

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2019.0060

何佳欢,许增光,柴军瑞,等.某地下水库在不同降雨条件下非稳定渗流分析[J].南水北调与水利科技,2019,17(3):56-66,88.  
HE J H, XU Z G, CHAI J R, et al. Unsteady seepage analysis for a groundwater reservoir under different rainfall conditions[J].  
South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(3): 56-66, 88. (in Chinese)

## 某地下水库在不同降雨条件下非稳定渗流分析

何佳欢,许增光,柴军瑞,章源,张悦

(西安理工大学 西北旱区生态水利国家重点实验室,西安 710048)

**摘要:**降雨入渗是地下水库主要来水之一,为了研究降雨对地下水库水位的影响以及分析地下水库的蓄水能力,分别以设置单道防渗地下坝的单库和多道防渗地下坝库群形式为研究对象,基于 GeoStudio 有限元软件中的 Seep/W 模块建立二维有限元模型,研究在不同降雨强度和雨型下的地下水库非稳定渗流场变化。降雨强度考虑年平均降雨量和年最大降雨量,持续时间为1年。降雨雨型考虑总降雨量为100 mm的平均型、前锋型、中锋型和后锋型。计算结果表明,在不同降雨强度下单库的地下坝前上游水位增加了71.1%,下游水位增加了11.7%。库群水位变化剧烈主要集中在1号和6号储水空间,水位增加量最高分别为8.8 m和12.5 m,而处于中间的储水空间水位变化较平缓;单库的整体水位变化较小,而库群主要对各个储水空间的水位影响较大,对取水有利;不同降雨雨型下对单库和库群上、下游表层孔压达到最大值的时间,以及表层体积含水量所能达到的峰值有一定的影响,且在前锋型最大含水量持续时间最长。研究成果可为地下水库在降雨条件下的蓄水提供一定的参考。

**关键词:**降雨入渗;地下水库;降雨强度;降雨雨型;非稳定渗流;有限元

中图分类号:TV641 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



### Unsteady seepage analysis for a groundwater reservoir under different rainfall conditions

HE Jiahuan, XU Zengguang, CHAI Junrui, QIN Yuan, ZHANG Yue

(State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** Rainfall infiltration is one of the main sources of water for the underground reservoir. The influence of rainfall on the groundwater reservoir water level and the water storage capacity of the groundwater reservoir are investigated in this study with a single reservoir of single-channel anti-seepage underground dam and a reservoir group of multi-channel anti-seepage underground dam. A two-dimensional finite element model was established to estimate the unsteady seepage field of the groundwater reservoir under different rainfall intensities and different rainfall patterns, with the Seep/W module in GeoStudio finite element software. Rainfall intensity was chosen by taking into account annual average rainfall and annual maximum rainfall for a period of 1 year. Rainfall types include average type, forward type, center type and post-peak type, with a total rainfall of 100 mm. The simulation results show that the upstream water level of the single-base underground dam increased by 71.1% and the downstream water level increased by 11.7% under different rainfall intensities. The water level changes are mainly occurred in the #1 and #6 water storage spaces under multiple water storage spaces in an actual underground reservoir group, and the maximum water level changes are 8.8 m and 12.5 m under average rainfall and maximum rainfall, respectively. The water level in the middle storage space has only a minor change. The single reservoir has little changes of an overall water level. The installation of

收稿日期:2018-12-27 修回日期:2019-03-19 网络出版时间:2019-04-01

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20190329.1609.004.html>

基金项目:国家自然科学基金(51679193)

作者简介:何佳欢(1995—),男,陕西勉县人,主要从事水工结构地下水渗流计算分析。E-mail:1024104175@qq.com

通信作者:许增光(1982—),男,陕西富平人,副教授,博士生导师,主要从事水利工程地下水流动特性、特殊岩土体的渗透特性研究。E-mail: xuzengguang@xaut.edu.cn

the reservoir group has a great influence on the water level for each water storage space, which might be beneficial to the water intake. Under different rainfall patterns, the pressures of the upper and lower surface pores of the single reservoir and the reservoir group reached their maximum. The peaks of the surface water content could be affected, and the maximum water content lasts the longest time with forward-type rainfall. The research results provide a reference for the groundwater reservoir to store water under different rainfall conditions.

**Key words:** rainfall infiltration; groundwater reservoir; rainfall intensity; rainfall type; unsteady seepage; finite element

地下水库是由天然的储水结构组成的库区,根据其储水结构形式的不同可将地下水库划分为松散介质,裂隙介质,岩溶介质等;也可根据其挡水工程结构形式不同分为有坝,无坝和混合型三种<sup>[1-3]</sup>,其中有坝地下水库主要建在山前坡积区,这种地势由于坡度大,会导致地下水的水力坡度陡,流速大,在其下游处有出口,需要修建地下坝来截断水流,保持库容<sup>[4]</sup>。地下水库的引渗工程中主要分为地面入渗和垂直注水,地面入渗包括河道水流下渗和降雨入渗,当表面覆土厚度很大时,可以改用打竖井穿透覆盖层向库区内注水<sup>[5-6]</sup>。

地下水库的储水通道主要通过注浆、表面防渗等措施,可以阻断过水通道,形成一定厚度的隔水层,对内部防渗起到积极的作用,在求解特征水位中,多数学者利用钻孔数据,建立区域地下水库区地质结构三维可视化模型,计算特征库容以及调蓄工程研究<sup>[7-9]</sup>。例如:杜新强等<sup>[10]</sup>认为:垂直防渗技术是地下水库防渗坝体建设的主要方法,包括帷幕灌浆,混凝土防渗墙等,对于复杂的地质条件,也会采用多种防渗型式联合防渗。此外在研究地下水库的人工补给方法中,由于实验室的模拟成本高,测量数据不够准确全面,越来越多的学者采用数值模拟的方式对地下水库进行研究,通过建立数值模型采用有限元方法进行求解<sup>[11-13]</sup>,研究在不同补给效应下的地下水流变化规律,其中主要进行动态模拟地下水库补给与消耗的变化<sup>[14-15]</sup>和抽水试验过程中非稳定渗流场的数值模拟等<sup>[16-17]</sup>。例如:谢轶等<sup>[18]</sup>基于GMS和ArcGIS,以大庆西部地下水库为例对库容进行计算,为地下水库库容求解提供技术支持;刘昌军等<sup>[19]</sup>应用自主研发的三维可视化渗流有限元计算软件GWSS,研究台兰河地下水库辐射井抽水试验过程中的非稳定渗流场,并提出了辐射井子结构法,可对抽水过程中的地下水非稳定渗流变化及取水效率分析和评价。

多数学者主要对地下水库地下坝防渗结构、人工回灌等做了相应的研究,但是对于降雨入渗补给对地下水库渗流特性的研究较少。地下水库补给水

主要来自于地下径流,天然补给和人工补给,其中天然补给主要来自于降雨入渗,降雨的过程是从地表进入土壤,再进入含水层之后融入地下水,因此对地下水库含水层介质在降雨条件下的渗流分析尤为重要。在考虑降雨过程中,综合影响因素有降雨强度、降雨雨型、前期降雨和降雨量等,由于地下水库在降雨条件下的渗流分析较少,但对于降雨入渗下的边坡渗透稳定性分析<sup>[20-22]</sup>,填埋场渗滤液水位渗流分析等研究比较成熟<sup>[23-24]</sup>,并且与地下水库含水层介质具有很高的相似性,可以将该研究方法应用于地下水库中降雨入渗分析中。本文是以平原地区某松散介质地下水库的典型剖面为例,分别结合设置单道防渗地下水库的单库模型和设置多道防渗地下坝的库群模型之间进行对比,分析设置不同防渗地下坝对地下水库储水效果研究,基于GeoStudio有限元软件对不同降雨条件下的渗流场计算,分析地下水库渗流变化规律。

## 1 计算原理和数学模型

选取目前在饱和-非饱和渗流分析中最成功的商业软件GeoStudio中的Seep/W模块,该软件是将Fredlund & Xing和Van Genuchten函数作为渗流场计算的非饱和土理论<sup>[25]</sup>,并且将土的含水量和渗透系数均看作为孔隙水压力的连续函数。Fredlund & Xing提出关于体积含水量闭合解法的控制方程为

$$\theta_w = C_\varphi \frac{\theta_s}{\left\{ \ln \left[ e + \left( \frac{\varphi}{a} \right)^n \right] \right\}^m} \quad (1)$$

式中: $\theta_w$ 是体积含水量; $C_\varphi$ 是修正系数; $\theta_s$ 是饱和体积含水量; $\varphi$ 是负孔隙水压力; $a$ 、 $n$ 、 $m$ 是拟合参数,表达式为

$$a = \varphi_i \quad (2)$$

$$m = 3.67 \ln \left( \frac{\theta_s}{\theta_i} \right) \quad (3)$$

$$n = \frac{1.31^{m+1}}{m\theta_s} \times 3.27s\varphi_i \quad (4)$$

式中: $\varphi_i$ 是曲线拐点含水量对应的基质吸力; $s$ 为经

过拐点的函数切线的斜率。

Van Genuchten 提出的关于体积含水量的闭合解法的控制方程为

$$\theta_w = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + \left(\frac{\varphi}{a}\right)^n\right]^m} \quad (5)$$

式中： $\theta_w$  是体积含水量； $\theta_s$  是饱和体积含水量； $\varphi$  是负孔隙水压力； $a$ 、 $n$ 、 $m$  是拟合参数，与 Fredlund & Xing 不同的是， $a$  不能用空气进入值估计； $n$  改变函数斜率的轴点； $m$  是影响函数曲线进入平缓段斜率部分的陡峭程度。

松散介质地下水组成的含水层是地下水以孔隙水的形式存在于松散介质空隙中，地下水流表现为孔隙水流的特性，其中孔隙水分布均匀，连通性好，可以假定含水层为连续介质，用达西定律进行描述，在此基础上建立孔隙介质地下水运动的微分方程，稳定渗流的基本微分方程可表示为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial H}{\partial z} \right) = 0 \quad (6)$$

式中： $H$  为总水头函数； $k_x$ 、 $k_y$ 、 $k_z$  为  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向上的渗透系数。

其中，边界条件还需满足以下条件：

第一类边界条件，称为狄利克雷条件，表述为已知  $S_1$  上的水头，法向流速未知，则有

$$H(x, y, z) |_{S_1} = \varphi(x, y, z), \quad (x, y, z) \in S_1 \quad (7)$$

式中： $\varphi$  为水头势函数。在 SEEP/W 中以压力水头边界 (pressure head) 和总水头 (total head) 边界实现。

第二类边界条件，称为诺伊曼条件，表述为已知边界  $S_2$  法向流速，水头未知，则有

$$k \frac{\partial H}{\partial n} |_{S_2} = q(x, y, z), \quad (x, y, z) \in S_2 \quad (8)$$

式中： $n$  为  $S_2$  的外法线方向； $q$  为流量。在 SEEP/W

中以单位流量边界 (unit flux)，总流量边界 (total flux) 条件实现。

## 2 单库模型案例分析

### 2.1 工程概况与有限元模型

某地下水库的主要储水空间是由第四系冲洪堆积形成的砾质粗砂，微含土砾质粗砂和中粗砂构成，储水条件受地质地貌和水文条件的控制。库底主要由片麻岩，变质岩和花岗岩组成，易受风化形成土块状，属于微透水层，可以视为相对隔水底板。在水库东部，西北部边界有岩浆岩出露，极易风化，属于微透水层，形成不透水边界。北部，西部和东部部分边界由砾质粗砂，微含土砾石粗砂等松散砂层组成，形成透水边界，需要建造地下坝进行截渗。库区内含水层库容足够大，连通性好，深埋适宜，满足地下水储水空间的库容条件和可利用条件。该地区的气候条件为温暖带东亚季风区大陆性气候。最高气温  $38.9^\circ\text{C}$ ，最低气温  $-17.0^\circ\text{C}$ ，多年平均气温为  $12.4^\circ\text{C}$ ，多年年平均降雨量为  $604.0\text{ mm}$ ，最大降雨量为  $1172.4\text{ mm}$  (1964 年)，最小降雨量为  $335.6\text{ mm}$  (1984 年)。在该流域内，冬季受西伯利亚气流控制，气候干燥，夏季气温高，雨量集中，气候湿润<sup>[26]</sup>。该地下水库库区的总库容为  $5.693 \times 10^7\text{ m}^3$ ，通过年降雨量分析可知，在该地区的降雨入渗补给量为  $8.2 \times 10^6\text{ m}^3$ ，占库容量的  $14.4\%$ ，河川径流入渗补给量为  $1.031 \times 10^7\text{ m}^3$ ，占总库容量  $18.1\%$ 。

在地下水库中设置防渗地下坝是用来储存地下水的一种有效手段，其通过截断地下水来保证上游处的水位，本文通过研究地下水库在不同降雨条件下的渗流分析，建立单库计算模型见图 1。模型最高处为  $55\text{ m}$ ，最低处为  $49\text{ m}$ ，右侧为地下水库上游，左侧为地下水库下游。在模型下游处修建防渗地

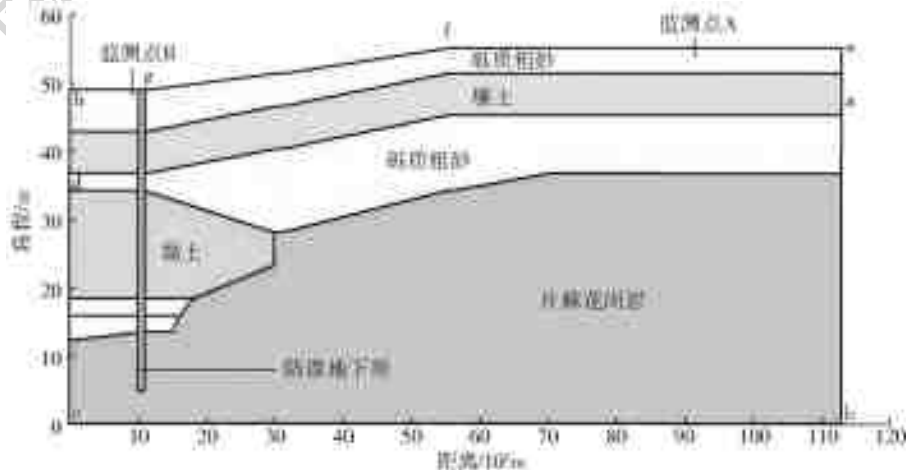


图 1 单库计算模型

Fig. 1 Computational models for a single reservoir

下坝,通过钻孔测定在原始地下水位上游侧为 43 m,下游侧为 34 m,在入库和出库距离地面 1 m 处设立监测点 A 和 B,分别监测上、下游侧表层的孔隙水压力变化。边界条件的设定,其中 ab 为上游定水头边界,为 43 m,cd 为下游定水头边界,为 34 m,其余边界条件设定为不透水边界,表面 efgh 为降雨入渗边界,模型的网格剖分一共剖分 6 032 个节点,6 044 个单元。

### 2.2 参数的选取

该地下水库地层自上而下分别为砾质粗砂、壤土、砾质粗砂和不透水的片麻花岗岩。局部地区夹杂黏土介质。多孔介质含水层主要为砾质粗砂和壤土,由于砾质粗砂和壤土的渗透系数较大,因此可采用常水头法测定其渗透系数,根据多组试验进行计算分析得到砾质粗砂的渗透系数平均值为  $1.390 \times 10^{-4}$  m/s,测得壤土的渗透系数平均值为  $5.289 \times$

$10^{-6}$  m/s,黏土层位于该地下水库的局部区域,且渗透系数小,采用变水头法测定其渗透系数数值,测得黏土的渗透系数平均值为  $1.0 \times 10^{-8}$  m/s,各个材料计算参数如表 1 所示,各多孔介质含水层的土-水特征曲线均以 Fredlund & Xing 预测方法得到的渗透性函数曲线作为输入参数,见图 2。防渗地下坝为混凝土结构,取其渗透系数值为  $1.0 \times 10^{-9}$  m/s,片麻花岗岩渗透系数为  $2.0 \times 10^{-12}$  m/s。

表 1 地下水库有限元计算参数

Tab. 1 Parameters of finite element calculation for groundwater reservoir

| 多孔介质 | 饱和渗透系数/<br>( $m \cdot d^{-1}$ ) | 饱和含水量/<br>( $m^3 \cdot m^{-3}$ ) | 残余含水量/<br>( $m^3 \cdot m^{-3}$ ) |
|------|---------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| 砾质粗砂 | 12.096                          | 0.35                             | 0.05                             |
| 壤土   | 0.457                           | 0.20                             | 0.05                             |
| 黏土   | $8.64 \times 10^{-4}$           | 0.20                             | 0.05                             |

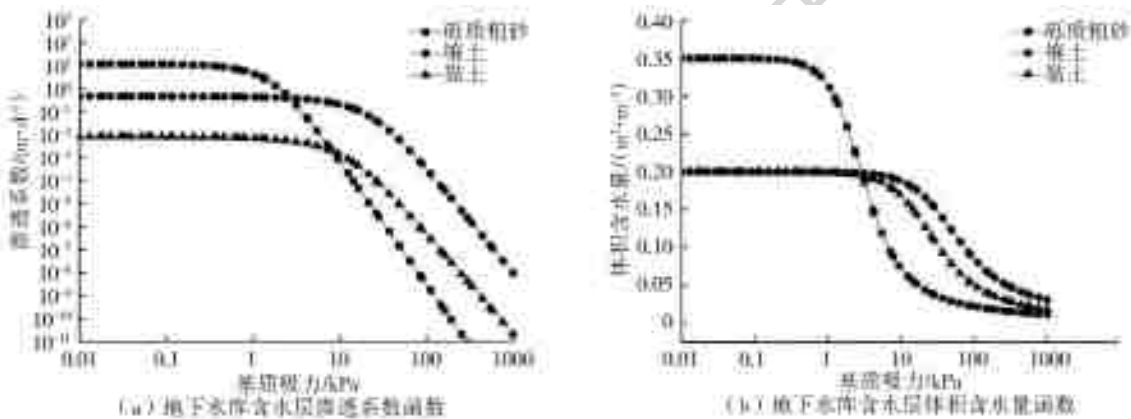


图 2 材料的土水特征曲线和渗透系数函数

Fig. 2 Soil-water characteristic curves of material and permeability coefficient

本文降雨强度分别考虑以年平均降雨量 604 mm 和年最大降雨量 1 172.4 mm 计算;降雨雨型分别采用平均型、前锋型、中锋型和后锋型四种典型雨型,而这四种雨型主要发生在雨季,属于年降雨量较大的时期。因此设定总降雨量为 100 mm,降雨时长为降雨 10 d 和停雨 10 d 的情况,降雨历程见图 3。

### 2.3 降雨入渗模型的验证

模型的验证通过文献[27]中关于 GeoStudio 软件模拟降雨入渗的案例,建立与之相似的模型见图 4,通过与文献[27]中计算结果进行对比,验证模型的可行性。

在图 4 模型中,材料饱和渗透系数为  $4.37 \times 10^{-6}$  m/s,初始孔隙水压力为 20 kPa,利用 Van Genuchten 拟合方程估计土水特征曲线,其中函数中各个参数为  $a = 2.02, n = 1.587, \theta_s = 0.405, \theta_r =$

0.1。计算在降雨强度 10 mm/d,相当于流量边界为  $1.16 \times 10^{-7}$  m/s,对比降雨历时 72 h 后的不同入渗深度下孔隙水压力的变化与文献[27]中的计算结果,见表 2,本文计算出孔隙水压力与文献[27]中孔隙水压力绝对误差的最大值为 0.330 kPa,平均值为 0.043 kPa。认为误差在合理范围内。

### 2.4 结果分析

#### 2.4.1 降雨强度的影响

通过对单库的降雨入渗分析,在正常降雨条件下,一定时期的降雨入渗有一部分降雨会以径流的方式流走,还有一部分水流会蒸发,仅有部分降雨会入渗到地下水库。降雨入渗的边界条件采用 Mein 和 Larson<sup>[28]</sup>的降雨强度,土壤允许入渗容量  $q$  和土壤饱和时的水力传导系数  $k_{ws}$ 。当  $q < k_{ws}$ ,此时地表径流不会发生,降雨会全部入渗,此时水的入渗率保持不变;当  $f_p > q > k_{ws}$ ,所有的雨水会全部入渗,

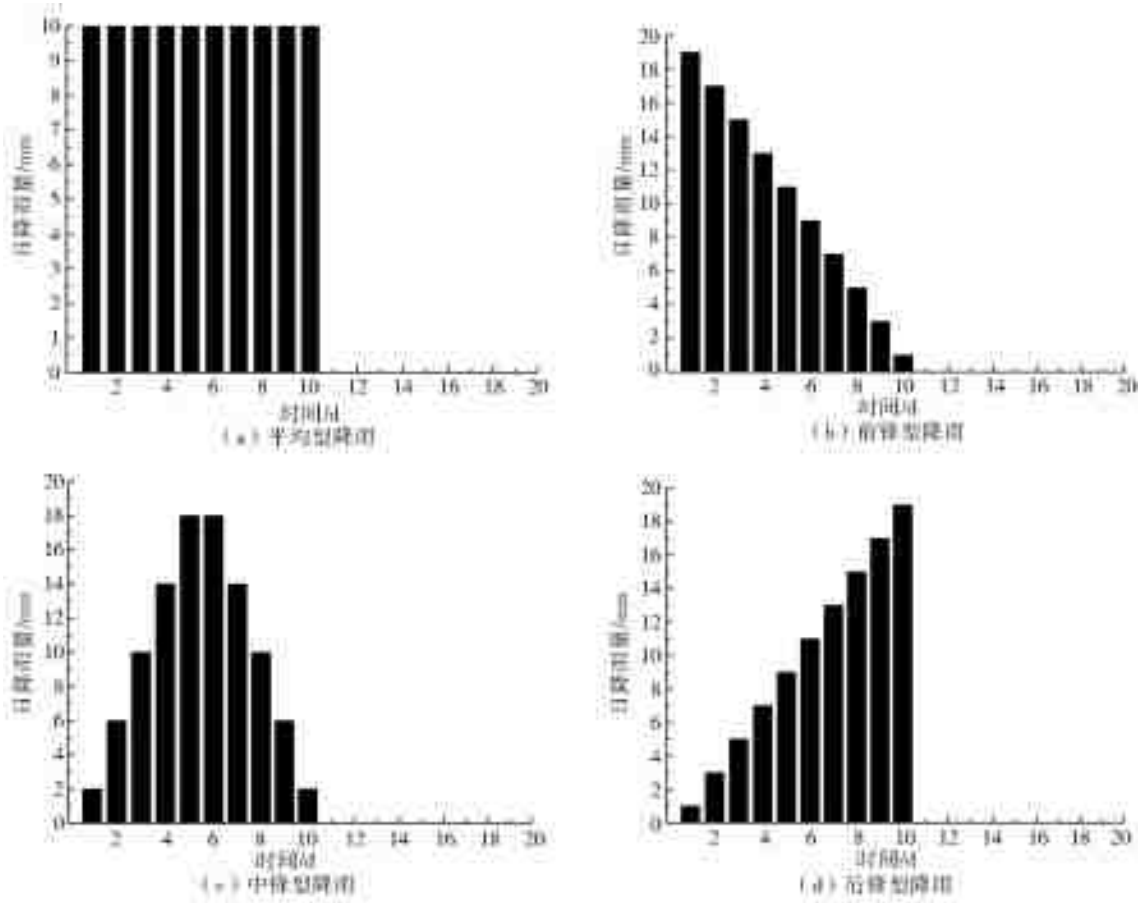


图 3 降雨历程

Fig. 3 Different rainfall types

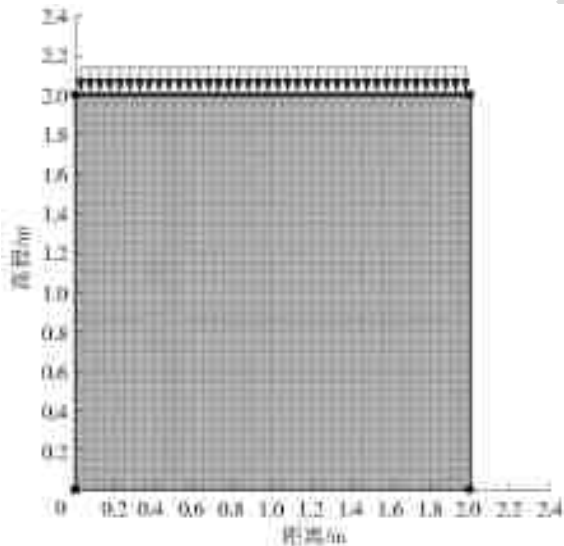


图 4 文献[27]单元数值模型

Fig. 4 Unit numerical model from reference[27]

$f_p$  会随着入渗深度的增加而减小,但此时降雨强度尚未达到土壤允许入渗的容量,故入渗率不会降低,且入渗率很高;当  $q > f_p$ , 由于降雨强度大于土壤的入渗容量,故部分降雨不会入渗而形成地表径流,入渗率也在降雨达到入渗容量后逐步下降。通过资料调查可得<sup>[28]</sup>,砂的入渗系数为 0.25,砂壤土的入渗系数为 0.17,壤土的入渗系数为 0.13,在该地下水

库表面为砾质粗砂层表面,且降雨强度小于砂层渗透系数。年降雨量分别以 604 mm 和 1 172.4 mm 计算,按全年平均分布,考虑砂的入渗系数,即流量边界分别为  $q_1 = 4.137 \times 10^{-4}$  m/d,  $q_2 = 8.03 \times 10^{-4}$  m/d,计算时间为 1 a,时间步计算共分为 24 步,得到在不同降雨强度上下游储水空间的水位变化见图 5。

表 2 模型计算对比

Tab. 2 Comparisons of model simulations

| 入渗深度/<br>m | 孔隙水压力/<br>kPa(文献[27]) | 孔隙水压力/<br>kPa(本文) | 绝对误差/<br>kPa |
|------------|-----------------------|-------------------|--------------|
| 1.50       | -20.0                 | -20.000           | 0.000        |
| 1.55       | -20.0                 | -19.995           | 0.005        |
| 1.60       | -19.8                 | -19.929           | -0.129       |
| 1.65       | -19.2                 | -19.051           | 0.149        |
| 1.70       | -13.5                 | -13.170           | 0.330        |
| 1.75       | -6.7                  | -6.459            | 0.241        |
| 1.80       | -4.4                  | -4.466            | -0.066       |
| 1.85       | -3.6                  | -3.632            | -0.032       |
| 1.90       | -3.1                  | -3.194            | -0.094       |
| 1.95       | -3.0                  | -2.941            | 0.059        |
| 2.00       | -2.8                  | -2.787            | 0.013        |

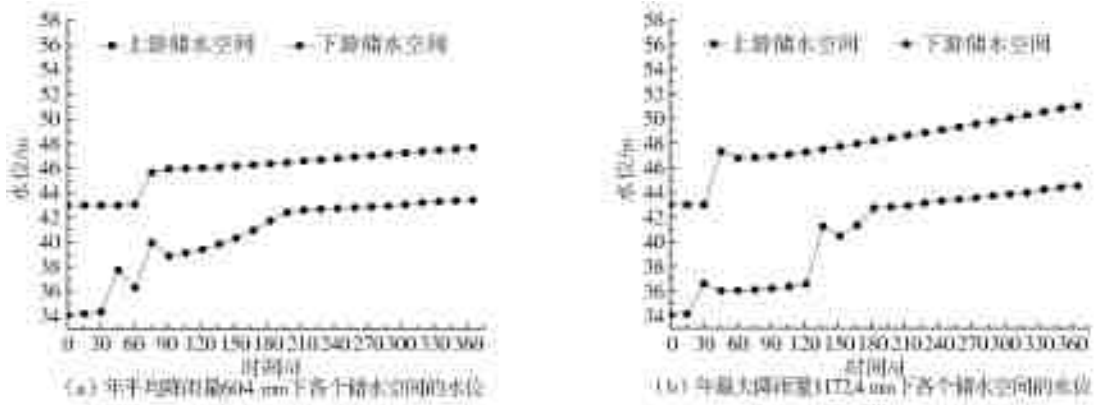


图5 单库在不同降雨强度下的水位变化

Fig.5 Water level changes under different rainfall intensities for a single reservoir

降雨强度为 604 mm 时,水库上游水位增长比较明显,在第 61 d 后,水位开始突增,72 d 后水位增长变缓,呈现出线性变化;水库下游处前期水位波动比较明显,中期水位增长迅速,后期水位变化比较缓慢。水库上游侧水位最终增加了 4.68 m,下游侧水位增加了 9.30 m,最终上下游水位差为 4.25 m。

降雨强度为 1 124.7 mm 时,水库上游处水位增长较快,与降雨强度为 604 mm 时的水位相比,水位增长幅度明显增大,最终水位增加了 8.01 m,与降雨强度为 604 mm 时相比,降雨强度增加了 86.2%,但水位增加了 71.1%。由此可知,上游水

位增长速度随降雨强度的增加而变缓。下游水位增加了 10.39 m,增加了 11.7%,最终上下游水位差为 6.50 m。虽然在水库下游处水位上升值较大,但是由于下游处有较大厚度黏土层,黏土渗透性低,可利用库容并不大,因此可利用的库容依然集中在水库上游处。

#### 2.4.2 降雨雨型的影响

四种不同降雨雨型下孔隙水压力和体积含水量的变化规律见图 6、7。通过上下游两个监测点 A、B 的孔隙水压力和体积含水量的变化来确定不同降雨雨型对地下水库的影响。

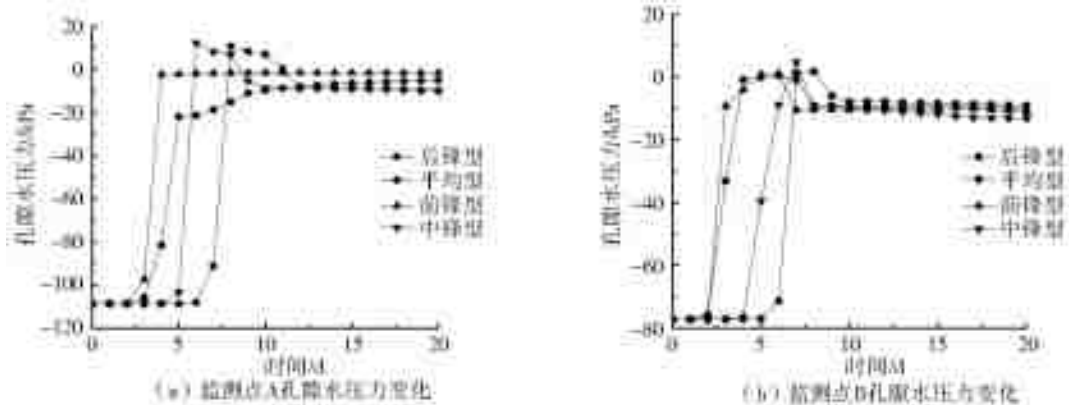


图6 单库在不同降雨雨型下的上下游测点处的孔隙水压力变化

Fig.6 Pore water pressure changes at upstream and downstream points under different rainfall types for a single reservoir

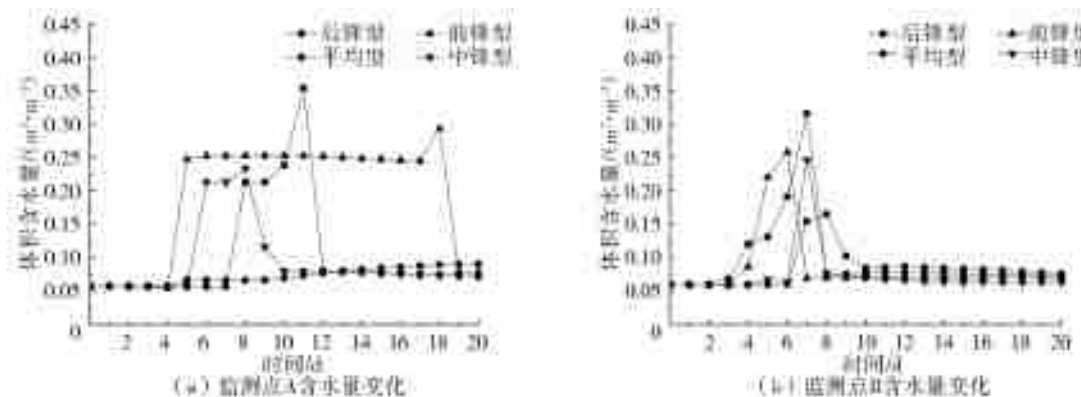


图7 单库在不同降雨雨型下的含水量变化

Fig.7 Water content change under different rainfall patterns for a single reservoir

由图 6 可知,不同降雨雨型对监测点 A 的孔隙水压力到达最大值的时刻有一定影响。前锋型降雨孔隙水压力最先达到最大值,其次是平均型和中锋型,最后是后锋型。后锋型、中锋型降雨情况下,监测点 A 的孔隙水压力最大,前锋型、平均型最小。监测点 B 的孔隙水压力变化规律与监测点 A 类似,不同降雨雨型对孔隙水压力到达最大值的时间有一定影响,而对于孔隙水压力的整体变化规律影响较小。

由图 7 可知,地下水库上游监测点 A 在后锋型降雨第 7 天时,体积含水量开始增加,第 11 天时达到最大值后开始下降并趋于稳定。平均型降雨的体积含水量缓慢增加趋于稳定。前锋型降雨在第 4 d 开始增加,第 5 天达到最大值,18 d 后开始下降。中锋型降雨的含水量在第 6 天开始增加,第 8 天时开始下降并在第 10 天时趋于稳定。对于水库下游,体积含水量的变化主要集中在 3~10 d 中,各个降雨

雨型下体积含水量所达到峰值的时间也不相同,平均型降雨所达到的峰值最高,在第 10 天后体积含水量趋于稳定。

### 3 地下水库库群分析与数值计算

#### 3.1 有限元模型

建立与单库相似的模型,见图 8,设置多道防渗地下坝,从上游向下游防渗地下坝的深度分别为 18、19、23.8、26、36 m。监测点位于相同位置,模型的网格剖分一共剖分 6 299 个节点,6 432 个单元。

#### 3.2 不同降雨强度下的结果分析

年降雨量与单库计算相同,流量边界分别为  $q_1=4.137 \times 10^{-4}$  m/d,  $q_2=8.03 \times 10^{-4}$  m/d,计算时间为 1 a,设置时间步为 24 步。在不同的降雨强度下,各储水空间的水位变化见图 9。

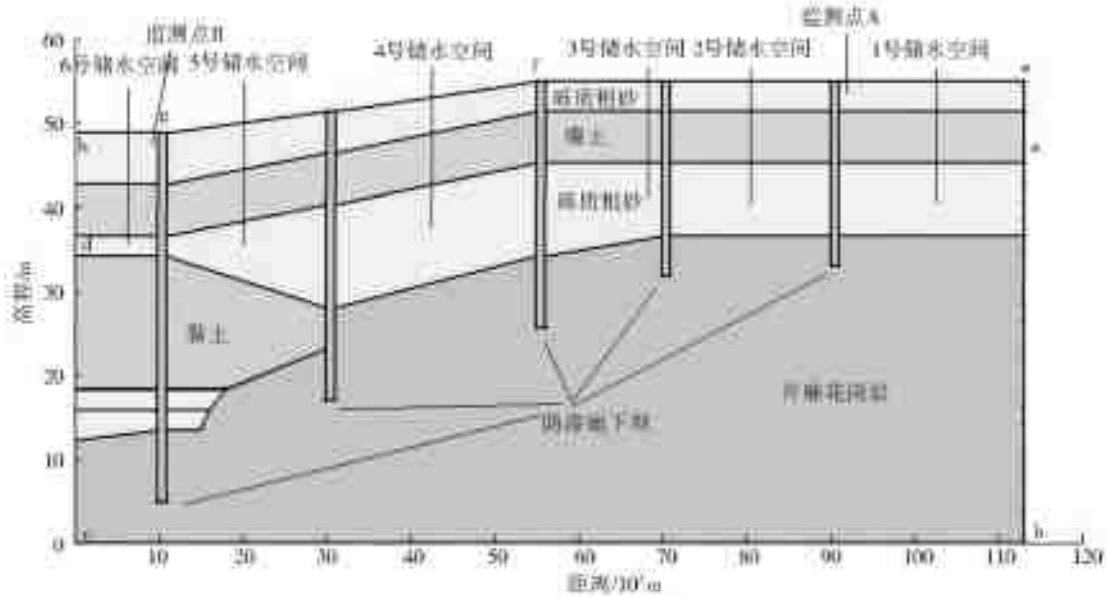


图 8 库群计算模型

Fig. 8 Computational model of a group of groundwater reservoirs

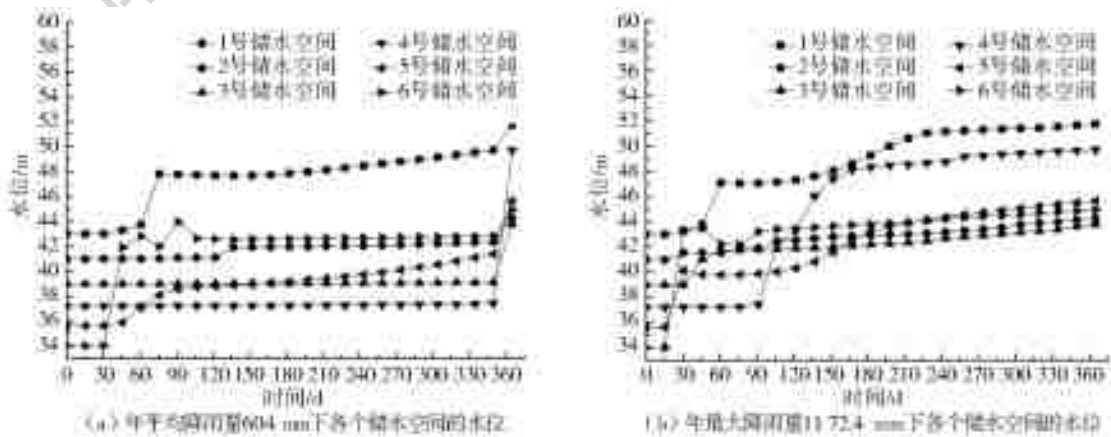


图 9 库群在不同降雨强度下水位变化

Fig. 9 Water level change under different rainfall intensities for a groundwater reservoir group

降雨量为 604 mm 时,1 号储水空间在第 61 天时水位突增,在 2、3、4 号空间中的水位变化较小,5 号储水空间处于稳定上升阶段,6 号储水空间水位在第 30 天突增,伴随着水位波动最终趋于稳定。最终在 1、5、6 号处水位变化大,6 号储水空间水位增加幅度最大,达到了 8.8 m,中间区域水位变化缓慢。

降雨量为 1 172.4 mm 时,各个储水空间的水位变化均匀,上游 1 号储水空间水位前期增长较慢,在第 46 天水位开始突增,第 76 天后趋于缓慢增长;2 号储水空间水位与时间基本呈线性变化,水位增长缓慢;3 号储水空间在第 61 天后水位开始缓慢变化;4 号储水空间前期水位基本保持不变,在第 91 天时水位开始突增,并且在第 91 天到 167 天水位增长最快,最终水位缓慢上升。5 号储水空间在第 15 天水位出现突增,并伴随水位波动后,在第 200 天时水位开始稳定,呈现均匀增长趋势,最终水位超过

2、3、4、6 号储水空间的水位,6 号储水空间水位也在第 15 天开始突增并最终趋于稳定;1、4、5、6 号储水空间水位变化大,4 号储水空间水位增加了 12.5 m,增长量最高,其次为 6 号储水空间,水位增加了 10.9 m,中间区域水位变化缓慢。

通过研究不同降雨强度下水位变化,可以得出地下水水库群的储水主要分布在最上游和最下游处,最上游处由于地势高,防渗地下坝的相对绝渗,可以维持一部分水源,而最下游水位一部分来源于上游储水空间通过相对不透水层部分入渗以及雨水汇集,因此可以在此处设置取水装置,例如取水井或者抽水井。伴随着雨量的增加,在 2 号,3 号,4 号储水空间处水位开始上升,原因在于大降雨强度下,雨水形成地表径流,沿着坡度下流,大量雨水汇集在下游处入渗进入下游储水空间,因此可进一步分析在地下水水库上下游位置 1 号和 6 号处的孔隙水饱和度,见图 10。

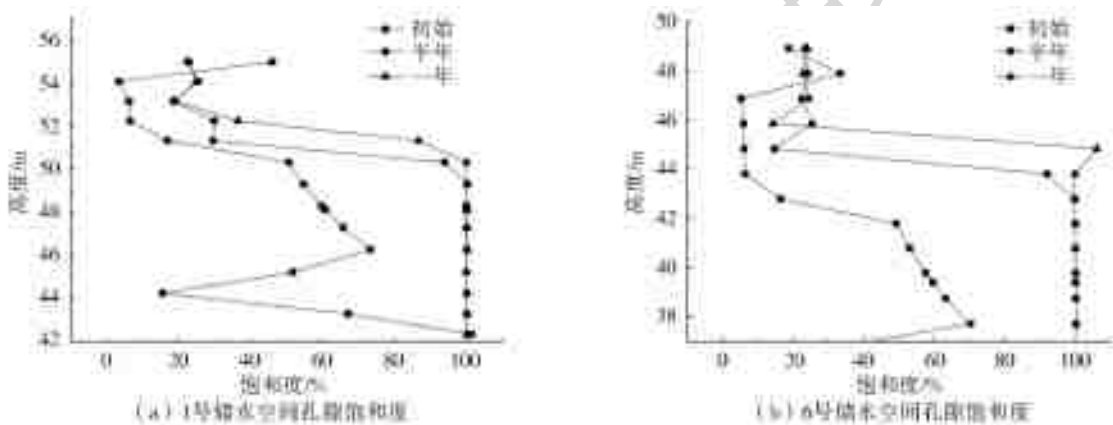


图 10 1 号,6 号储水空间的孔隙饱和度

Fig. 10 Pore saturation of water storage spaces at #1, #6

由不同高程处孔隙水压力的变化可知,初始条件下水位未达到饱和状态,半年后地下水水库上游侧 49.8 m 以上处于非饱和状态,水库下游侧 42.8 m 以上也处于非饱和状态。孔隙介质到达饱和状态高程最长,从半年到一年区间中,孔隙水所能达到饱和

的高程较短,在此区间中水位所能达到饱和的库容较少。因此蓄水前期主要分布在年降雨前期。

### 3.3 不同降雨雨型下的结果分析

四种不同降雨雨型下孔隙水压力和体积分水量的变化规律见图 11、12。通过上下游两个监测点

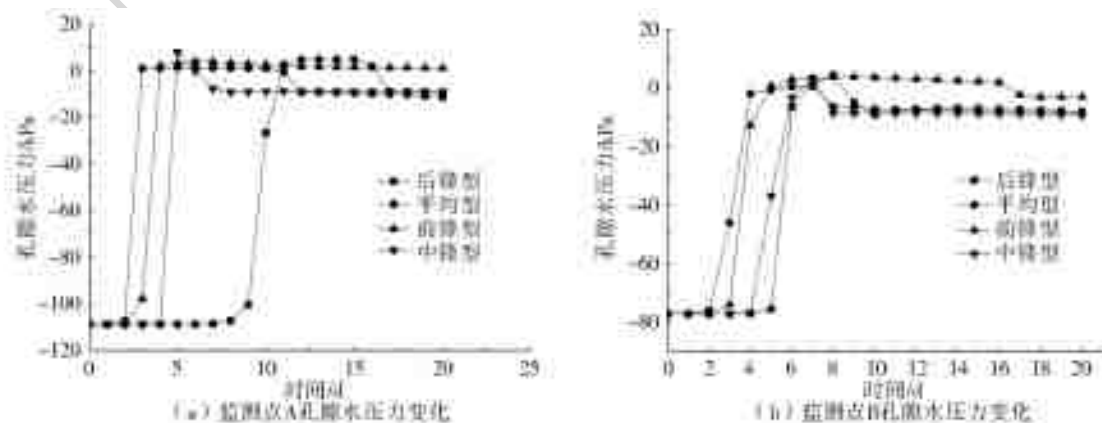


图 11 库群在不同降雨雨型下的上下游测点处的孔隙水压力变化

Fig. 11 Pore water pressure changes at upstream and downstream points under different rainfall types for a groundwater reservoir group



的孔隙水压力和体积含水量的值变化来确定不同的降雨雨型对地下水库的影响。

由图 11 可知,与单库中降雨孔隙水压力相比,两者的趋势基本相同,但是在库群中的孔隙水压力分布中,监测点 A 处后锋型降雨的孔隙水压力变化更加靠后,监测点 B 在前锋型降雨下的孔隙水压力要远大于其他三种。同样在库群中不同降雨雨型只是影响了孔隙水压力到达最大值的时刻,对于孔隙水压力的整体变化规律影响较小。

由图 12 可知,上游监测点 A 的体积含水量在后锋型降雨下前十天的变化不明显,后十天开始明

显变化,第 16 天达到了最大值。平均型降雨在第 6 天含水量达到最大值,第 7 天开始趋于稳定。前锋型降雨在第 3 天开始增加,第 6 天达到最大值,17 天后开始下降。中锋型降雨在第 7 天含水量达到最大值,最终含水量趋于稳定。对于水库下游,与上游测点处相比较,体积含水量的变化趋势基本相同,但是中锋型降雨的最大含水量峰值滞后,而平均型的峰值会提前,后锋型降雨下最大含水量降低。其中,在两个监测点中前锋型降雨最大含水量持续的时间最长,并且前锋型降雨在降雨过后所能达到的体积含水量最大。

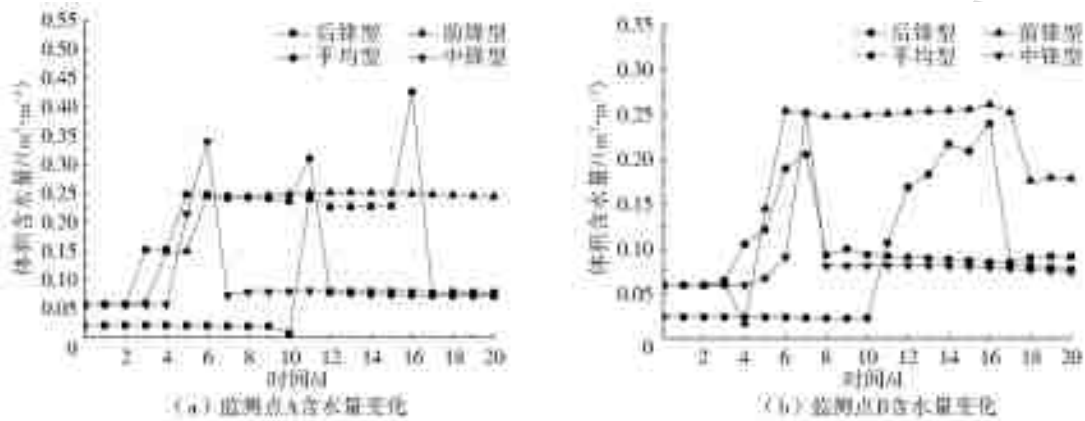


图 12 库群在不同降雨雨型下的含水量变化

Fig. 12 Water content changes under different rainfall patterns for a groundwater reservoir group

### 3.4 对比分析

在不同的降雨强度下,当降雨强度为 604 mm 时,单库水位增加为 4.68 m,库群水位最大增加为 8.8 m。当降雨强度为 1124.7 mm 时,设置单道防渗地下坝的单库地下水水位增加为 8.01 m,设置多道防渗地下坝的水位最大增加为 12.5 m。对比二者之间关系可知,单道防渗地下坝对于整体水位变化较小,多道防渗地下坝主要对于各个储水空间的水位影响较大,且各个储水空间水位变化并不相等,对开采地下水有利,但是对于工程实践中,会增加造价并提高施工难度。

在不同的降雨雨型下,监测点 A 处库群的孔隙水压力变化与单库基本相似,但在后锋型降雨中,库群的孔隙水压力相对于单库更加滞后。含水量变化主要表现在后锋型降雨的含水量峰值出现的时间不同,平均型降雨下单库中的含水量变化不明显,而库群中含水量先增大后减小,对于中锋型降雨,二者基本相似;监测点 B 处的二者孔隙水压力变化基本相同,但二者之间的含水量变化比较大,主要表现在后锋型降雨在单库中第 6 天含水量开始增加,第 8 天时达到峰值,在库群中第 10 天时含水量开始增加;

前锋型降雨在单库中的含水量第 3 天开始增加,第 6 天达到峰值后减小,而库群在第 6 天达到峰值后含水量保持不变,对于平均型和中锋型降雨下二者含水量变化规律基本相似。

## 4 结论

通过对该地下水库在不同的降雨强度和降雨雨型条件下降雨入渗计算,结合非稳定渗流场有限元计算原理,可得到以下结论。

(1)在不同的降雨强度下,降雨强度增加了 86.2%,单库库区上游水位增加了 71.1%,下游水位增加了 11.7%。在库群中,年最大降雨条件下储水空间的水位变化比在年平均降雨条件下的水位变化更加明显。降雨强度的影响对于各个储水空间的影响主要呈现出中间储水空间区域水位变化缓慢,两侧处水位增加比较明显。在年降雨量 604 mm 条件下,水位增加量最高为 6 号储水空间,增加了 8.8 m;在年降雨量 1172.4 mm 条件下,4 号储水空间水位增加了 12.5 m。由此可知,单库对于地下水水位整体变化没有库群变化大,库群则可根据各个储水空间水位变化不同对取水有利。同时还可以根据降雨强度对不同形式地下水库的变化规律,考虑

如何有效的收集雨水,使得天然降雨达到最大利用,并且研究地下坝的防渗结构,将收集到的雨水进行有效的保护和利用。

(2)不同的降雨雨型下单库和库群中的监测点孔隙水压力变化基本相似,但上游和下游监测点处孔隙水压力达到最大值的时间不同,由于前锋型降雨最先影响表层孔隙水压力的变化,对上下游侧的最大孔隙水压力所达到的时刻影响最大。且都在前锋型降雨下最大含水量持续时间最长,各个降雨雨型条件下的孔隙水压力最终都趋于稳定值,最大孔隙水压力差值并不明显。单库与库群的上游监测点在平均型降雨条件下含水量变化不同,下游监测点含水量在平均型和中锋型降雨下变化规律基本相似。

(3)该地下水库在不同的降雨强度和降雨雨型条件下的分析结果与定性分析结果一致,说明GeoStudio软件在处理非饱和土体下的非稳定渗流分析方面具有可行性,对降雨的入渗模拟具有一定的借鉴意义。虽然国内外学者已经对地下水库的工程特性,水位分析等做了相当多的研究。但是降雨条件只是地下水库天然来水方式之一,如果能够将不同降雨条件下渗流场分析与前人研究内容相结合,并可以将所有天然来水方式以及人工补给等作为计算条件,可以使得研究更加完善。

(4)降雨入渗条件下地下水库的非稳定渗流计算结果不仅仅取决于降雨的特性,多孔介质含水层中土-水特征曲线中的各个参数也具有重要影响。对含水层介质中的土-水特征曲线进行更加精确的拟合也是需要改进的方向。同时,本文在进行数值计算过程中,对含水层介质进行了简化处理,与实际工程存在一定的差异。由于地下水库的结构相对复杂,缺乏最新资料,因此,可以继续对模型及边界条件进行完善,以便于为工程更好的服务。

#### 参考文献(References):

[1] 王辉,许学工. 滨海平原地下水库效益评估[J]. 水资源与水工程学报,2015,26(3):13-19. (WANG H, XU X G. Evaluation of benefit of groundwater reservoir in coastal plain[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2015, 26(3): 13-19. (in Chinese)) DOI: 10.11705/j.issn.1672-643X.2015.05.03.

[2] 杜汉学,常国纯,张乔生,等. 利用地下水库蓄水的初步认识[J]. 水科学进展,2002,13(5):85-89. (DU H X, CHANG G C, ZHANG Q S, et al. Preliminary study on utilizing groundwater storage[J]. Advances in Water Science, 2002, 13(5): 85-89. (in Chinese)) DOI: 10.

3321/j.issn:1001-6791.2002.05.015.

[3] 朱思远,田军仓,李全东. 地下水库的研究现状和发展趋势[J]. 节水灌溉,2008(4):26-30. (ZHU S Y, TIAN J C, LI Q D. Current situation and development trend of research on groundwater reservoir[J]. Water Saving Irrigation, 2008(4): 26-30. (in Chinese))

[4] 李旺林,束龙仓,殷宗泽. 地下水库的概念和设计理论[J]. 水利学报,2006,37(5):613-618. (LI W L, SHU L C, YIN Z Z. Concept and design theory of groundwater reservoir[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(5): 613-618. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:0559-9350.2006.05.017.

[5] 张志永,焦剑妮,李凤翀,等. 地下水库回灌对地下水开采能力影响[J]. 南水北调与水利科技,2014,12(6):127-131,153. (ZHANG Z Y, JIAO J N, LI F C, et al. Impact of groundwater recharge in underground reservoirs on groundwater production capacity[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12(6): 127-131, 153. (in Chinese)). DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2014.06.029.

[6] 周俊,陈凯麒,梁鹏,等. ASR技术模式在我国地下水库工程建设应用中面临的问题与应用展望[J]. 南水北调与水利科技,2014,12(6):192-195. (ZHOU J, CHEN K Q, LIANG P, et al. Problems and application prospect of ASR technology in the underground reservoir construction of China[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12(6): 192-195. (in Chinese)) DOI:10.13476/j.cnki.nsbdkq.2104.06.044.

[7] 白东尧,鞠金峰,许家林. 李家壕煤矿地下水库人工坝体稳定性研究[J]. 煤炭学报,2017,42(7):1839-1845. (BAI D Y, JU J F, XU J L, et al. Stability analysis of mine underground reservoir artificial dam in Lijiahao mine[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(7): 1839-1845. (in Chinese)) DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2016.1477.

[8] 徐映雪,薛伟,代俊宁. 大沽河地下水库调蓄功能数值模拟研究[J]. 中国农村水利水电,2015(4):126-129,132. (XU Y X, XUE W, DAI J N. The numerical simulation of groundwater reservoir regulation in Dagu River[J]. China Rural Water and Hydropower, 2015(4): 126-129, 132(in Chinese)). DOI:10.3969/j.issn.1007-2284.2015.04.031.

[9] 杜新强,李砚阁,冶雪艳. 地下水库的概念、分类和分级问题研究[J]. 地下空间与工程学报,2008,4(2):15-20. (DU X Q, LI Y G, YE X F. Study on concept, type and grades of groundwater reservoir[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2008, 4(2): 15-20. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1673-

0836. 2008. 02. 003.

- [10] 李柱和, 祝树红, 顾雪明. 防渗堵漏技术在煤矿建设中的应用[J]. 建井技术, 2000, 21(1): 18-20. (LI Z H, ZHU G H, GU X M. Application of anti-seepage and plugging technology in coal mine construction[J]. Mine Construction Technology, 2000, 21(1): 18-20. (in Chinese)) DOI: 8/j. cnki. cn11-2456/td. 2000. 01. 006.
- [11] 杨亚慧, 卢玉东, 李鑫, 等. 贺兰山西麓地下水系统分析[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(9): 62-67. (YANG Y H, LU Y D, LI X, et al. Analysis of groundwater reservoir system in the piedmont of the west side of Helan Mountain[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2017, 31(9): 62-67. (in Chinese)) DOI: 10. 13448/j. cnki. jalre. 2017. 281.
- [12] 杜尚海. 滹沱河地下水人工补给效果模拟[D]. 长春: 吉林大学, 2009. (DU S H. Simulation of artificial recharge effects in Hutuo River groundwater reservoir [D]. Changchun: Jilin University, 2009. (in Chinese))
- [13] 陈末, 卢文喜, 侯泽宇. 基于 ArcGIS 的潮白河地下水三维地质建模及动态模拟[J]. 节水灌溉, 2013(8): 43-47, 53. (CHEN M, LU W X, HOU Z Y. Three-dimensional Geological modeling and dynamic simulation based on ArcGIS in groundwater reservoir of Chaobai river. Water Saving Irrigation, 2013(8): 43-47, 53. (in Chinese))
- [14] MA L Q, ZHANG D S, LI X, et al. Technology of groundwater reservoir construction in goafs of shallow coalfields [J]. Mining Science and Technology (China), 2009, 19(6): 730-735. DOI: 10. 1016/s1674-5264(09)60133-2.
- [15] ZUURBIER K G, ZAADNOORDIJK W J, STUY-FZAND P J. How multiple partially penetrating wells improve the freshwater recovery of coastal aquifer storage and recovery (ASR) systems: A field and modeling study[J]. Journal of Hydrology, 2014, 509(4): 430-441. DOI: 10. 1016/j. jhydrol. 2013. 11. 057.
- [16] ZHANG Y Q, WANG J H, CHEN J J, et al. Numerical study on the responses of groundwater and strata to pumping and recharge in a deep confined aquifer [J]. Journal of Hydrology, 2017, 548: 342-352. DOI: 10. 1016/j. jhydrol. 2017. 03. 018.
- [17] BODEUX S, PUJADES E, ORBAN P, et al. Interactions between groundwater and the cavity of an old slate mine used as lower reservoir of an UPSH (Underground Pumped Storage Hydroelectricity): A modelling approach[J]. Engineering Geology, 2017, 217: 71-80. DOI: 10. 1016/j. enggeo. 2016. 12. 007.
- [18] 谢轶, 周丹卉, 张峥, 等. 基于 GMS 和 ArcGIS 的地下水水库库容计算——以大庆西部地下水水库为例[J]. 环境保护科学, 2009, 35(2): 98-100. (XIE Y, ZHOU D H, ZHANG Z, et al. Underground reservoir volume calculation based on GMS and ArcGIS-Taking underground reservoir in west Daqing as an example[J]. Environmental Protection Science, 2009, 35(2): 98-100. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1004-6216. 2009. 02. 031.
- [19] 刘昌军, 赵华, 张顺福, 等. 台兰河地下水辐射井抽水过程的非稳定渗流场的有限元分析[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2013, 43(3): 922-930. (LIU C J, ZHAO H, ZHANG S F, et al. Finite element analysis on unsteady seepage field of groundwater reservoir of Tailan River during the pumping water of the radiation well[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2013, 43(3): 922-930. (in Chinese)) DOI: 10. 13278/j. cnki. jjuese. 2013. 03. 009.
- [20] 刘毓斌, 缪宏杰. 降雨入渗条件下新型路面排水系统性能研究[J]. 中国公路学报, 2017, 30(5): 1-9. (LIU Y C, MAO H J. Research on performance of new pavement drainage system under rainfall infiltration [J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(5): 1-9. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1001-7372. 2017. 05. 001.
- [21] 李炎隆, 陈波, 马成成, 等. 基于 ABAQUS 的降雨入渗条件下基坑边坡稳定性分析[J]. 应用力学学报, 2017, 34(1): 155-161. (LI Y L, CHEN B, MA C C, et al. Study on the stability of the foundation pit slope under rainfall infiltration conditions based on ABAQUS[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2017, 34(1): 155-161. (in Chinese)) DOI: 10. 11776/cjam. 34. 01. B084.
- [22] 郁舒阳, 张继勋, 王军磊, 等. 基于 Fredlund&Xing 参数下不同雨型边坡渗透稳定性分析[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2017, 39(6): 46-51. (YU S Y, ZHANG J X, WANG J L, et al. Seepage and slope stability analysis under different rainfall patterns based on Fredlund&Xing parameters[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Science), 2017, 39(6): 46-51. (in Chinese)) DOI: 10. 13393/j. cnki. issn. 1672-948X. 2017. 06. 010.
- [23] 钱磊, 沈磊, 柯瀚. 填埋场渗滤液水位的形成及增长规律分析[J]. 安全与环境学报, 2013, 13(1): 88-91. (QIAN L, SHEN L, KE H. On the leachate level formation and growth of solid waste landfill[J]. Journal of Safety and Environment, 2013, 13(1): 88-91. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1009-6094. 2013. 01. 021.

(下转第 88 页)

- 1016/j. catena. 2015. 04. 018.
- [21] JUNG M, REICHSTEIN M, CIAIS P, et al. Recent decline in the global land evapotranspiration trend due to limited moisture supply [J]. *Nature*, 2010, 467 (7318): 951-954. DOI: 10. 1038/nature09396.
- [22] BALDOCCHI, D. Breathing of the terrestrial biosphere; lessons learned from a global network of carbon dioxide flux measurement systems [J]. *Australian Journal of Botany*, 2008, 56 (1): 1-26. DOI: 10. 1071/BT07151.
- [23] MU Q, ZHAO M, RUNNING S W. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115 (8): 1781-1800. DOI: 10. 1016/j. rse. 2011. 02. 019.
- [24] 严家宝, 贾绍凤, 吕爱锋, 等. 近十年中国陆地水储量变化及其时空分布规律 [J]. *南水北调与水利科技*, 2016, 14(4): 21-28. (YAN J B, JIA S F, LYU A F, et al. Spatial-temporal variation characteristics of China terrestrial water storage in the last ten years [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2016, 14 (4): 21-28. (in Chinese)) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2016. 04. 004.
- [25] 冯险峰. 基于过程的中国陆地生态系统生产力和蒸散遥感研究 [D]. 北京: 中国科学院地理科学与资源研究所, 2004. (FENG X F. Process based remote sensing study on productivity and evapotranspiration of terrestrial ecosystems in China [D]. Beijing: Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, 2004. (in Chinese))
- [26] 杨扬, 杨启东, 孙旭映, 等. 三个陆面过程模式在西北半干旱区的模拟性能对比 [J]. *气候与环境研究*, 2016, 21(4): 405-417. (YANG Y, YANG Q D, SUN X Y. A comparative research of the simulation capability of NOAH, SHAW, and CLM models in Semi-Arid areas of northwestern China [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2016, 21 (4): 405-417. (in Chinese))
- [27] 董晴晴, 占车生, 王会肖, 等. 2000 年以来的渭河流域实际蒸散发时空格局分析 [J]. *干旱区地理*, 2016, 39 (2): 327-335. (DONG Q Q, ZHAN C S, WANG H X, et al. Spatio-temporal patterns of actual evapotranspiration in the Weihe River basin since 2000 [J]. *Arid Land Geography*, 2016, 39(2): 327-335. (in Chinese)) DOI: 10. 18402/resci. 2017. 02. 10.
- 
- (上接第 66 页)
- [24] YANG R, XU Z G, CHAI J R, et al. Permeability test and slope stability analysis of municipal solid waste in Jiangcungou landfill, Shaanxi, China [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2016, 66(7): 655-662. DOI: 10. 1080/10962247. 2015. 1093038.
- [25] 仵彦卿. 多孔介质渗流与污染物迁移数学模型 [M]. 北京: 科学出版社, 2012. (WU Y Q. Mathematics method of flow and contaminant in porous media [M]. Beijing: Science Press, 2012. (in Chinese))
- [26] 李旺林, 刘长余, 汤怀义. 地下水设计理论与工程实践 [M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2012. (LI W L, LIU C Y, TANG H Y. Design theory and engineering practice of groundwater reservoir [M]. Zhengzhou: The Yellow River Water Conservancy Press, 2012. (in Chinese))
- [27] 李全文, 常金源, 徐文刚, 等. Geostudio 软件模拟降雨入渗过程中边界条件的探讨 [J]. *水利规划与设计*, 2019(2): 54-57, 87. (LI Q W, CHANG J Y, XU W G, et al. Discussion on the boundary conditions of rainfall infiltration process by Geostudio software [J]. *Water Resources Planning and Design*, 2019 (2): 54-57, 87. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1672-2469. 2019. 02. 017.
- [28] 李秀珍, 何思明. 基于 Mein-Larson 入渗模型的浅层降雨滑坡稳定性研究 [J]. *灾害学*, 2015, 30(2): 16-20. (LI X Z, HE S M. A study on stability of shallow rain-induced landslide based on Mein-Larson infiltration model [J]. *Journal of Catastrophology*, 2015, 30 (2): 16-20. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-811X. 2015. 02. 004.