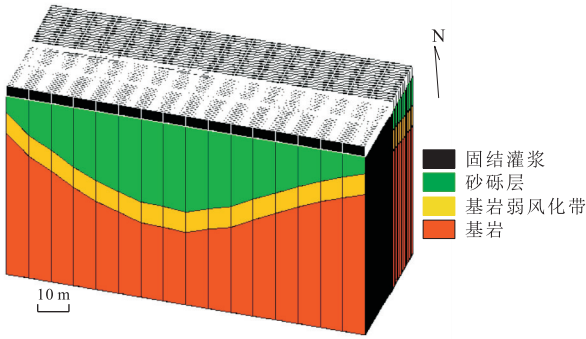


图 7 水电站基坑施工期三维模型

Fig.7 The three-dimensional model for foundation pit of hydropower station during construction

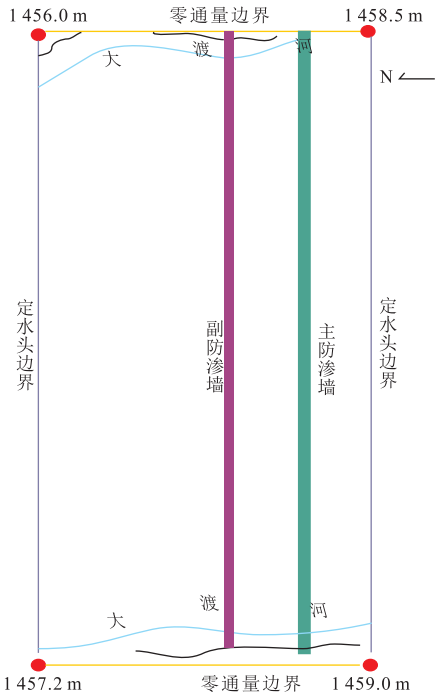


图 9 数值模型边界示意

Fig.9 The schematic diagram of the boundaries for the mathematical model

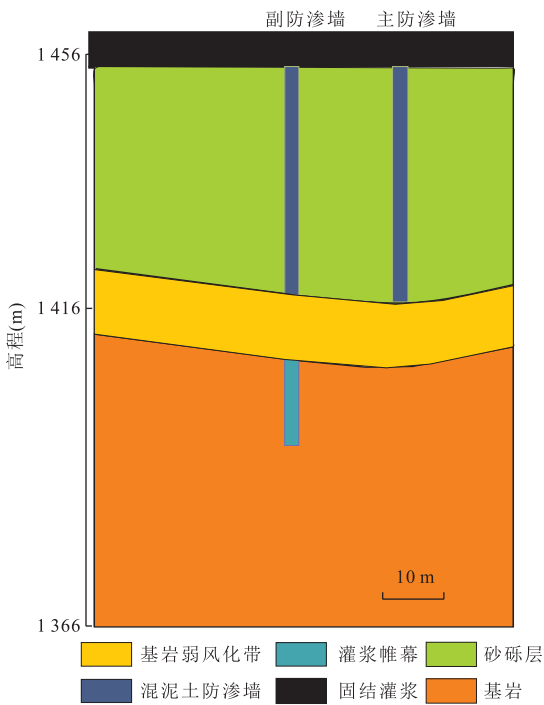


图 8 沿大渡河流向剖面

Fig.8 A sectional view along the Dadu river

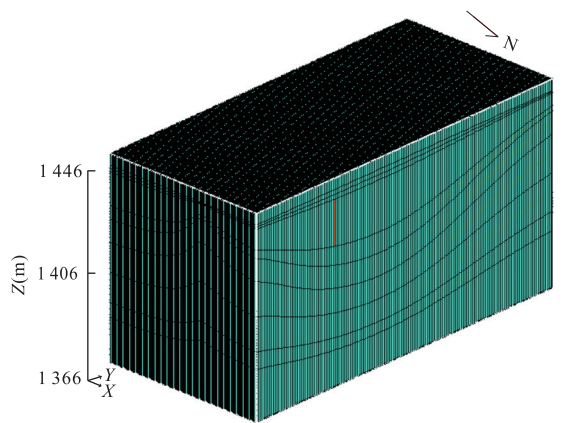


图 10 基坑网格剖分

Fig.10 The picture of mesh discretization in foundation pit of hydropower station

建立相应的数值模型,将拟合得到的含水层参数与解析法的结果对比,两种方法的结果互相验证,可提高含水层参数的可靠性。

3.2.1 水文地质条件概化 根据抽水试验所设观

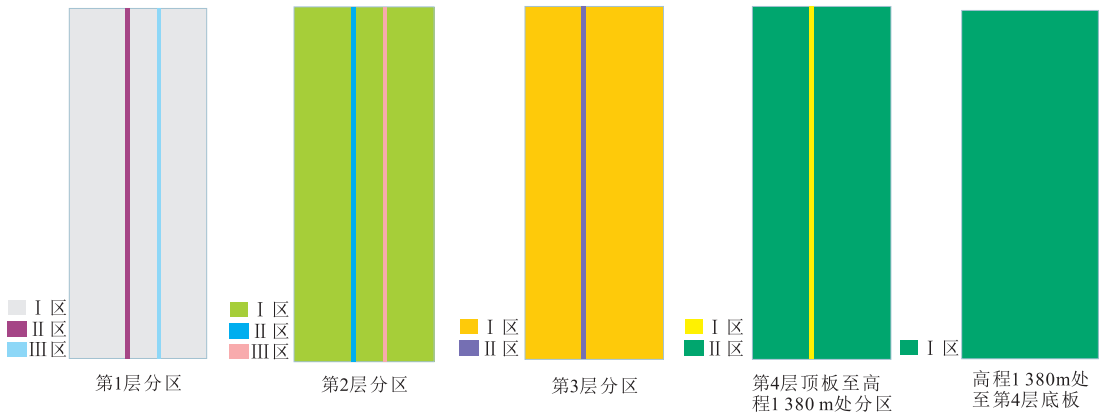


图 11 各层分区

Fig.11 The partition for each layer

表 3 分区说明

Table 3 The description for the partition

层数	厚度(m)	分区说明		
		I 区	II 区	III 区
第 1 层	5	混凝土灌浆	上游副防渗墙(混凝土防渗墙)	下游主防渗墙(混凝土防渗墙)
第 2 层	10~55	覆盖层(砂砾层)	上游副防渗墙(混凝土防渗墙)	下游主防渗墙(混凝土防渗墙)
第 3 层	10~12	弱风化带	上游副防渗墙(帷幕灌浆)	\
第 4 层	20~30	基岩带	上游副防渗墙(帷幕灌浆)	\

表 4 各岩层参数

Table 4 The parameters for each layer

层数	渗透系数(m/d)			给水度			弹性给水度( $u_e$ )		
	I 区	II 区	III 区	I 区	II 区	III 区	I 区	II 区	III 区
第 1 层	0.01	0.011	0.023	0.01	0.04	0.04	\	\	\
第 2 层	26.00	0.011	0.023	\	\	\	0.006 3	0.003 0	0.003 0
第 3 层	0.50	0.040	\	\	\	\	0.040 0	0.004 0	\
第 4 层	0.01	0.008	\	\	\	\	0.002 5	0.001 0	\

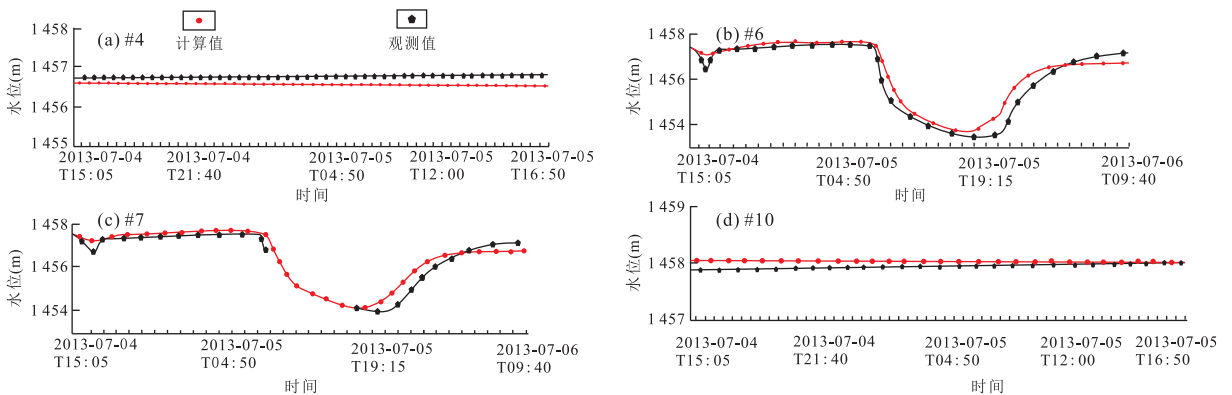


图 12 水位观测值与计算值拟合曲线

Fig.12 Fitting curve for the hydraulic heads in the observation wells

测孔与两防渗墙的距离划定模拟区为以长河坝主、副防渗墙为中心,向上游延伸 32 m、下游延伸 16 m

的区域.研究区两侧以大渡河与山体交界处为边界(图 2),整个研究区面积为  $8.3 \times 10^3 \text{ m}^2$ ,模拟中将

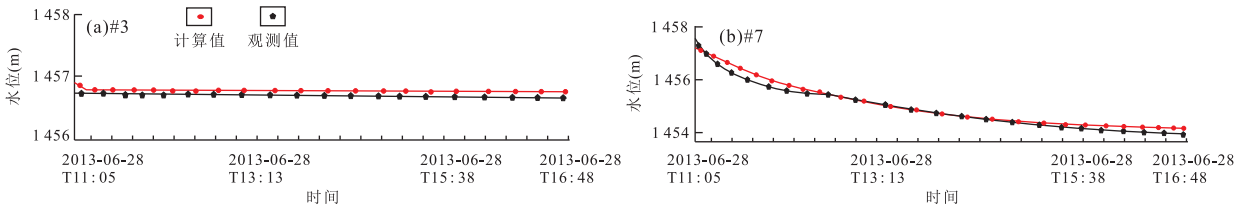


图 13 水位观测值与计算值拟合曲线

Fig.13 Fitting curve for the hydraulic heads in the observation wells

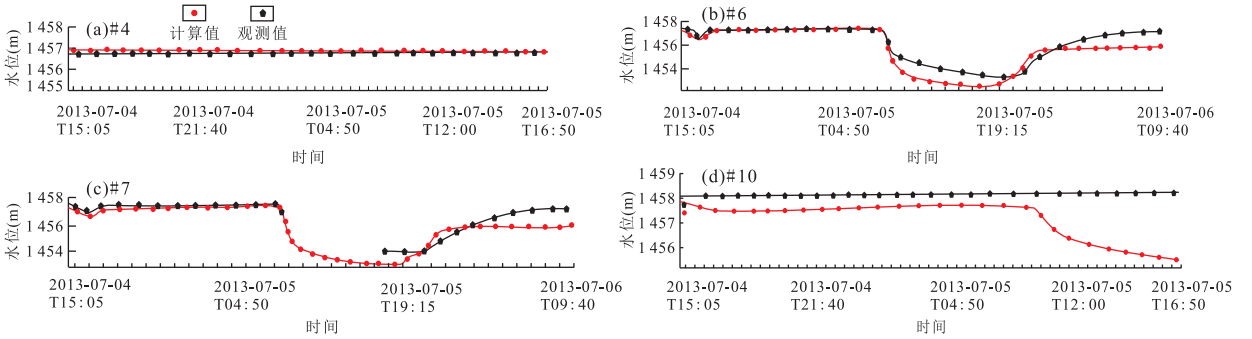


图 14 水位观测值与计算值拟合曲线

Fig.14 Fitting curve for the hydraulic heads in the observation wells

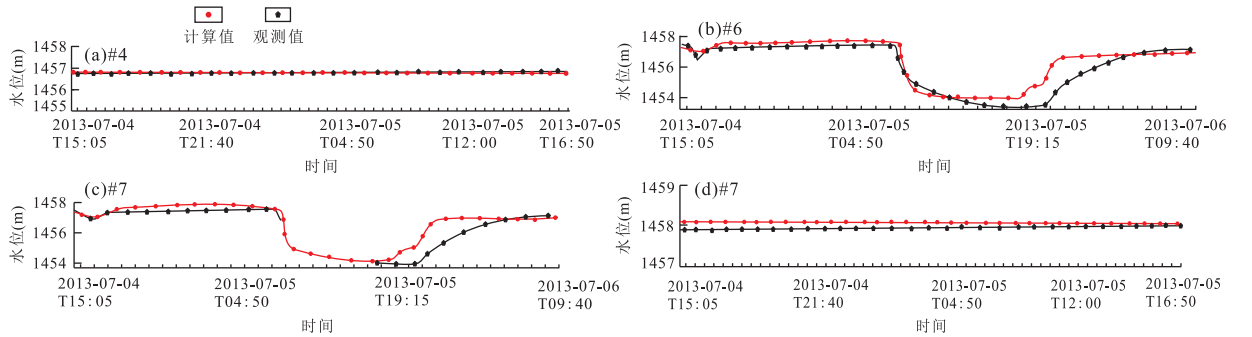


图 15 水位观测值与计算值拟合曲线

Fig.15 Fitting curve for the hydraulic heads in the observation wells

该区地下水流系统概括为均质各向同性的二维地下水流。

根据现场调研以及主、副防渗墙的施工进展,将研究区的岩性结构概化为 4 层,从上至下依次为固结灌浆层(5 m)、砂砾含水层(10~55 m)、基岩弱风化带(10~12 m)、基岩带(20~30 m);主、副防渗墙因施工条件不同,副防渗墙岩性从上至下依次为混凝土防渗墙带(固结灌浆层至砂砾含水层)、灌浆帷幕带(弱风化带)、基岩带;主防渗墙施工未完成,目前岩性依次为混凝土防渗墙带、弱风化带和基岩带.依据钻孔资料及施工现状,利用 GMS7.0 生成水电站 91 m 深度内(高程 1 457 m 至 1 366 m)的松散介质及工程活动三维可视化模型(图 7),并建立了沿

大渡河流向的剖面图(图 8)。

研究区南北边界为大渡河的上下游,数值模拟中将其处理为定水头边界,依据实测水位资料给定上游边界上端点水位 1 456.0 m,下端点水位 1 457.2 m;下游边界上端点水位 1 458.5 m,下端点水位 1 459.0 m,两岸边界为大渡河与山体的接触线,将其定义为零通量边界(图 9)。

**3.2.2 地下水流数值模型** 利用 GMS 中的 MAP 模块与 MODFLOW 模块建立地下水流数值模型.将模拟区域在垂向上概化为 4 层:第 1 层为固结灌浆层,厚度为 5 m;第 2 层为砂砾含水层(加密为 4 层),厚度为 10~55 m;第 3 层为基岩弱风化层,厚度为 10~12 m;第 4 层为基岩(加密为 4 层),厚度



为20~30 m.采用矩形网格剖分,研究区平面上平均划分为23700个网格,整个模拟区被分为237000个单元(图10).

模拟中依据施工条件的不同进行分区(图11),各层的分区说明见表3.

由于第2次抽水试验抽水时间相对较长,且观测井数据较多,故采用第2次抽水试验的数据建立数值模型,模拟时间从2013年7月4日15:00至2013年7月6日11:00,该抽水时间内没有降雨,且模拟时间较短,故不考虑地下水的降雨补给与蒸发排泄.以2013年7月4日15:00六个观测孔(井#2,井#4,井#5,井#6,井#7,井#10)及一个抽水井(井#5)的地下水位观测资料作为初始流场,以模拟时段内井#4、井#6、井#7、井#10的观测水位对模型进行识别与验证.模拟中共分为27个应力期,每个应力期为120 min,时间步长为5 min.含水层参数的调整采用软件的自动调参(PEST模块)与人工调参相结合,通过模型识别反求研究区的水文地质参数.

**3.2.3 水流模型参数识别** 经过不断的人工调参与软件的自动拟合,最终确定研究区不同分区的参数如表4所示.

上述各参数主要利用水位拟合及水均衡来识别验证,具体识别结果如下:

**水位拟合:**在表4参数情况下,选取4个观测井(井#4,井#6,井#7,井#10)的数据进行拟合(图12a~12d),从这4幅图可以看出:观测井地下水位的计算值与观测值虽然部分时段有误差,但整体拟合较好.

**水均衡:**水均衡分析是检验模型可信度的重要标准,模拟时段(44 h)内研究区总输入水量为2245.92 m<sup>3</sup>,总输出水量为2446.53 m<sup>3</sup>,水均衡误差为0.027%,即该区基本处于水均衡状态,说明所建立的数值模拟模型是可靠的.

**3.2.4 模型参数验证** 为了验证参数的合理性,利用第1次抽水试验中2个观测井的观测水位对模型加以验证.为此选用2013年6月28日11:00研究区的观测水位作为初始水位,用2个观测井(井#3、井#7)的水位作为模型校正的依据(图13a~13b),两图拟合情况也较好,说明所获取的参数比较可靠.

**3.2.5 解析法参数在数值法中的验证** 为说明解析法与数值法综合运用的优势,在保持其他参数不变的条件下,将解析法获取的参数值代入数值模型中,通过对比拟合效果及水均衡来说明2种方法的差异.

(1)第1次抽水试验.将第1次抽水试验中5号观测井计算得到的解析解参数( $K = 19.13$  m/d,

$u_e = 1.64 \times 10^{-3}$ )代入数值模型中,得到各观测井的拟合情况如图14a~14d所示:

(2)第2次抽水试验.将第2次抽水试验中7号观测井计算得到的解析解参数( $K = 32.24$  m/d,  $u_e = 1.88 \times 10^{-3}$ )代入数值模型中,得到各观测井的拟合情况如图15a~15d所示:

通过对比数值法拟合效果(图12a~12d)和解析法参数的拟合效果(图15a~15d)可以看出:①解析法只能缩小含水层参数取值范围;②抽取同样水量的条件下,含水层渗透系数直接影响降落漏斗( $K$ 越大,水位下降越慢,反之 $K$ 越小,水位下降越快);③在解析法的基础上再利用数值法求取含水层参数,不仅能提高工作效率,而且能极大地提高准确性.

## 4 结论

(1)利用综合井函数计算得到的砂砾层渗透系数取值范围为19.13~32.24 m/d,弹性给水度为 $1.64 \times 10^{-3} \sim 2.21 \times 10^{-3}$ ;数值法拟合得到该含水层渗透系数为26.00 m/d,弹性给水度为 $6.30 \times 10^{-3}$ ,2种方法计算的含水层参数间虽有差异,但差异不大,说明参数可靠性较高.

(2)在解析法的基础上再运用数值法求取含水层参数不仅提高了工作效率,还极大地提高了参数的准确性.

(3)数值法拟合得到两防渗墙的渗透系数为0.01~0.02 m/d,说明防渗体的渗透性很差,即防渗效果很好,该水电站可顺利进行后期的施工.

## References

- Bai, L.P., Wang, J.S., 2004. The Application of GMS in Numerical Simulation of Groundwater in Linfen Basin. *Shanxi Architecture*, 30(16): 78-79 (in Chinese with English abstract).
- Chenaf, D., Chapuis, R.P., 2002. Methods to Determine Storage of Infinite Confined Aquifer from a Recovery Test. *Ground Water*, 40(4): 385-389. doi: 10.1111/j.1745-6584.2002.tb02517.x
- Guo, J.Q., Zhou, H.F., Li, Y., 2008. Multi Straight Line Analytical Method for Estimating Aquifer Parameters from Recovery Test Data. *Rock and Soil Mechanics*, 29(12): 3246-3250 (in Chinese with English abstract).
- Hao, Q.C., Shao, J.L., Cui, Y.L., et al., 2014. Applicability of Artificial Recharge of Groundwater in the Yongding River Alluvial Fan in Beijing through Numerical Simu-

- lation. *Journal of Earth Science*, 25(3): 575–586. doi: 10.1007/s12583-014-0442-6
- Hossein, B.J., Hamid, M.H., Mohammad, H.G., et al., 2014. Numerical Simulation of Groundwater Flow and Contamination Transport in Nahavand Plain Aquifer, West of Iran. *Journal of Geological Society of India*, 83: 83–92. doi: 10.1007/s12594-014-0010-9
- Jin, W.Z., Luo, Z.Z., Chen, X.X., et al., 2014. Coupling Simulation of Groundwater Seepage and Land Subsidence. *Earth Science*, 39(5): 611–619 (in Chinese with English abstract).
- Li, G.R., Zhao, Z., Chen, Z.H., 2013. Application of Numerical Simulation to Inverting Hydrogeological Conditions in Mining Areas. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 40(2): 19–23 (in Chinese with English abstract).
- Li, P., Guo, H.R., Wu, K.J., et al., 2011. Numerical Simulation and Forecast of Mine Discharge in Wanghe Coal Mine. *Earth Science*, 36(4): 755–760 (in Chinese with English abstract).
- Li, W., Zhao, Y.R., Zhu, X.F., et al., 2013. Study on Optimization Path Method of Solving Hydrogeologic Parameters by Automatic Curve-Fitting Method. *Exploration Science Technology*, (2): 6–10 (in Chinese with English abstract).
- Liu, H.J., Hsu, N.S., Lee, T.H., 2009. Simultaneous Identification of Parameter, Initial Condition, and Boundary Condition in Groundwater Modeling. *Hydrol. Process*, 23: 2358–2367. doi: 10.1002/hyp.7344
- Liu, Y., Shao, J.L., Chen, J.X., 2015. Hydrogeological Parameter Estimations for Slug Test in Sloping Confined Aquifer. *Earth Science*, 40(5): 925–932 (in Chinese with English abstract).
- Samani, N., Pasandi, M., 2003. A Single Recovery Type Curve from Theis' Exact Solution. *Ground Water*, 41(5): 602–607. doi: 10.1111/j.1745-6584.2003.tb02398.x
- Tan, W.Q., Sun, C., Hu, J.M., et al., 2008. Application of GMS in Simulation of Pollutants Migration for Groundwater. *Water Resources & Hydropower of Northeast China*, 26(5): 54–56 (in Chinese with English abstract).
- Wu, X.M., Chen, C.X., Shi, S.S., et al., 2003. Three-Dimensional Numerical Simulation of Groundwater System in Ejina Basin, Heihe River, Northwestern China. *Earth Science*, 28(5): 527–532 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, M.G., Chen, X.J., Liu, B.C., 2003. Hydrogeology Parameter Calculation in Water Gushing Test of Constant Drawdown Yield in Infinite Confined Aquifer Where Gushing in the Main Hole is Observed from Several Other Holes. *Earth Science*, 28(5): 575–578 (in Chinese with English abstract).
- Xue, Y.Q., Zhu, X.Y., 1979. Groundwater Dynamic. Geological Publishing House, Beijing, 66–72 (in Chinese).
- Yu, Q., Xie, X.J., Ma, R., et al., 2013. Impact of Groundwater Flow on Arsenic Transport: A Field Observation and Simulation in Datong Basin. *Earth Science*, 38(4): 877–886 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, B.F., Kang, W.D., Zhutian, D.W., et al., 2009. Aquifer Parameter Recognition Based on Numerical Simulation. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 31(4): 409–412 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, K.R., 1982. The Discussion about Arithmetic Parameters of Steady Flow Wiring Method. *Engineering Survey*, 1: 63–67 (in Chinese).

### 附中文参考文献

- 白利平, 王金生, 2004. GMS 在临汾盆地地下水数值模拟中的应用. *山西建筑*, 30(16): 78–79.
- 郭建青, 周宏飞, 李彦, 2008. 分析含水层水位恢复数据的多次直线解析法. *岩土力学*, 29(12): 3246–3250.
- 金玮泽, 骆祖江, 陈兴贤, 等, 2014. 地下水渗流与地面沉降耦合模拟. *地球科学*, 39(5): 611–619.
- 李贵仁, 赵珍, 陈植华, 2013. 数值模拟在反演矿区水文地质条件中的应用. *水文地质工程地质*, 40(2): 19–23.
- 李平, 郭会荣, 吴孔军, 等, 2011. 王河煤矿矿井涌水量数值模拟及预测. *地球科学*, 36(4): 755–760.
- 李伟, 赵燕容, 朱旭芬, 等, 2013. 自动配线法求水文地质参数的优化路径法研究. *勘察科学技术*, 2: 6–10.
- 刘颖, 邵景力, 陈家洵, 2015. 基于微水试验倾斜承压含水层水文地质参数的推估. *地球科学*, 40(5): 925–932.
- 谭文清, 孙春, 胡婧敏, 等, 2008. GMS 在地下水污染质运移数值模拟预测中的应用. *东北水利水电*, 26(5): 54–56.
- 武选民, 陈崇希, 史生胜, 等, 2003. 西北黑河额济纳盆地水资源管理研究——三维地下水流数值模拟. *地球科学*, 28(5): 527–532.
- 肖明贵, 陈学军, 刘宝臣, 2003. 无限承压含水层中主孔涌水多孔观测定降深井流试验水文地质参数计算. *地球科学*, 28(5): 575–578.
- 薛禹群, 朱学愚, 1979. 地下水动力学. 北京: 地质出版社, 66–72.
- 余倩, 谢先军, 马瑞, 等, 2013. 地下水流动对砷迁移的影响: 大同盆地试验场的观测与模拟. *地球科学*, 38(4): 877–886.
- 赵宝峰, 康卫东, 祝田多娃, 等, 2009. 基于数值模拟的含水层参数识别. *地球科学与环境学报*, 31(4): 409–412.
- 赵凯荣, 1982. 稳定流配线法计算参数探讨. *工程勘察*, 1: 63–67.