



## 基于多种解析法和数值法求解巨厚砂岩水文地质参数

周全超 刘玲 李继升 殷裁云

引用本文:

周全超, 刘玲, 李继升, 等. 基于多种解析法和数值法求解巨厚砂岩水文地质参数[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(S1): 174–182.

ZHOU Quanchao, LIU Ling, LI Jisheng. Solving hydrogeological parameters of thick sandstone based on various analytical and numerical methods[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(S1): 174–182.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2023-0927>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 宁正矿区新庄煤矿首采区侏罗系延安组8号煤层顶板涌(突)水危险性评价

Risk assessment of roof water inrush in No. 8 coal seam of Jurassic system Yan'an Formation in the first mining area of Xinzhuan Coal Mine in Ningzheng Mining Area

煤炭科学技术. 2023, 51(S1): 298–309 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-0919>

#### 巨厚砂岩含水层下厚煤层综放减水开采技术

Water-reducing mining technology for fully-mechanized top-coal caving mining in thick coal seams under ultra-thick sandstone aquifer

煤炭科学技术. 2020, 48(9): 88–95 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/49f9f7c1-2bd5-42a1-85ac-09ebc2c588a2>

#### 彬长矿区典型顶板水害矿井洛河组砂岩微观孔隙特征研究

Micro pore characteristics of Luohe aquifer sandstone in Binchang Mining Area typical roof water hazard mines

煤炭科学技术. 2023, 51(8): 208–218 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1016>

#### 河流区域露-井联采矿区水文地质综合勘查技术研究

Research on comprehensive hydrogeological exploration insurface-underground combined mining area of river basin

煤炭科学技术. 2020, 48(11): 191–198 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/4a34abc6-266f-4b56-9a19-43c22a210aaa>

#### 越层水文地质现象及对煤矿防治水的影响研究

Study on hydrogeological phenomena of across stratigraphic boundary and impact on prevention and control of mine water

煤炭科学技术. 2020, 48(8): 150–156 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/e81a4174-65fd-4dc8-a010-b491f5f12c87>

#### 黔南灯影组巨厚含水层立井井筒帷幕注浆参数研究

Study on curtain grouting parameters of vertical shaft in Dengying formation of southern Guizhou with thick aquifer

煤炭科学技术. 2021, 49(3): 71–77 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.03.008>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

周全超, 刘玲, 李继升, 等. 基于多种解析法和数值法求解巨厚砂岩水文地质参数[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(S1): 174-182.

ZHOU Quanchao, LIU Ling, LI Jisheng, *et al.* Solving hydrogeological parameters of thick sandstone based on various analytical and numerical methods[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(S1): 174-182.

## 基于多种解析法和数值法求解巨厚砂岩水文地质参数

周全超<sup>1</sup>, 刘玲<sup>2</sup>, 李继升<sup>1</sup>, 殷裁云<sup>1</sup>

(1. 华能煤炭技术研究有限公司, 北京 100070; 2. 中国煤炭地质总局 勘查研究总院, 北京 100039)

**摘要:**在煤矿开采过程中, 矿井涌(突)水等事故不仅会造成巨大的经济损失, 还严重威胁工作人员的生命安全。水文地质参数在计算矿井涌水量过程中扮演着重要角色, 因此, 准确测定含水层的水文地质参数对于煤矿防治水等工作具有重要意义。为了获取更加贴近实际的矿区顶板巨厚洛河组砂岩含水层的水文地质参数, 以新庄煤矿洛河组巨厚砂岩含水层上、下段的抽水试验资料为依托, 采用传统的非稳定流的 Theis 公式法、Jacob 直线图解法和水位恢复法等解析法, 结合实际场地特征, 计算出洛河组砂岩含水层上、下段的渗透系数分别为 0.22~0.59 和 0.03~0.35 m/d; 上段导水系数为 128.74~373.67 m<sup>2</sup>/d, 下段为 5.52~47.07 m<sup>2</sup>/d; 上段的贮水系数为 2.22×10<sup>-4</sup>~6.69×10<sup>-3</sup>, 下段为 6.53×10<sup>-5</sup>~3.29×10<sup>-3</sup>。并通过 FEFLOW 软件建立新庄矿区的地下水流数值模型, 求解洛河组含水层的水文地质参数, 得到洛河组上、下段渗透系数分别为 0.55 和 0.45 m/d。通过多种方法对比分析表明, 通过数值模拟法得到的水文地质参数结果与多种解析法计算的结果相近。在此基础上, 根据各方法得出的水文地质参数计算矿井涌水量, 并与实际涌水量进行对比, 结果表明:在含水层上段, 采用数值模拟法得到的水文地质参数计算的涌水量更加接近实际涌水量; 而在洛河组下段, 采用 Jacob 直线图解法得到的水文地质参数计算的涌水量更加接近实际涌水量。进一步提高了水文地质参数计算的准确度, 为后期的含水层富水性研究、矿井涌水量预测以及类似矿区顶板巨厚洛河组砂岩含水层的矿井水防治工作提供依据。

**关键词:** 矿井涌(突)水; 水文地质参数; 抽水试验; 洛河组砂岩

中图分类号: P641

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2024)S1-0174-09

### Solving hydrogeological parameters of thick sandstone based on various analytical and numerical methods

ZHOU Quanchao<sup>1</sup>, LIU Ling<sup>2</sup>, LI Jisheng<sup>1</sup>, YIN Caiyun<sup>1</sup>

(1. Huaneng Coal Technology Research Co., Ltd., Beijing 100070, China; 2. General Prospecting Institute of China National Administration of Coal Geology, Beijing 100039, China)

**Abstract:** In the process of coal mining, accidents such as water inrush in mines can not only cause huge economic losses, but also seriously threaten the safety of workers. Hydrogeological parameters play an important role in calculating the amount of water inflow in mines. Therefore, accurately measuring the hydrogeological parameters of aquifers is of great significance for coal mine water prevention and control work. In order to obtain more practical hydrogeological parameters of the thick sandstone aquifer in the Luohe Formation of the mining area roof, based on the pumping test data of the upper and lower sections of the Luohe Formation sandstone aquifer in Xinzhuang Coal Mine, traditional analytical methods such as Theis formula method, Jacob line diagram method, and water level restoration method for unstable flow were used, and combined with the actual site characteristics, the upper and lower sections of the Luohe Formation sandstone aquifer were calculated. The permeability coefficients of the lower section are 0.22 ~ 0.59 and 0.03 ~ 0.35 m/d respectively;

收稿日期: 2023-05-06

责任编辑: 周子博

DOI: 10.12438/cst.2023-0927

基金项目: 华能集团总部科技资助项目(HNKJ20-H49)

作者简介: 周全超(1991—), 男, 山东菏泽人, 工程师, 硕士。E-mail: 947472097@qq.com

通讯作者: 刘玲(1991—), 女, 辽宁本溪人, 助理工程师, 硕士。E-mail: 569442022@qq.com

The upper section has a hydraulic conductivity coefficient of  $128.74\text{--}373.67\text{ m}^2/\text{d}$ , while the lower section has a conductivity coefficient of  $5.52\text{--}47.07\text{ m}^2/\text{d}$ ; The water storage coefficient of the upper section is  $2.22\times 10^{-4}\text{--}6.69\times 10^{-3}$ , the lower paragraph is  $6.53\times 10^{-5}\text{--}3.29\times 10^{-3}$ . And a numerical model of groundwater flow in the Xinzhuang mining area was established using FEFLOW software to solve the hydrogeological parameters of the Luohe Formation aquifer. The permeability coefficients of the upper and lower sections of the Luohe Formation were obtained to be 0.55 and 0.45m/d, respectively. By comparing and analyzing various methods, it is shown that the hydrogeological parameters obtained through numerical simulation are similar to the results calculated by various analytical methods. On this basis, the mine water inflow was calculated based on the hydrogeological parameters obtained by various methods, and compared with the actual water inflow. The results showed that in the upper section of the aquifer, the hydrogeological parameters calculated using numerical simulation method were closer to the actual water inflow; In the lower section of the Luohe Formation, the hydrogeological parameters calculated using Jacob's line diagram method are closer to the actual water inflow. This further improves the accuracy of hydrogeological parameter calculation, providing a basis for later research on aquifer water abundance, prediction of mine water inflow, and mine water prevention and control work in similar mining areas with thick sandstone aquifers in the Luohe Formation.

**Key words:** mine water inflow (inrush); hydrogeological parameters; pumping test; Luohe Formation sandstone

## 0 引言

煤炭资源是重要的矿产资源之一,从我国能源的天然禀赋来看,在今后相当长的一段时期内,以煤炭资源为主的能源结构不会发生根本改变<sup>[1-3]</sup>。在煤矿开采过程中,矿井涌(突)水等事故不仅会造成巨大的经济损失,还严重威胁工作人员的生命安全,因此,进行矿井涌水量预测对煤矿安全生产有重大意义<sup>[4-5]</sup>。水文地质参数是反映含水层水文地质特征参数,是进行含水层富水性研究、矿井涌水机理研究和矿井涌水量预测的重要参数,对于煤矿含水层涌(突)水风险评价十分重要。用抽水试验数据分析水文地质参数的方法已非常成熟,解析法中有相对比较传统的 Dupuit、Thiem 公式法、直线图解法、恢复水位法等<sup>[6-9]</sup>。数值法包括 FEFLOW、MODFLOW、全程曲线拟合法、以及基于 Matlab 的遗传算法等<sup>[10-14]</sup>。不同的计算方法都有自身的优劣性及适用条件,且都存在计算误差<sup>[15]</sup>,因此需要采用多种不同的方法计算,以确定最接近实际的水文地质参数。然而通过解析法确定水文地质参数需假设含水层几何形状规则、均质各向同性、边界条件单一等,其使用条件较为理想化,难以满足实际复杂水文地质条件下参数反演的要求<sup>[16]</sup>。数值模拟可以模拟各种复杂形状的边界条件和不同的初始条件,且随着计算机技术的发展,各种数值求解方法和模型不断涌现,已经逐渐成为当前求解多孔介质水流运动及溶质运移方程较为有效的办法<sup>[17]</sup>。因此,笔者通过对比分析多种解析法与数值法的计算结果,相互验证所得水文地质参数的准确度,以降低单种方法求解的不确定性。这对于水文地质条件判别、矿井涌水量预测以及煤矿安全开采十分重要。

新庄矿位于鄂尔多斯盆地南部,主要充水含水

层为煤层顶板白垩系洛河组砂岩孔隙裂隙含水层,厚度较大,矿井涌水量大。大量的矿井涌水对矿井采掘带来严重威胁,同时也对地下水造成了破坏。因此,笔者分别采用多种解析法和数值法求解煤层顶板白垩系巨厚洛河组砂岩孔隙裂隙含水层的水文地质参数,如渗透系数  $K$ 、贮水系数  $S$  以及导数系数  $T$  等,对矿区洛河组矿井水防治工作提供宝贵的技术借鉴。

## 1 矿井概况

### 1.1 矿井场地条件

新庄井田位于鄂尔多斯盆地南部,井田内地层序由老至新依次为:侏罗系中统延安组( $J_2y$ )、直罗组( $J_2z$ )、安定组( $J_2a$ ),白垩系下统宜君组( $K_1y$ )、洛河组( $K_1l$ )、环河华池组( $K_1h$ )以及第四系( $Q$ )地层。主采煤层赋存于延安组,岩性为灰、深灰、灰黑色泥岩、泥质粉砂岩、粉砂岩和浅灰、灰白色砂岩,夹煤层及炭质泥岩。常见斜波状层理、缓波状层理、水平层理、递变层理等。富含植物化石及其碎片。煤层底板发育根化石和团块状、不规则状黄铁矿结核,多属后生结核或成岩结核,裂隙中多黄铁矿薄膜。粒度旋回明显,韵律发育。

矿井水文地质条件受矿区及周边矿井水文地质条件影响。西南部 and 南部为泾河,天然条件下为排泄边界。另外,井田内有马莲河由北向南穿过,天然条件下为地下水的排泄边界。被河流切割出露的地段(如环河华池组砂岩水)向河谷排泄,未被切割的深层地下水(如洛河组砂岩水),常常以顶托的方式进行排泄,最终成为地表水的补给来源。

根据地层岩性、含水空间介质类型,煤层以上可划分为 4 个含水层,即第四系孔隙含水层、环河华池

组砂岩裂隙孔隙含水层、洛河组砂岩裂隙孔隙含水层、以及煤层顶板侏罗系砂岩裂隙含水层。其主要充水含水层为煤层顶板白垩系洛河组砂岩孔隙裂隙含水层,岩性主要为中、粗粒砂岩,平均厚度约为 419.58 m。含水层富水性强,单位涌水量大于 1.0 L/(s·m)。地下水循环交替及径流条件普遍较差,随着埋深增大,受岩性、构造及埋藏条件制约,洛河组砂岩地下水系统总体上构成非径流型蓄水构造或储水构造,地下水承压、滞流、矿化度高。深部地下水主要赋存形式为弹性贮存,压力传导和局部渗流是其地下水运动的动力学模式。主要排泄方式为向马莲河和泾河排泄。地下水水化学类型与环河华池组具有明显区别,主要为矿化度 1.14 ~ 6.17 g/L,水化学类型主要为 SO<sub>4</sub>-Na、SO<sub>4</sub>·Cl-Na 及少量 SO<sub>4</sub>·HCO<sub>3</sub>-Na 型。

1.2 抽水试验概况

为获得更准确的水文地质参数等资料,中国煤炭地质总局勘查研究总院于 2022 年 2 月在 X<sub>1</sub> 与 X<sub>2</sub> 孔、X<sub>3</sub> 与 X<sub>4</sub> 孔进行抽水试验。此次抽水试验方式为多孔抽水试验,抽水试验段为洛河组上段、洛河组下段。钻孔参数见表 1,X<sub>1</sub>、X<sub>2</sub> 号孔孔距为 20 m,X<sub>3</sub>、X<sub>4</sub> 号孔孔距为 30 m。

为获得更准确的水文地质参数等资料,对 X<sub>1</sub> 与

表 1 钻孔参数  
Table 1 Drilling parameters

钻孔	孔径/mm	深度/m	钻孔类型
X <sub>1</sub>	445	0 ~ 230.00	抽水孔
	345	230.00 ~ 469.00	
	245	469.00 ~ 742.00	
	152	742.00 ~ 918.65	
X <sub>2</sub>	311	0 ~ 470.00	观测孔
	190	470.00 ~ 742.00	
	152	742.00 ~ 935.41	
X <sub>3</sub>	393	0 ~ 191.00	抽水孔
	345	191.00 ~ 430.00	
	245	430.00 ~ 730.00	
	152	730.00 ~ 893.93	
X <sub>4</sub>	311	0 ~ 423.00	观测孔
	190	423.00 ~ 730.00	
	152	730.00 ~ 886.42	

X<sub>2</sub> 孔、X<sub>3</sub> 与 X<sub>4</sub> 分别进行 3 次落程降深抽水试验,并进行恢复水位观测。其中,第一落程尽机械能力作 1 次最大降深,其余 2 次水位降深分别为最大水位降深值的三分之二和三分之一处,3 次抽水均采用非稳定流抽水,抽水持续与稳定时间见表 2。

表 2 抽水时间表  
Table 2 Pumping schedule h

抽水过程	上段				下段			
	X <sub>1</sub> 与X <sub>2</sub>		X <sub>3</sub> 与X <sub>4</sub>		X <sub>1</sub> 与X <sub>2</sub>		X <sub>3</sub> 与X <sub>4</sub>	
	抽水	稳定	抽水	稳定	抽水	稳定	抽水	稳定
第一次降深	40	10	50	11	49	10	51	10
第二次降深	15	8	17	8	12	8	20	9
第三次降深	29	13	13	9	12	9	12	8

2 解析法及相关结果

2.1 解析法计算方法

利用多孔和单孔在抽水试验场地进行非稳定流抽水试验。抽水含水层近似均质、等厚、侧向无限延伸,且水头损失符合达西定律。分别采用 Theis 公式法或 Jacob 直线图解法以及水位恢复法计算洛河组含水层的水文地质参数。

2.1.1 配线法

非稳定流 Theis 计算公式如下:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \tag{1}$$

$$u = \frac{r^2}{4at} \tag{2}$$

式中: s 为水位降深, m; Q 为抽水井出水量, m<sup>3</sup>/d; T 为导水系数, m<sup>2</sup>/d; W(u) 为泰斯井函数; u 为泰斯井函数自变量; r 为孔径, m; a 为导压系数, m<sup>2</sup>/d; t 为时间, min。

绘制实测降深-时间曲线,平移纵横坐标将其与标准曲线拟合,选取任意匹配点,读取对应坐标值,即可确定有关参数。

2.1.2 Jacob 直线图解法

本次抽水试验的抽水孔径较小,抽水含水层层厚较大,且抽水时间较长,u 值均小于 0.01,因此,除



配线法之外,还可采用 Jacob 直线图解法求解含水层的水文地质参数。Jacob 直线图解法公式如下:

$$s = \frac{2.3Q}{4\pi T} \lg \frac{2.25T}{S} + \frac{2.3Q}{4\pi T} \lg \frac{t}{r^2} \quad (3)$$

式中:  $S$  为贮水系数,无量纲。

绘制  $s$ - $\lg t$  曲线,由于  $s$  与  $\lg t$  成线性关系,根据曲线求出直线段斜率  $i = \frac{2.3Q}{4\pi T} \lg \frac{t}{r^2}$ ,利用  $i$  求出  $T = \frac{2.3Q}{4\pi i}$ ,进一步确定直线公式。根据直线在零降深线上截距  $t_0$  值,求贮水系数  $S = \frac{2.25Tt}{r^2}$  的值<sup>[18]</sup>。

### 2.1.3 水位恢复法

水位恢复法的计算公式如下:

$$s' = \frac{2.3Q}{4\pi T} \lg \frac{t}{t'} \quad (4)$$

式中:  $s'$  为剩余降深,原始水位与停抽后某时刻水位之差, m;  $t'$  为停抽后某时刻与抽水时间之差, min。

在不考虑水头惯性滞后动态的前提下,利用抽水试验水位恢复资料,绘制剩余降深-时间 ( $s'$ - $\lg \frac{t}{t'}$ ) 曲线,由于  $s'$  与  $\lg \frac{t}{t'}$  存在线性关系,根据曲线确定直线段,计算直线斜率  $i = \frac{2.3Q}{4\pi T}$  及直线公式,进而求参数<sup>[19]</sup>。

## 2.2 解析法相关结果

基于不同水位降深的多孔非稳定流抽水试验数据,采用非稳定流 Theis 计算公式法(图1、图2)、Jacob 直线图解法(图3)和水位恢复法(图4)分别求解水文地质参数。

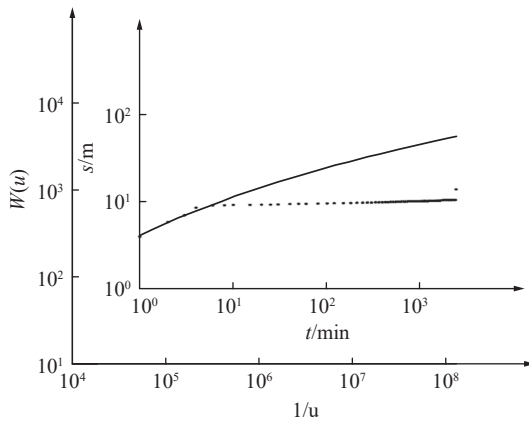
计算结果见表3,通过不同解析法求得的洛河组上段的渗透系数为 0.22 ~ 0.59 m/d,下段为 0.03 ~ 0.35 m/d;上段导水系数为 128.74 ~ 373.67 m<sup>2</sup>/d,下段为 5.52 ~ 47.07 m<sup>2</sup>/d;上段的贮水系数为  $2.22 \times 10^{-4}$  ~  $6.69 \times 10^{-3}$ ,下段为  $6.53 \times 10^{-5}$  ~  $3.29 \times 10^{-3}$ 。

## 3 数值法及计算结果

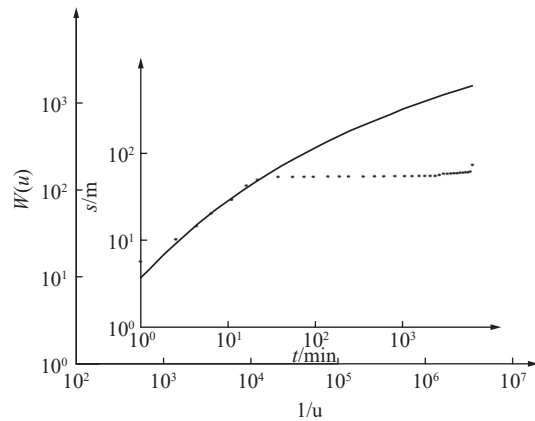
为了更加准确地描述洛河组含水层的水文地质特征,本文利用 FEFLOW 软件对洛河组含水层进行地下水流模拟,并采用抽水试验数据对模型进行校正,进而得到该含水层的最优水文地质参数。

### 3.1 地下水流概念模型

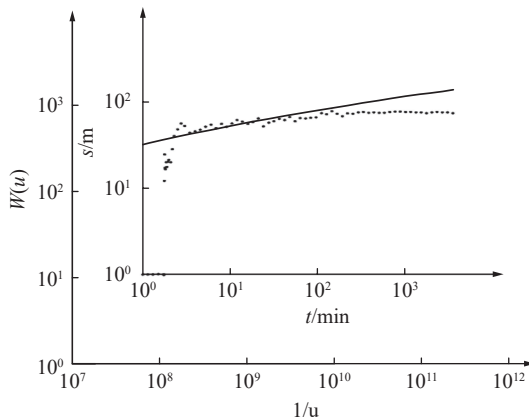
根据洛河组含水层的水文地质条件以及相关的勘探资料,对含水层结构进行概化,由上到下可将含水层概化成两层,洛河组上部岩性以巨厚层状中、粗砂岩为主,细砂岩次之,局部夹少量薄层泥岩,为富水性较强,将此段划分为模型的第一层,厚度约为



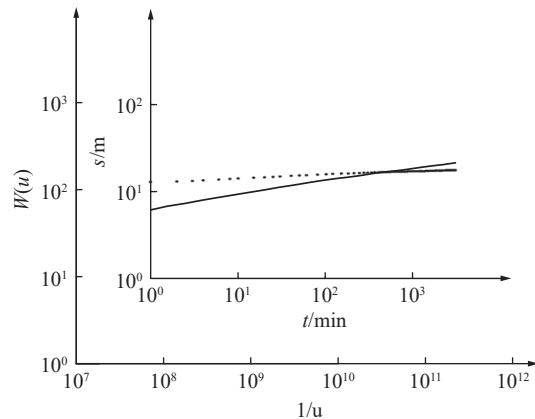
(a)  $X_1$  孔第一次降深  $s$ - $t$  曲线图



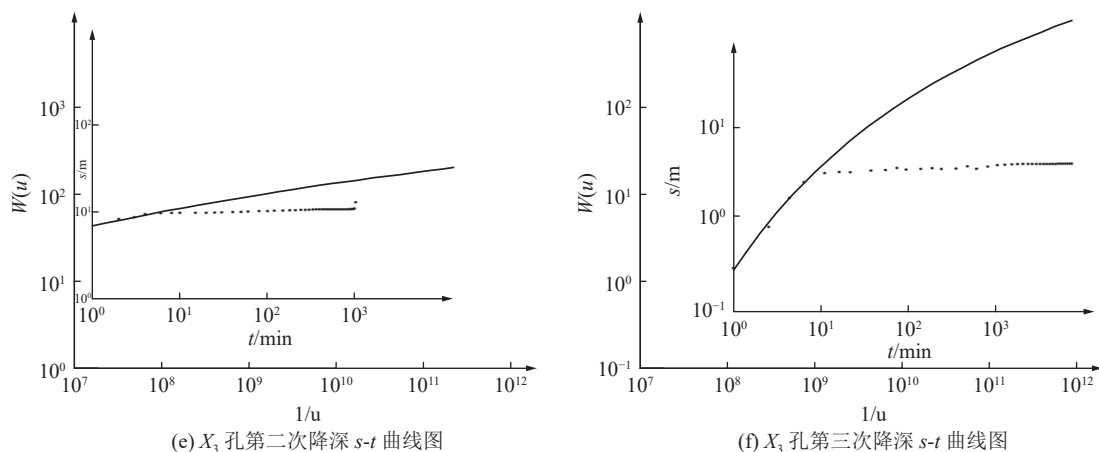
(b)  $X_1$  孔第二次降深  $s$ - $t$  曲线图



(c)  $X_1$  孔第三次降深  $s$ - $t$  曲线图



(d)  $X_3$  孔第一次降深  $s$ - $t$  曲线图

图1 洛河组上段 Theis 公式法  $s$ - $t$  配线图Fig.1 Theis formula method  $s$ - $t$  diagram for the upper section of the Luohe formation

283 ~ 300 m; 下部岩性为砂、泥岩互层, 以薄层砂岩为主, 泥岩层明显增多, 且砂岩类泥质胶结含量增多, 砂岩富水性弱, 具备一定的阻隔水能力, 将此段划分为第二层, 厚度约为 163.93 ~ 176.65 m。

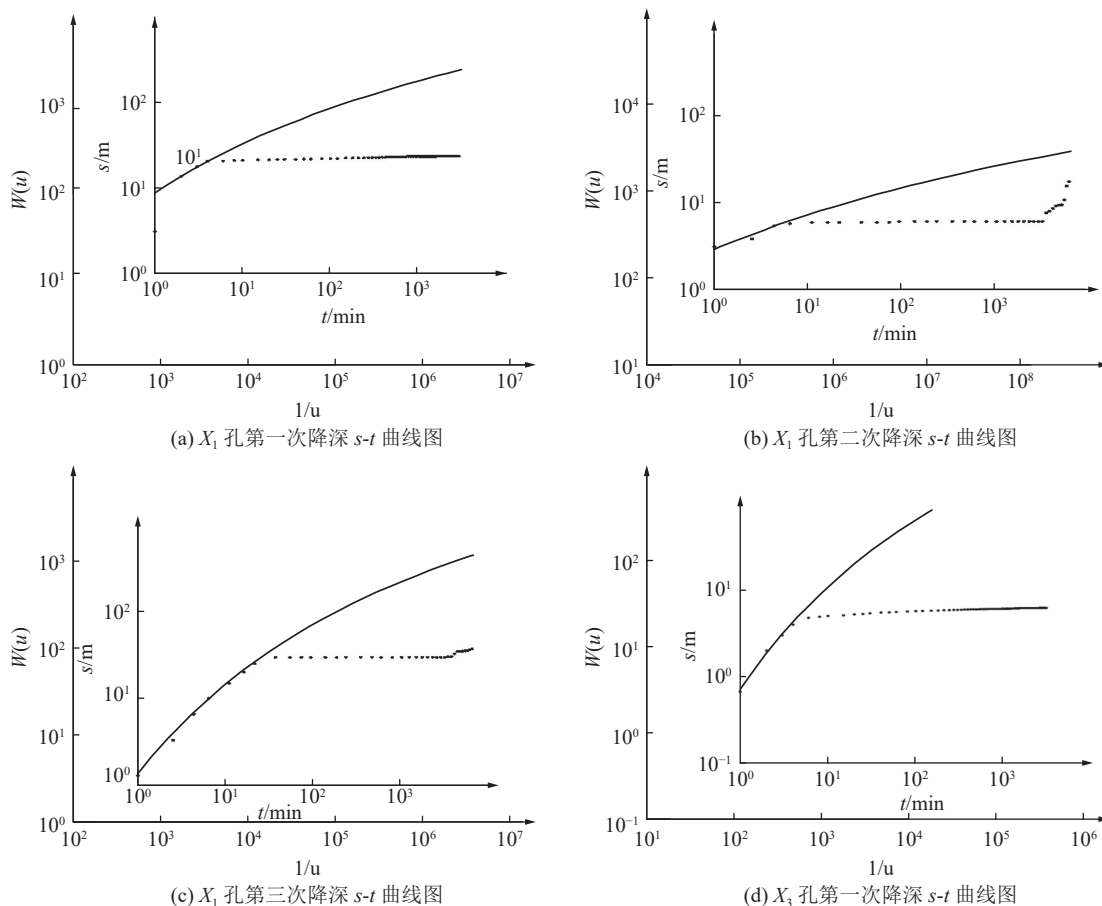
由于含水层的岩性在水平方向上变化较小, 因此将含水层概化为均质、各向同性的介质。通过分析研究区地下水系统的补给、径流及排泄条件, 得出区内承压水的主要补给来源为侧向径流补给, 不考虑降水入渗补给。由于研究区内地下水埋深较深,

故蒸发量忽略不计。排泄项主要为含水层开采量、承压含水层向地表河流排泄量。

### 3.2 地下水流数学模型

根据概念模型, 在不考虑水的密度变化的前提下, 将该模型概化为三维完全承压含水层中的非稳定流数学模型:

$$S \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial \left( K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right)}{\partial x} + \frac{\partial \left( K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right)}{\partial y} + \frac{\partial \left( K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right)}{\partial z} + \varepsilon \quad (5)$$



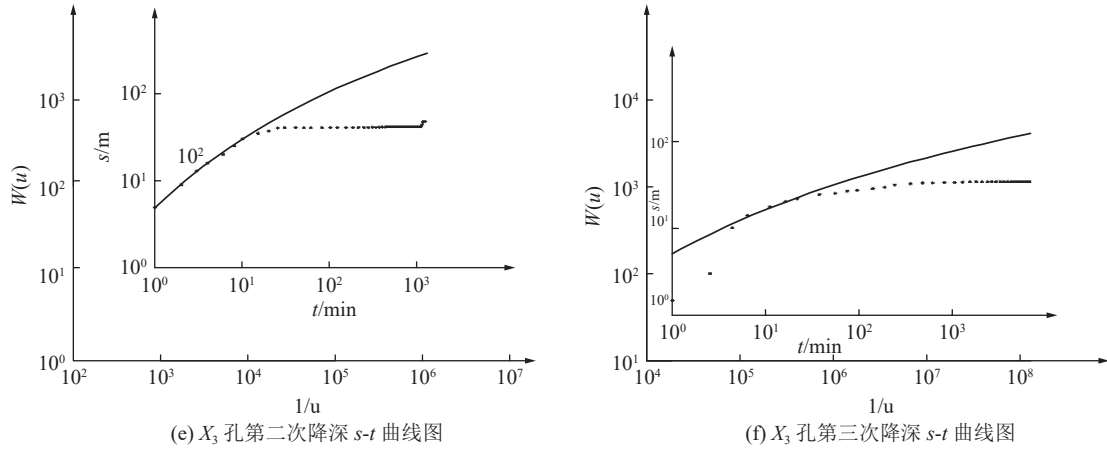
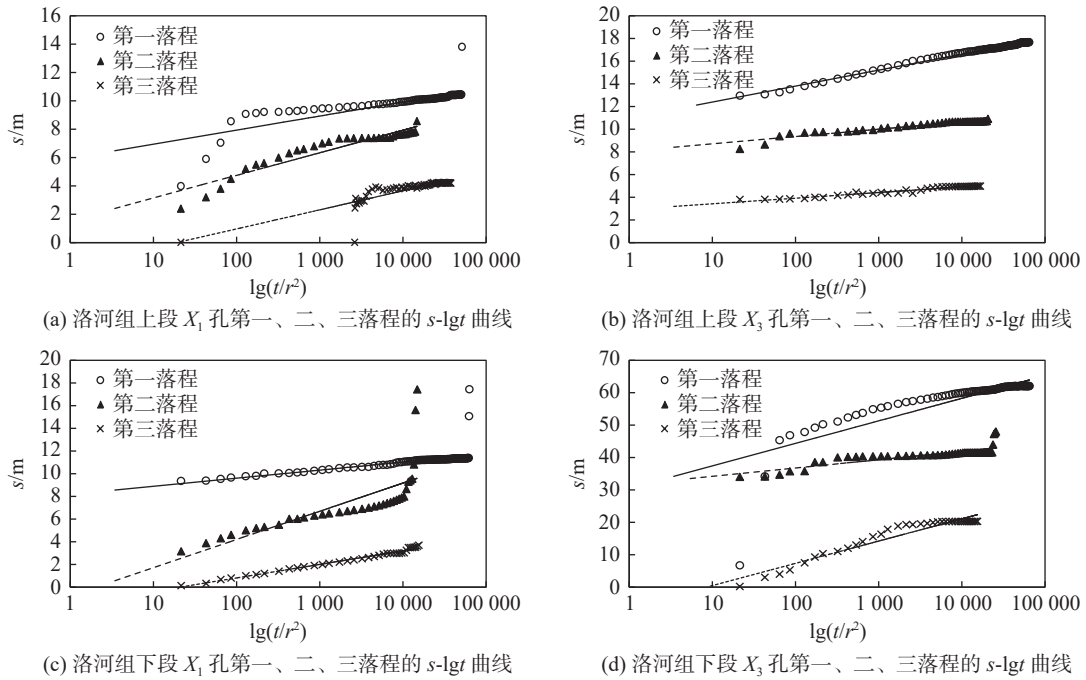
图2 洛河组下段 Theis 公式法  $s$ - $t$  配线图Fig.2 Theis formula method  $s$ - $t$  diagram for the lower section of the Luohe formation

图3 Jacob 直线图解法曲线图

Fig.3 Jacob curve

$$h(x, y, z, t)|_{t=0} = h_0 \quad (6)$$

$$K_n \frac{\partial h}{\partial n} \bigg|_{\Gamma_1} = q(x, y, z, t) \quad (7)$$

$$x, y, z, t \in \Omega \quad t \geq 0 \quad (8)$$

式中;  $h$  为模型的水头高度, m;  $K_x$ 、 $K_y$ 、 $K_z$  分别为  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的渗透系数, m/d;  $\varepsilon$  为模型的源汇项;  $h_0$  为模型的初始水位, m;  $K_n$  为边界面法向方向的渗透系数,  $n$  表示法线方向, m/d;  $\Gamma$  为模拟区域的给定流量边界, 包括模拟区的侧向流量或隔水边界和底部的隔水边界;  $q(x, y, z, t)$  为给定流量边界的单位面积流量, 本文中为隔水边界, 设为 0;  $\Omega$  为地下水系统的模拟区域<sup>[20]</sup>。

### 3.3 地下水流数值模型

根据收集到的矿区地质勘探孔和水文地质孔的统计资料, 以及汇总区域内地理、地质图件中地层高程信息, 根据钻孔数据插值得出含水层的顶底板标高, 将数据导入到模型中, 生成研究区含水层的三维结构模型, 模型在垂向上划分为两层, 以表示洛河组含水层的上、下段, 在横向上采用 Triangle 网格剖分, 共剖分 4 863 个节点和 6 246 个网格单元(图 5)。研究区含水层岩性在水平方向上分布较均匀, 因此横向上不再进行参数分区。选取多孔抽水试验时段为模拟期, 对洛河组含水层进行水文地质参数反演, 采用自动时间步长进行误差迭代控制。

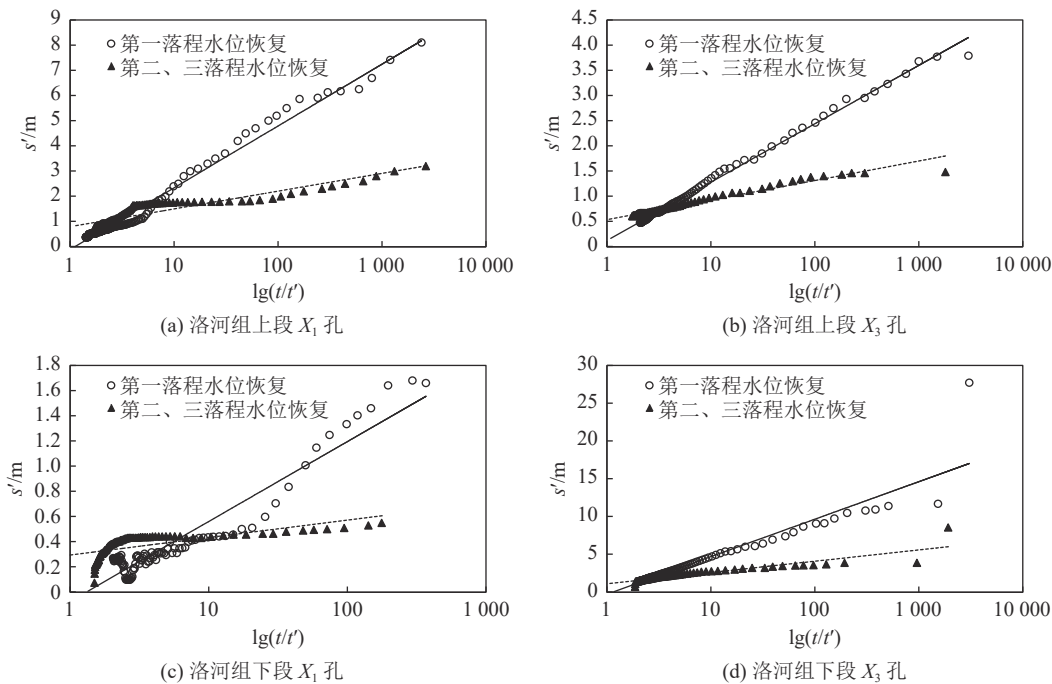


图4 水位恢复法曲线  
Fig.4 Curve chart of water level restoration method

表3 各解析法水文地质参数计算

Table 3 Calculation table of hydrogeological parameters for various analytical methods

含水层 钻孔		渗透系数 $K/(\text{m}\cdot\text{d}^{-1})$			导水系数 $T/(\text{m}^2\cdot\text{d}^{-1})$			贮水系数 $S$		
		Theis公式法	Jacob直线图解法	水位恢复法	Theis公式法	Jacob直线图解法	水位恢复法	Theis公式法	Jacob直线图解法	水位恢复法
上段	$X_1$	0.47	0.4	0.59	297.67	253.34	373.67	$5.57\times 10^{-3}$	$6.69\times 10^{-3}$	$4.28\times 10^{-3}$
	$X_3$	0.27	0.26	0.22	158.00	152.15	128.74	$2.22\times 10^{-4}$	$4.36\times 10^{-4}$	$3.66\times 10^{-4}$
下段	$X_1$	0.35	0.22	0.33	47.07	29.59	44.38	$1.67\times 10^{-3}$	$3.29\times 10^{-3}$	$0.98\times 10^{-3}$
	$X_3$	0.09	0.03	0.04	12.43	4.14	5.52	$7.15\times 10^{-5}$	$8.58\times 10^{-5}$	$6.53\times 10^{-5}$

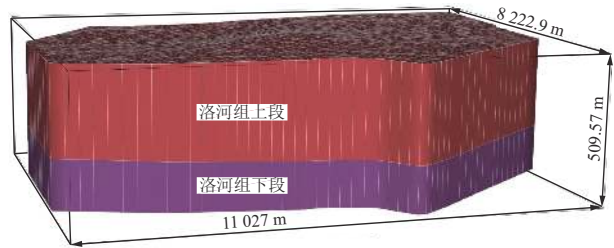


图5 研究区三维数值模型图  
Fig.5 3D numerical model of the study area

3.4 数值法计算结果

模型参数校验主要采用“试错法”进行调整<sup>[21]</sup>。初始流场是将研究区参数初始值输入模型,经过模拟计算得到天然流场,然后根据实际观测水位对天然流场进行参数校正,得到校正后的地下水流场(图6),将模拟值与实际值做拟合(图7),得到其相关系数为0.959 5,模拟值与实际值相比,均方差( $E_{MS}$ )为5.78,均方根误差( $E_{RMS}$ )为2.41,表明模型

基本符合研究区实际水文地质条件,反映了实际流场特征。通过数值法得到的含水层上、下段的渗透系数分别为0.55 m/d和0.45 m/d。

4 解析法和数值法计算结果对比

由表3可以看出,通过不同方法得到的水文地质参数,结果具有差异性。尽管配线法能够充分利用抽水试验的所有观测数据,但由于观测数据的不确定性,使得它的拟合精度较低;此外,配线过程中存在较大的主观性,也会影响计算结果的准确性。尽管Jacob直线图解法和水位恢复法可以有效地抑制配线法的主观性和随机性,但它们也存在着可能因为异常值而导致拟合效果不尽如人意的风险。

水文地质数值模拟法是将含水系统的各要素(水量、热量、盐量、能量)等的收支情况通过数学关系式表达出来,并利用适当的计算机软件对该数学表达式进行求解,在求解过程中一个重要的步骤就



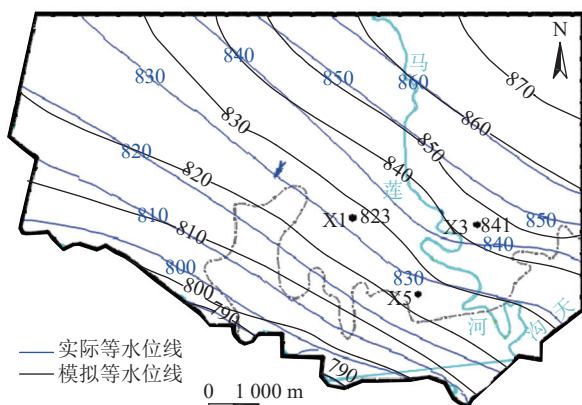


图6 含水层模拟流场与实际流场对比

Fig.6 Comparison of simulated and actual flow fields in aquifers

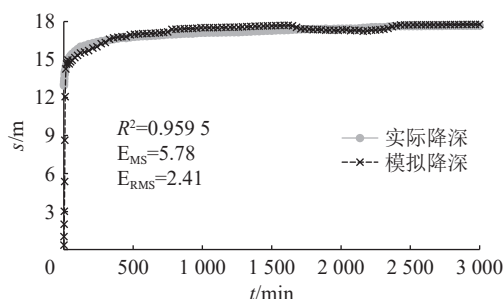


图7 模拟值与实际值拟合图

Fig.7 Fitting diagram of the simulated value and actual value

是对研究单元进行剖分和近似,在此过程中,不可避免的会产生一些计算误差,且系统中各要素相互影响、相互转化又相互制约,众多复杂的随机变量决定了数学模型模拟结果不可能完全反映地下水系统的实际情况<sup>[22]</sup>,导致模拟结果的准确度不足。因此,在求解含水层的水文地质参数时,有必要采用多种方法进行计算,综合分析不同方法计算结果的准确性,结合实际的地质及水文地质条件,提高计算精度,使结果更加符合实际情况,最终确定符合实际的水文地质参数。

根据各方法得到的水文地质参数计算矿井涌水量,与矿井实际涌水量进行对比可知,在含水层上段,采用数值模拟法得到的水文地质参数计算的涌水量更加接近实际涌水量;而在洛河组下段,采用 Jacob 直线图解法得到的水文地质参数计算的涌水量更加接近实际涌水量。因此,笔者认为,在对野外已进行详细勘查并且资料较完备的情况下,通过数值模拟的方法可以获得相对较为准确的水文地质参数,因此,推荐采用数值模拟的方法求取水文地质参数。

## 5 结 论

1) 在本研究中,将洛河组含水层划分为上、下

两段,分别对上段和下段进行了多孔抽水试验,获取了洛河组上、下含水层段的非稳定运动的相关参数,通过不同解析法求得的洛河组上段的渗透系数为 0.22 ~ 0.59 m/d,下段为 0.03 ~ 0.35 m/d;上段导水系数为 128.74 ~ 373.67 m<sup>2</sup>/d,下段为 5.52 ~ 47.07 m<sup>2</sup>/d;上段的贮水系数为  $2.22 \times 10^{-4}$  ~  $6.69 \times 10^{-3}$ ,下段为  $6.53 \times 10^{-5}$  ~  $3.29 \times 10^{-3}$ 。

2) 数值法模拟了多孔非稳定流抽水试验过程中洛河组含水层地下水流的变化过程,通过拟合得到洛河组含水层上、下段的渗透系数分别为 0.55 和 0.45 m/d。

3) 解析法和数值法计算结果的相互验证,有效地提高了水文地质参数计算结果的准确度,为后期的含水层富水性研究、矿井涌水量预测以及类似矿区顶板巨厚砂岩含水层的矿井水防治工作提供依据。

## 参考文献(References):

- [1] 中国科学院能源战略研究组. 中国能源可持续发展战略专题研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2006.  
Energy Strategy Research Group, Chinese Academy of Sciences. Special study on China's energy sustainable development strategy [M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [2] 于小鸽, 刘焱菲, 翟培合. 基于 PCA-AWOA-ELM 模型的矿井突水水源识别 [J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(3): 182-189.  
YU Xiaoge, LIU Yifei, ZHAI Peihe. Identification of mine water inrush source based on PCA-AWOA-ELM model [J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(3): 182-189.
- [3] 吕情绪, 狄军贞, 李果, 等. 高强度采矿活动对地下水影响的数值模拟研究 [J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(5): 193-199.  
LYU Qingxu, DI Junzhen, LI Guo, et al. Numerical simulation study on the impact of high intensity mining activities on groundwater [J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(5): 193-199.
- [4] 张耀辉, 熊祖强, 李西凡, 等. 复杂水文地质条件下矿井水害防治技术研究 [J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(3): 167-174.  
ZHANG Yaohui, XIONG Zuqiang, LI Xifan, et al. Study on technology of mine water disaster prevention and control in underground mine under complex hydrogeological conditions [J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(3): 167-174.
- [5] DU W. JIANG Y. Assessment of water inrush and factor sensitivity analysis in an amalgamated coal mine in China [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2017, 10(21): 1-9.
- [6] 吴家杰, 史丽娜. 非稳定流方法计算水文地质参数 [J]. 西部探矿工程, 2010(1): 140-141.  
WU Jiajie, SHI Lina. Calculation of hydrogeological parameters using the unsteady flow method [J]. Western Exploration Engineering, 2010 (1): 140-141.
- [7] 聂庆林, 高广东, 轩华山, 等. 抽水试验确定承压含水层参数方法探讨 [J]. 水文地质工程地质, 2009, 37(4): 37-41.

- NIE Qinglin, GAO Guangdong, XUAN Huashan, *et al.* Methods of determining parameters of a confined aquifer with pumping tests[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2009, 36(4): 37–40.
- [8] 薛禹群, 朱学愚, 吴吉春, 等. 地下水动力学[M]. 北京: 地质出版社, 1997.
- XUE Yuqun, ZHU Xueyu, WU Jichun, *et al.* *Groundwater Dynamics*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1997.
- [9] 常安定, 李佩成. 用割离井公式反求水文地质参数的直线图解法[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2006, 34(4): 135–138.
- CHANG Anding, LI Peicheng. The flow jacob linear graphic method of converse calculating the hydrogeology parameters with the isolated-well formulas[J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2006, 34(4): 135–138.
- [10] 蒋辉. 基于 Aquifer Test 的抽水试验参数计算方法分析[J]. 水文地质工程地质, 2011, 38(2): 35–38.
- JIANG Hui. An analysis of parameter calculation through pumping tests based on the AquiferTest[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2011, 38(2): 35–38.
- [11] 廖梓龙, 魏永富, 郭中小, 等. 一种基于 MATLAB 的渗透系数确定方法[J]. 水资源与水工学报, 2012, 23(2): 175–178.
- LIAO Zilong, WEI Yongfu, GUO Xiaoxiao, *et al.* A method for determining permeability coefficient based on matlab[J]. *Journal of Water Resources and Hydraulic Engineering*, 2012, 23(2): 175–178.
- [12] YEH H D, HUANG Y C. Parameter estimation for leaky aquifers using the extended Kalman filter, and considering model and data measurement uncertainties[J]. *Journal of Hydrology*, 2005, 302(1-4): 28–45.
- [13] 肖长来, 梁秀娟, 崔建铭, 等. 确定含水层参数的全程曲线拟合法[J]. 吉林大学报(自然科学版), 2005, 35(6): 751–755.
- XIAO Changlai, LIANG Xiujuan, CUI Jianming, *et al.* The whole process curve fitting method for determining aquifer parameters[J]. *Jilin University News (Natural Science Edition)*, 2005, 35(6): 751–755.
- [14] 张楠. 深基坑水文地质参数的确定及降水设计[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(2): 375–379.
- ZHANG Nan. Determination of hydrogeology parameters and dewatering design of deep foundation pit[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2011, 7(2): 375–379.
- [15] 肖长来, 梁秀娟, 王彪, 等. 水文地质学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010.
- XIAO Changlai, LIANG Xiujuan, WANG Biao, *et al.* *Hydrogeology*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010.
- [16] 李磊, 陈干, 唐沛, 等. 基于解析法和数值法反演哈尔滨漫滩区水文地质参数[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(10): 54–59.
- LI Lei, CHEN Gan, TANG Pei, *et al.* Inversion of hydrogeological parameters in Harbin floodplain area based on analytical and numerical methods [J] *Research on Urban Rail Transit*, 2021 24(10): 54–59.
- [17] 刘玲, 魏亚强, 陈坚, 等. 动网格在非饱和-饱和界面数值模拟中的应用研究进展[J]. 地质科技通报, 2023, 42(1): 360–368.
- LIU Ling, WEI Yaqiang, CHEN Jian, *et al.* Research progress on the application of dynamic grids in the numerical simulation of unsaturated-saturated interfaces[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2023, 42(1): 360–368.
- [18] 何俊杰, 王明伟, 王廷国. 地下水动力学[M]. 北京: 地质出版社, 2009.
- HE Junjie, WANG Mingwei, WANG Tingguo. *Groundwater dynamics*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2009.
- [19] 赵琳琳, 肖长来, 陈昌亮, 等. 基于抽水试验的多种方法确定水文地质参数[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(2): 306–309.
- ZHAO Linlin, XIAO Changlai, CHEN Changliang, *et al.* Determination of hydrogeological parameters by a variety of methods based on the pumping test[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2015, 11(2): 306–309.
- [20] DIERSCH H J G, PERROCHET P. On the primary variable switching technique for simulating unsaturated-saturated flows[J]. *Advances in Water Resources*, 1999, 23(3): 271–301.
- [21] 刘玲, 陈坚, 牛浩博, 等. 基于 FEFLOW 的三维土壤-地下水耦合铬污染数值模拟研究[J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(1): 164–174.
- LIU Ling, CHEN Jian, NIU Haobo, *et al.* Numerical simulation of three-dimensional soil-groundwater coupled chromium contamination based on FEFLOW[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(1): 164–174.
- [22] 于炳义, 杜绍敏, 李学成. 水文地质数值模拟问题的讨论[J]. 黑龙江水专学报, 2002, 29(2): 14–16.
- YU Bingyi, DU Shaomin, LI Xuecheng. Discussion on Numerical Simulation of Hydrogeology[J] *Journal of Heilongjiang Water Conservancy College*, 2002, 29(2): 14–16.