

## 基于多源数据的弱透水层水文地质参数反演研究

石鸿蕾, 郝奇琛, 邵景力, 崔亚莉, 张秋兰

## Research on hydrogeological parameter inversion of an aquitard based on multi-source data: A case study of a silt layer in the Hohhot Basin

SHI Honglei, HAO Qichen, SHAO Jingli, CUI Yali, and ZHANG Qiulan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202010013>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 基于iTOUGH2的生物降解模型全局敏感性时变分析

Temporal variation of global sensitivity analysis for biodegradation model using iTOUGH2

杜建雯, 施小清, 徐红霞, 吴吉春 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 35-42

#### 基于遗传算法-支持向量机的滑坡渗透系数反演

Estimation of hydraulic conductivity of landslides based on support vector machine method optimized with genetic algorithm

胡鹏, 文章, 胡新丽, 张玉明 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 160-168

#### 第二松花江干流傍河开采潜力评价

Potential evaluation of river bank infiltration along the Second Songhuajiang River

崔瑞娟, 冶雪艳, 杜新强, 王丽雪, 陆向勤 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 35-35

#### 地面沉降对含水层参数及给水能力的影响研究

A study of the influence of land subsidence on hydraulic parameters and water supply capacity

刘蓉, 曹国亮, 赵勇, 陆垂裕, 孙青言, 严聆嘉, 彭鹏 水文地质工程地质. 2019, 46(3): 47-47

#### 基于多点地质统计与集合平滑数据同化方法识别非高斯渗透系数场

Characterization of non-Gaussian hydraulic conductivity fields using multiple-point geostatistics and ensemble smoother with multiple data assimilation method

宗成元, 康学远, 施小清, 吴吉春 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 1-8

#### 基于水力层析法的某煤矿承压含水层叠加放水试验分析

An analysis of sequential water releasing tests of the confined aquifers in a coal mine based on hydraulic tomography

赵瑞珏, 毛德强, 刘再斌, 姬中奎, 曹祖宝 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 1-9



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202010013

# 基于多源数据的弱透水层水文地质参数反演研究 ——以呼和浩特盆地某淤泥层为例

石鸿蕾<sup>1</sup>, 郝奇琛<sup>2</sup>, 邵景力<sup>1</sup>, 崔亚莉<sup>1</sup>, 张秋兰<sup>1</sup>

(1. 中国地质大学(北京)水资源与环境学院, 北京 100083;  
2. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北石家庄 050061)

**摘要:** 弱透水层是含水层系统的重要组成部分, 其水文地质参数的准确获取一直以来都是研究难点, 传统室内试验难以克服应力状态及环境变化对土层参数的影响, 因此如何在原位状态下评价其水文地质参数有着重要意义。选取呼和浩特盆地某淤泥层为研究对象, 基于抽水试验和溶质运移试验获得的多源数据, 采用基于控制体积有限差分法的非结构化网格(Unstructured Grid)方法, 建立三维地下水流-溶质运移耦合模型, 对弱透水层水文地质参数进行反演。结果显示: 模型计算的抽水井中水位和溶质浓度变化规律与实际观测数据能够较好拟合, 模型识别出的抽水含水层渗透参数(4.8 m/d)与通过解析法计算得出的结果(4.17 m/d)相近, 建立的数值模型符合实际水文地质条件; 反演得到淤泥质弱透水层垂向渗透系数为  $1.2 \times 10^{-4}$  m/d、储水率为  $1.0 \times 10^{-5}$  m<sup>-1</sup>。基于多源数据的参数反演方法可为弱透水层参数研究提供借鉴。

**关键词:** 数值模拟; 弱透水层; MODFLOW-USG; 多源数据; 参数反演

中图分类号: P641.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2021)02-0001-07

## Research on hydrogeological parameter inversion of an aquitard based on multi-source data: A case study of a silt layer in the Hohhot Basin

SHI Honglei<sup>1</sup>, HAO Qichen<sup>2</sup>, SHAO Jingli<sup>1</sup>, CUI Yali<sup>1</sup>, ZHANG Qiulan<sup>1</sup>

(1. School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 2. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, CAGS, Shijiazhuang, Hebei 050061, China)

**Abstract:** An aquitard is an important part of an aquifer system. It is always difficult to determine the hydrogeological parameters of the aquitard. Traditional laboratory tests are difficult to overcome the influence of stress state and environmental change on the aquitard layer parameters. Therefore, evaluation of hydrogeological parameters under in-situ state is of great significance. This article selects a silt layer in the Hohhot Basin, and primarily designs and carries out pumping tests and solute transport tests. The unstructured grid with the controlled volume finite difference method is used to establish a 3D coupling model of groundwater flow and solute transport. Groundwater levels and concentration data are used to estimate the hydrogeological parameters of the aquitard. The results show that the variation in groundwater levels and solute concentrations in the pumping wells calculated by the model can fit well with the actual observation data, and the coefficient of permeability of the pumping aquifer identified by the model (4.8 m/d) is similar to the analytical result (4.17 m/d). The numerical model conforms to the actual hydrogeological conditions. The vertical hydraulic conductivity of the aquitard

收稿日期: 2020-10-13; 修订日期: 2020-11-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(41702282); 中国地质调查局地质调查项目(DD20160238; DD20190303)

第一作者: 石鸿蕾(1995-), 男, 硕士研究生, 主要从事地下水数值模拟方面的研究。E-mail: shlcugb@126.com

通讯作者: 邵景力(1959-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事水文学及水资源专业的教学和科研工作。E-mail: jshao@cugb.edu.cn

studied in this paper is  $1.2 \times 10^{-4}$  m/d, and the specific storage is  $1.0 \times 10^{-5}$   $m^{-1}$ . The method presented in this paper may provide references for the parameter determination of an aquitard.

**Keywords:** numerical modeling; aquitard; MODFLOW-USG; multi-source data; parameter inversion

水文地质参数对于区域地下水资源评价、数值模拟及预报、开发利用与保护及科学管理具有重要意义<sup>[1]</sup>。当实际含水介质的水文地质参数不易获取时,通过已知水文地质结构、参数、源汇条件及观测资料反演未知参数通常是一种十分有效的方法<sup>[1-3]</sup>。当前水文地质参数的反演方法主要包括解析法和数值法。随着计算机技术的发展,地下水数值模拟技术逐渐成熟,数值法逐渐成为解决地下水相关问题的重要方法<sup>[4-5]</sup>,用于水文地质参数求取、地下水资源评价、预报等,为地下水开发利用及科学管理提供有效的工具和重要依据。

目前已有不少学者基于数值法进行了水文地质参数的反演研究<sup>[6-9]</sup>。毛喜云<sup>[10]</sup>结合群井抽水试验结果,建立地下水流数值模型对哈尔滨地区典型河漫滩二元结构地层的水文地质参数进行反演。李贵仁<sup>[11]</sup>建立地下水流数值模型,通过水位拟合对安徽某铁矿区岩溶裂隙含水层的水文地质参数进行反演。SzabóNP<sup>[12]</sup>建立了一种遗传算法辅助反演方法反演非饱和带地层的水文地质参数。Moharir等<sup>[13]</sup>利用 MODFLOW 软件对玄武岩含水层参数进行抽水试验反演建模。以往研究大都通过建立地下水流数值模拟模型,通过水位拟合反演参数。由于反演问题是根据结果间接估计的,数值模型中可能存在异参同效的问题,因此基于单一数据源的反演方法具有较强的不确定性。另外,以往研究大都是反演含水层的水文地质参数,针对弱透水层的参数反演研究很少。但对于多层含水系统,弱透水层的水文地质参数是计算层间越流量、预测和评价地面沉降的关键参数,对于指导地下水合理开发利用具有重要意义<sup>[14]</sup>。

针对以上问题,本文在野外抽水试验和溶质运移试验的基础上,利用 MODFLOW-USG 建立地下水流-溶质运移耦合模型,基于地下水位和溶质浓度多源数据对弱透水层水文地质参数进行反演。相较于单一源数据反演,这种方法在一定程度上降低了模型异参同效性导致的不确定性<sup>[15]</sup>。

## 1 水文地质试验

呼和浩特盆地第四系含水层系统划分为山前单

一结构含水层系统和平原区双层结构含水系统,双层结构含水系统主要分布于盆地中部。本文水文地质试验点位于呼和浩特盆地中东部的大黑河冲湖积平原,为双层结构的第四系含水系统<sup>[16]</sup>,地表高程 1 081 m,地势较为平坦。以中更新统上段(Q<sub>2</sub>)淤泥质层为分层标志,地下含水系统划分为浅层潜水—微承压含水层、深层承压含水层<sup>[17]</sup>。上部为上更新统至全新统(Q<sub>3-4</sub>)潜水—微承压含水层,厚度 10~40 m,含水层分布广、埋藏浅、颗粒粗、水量丰富;下部为中更新统下段和下更新统(Q<sub>2</sub>—Q<sub>1</sub>)承压含水层,平均厚度大于 50 m,下更新统(Q<sub>1</sub>)承压含水层因分布范围小,埋藏较深,水量小。中更新统下段(Q<sub>2</sub>)承压含水层分布广而稳定,厚度大,含水丰富。大黑河平原区承压含水层与上部潜水—微承压含水层间的淤泥质层厚度自东向西由 12 m 增至超过 100 m,上下两含水层可通过淤泥质弱透水层发生水量交换<sup>[18]</sup>。以往研究表明,承压水长期超采造成水位持续下降,进而潜水对承压含水层越流增大,是呼和浩特盆地山前潜水含水层疏干的主要原因<sup>[18-19]</sup>。

研究区承压含水层与上部潜水—微承压含水层之间的弱透水层(Q<sub>2</sub>)由多层淤泥层与砂层互层组成,发育总厚度约为 40 m(图 1)。为准确反演淤泥质弱透水层的水文地质参数,评价淤泥层渗透性能,同时为使抽水试验中,上下含水层较快产生响应,本文选择了中更新统下段(Q<sub>2</sub>)承压含水层之上最近的,同时也是与承压含水层水力联系最紧密的淤泥层(埋深 74.2~75.8 m)作为研究对象,设计实施了抽水试验和溶质运移试验。

在试验场施工 2 眼相距 2 m 的水文地质钻孔(图 1),其中抽水孔深 82.5 m,在 76~82 m 处安装滤水管,抽水试验过程中对下部含水层(III 层)进行抽水并观测其水位;观测孔深 74.2 m,在 72.5~74.2 m 处安装滤水管,观测该层(I 层)地下水位。两含水层之间夹 1.6 m 厚的淤泥层(II 层)即为本次研究的弱透水层。

试验前在抽水孔和观测孔中分别放置荷兰 vanEssen 公司的水位自动记录仪(Mini-Diver),该水位仪可自动监测并记录地下水的水位及温度。将水位记录仪放置在静水位以下约 10 m,保证抽水过程中水位计始终

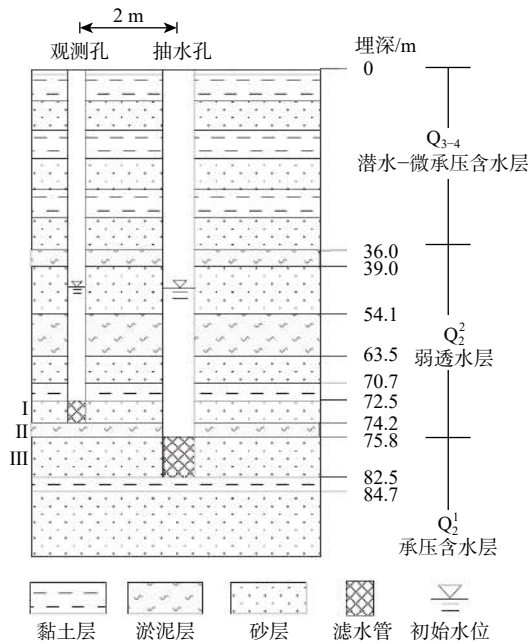


图1 地层剖面示意图

Fig. 1 Schematic stratigraphic section

位于水面以下。抽水前的初始水位埋深为: 抽水井 50.06 m、观测井 50.02 m。整个抽水试验采用  $100 \text{ m}^3/\text{d}$  的定流量抽水, 持续抽水 40 d。开始抽水后设置抽水井中水位记录器记录间隔 0.5 h, 观测孔中记录间隔 1 h。

待上下含水层水位稳定后, 测得上下含水层水头差为 3.10 m。选用萘磺酸钠作为示踪剂进行溶质运移试验。在开始抽水后 8 d, 一次性向观测孔中投入 59 kg 萘磺酸钠粉末, 溶质投入后每天从抽水井取一次水样, 利用天津港东 F-280 型荧光分光光度计对采集水样进行测试。累计测试了 40 d 抽水井中水样溶质浓度。

## 2 地下水数值模型

### 2.1 概念模型

为确保抽水井抽水不影响边界水位, 进而影响模型运行结果, 本次模拟以抽水试验和示踪试验场地为中心, 确定长宽均为 2 km 的矩形区域为模拟区。本次反演的是埋深 74.2 ~ 75.8 m、厚度 1.6 m 淤泥层的水文地质参数。根据地层剖面(图 1)选择埋深 72.5 ~ 82.5 m 的含水岩组作为模拟对象。垂向上将模型概化为 3 层, 上部中细砂层, 透水性和富水性良好, 概化为上部承压含水层; 中部为淤泥层, 透水性差, 概化为弱透层; 下部亦为中细砂层, 透水性和富水性良好, 概化为下部承压含水层。

试验场距自然边界较远, 且试验时间为冬季, 无人开采影响, 试验点附近水位观测井显示区域地下

水位较稳定, 天然水力坡度约 3‰, 基于此将模型四周水平边界条件概化为定水头边界。另外由于模拟期内无显著降水, 蒸发对研究地层的影响可以忽略, 故不考虑除试验中抽水井以外的源汇项条件。

模型涉及的水文地质参数主要包括渗透系数、储水率、弥散系数<sup>[17]</sup>等。研究区水文地质条件简单, 水平方向未作参数分区, 每层水文地质参数采用相同数值。

### 2.2 数学模型

根据上述水文地质条件概化, 将研究区地下水系统概化为三维非稳定地下水流系统<sup>[18]</sup>, 地下水流的控制方程为:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) + \varepsilon = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

式中:  $h$ ——地下水位/m;

$K$ 、 $K_z$ ——含水介质的水平和垂向渗透系数/ $(\text{m} \cdot \text{d}^{-1})$ ;

$\varepsilon$ ——源汇项/ $\text{d}^{-1}$ ;

$S_s$ ——储水率/ $\text{m}^{-1}$ 。

溶质运移试验中选择的萘磺酸钠溶质在地下水中不易发生化学反应, 不易挥发和吸附<sup>[20]</sup>, 因此模拟过程仅考虑溶质在地下水中的对流、弥散以及源汇项混合作用, 溶质运移模型控制方程为:

$$\frac{\partial(\theta C)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \theta D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (\theta v_i C) + q_s C_s \quad (2)$$

$x, y, z \in \Omega, t \geq 0$

式中:  $\Omega$ ——渗流区域;

$C$ ——溶质浓度/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$ ;

$v_i$ ——各方向上地下水实际流速/ $(\text{m} \cdot \text{d}^{-1})$ , 通过地下水流方程求得;

$D_{ij}$ ——水动力弥散系数张量/ $(\text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1})$ ;

$C_s$ ——固体颗粒吸附的溶质浓度/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$ 。

### 2.3 数值模型

本文采用 MODFLOW-USG 程序包建立地下水数值模型。该程序包是美国地质调查局 (USGS) 2013 年发布的新的 MODFLOW 版本<sup>[21]</sup>, USG 是非结构网格 Unstructured Grid 的缩写 (简称 Ugrid)。在网格剖分方面非结构化网格比传统结构化网格具有更强的灵活性<sup>[22]</sup>。同时基于控制体积有限差分 (Control Volume Finite-difference, CVFD) 的网格设计保证了网格几何形状灵活性, 也提高了数值计算的稳定性。利用非结构化网格精细刻画和灵活加密的特点, 即可以实现对水文地质试验点附近网格的精细刻画, 同时也因其在局部加密过程中产生的无效网格数量较少, 可以大大降低模型计算负荷。

为实现试验场地的精细刻画,在水平方向上将约  $4 \text{ km}^2$  模拟区划分为  $64 \text{ m} \times 64 \text{ m}$  的矩形网格,在抽水井和观测井附近进行非结构化局部加密,最细网格剖分精度达到  $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$  (图 2)。纵向上将模型剖分为 3 层,  $1006.8 \sim 1008.5 \text{ m}$  (标高,下同) 为上部含水层,厚  $1.7 \text{ m}$ ;  $1005.2 \sim 1006.8 \text{ m}$  为中部弱透水层,厚  $1.6 \text{ m}$ ;  $998.5 \sim 1005.2 \text{ m}$  为下部含水层,厚  $6.7 \text{ m}$ ; 模型垂向总厚度  $10 \text{ m}$ 。

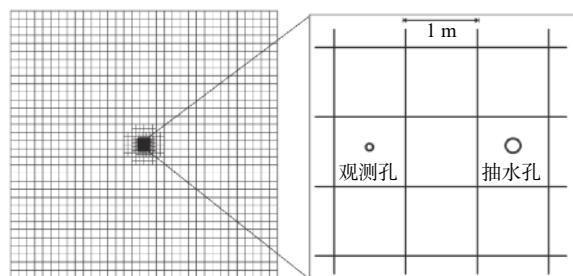


图 2 非结构网格剖分图

Fig. 2 Diagram showing unstructured grid subdivision

本次数值模型模拟验证期共 45 d,划分为 91 个应力期。模拟期前 2 d 水位变化明显,按每小时一个应力期分为 48 个应力期。2 d 后抽水井与观测井中水位均基本稳定,按每天一个应力期分为 43 个应力期。

根据概念模型中对模型的概化,设定模型初始条件与边界条件。根据初始水力坡度,将模型四周边界设为定水头边界;根据实测水位数据设定模型上下含水层的初始水位,弱透水层初始水位取上下含水层水位平均值<sup>[23]</sup>。在抽水井中设定  $100 \text{ m}^3/\text{d}$  定流量抽水。

模型中上下含水层水文地质参数依据经验值给定<sup>[24]</sup>,弱透水层水文地质参数通过观测数据与模型运行结果拟合进行反演。

在水流模型基础上采用 MT3DMS 模块建立溶质运移模型。在上部含水层中将溶质输入模型,并在下部含水层中设置溶质浓度观测井。溶质运移模型中各层的流动特征参数依据经验值给定<sup>[25-26]</sup>,纵向弥散度取  $10 \text{ m}$ 。

#### 2.4 水文地质参数反演

基于地下水位与溶质浓度多源数据对弱透水层水文地质参数进行反演。总体反演思路可分为参数识别和参数验证 2 大步骤 (图 3): 以水流模型识别过程作为反演参数的识别过程;溶质运移模型的识别过程作为反演参数的验证过程。首先对水流模型参数进行识别,通过水位拟合反演出一组满足水流模型的弱透水层水文地质参数;然后将这些参数代入溶质运移模型进行参数验证,通过溶质运移模型的识别验证

反演出的水文地质参数。若参数验证失败(溶质浓度曲线无法拟合)便调整水流模型中含水层参数重新反演,反复迭代后得到同时满足水流模型和溶质运移模型的弱透水层参数。基于水流模型和溶质运移模型的共同识别,可反演出可信度较高的弱透水层水文地质参数。

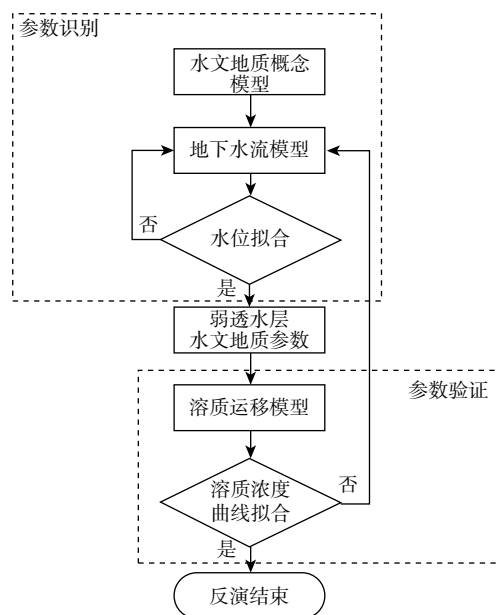


图 3 参数反演流程图

Fig. 3 Flow chart showing parameter inversion

### 3 结果分析

水文地质试验中观测到:抽水井在开始抽水后 13 h 基本达到稳定,稳定降深  $3.76 \text{ m}$ ;观测井中水位下降存在滞后,在开始抽水后 19 h 观测孔水位开始下降,36 h 观测孔水位基本稳定,稳定降深  $0.66 \text{ m}$ 。由于抽水泵的影响,抽水井中后期水位观测值出现小幅波动,与总体水位变化相比波动不大,不会对稳定水位造成影响。溶质运移试验显示,在开始抽水 24 d 后,采集水样中观测到了萘磺酸钠浓度峰值 ( $3.38 \times 10^{-8} \text{ mol/L}$ )。

通过地下水流模型与溶质运移模型的共同识别对弱透水层水文地质参数进行反演,最终在完成参数识别和参数验证后,模型中的地下水位和溶质浓度与实际观测值拟合效果见图 4。

从水位及溶质浓度拟合效果中可以看出,抽水井中的水位和溶质浓度与实际观测数据拟合较好,观测孔中模拟水位变化明显提前于实际水位变化,这是由于地下水流模型中未考虑到弱透水层中存在的滞后

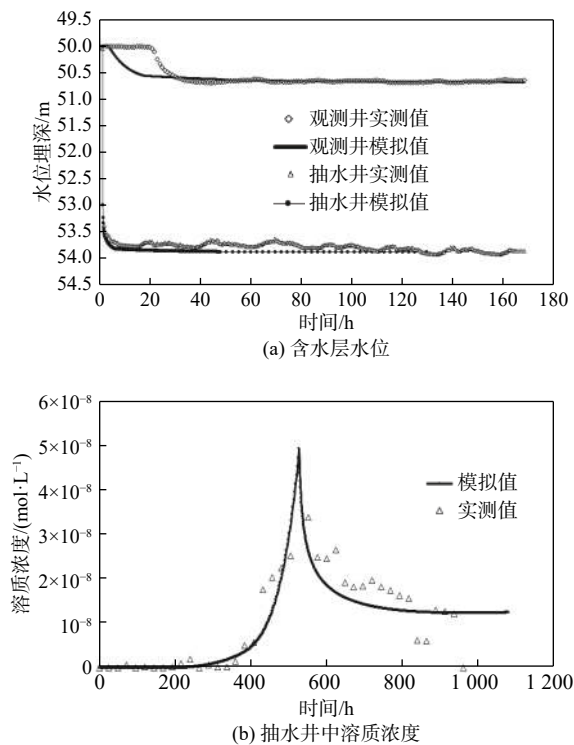


图4 含水层水位和抽水井中溶质浓度拟合效果

Fig. 4 Fitting effect of groundwater level in the aquifer and solute concentration in the pumping well

释水现象<sup>[14]</sup>。模型中下部含水层水头变化会直接导致弱透水层水头下降,从而引发越流;而实际情况是

下部含水层水头下降后,会先导致弱透水层水头由下自上逐渐消散,待水头消散影响到弱透水层的上部边界时才会引起上部含水层向下越流。实测水位波动比较大是由于区域地下水位的变化导致的。

虽然模型中未考虑到弱透水层水头消散的滞后性,但抽水试验前期水位下降滞后并不会影响到稳定水位及水位稳定后进行的溶质运移试验。忽略弱透水层水位响应滞后性,抽水井与观测井的后期水位变化曲线均与实际观测数据有较好的拟合效果,溶质运移模型运行结果中溶质浓度峰值出现时间也与实际观测基本一致,只是浓度峰值大小存在一定差异,这可能与水样采集时刻及测量误差有关,也可能因为溶质运移过程中发生的对流弥散外的其他作用。

总体而言,模型运行结果与观测数据的拟合效果说明模型能较好地反映实际水文地质条件。模型识别后的主要参数见表1。整体来看,各参数取值满足经验范围,抽水含水层水文地质参数取值与解析法计算出的结果相近(假设不考虑越流条件下,根据承压井Dupuit公式计算出抽水含水层渗透系数 $K=4.17\text{ m/d}$ )。最终反演得出的淤泥层的水文地质参数为:垂向渗透系数 $K_z=1.2\times 10^{-4}\text{ m/d}$ ;储水率 $S_s=1.0\times 10^{-5}\text{ m}^{-1}$ 。反演结果与该地区以往研究成果<sup>[17]</sup>具有较好的一致性,可信度较高。

表1 主要水文地质参数表

Table 1 Main hydrogeological parameters

参数	$K/(\text{m}\cdot\text{d}^{-1})$		$K_z/(\text{m}\cdot\text{d}^{-1})$		$S_s/\text{m}^{-1}$		
	I层	III层	II层	I层	II层	III层	
参数值	1.92	4.8	$1.2\times 10^{-4}$	$1.5\times 10^{-6}$	$1.0\times 10^{-5}$	$2.0\times 10^{-6}$	
确定方法	经验值	经验值	反演	经验值	反演	经验值	

## 4 结论

(1)弱透水层滞后释水会导致越流系统水位响应滞后。抽水试验中,抽水井开始抽水19h后观测井中才观测到水位下降。

(2)基于地下水位与溶质浓度多源数据对弱透水层水文地质参数进行反演,得出淤泥质弱透水层水文地质参数:垂向渗透系数 $K_z=1.2\times 10^{-4}\text{ m/d}$ ;储水率 $S_s=1.0\times 10^{-5}\text{ m}^{-1}$ 。

(3)模型中未对弱透水层滞后释水过程进行详细刻画,导致观测孔中计算水位与实测水位存在一定误差。溶质运移模型中参数取值误差也可能对模型精度产生一定影响。针对弱透水层中滞后释水、溶质

运移等复杂水文地质现象,今后还需进行深入研究。

## 参考文献 (References):

- [1] 陈晨,文章,梁杏,等.江汉平原典型含水层水文地质参数反演[J].地球科学,2017,42(5):727-733.  
[CHEN Chen, WEN Zhang, LIANG Xing, et al. Estimation of hydrogeological parameters for representative aquifers in Jiangnan Plain[J]. Earth Science, 2017, 42(5): 727 - 733. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 程林,韩龙喜,刘晓华,等.一维地下水溶质运移模型多参数反演[J].水资源保护,2014,30(3):5-8.  
[CHENG Lin, HAN Longxi, LIU Xiaohua, et al. Multi-

- parameter inversion of one-dimensional groundwater solute transport model[J]. *Water Resources Protection*, 2014, 30(3): 5 – 8. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 3 ] 杨建民, 郑刚. 用水位恢复数据反演越流承压含水层参数 [J]. *岩土力学*, 2008, 29(6): 1602 – 1606. [ YANG Jianmin, ZHENG Gang. Parameter estimation for leaky aquifers using residual drawdowns[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(6): 1602 – 1606. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 4 ] 易立新, 徐鹤. 地下水数值模拟[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009. [ YI Lixin, XU He. Numerical simulation of groundwater[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009. (in Chinese) ]
- [ 5 ] EL OSTA M, HUSSEIN H, TOMAS K. Numerical simulation of groundwater flow and vulnerability in wadi el-natron depression and vicinities, west Nile delta, Egypt[J]. *Journal of the Geological Society of India*, 2018, 92(2): 235 – 247.
- [ 6 ] 郝奇琛. 中国内陆盆地地下水流与水盐运移耦合模拟研究: 以柴达木盆地典型剖面为例[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2015. [ HAO Qichen. Coupled modeling of salt movement and groundwater flow in inland basin: A case study in Qaidam basin, China[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2015. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 7 ] 肖勇, 邵景力, 顾晓敏, 等. 北京昌平平原区地下水污染特征[J]. *南水北调与水利科技*, 2015, 13(2): 252 – 256. [ XIAO Yong, SHAO Jingli, GU Xiaomin, et al. Characteristics of groundwater pollution in Changping Plain of Beijing[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2015, 13(2): 252 – 256. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 8 ] 顾晓敏, 张戈, 郝奇琛, 等. 基于TOUGH2的柴达木盆地诺木洪剖面地下水流模拟[J]. *干旱区地理*, 2016, 39(3): 548 – 554. [ GU Xiaomin, ZHANG Ge, HAO Qichen, et al. Application of TOUGH2 in groundwater numerical simulation of Qaidam Basin[J]. *Arid Land Geography*, 2016, 39(3): 548 – 554. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 9 ] 陈晓恋, 张美雁, 文章, 等. 裂隙含水层水文地质参数反演——以黑龙江七台河市应急水源地为案例[J]. *水文地质工程地质*, 2014, 41(5): 32 – 37. [ CHEN Xiaolian, ZHANG Meiyuan, WEN Zhang, et al. Application of numerical simulation to estimate the hydraulic parameters in fractured media: A case study in emergency water area of Qitaihe City, Heilongjiang Province[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2014, 41(5): 32 – 37. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 10 ] 毛喜云, 张强, 于升才, 等. 基于 AquiferTest 和 ModFlow 求解哈尔滨河漫滩地区水文地质参数[J]. *天津建设科技*, 2017, 27(6): 56 – 59. [ MAO Xiyun, ZHANG Qiang, YU Shengcai, et al. Inversion of hydrogeological parameters in Harbin River floodplain based on Aquifer Test and Modflow[J]. *Tianjin Construction Science and Technology*, 2017, 27(6): 56 – 59. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 11 ] 李贵仁. 某铁矿岩溶裂隙含水层水文地质参数反演[J]. *勘察科学技术*, 2019(1): 42 – 46. [ LI Guiren. Inversion of hydrogeological parameters of Karst fissure aquifer in an iron mine[J]. *Site Investigation Science and Technology*, 2019(1): 42 – 46. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 12 ] SZABÓ N P. A genetic meta-algorithm-assisted inversion approach: hydrogeological study for the determination of volumetric rock properties and matrix and fluid parameters in unsaturated formations[J]. *Hydrogeology Journal*, 2018, 26(6): 1935 – 1946.
- [ 13 ] MOHARIR K, PANDE C, PATIL S. Inverse modelling of aquifer parameters in basaltic rock with the help of pumping test method using MODFLOW software[J]. *Geoscience Frontiers*, 2017, 8(6): 1385 – 1395.
- [ 14 ] 李兆峰, 周志芳, 李明远, 等. 弱透水层释水过程中水力参数响应规律[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2017, 45(4): 340 – 344. [ LI Zhaofeng, ZHOU Zhifang, LI Mingyuan, et al. Variation of hydraulic parameters of aquitard during water release[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2017, 45(4): 340 – 344. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 15 ] WU Jichun, ZENG Xiankui. Review of the uncertainty analysis of groundwater numerical simulation[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(25): 3044 – 3052.
- [ 16 ] 张泽鹏, 朱玉晨, 郝奇琛, 等. 呼和浩特盆地地下水流系统变异机制及其资源效应[J]. *水文地质工程地质*, 2017, 44(2): 63 – 68. [ ZHANG Zepeng, ZHU Yuchen, HAO Qichen, et al. A study on variation mechanism of groundwater flow system in the Hohhot basin and its resources effect analysis[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2017, 44(2): 63 – 68. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 17 ] 张翼龙. 呼和浩特盆地开采胁迫下的地下水系统响应及适应性对策研究[D]. 北京: 中国地质科学院, 2012. [ ZHANG Yilong. Aquifer system response and its

- adaptability countermeasures to exploitation in the Hohhot basin[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2012. (in Chinese with English abstract) ]
- [18] 赵瑞科,曹文庚,杨会峰,等.呼和浩特盆地地下水演化特征研究[J].*人民黄河*, 2018, 40(5): 78 - 82. [ ZHAO Ruike, CAO Wengeng, YANG Huifeng, et al. Study on evolution characteristics of groundwater in Hohhot Basin[J]. *Yellow River*, 2018, 40(5): 78 - 82. (in Chinese with English abstract) ]
- [19] 曹文庚,张翼龙,李政红,等.呼和浩特市大青山山前倾斜平原地质环境问题形成机理研究[J].*现代地质*, 2013, 27(2): 468 - 474. [ CAO Wengeng, ZHANG Yilong, LI Zhenghong, et al. Formation mechanism of geological environment issue in piedmont clinoplain of Daqing mountain, Hohhot, Inner Mongolia[J]. *Geoscience*, 2013, 27(2): 468 - 474. (in Chinese with English abstract) ]
- [20] 陆丽华,侯岳岚,程亚平,等.地表水-地下水溶质运移耦合模拟研究:以某赤泥堆场项目地下水环境影响评价为例[J].*地下水*, 2019, 41(6): 1 - 4. [ LU Lihua, HOU Yuelan, CHENG Yaping, et al. Study of solute transport simulation considering the coupling of groundwater and surface water: A case study of an environmental impact assessment of a red mud disposal site on groundwater[J]. *Ground Water*, 2019, 41(6): 1 - 4. (in Chinese with English abstract) ]
- [21] Panday S, Langevin C D, Niswonger R G, et al. MODFLOW-USG version 1: An unstructured grid version of MODFLOW for simulating groundwater flow and tightly coupled processes using a control volume finite-difference formulation[R]. Washington DC: US Geological Survey, 2013.
- [22] 周念清,杨一流,江思珉.非结构网格化方法求解地下水流数值模型[J].*勘察科学技术*, 2016(1): 14 - 17. [ ZHOU Nianqing, YANG Yiliu, JIANG Simin. Solving groundwater numerical model with unstructured grid method[J]. *Site Investigation Science and Technology*, 2016(1): 14 - 17. (in Chinese with English abstract) ]
- [23] 杜新强,常翠,冶雪艳.地下水流三维数值模拟中弱透水层初始水位的推求方法分析[J].*黑龙江水专学报*, 2008, 35(4): 94 - 97. [ DU Xinqiang, CHANG Cui, YE Xueyan. Analysis on the method to the initial groundwater level of aquitard during three dimensional transient numerical simulation of groundwater flow[J]. *Journal of Heilongjiang Hydraulic Engineering*, 2008, 35(4): 94 - 97. (in Chinese with English abstract) ]
- [24] 王超,束龙仓,鲁程鹏.渗透系数空间变异性对低渗透地层中地下水溶质运移的影响[J].*河海大学学报(自然科学版)*, 2014, 42(2): 137 - 142. [ WANG Chao, SHU Longcang, LU Chengpeng. Impacts of spatial variability of hydraulic conductivity on solute transport in groundwater of low-permeability stratum[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2014, 42(2): 137 - 142. (in Chinese with English abstract) ]
- [25] 王小丹,凤蔚,王文科,等.基于HYDRUS-1D模型模拟关中盆地氮在包气带中的迁移转化规律[J].*地质调查与研究*, 2015, 38(4): 291 - 298. [ WANG Xiaodan, FENG Wei, WANG Wenke, et al. Migrating and transforming rule of nitrogen in unsaturated zone in Guanzhong basin based on HYDRUS-1D model[J]. *Geological Survey and Research*, 2015, 38(4): 291 - 298. (in Chinese with English abstract) ]
- [26] 田振东.基于Visual MODFLOW的卫河河水污染对地下水影响研究[D].郑州:华北水利水电大学, 2016. [ TIAN Zhendong. Based on visual MODFLOW research on between the Wei river water pollution to groundwater[D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2016. (in Chinese with English abstract) ]

编辑:张若琳