

# 平原水库渗流场模拟及渗漏量计算

——以斗门水库试验段为例

李文溢<sup>1,2</sup>, 杨阿敏<sup>1,2</sup>, 周维博<sup>1,2</sup>

(1. 长安大学 环境科学与工程学院, 陕西 西安 710054;

2. 长安大学 旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 以陕西省斗门水库试验段为例,通过野外取样及室内试验分析计算了库底沉积物的渗透系数,运用解析法求得了库区渗漏量和渗漏强度,采用数值法模拟了水库蓄水条件下的地下水水流场变化。结果表明:库底沉积物渗透系数数量级为  $10^{-3}$  m/d, 渗漏强度约为 14.97 mm/a, 库区东北部渗透系数及渗漏强度较大;库区渗漏量约为 7 070.05 m<sup>3</sup>/a, 约占总库容的 4.6%, 渗漏量变化受降水量影响较为明显;水库蓄水 5 年后区域地下水位整体抬升 0.1~0.5 m, 库区东北部地下水水力梯度明显增大, 地下水流向发生偏转。

**关键词:** 平原水库;数值模拟;地下水渗流场;渗漏量;渗漏强度

中图分类号:TV223.4; P641.6

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2019)01-0066-07

## Seepage field simulation and leakage calculation in plain reservoir:

Taking the test section of Doumen Reservoir as an example

LI Wenyi<sup>1,2</sup>, YANG Amin<sup>1,2</sup>, ZHOU Weibo<sup>1,2</sup>

(1. College of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. Key laboratory of Subsurface Hydrology and Ecology in Arid Areas of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** Taking the test section of Doumen Reservoir in Shaanxi Province as an example, the permeability coefficient of the sediment at the bottom of the reservoir was calculated by field sampling and laboratory test. The leakage amount and leakage strength of the reservoir area were obtained by analytical solution, and the groundwater flow field changes under reservoir water storage conditions was simulated by numerical method. The results showed that the permeability coefficient of the sediment at the bottom of the reservoir and the leakage strength were  $10^{-3}$  m/d and 14.97 mm/a, respectively; and the permeability coefficient and leakage strength in the northeastern part of the reservoir area were relative large. The leakage in the reservoir area was about 7070.05 m<sup>3</sup>/a, accounting for 4.6% of the total storage capacity, and the leakage change was more affected by the precipitation. After five years of reservoir impoundment, the regional groundwater level rises 0.1~0.5 m, and the groundwater in the northeast of the reservoir area. The force gradient significantly increased and the groundwater flow direction deflected.

**Key words:** plain reservoir; numerical simulation; groundwater seepage field; leakage amount; leakage strength

## 1 研究背景

平原水库是在平原区天然湖泊、洼地、河道等地形的基础上,通过圈筑围堤而建成的水库<sup>[1]</sup>。在我国西北干旱及半干旱地区,由于受到人类活动和经

济发展等多方面的影响,区域性的水环境问题、生态环境问题日益突出<sup>[2]</sup>,严重影响了地区社会发展及“一带一路”建设,而平原水库在解决这些问题和促进区域经济发展等方面起着重要作用。但平原水库的运行也往往会对区域地下水、地表水、土壤环境等

收稿日期:2018-09-12; 修回日期:2018-12-12

基金项目:陕西省水利科技项目(2018slkj-10)

作者简介:李文溢(1996-),男,河南商丘人,硕士研究生,主要从事水文地质方面的研究工作。

通讯作者:周维博(1956-),男,陕西乾县人,博士,教授,博士生导师,主要从事地下水环境方面的研究。

带来一定的负面影响,产生库水富营养化、泥沙淤积、浸没、土壤盐渍化等一系列问题<sup>[3]</sup>,这对水库的运行效率和城市供水安全造成了严重的隐患。

针对平原水库运行引起的环境问题,国内外学者展开了大量研究。李荣荣等<sup>[4]</sup>采用遥感影像法分析了水库下游土壤盐分指数变化,结果表明水库蓄水使得下游土壤盐渍化程度不断加重;Winter<sup>[5]</sup>在充分考虑介质各向异性、地下水流系统、渗透系数等因素的情况下,运用垂向二维稳定流模型研究了水库和地下水之间的相互作用;韩菲等<sup>[6]</sup>系统分析了国内外湖泊及水库富营养化模型的优缺点,结果表明富营养化模型应当着重考虑水动力、化学、生物3方面因素的影响。

目前关于平原水库的研究多集中在库水水质评价及周边土壤生态环境等方面,对水库渗漏及周边地下水水流场演变等方面的研究较少,而这正是威胁平原水库安全运行的常见问题<sup>[7-9]</sup>。在天然条件下,地下水系统会保持一定的均衡状态,而当水库蓄水之后,库水的渗漏补给作用改变了区域地下水系统的收支特征,打破了原有的地下水均衡动态<sup>[10]</sup>;另外,库底沉积物的分布、渗透性特征、地下水位变化会对水库的渗漏速率产生影响<sup>[11]</sup>。因此在充分考虑水库沉积物渗透性、地下水位特征的基础上,分析计算水库渗漏量,探究水库蓄水后区域地下水水流场的变化就显得尤为重要。

本文以陕西省西咸新区斗门水库试验段为例,采用数值法和解析法相结合,分析库区渗漏量及水库蓄水对区域地下水水流场的影响,以期为库底防渗、水库调蓄、地下水环境保护及斗门水库的进一步建设提供相关科学依据。

## 2 研究区概况

斗门水库在陕西省原汉代昆明池遗址的基础上修建而成,位于西咸新区沣东新城境内(原西安市长安区),北接鱼斗路,西靠新韦斗路,距离沣河约2.6 km。斗门水库是引汉济渭工程的重要一环,在输配水工程中起着重要作用,是一座集调蓄、防洪、改善生态环境等多项功能于一体的水资源综合利用平原水库<sup>[12]</sup>。斗门水库试验段是斗门水库工程建设的一部分,于2017年3月正式蓄水运行,库区面积0.53 km<sup>2</sup>,其中水面面积约0.47 km<sup>2</sup>,库底高程396.8 m,正常蓄水位400.47 m,蓄水深度3.67 m,蓄水量 $155 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,地理位置如图1所示。

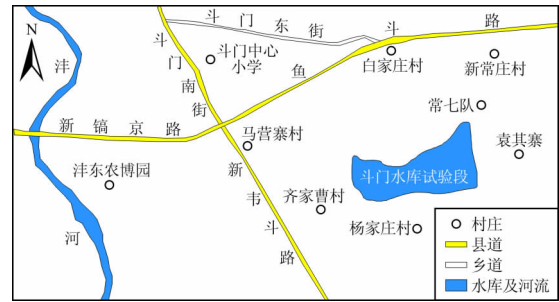


图1 研究区地理位置

### 2.1 地形地貌

斗门水库试验段所处地貌单元为秦岭北麓近山前冲洪积平原,库区内渭河一级阶地大面积分布,阶面高程为396~410 m,整体上东南高、西北低,地形开阔,高程起伏较为平缓。

### 2.2 地层岩性

库区地表50 m以内地层主要形成于第四系,可分为以下几种类型:(1)上更新统( $Q_3^3$ )风积层,其岩性主要为风积黄土( $Q_3^{2eol}$ ),层厚约5~12 m,外表呈淡灰黄色,垂直节理及大孔隙发育,质地较为疏松,分布于库区西南部。(2)全新统( $Q_n$ )冲积层,分为上下两部。下部冲积层( $Q_4^{1al}$ )分上下两层:上层厚约10~40 m,主要为壤土、粉土,夹少量中砂,于库区南部、西部(渭河一、二级阶地)广泛分布;下层岩性主要为粉质黏土,局部夹薄砂层,夹层厚度0.3~0.5 m。而上部冲积层( $Q_4^{2al}$ )岩性主要为壤土,层厚约5~10 m,受到人类活动影响,顶部人工堆积零星分布(约0.5 m,主要为水泥块、砖块等建筑垃圾),于库区东北部(渭河一级阶地)分布。

### 2.3 水文地质条件

库区地下水类型为孔隙潜水,埋深在7.5~14.2 m之间,主要赋存于第四系黏性土层(夹部分少量砂层)中,大致由东南流向西北,含水层埋藏于山前洪积扇、阶地及漫滩。受到斗门水库建设影响,周边农田面积及人为灌溉有所减少,因此降水入渗补给和人工开采分别为斗门水库区域地下水的主要补给和排泄途径。

## 3 库区渗漏量计算

### 3.1 水库渗漏模型

在水库的建设过程中,库坝体内侧面做了较好的防渗处理,因此可以忽略内侧面的渗漏,仅考虑库底区域,根据库底沉积物岩性将水库划分为不同的渗漏分区进行分析计算。库水对地下水入渗补给的

渗漏模型如图2所示,可概化为:(1)库水在水头差的作用下通过库底沉积物垂向入渗到含水层中;(2)在地下水水流场的作用下,发生侧向渗流。根据达西定律<sup>[13-14]</sup>,采用公式(1)所示的离散化模型计算库区渗漏量:

$$Q = \sum_{i=1}^n Q_i = \sum_{i=1}^n (K_i A_i \frac{\Delta H_i}{L_i}) \quad (1)$$

式中: $Q$ 为库区总渗漏量,即库水补给地下水的总量, $\text{m}^3/\text{d}$ ;  $Q_i$ 为分区渗漏量,即库水在各个分区对地下水的补给量, $\text{m}^3/\text{d}$ ;  $A_i$ 为各分区库底的水平面积, $\text{m}^2$ ;  $\Delta H_i$ 为库水位与所对应的地下水监测井水位之差, $\text{m}$ ;  $L_i$ 为监测井与所对应的分区形心的距离, $\text{m}$ ;  $K_i$ 为各分区沉积物的垂向渗透系数, $\text{m}/\text{d}$ ;  $n$ 为分区个数。

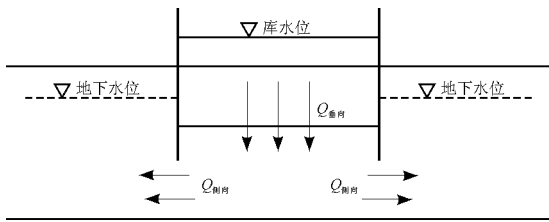


图2 水库渗漏模型示意图

### 3.2 水库渗漏分区

根据斗门水库试验段工程地质勘察资料,按照库底沉积物岩性,将库区划分为3个区域,渗漏分区及监测井位示意图如图3所示。其中I-III为不同的渗漏分区,GW1-GW6为沿库北岸自西向东布设的6口地下水位监测井。

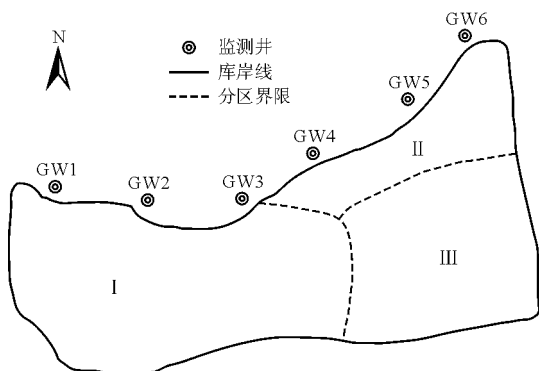


图3 库区渗漏分区图

考虑到水库较深,不适宜进行野外原位试验测定沉积物渗透系数。根据土工试验标准<sup>[15]</sup>,在库区内共取样12组,采用室内变水头渗透试验法<sup>[16]</sup>测定了库底沉积物的渗透系数。变水头渗透试验法原理如图4所示:将野外所取的原状土样作为渗流通道,将变水头管的供水作为水源来模拟地下水的一

维渗流过程;通过多次调节(5~6次)不同的水头高度进行重复试验;记录多次试验的时间和水头来计算分析试验结果。

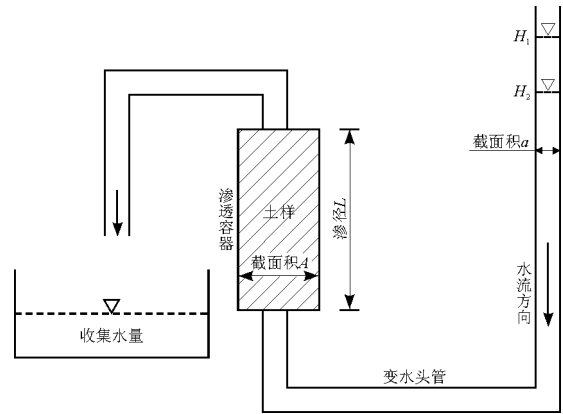


图4 变水头渗透试验法示意图

根据试验数据,采用公式(2)计算库底沉积物的垂向渗透系数:

$$K_V = 864 \frac{aL}{A(t_2 - t_1)} \ln \frac{H_1}{H_2} \quad (2)$$

图4及公式(2)中: $a$ 为变水头管垂直于水流方向的横断面面积, $\text{cm}^2$ ;  $L$ 为变水头管两端过水断面之间的距离(渗径),在本试验装置中等于土样高度, $\text{cm}$ ;  $K_V$ 为沉积物的垂向渗透系数, $\text{m}/\text{d}$ ;  $t_1$ 、 $t_2$ 分别为同一次试验中初始、最后读取变水头管水头的时间, $\text{s}$ ;  $H_1$ 、 $H_2$ 分别为前后两次读取的变水头管的水头, $\text{m}$ 。

通过野外取样及室内试验求得了各个分区库底沉积物的垂向渗透系数。各渗漏分区面积、库底沉积物岩性及垂向渗透系数如表1所示。

由表1可以看出:库底沉积物渗透系数数量级为 $10^{-3} \text{ m}/\text{d}$ ,其中库区东北部(II区)沉积物渗透系数相对较大。

表1 渗漏分区相关参数

分区	面积/ $\text{m}^2$	沉积物岩性	渗透系数/ $(\text{m} \cdot \text{d}^{-1})$
I	241045	壤土夹淤泥质土	0.0025
II	64712	淤泥质土夹中砂	0.0039
III	163153	壤土	0.0012
合计	468910		

### 3.3 水库渗漏计算

结合表1中的相关参数,根据库区2018年3-7月的地下水位监测资料(由于库区施工限制,4月份监测资料缺失),求得了库区渗漏量及日渗漏强度<sup>[17]</sup>,结果如表2所示。

表 2 库区渗漏量及渗漏强度

渗漏分区	监测日期				渗漏量平均 值/(m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	渗漏强度/ (mm·d <sup>-1</sup> )
	2018-03-20	2018-05-22	2018-06-17	2018-07-17		
I	10.76	9.18	9.36	7.52	9.21	0.038
II	8.66	7.75	7.75	6.2	7.59	0.117
III	2.58	2.99	2.26	2.45	2.57	0.016
合计	22.00	19.92	19.37	16.17	19.37	0.041

由表 2 可以看出:库区日平均渗漏量为 19.37 m<sup>3</sup>/d,由此可得年渗漏量约为 7 070.05 m<sup>3</sup>/a,约占水库总库容(155 × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>)的 4.6‰,库区平均日渗漏强度约为 0.041 mm/d,年渗漏强度约为 14.97 mm/a。从时间上看:3-7 月库区渗漏量变化呈下降趋势,分析原因是由于 3-7 月随着降雨量的增大,库区地下水位有所抬升,而由于水库的运行调节,库水位基本无变化,因此使得区域水力坡度减小,库水对地下水的渗漏补给减小;从空间上看:库区东北部(II 区)的渗漏强度较大,分析其原因是 II 区库底沉积物岩性以淤泥质土为主,且夹有部分中砂,因此造成了较大的渗漏损失,存在较大的渗漏风险。在水库运行管理中,应当着重加强库区东北侧的地下水位监测,做好防渗措施。

## 4 地下水流数值模拟

### 4.1 水文地质概念模型的建立

4.1.1 模拟范围 由于斗门水库试验段面积较小,大尺度的区域水流模拟不能精确反映斗门水库试验段蓄水对周边地下水流场的影响。因此采用等流量交换法<sup>[18]</sup>,概化模拟区范围。如图 5 所示:模拟区北至常七队,南到杨家庄村,距离约 1.42 km,西接西安龙门中学,东至袁其寨一带,距离约 1.85 km,总面积约 1.83 km<sup>2</sup>。模拟计算的目标含水层为第四纪孔隙潜水含水层,厚度约 55~60 m,含水层上边界为潜水面,下边界为隔水黏土层。

4.1.2 水力特征及边界条件概化 模拟区内含水层地下水主要表现为水平运动,仅在河道、库岸周边等区域存在垂向运动,整体地下水流速较小,符合层流运动的特征,适用于 Darcy 定律;渗透系数、给水度等水文地质参数在含水层不同点存在一定差异,为非均质性;地下水系统的补给、径流、排泄等要素随时间和空间有所变化,为非稳定流。综合分析模拟区的水文地质条件及地下水流的补、径、排条件,将模型边界条件概述如下:将黏性土隔水底板概化

为潜水底部隔水边界;潜水面接受大气降水补给、库水入渗补给、蒸发排泄等垂向入渗补给,为不稳定水面;将东北及西南侧边界概化为零流量边界,东南侧及西北侧为二类流量边界。

### 4.2 地下水流系统数学模型

根据斗门水库试验段模拟区的水文地质概念模型,可建立如式(3)所示的数学模型来描述模拟区含水层地下水的二维水流运动:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x}(K(h-Z_b)\frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(K(h-Z_b)\frac{\partial h}{\partial y}) + \\ W = \mu \frac{\partial h}{\partial t} \\ h(x,y,0) = h_0(x,y) \quad (x,y) \in D \\ \left. \frac{\partial h}{\partial n} \right|_{\Gamma_1} = 0 \\ \left. -K(h-Z_b)\frac{\partial h}{\partial n} \right|_{\Gamma_2} = q \quad t > 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: $x,y$ 为坐标变量; $D$ 为模拟区范围; $h$ 为水位,m; $h_0$ 为初始水位,m; $K$ 为渗透系数,m/d; $W$ 为垂向补给强度,m/d; $\mu$ 为给水度; $Z_b$ 为含水层底板标高,m; $q$ 为二类边界上单位面积流入(流出)水量,m<sup>3</sup>/(d·m<sup>2</sup>); $\Gamma_1$ 、 $\Gamma_2$ 分别为一、二类边界; $n$ 为二类边界外法线方向。

### 4.3 模型设计

4.3.1 模型网格剖分 根据实际水文地质条件和计算需求,采用不等距剖分的方法对所建立的模型进行了网格剖分,将模型剖分成了若干行和列,在库岸边进行了一定程度的网格加密。如图 6 所示:共剖分 132 行、160 列,21 120 个单元格,其中活动单元格 15 789 个,非活动单元格 5 331 个。

4.3.2 模型顶板和底板高程 通过 DEM 数据提取获取模拟区顶板高程数据,通过收集模拟区钻孔资料及工程地质勘察资料获取模拟区底板高程数据,采用克里金法进行插值,生成模拟区顶、底板高程如图 7 所示。

4.3.3 模型源汇项的处理 根据相关研究<sup>[19-20]</sup>, 潜水埋深超过 5 m, 其蒸发可忽略不计, 而模拟区潜水埋深在 9~14 m 之间, 因此在模型源汇项的处理中不考虑潜水蒸发, 主要考虑以下源汇项: (1) 降雨入渗补给及蒸发。根据模拟区气象站实测降雨蒸发资料, 模拟区降雨量多年平均值为 605 mm, 水面蒸发量多年平均值为 592.9 mm。由于模拟区位于渭河一级阶地, 根据西安市地貌图及模拟区相关地质资料<sup>[21-22]</sup>, 确定模拟区降雨入渗补给系数为 0.37, 在模型中通过 PRECHARGE 模块进行设置。(2) 对于地下水侧向径流补给, 运用 MODFLOW 的 Wells 模块, 在模型中设置抽注水井, 通过侧向补给量确定井的流量。

4.3.4 模拟时长及初始流场 模拟期为 2017 年 3 月 - 2022 年 3 月, 在设置好模型各项参数后进行地下水稳定流场的模拟, 得到模型的初始流场, 如图 8 所示。

#### 4.4 模型识别和校正

选择地下水流数值模拟中常用的“试错法”<sup>[19]</sup> 对模型参数进行校正, 即不断地对比观测井的模拟

计算水位和实测水位, 根据对比结果针对性地调整水文地质参数, 直至观测井的模拟计算水位和实测水位误差在合理范围之内, 则认为模型可用于区域流场的预测。在建立确定区域水文地质参数分区的过程中, 参考斗门水库建设可行性研究结果, 充分收集斗门水库试验段建设前期工程勘测资料<sup>[22-23]</sup>, 划分出模型的水文地质参数分区。在此基础上对模型进行水文地质参数校正: 选取 2017 年 3 月 - 2018 年 3 月为模型的识别和校正期, 根据 2018 年 3 月库岸边监测井的实测地下水位绘制校正对比流场, 从而得出校正后的各分区及其对应的参数值, 如图 9、表 3 所示。

表 3 模拟区各分区水文地质参数表

分区编号	渗透系数/( $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ )	给水度
1	1.8	0.032
2	2.5	0.035
3	3.8	0.044
4	1.2	0.068
5	1.6	0.026
6	4.2	0.081

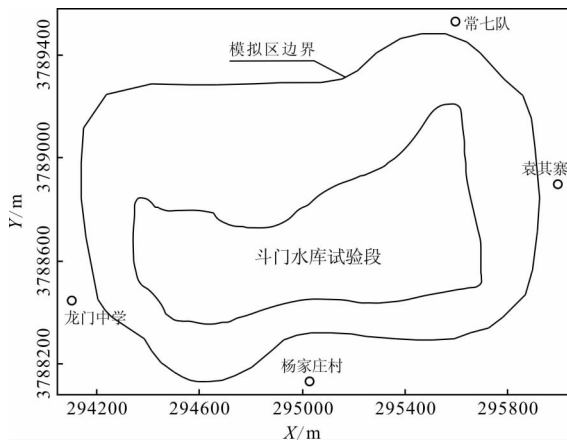


图 5 模拟区范围示意图

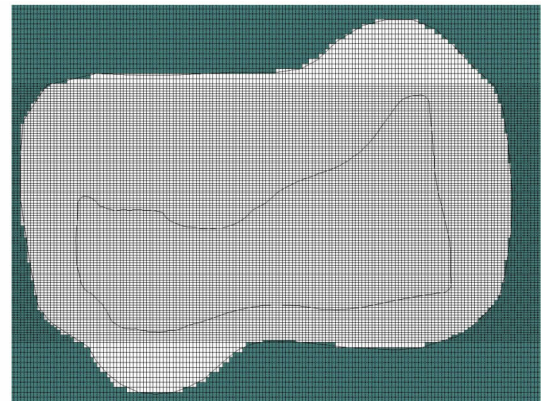


图 6 模拟区网格剖分示意图

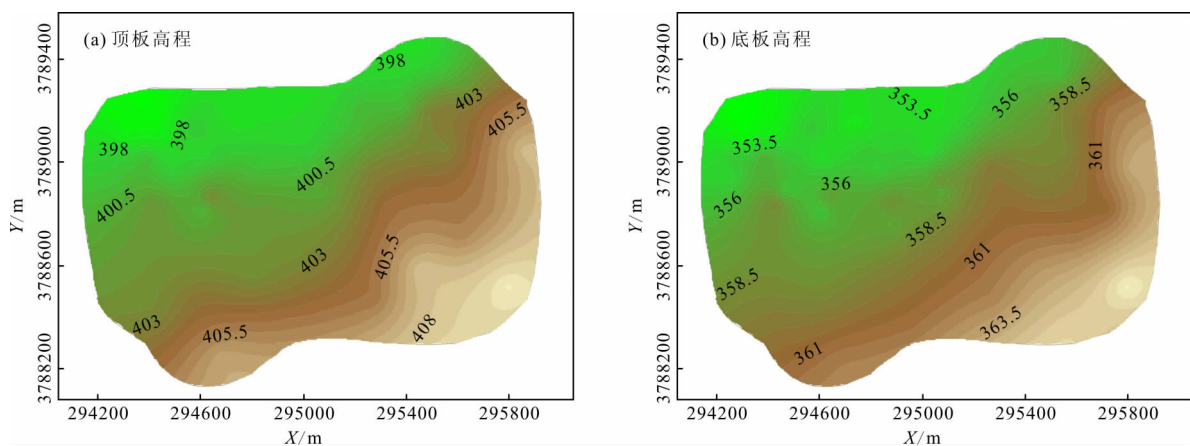


图 7 模拟区顶、底板高程(单位:m)

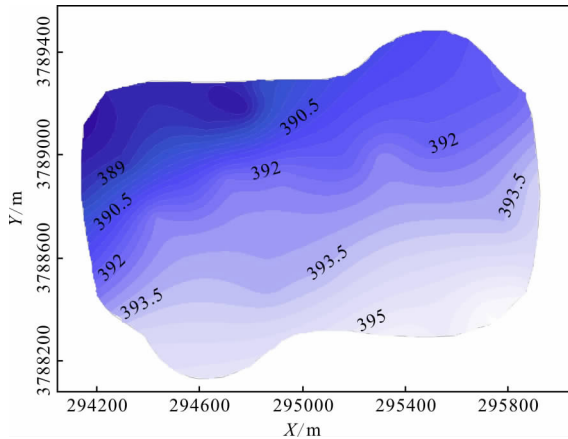


图 8 模拟区初始流场(单位:m)

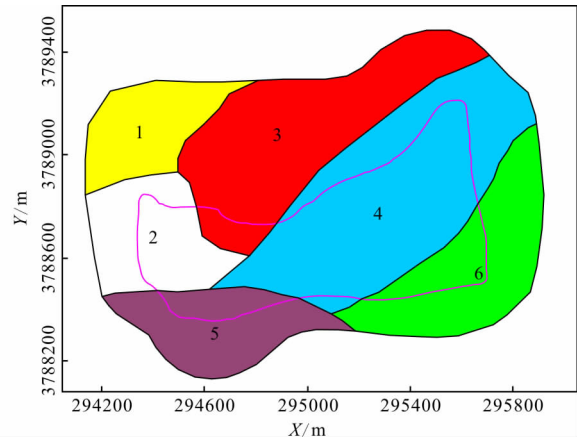


图 9 模拟区水文地质参数分区图

#### 4.5 结果与分析

利用模型识别和校正后的水文地质参数和边界条件,采用有限差分软件 Visual MODflow 模拟了斗门水库蓄水 5 年后的地下水水流场变化,模拟结果如图 10 所示。

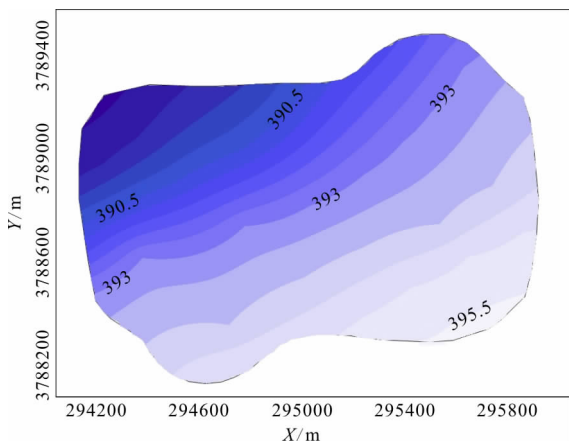


图 10 斗门水库蓄水 5 年后地下水流场(单位:m)

通过蓄水前后(图 8 及图 10)的地下水水流场模拟结果对比可以看出:蓄水前,受地形因素控制,模拟区地下水流向为东南向西北,整体地下水位介于 387 ~ 396 m 之间,库区地下水位介于 391 ~ 394 m 之间;蓄水 5 年后,模拟区地下水位抬升约 0.1 ~ 0.5 m,整体地下水位介于 388.5 ~ 396 m 之间,其中库区东北部水位抬升较为明显,等水位线变得更为密集,水力梯度变大,地下水流向西发生偏转,结合表 1、表 2 分析其原因是由于库区东北部渗漏强度较大,对原有的地下水水流场产生了较大影响;库区南部地下水水流场变化较小,地下水流向基本保持不变。综合以上分析可知,水库蓄水会对区域地下水水流场产生一定影响,使得区域地下水位尤其是库区东北部地下水位产生了较为明显的抬升,地下水流向发

生偏转,应当加强库区东北部的地下水水位动态监测,做好防渗措施。

## 5 结论

(1)斗门水库试验段库底沉积物岩性以淤泥质土和壤土为主,东北部地层中夹有少量中砂;库底各分区渗透系数差异较小,量级均为  $10^{-3}$  m/d,库区平均渗漏强度约为 0.041 mm/d,即 14.97 mm/a;库区东北部沉积物渗透系数及渗漏强度均较大,应当加强库区东北侧的地下水水位动态监测,做好库底防渗措施。

(2)库区平均渗漏量约为 19.37  $m^3/d$ ,即 7070.05  $m^3/a$ ,年渗漏损失约占试验段总库容的 4.6‰;库区渗漏量受降水量影响较为明显,丰水季节的渗漏量较小。

(3)水库蓄水对周边区域原有的地下水水流场产生了一定影响,蓄水 5 年后使得模拟区地下水位整体抬升 0.1 ~ 0.5 m 左右,库区东北部水力梯度变大,地下水流向发生偏转。

#### 参考文献:

- [1] 谢晓勇,侍克斌. 干旱区平原水库渗流及下游土壤盐渍化分析[J]. 水资源与水工程学报, 2014,25(2):180-183.
- [2] 周荣星,金瑞清. 山东省平原水库建设现状及发展对策[J]. 中国水利, 2015(8):25-26+38.
- [3] 何庆海,周荣星,金瑞清,等. 山东省平原水库的典型生态环境问题及对策研究[J]. 中国农村水利水电, 2010(10):53-54+58.
- [4] 李荣荣,熊黑钢,段鹏程,等. 干旱区平原水库下游盐渍化土壤光谱时空分布特征分析[J]. 土壤通报, 2016, 47(3):532-536.

- [5] WINTER T C. Relation of streams, lakes, and wetlands to groundwater flow systems [J]. Hydrogeology Journal, 1999, 7(1): 28-45.
- [6] 韩菲, 陈永灿, 刘昭伟. 湖泊及水库富营养化模型研究综述[J]. 水科学进展, 2003, 14(6): 785-791.
- [7] 谭界雄, 位敏. 我国水库大坝病害特点及除险加固技术概述[J]. 中国水利, 2010(18): 17-20.
- [8] 王旭东. 水库工程常见病害及防治措施[J]. 科技创新与应用, 2018(18): 113-114.
- [9] 刁延峰. 平原型水库工程地质问题浅议[J]. 陕西水利, 2017(3): 61-63.
- [10] 崔宇龙, 黄涛, 彭道平, 等. 川西高原某水库坝址区渗流场模拟及渗漏量计算[J]. 水资源与水工程学报, 2014, 25(5): 51-54.
- [11] 束龙仓, 李伟. 北塘水库库底地层渗透系数的随机特性分析[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2007, 37(2): 216-220.
- [12] 李鹏, 焦振华. 平原型水库浸没预测方法探讨——以陕西省斗门水库为例[J]. 资源环境与工程, 2015, 29(5): 661-665.
- [13] 张人权. 水文地质学基础[M]. 北京: 地质出版社, 2011.
- [14] 李伟. 北塘水库对地下水的渗漏补给特性研究[D]. 南京: 河海大学, 2007.
- [15] 国家质量技术监督局, 中华人民共和国建设部. GB/T 50123-1999; 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.
- [16] 吉青克. 大孔隙材料渗透系数的室内测定[J]. 公路交通科技, 2002, 19(2): 31-34.
- [17] 李扭串. 三泉水库库区渗漏模式及渗漏强度问题研究[J]. 水利建设与管理, 2017, 37(8): 59-63.
- [18] 张晗. 西安曲江南湖蓄水对地下水动力场的影响研究[D]. 西安: 长安大学, 2017.
- [19] 宋扬. 灞河橡胶坝库区沉积物渗透系数空间变异及河水-地下水交互作用研究[D]. 西安: 长安大学, 2017.
- [20] 胡顺军, 宋郁东, 田长彦, 等. 潜水埋深为零时塔里木盆地不同土质潜水蒸发与水面蒸发关系分析[J]. 农业工程学报, 2005, 21(S1): 80-83.
- [21] 周维博, 宋扬, 李慧, 等. 大西安城市建设引起的水循环变化规律研究[R]. 西安: 长安大学, 2016.
- [22] 王碧琦, 王锦峰, 陈莉, 等. 陕西省斗门水库工程可行性研究报告[R]. 西安: 水利部西安水土保持生态环境规划设计院, 陕西省水利电力勘测设计研究院, 2017.
- [23] 李鹏, 李之随, 刁延峰, 等. 陕西省斗门水库地质勘察报告(起步区试验段)[R]. 咸阳: 陕西省水利电力勘测设计研究院, 2014.

(上接第65页)

- [9] 苏丰敏, 李文峰, 王军, 等. 许昌市降水资源及变化分析研究[J]. 中国农村小康科技, 2011(2): 20-23.
- [10] 李谢辉, 王磊. 河南省历史水旱灾害危险性分析[J]. 资源科学, 2012, 34(8): 1526-1532.
- [11] 周念清, 夏学敏, 朱勍, 等. 许昌市水资源多模式联合调度与合理配置[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(1): 7-13.
- [12] 顾万龙, 王记芳, 竹磊磊. 1956-2007年河南省降水和水资源变化及评估[J]. 气候变化研究进展, 2010, 06(4): 277-283.
- [13] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术: 第2版[M]. 北京: 气象出版社, 2007.
- [14] 丁楠, 俞芳琴, 刘俊, 等. 1961-2011年深圳市降水变化趋势分析[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(5): 61-64.
- [15] 章诞武, 丛振涛, 倪广恒. 基于中国气象资料的趋势检验方法对比分析[J]. 水科学进展, 2013, 24(4): 490-496.
- [16] 李斌, 解建仓, 胡彦华, 等. 近50年陕南地区降水时空变化特征[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(1): 14-19+25.
- [17] 何庆龙, 周维博, 夏伟, 等. 延安市近60年降水时空特征分析[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(1): 31-37.
- [18] 张应华, 宋献方. 水文气象序列趋势分析与变异诊断的方法及其对比[J]. 干旱区地理, 2015, 38(4): 652-665.
- [19] 贺伟, 布仁仓, 熊在平, 等. 1961-2005年东北地区气温和降水变化趋势[J]. 生态学报, 2013, 33(2): 519-531.
- [20] 李森, 夏军, 陈社明, 等. 北京地区近300年降水变化的小波分析[J]. 自然资源学报, 2011, 26(6): 1001-1011.
- [21] 徐建新, 陈学凯, 黄鑫, 等. 贵州省近50年降水量时空分布及变化特征[J]. 水电能源科学, 2015, 33(2): 10-14.
- [22] 王晓莹, 杨丹, 邵银龙. 南京市近60年气候变化特征分析[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(4): 119-124.
- [23] 汤国安, 杨昕. ArcGIS地理信息系统空间分析实验教程[M]. 北京: 科学出版社, 2006.