

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.01.013

# 基于 KELM 的趵突泉泉域地下水流替代模型

王子健<sup>1</sup>, 骆乾坤<sup>1</sup>, 李迎春<sup>2</sup>, 刘鑫<sup>1</sup>, 邓亚平<sup>1</sup>, 钱家忠<sup>1</sup>

(1. 合肥工业大学 资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 安徽省公益性地质调查管理中心, 安徽 合肥 230092)

**摘要:**文章以济南市趵突泉泉域为研究区,采用核极限学习机(kernel extreme learning machine, KELM)建立泉域地下水流数值模型的替代模型,使用拉丁超立方抽样(Latin hypercube sampling, LHS)方法确定 60 组地下水开采方案用于训练 KELM 模型,通过对比地下水流数值模型的模拟结果与替代模型输出的结果,评价所建立替代模型的性能。结果表明:替代模型输出的地下水位值与地下水流数值模型模拟得到的地下水位值基本接近,且模型的运行时间减少了约 99.62%。说明该模型可作为趵突泉泉域地下水流数值模型的替代模型,可提高区域地下水优化管理模型的求解效率。

**关键词:**地下水数值模拟;趵突泉泉域;替代模型;核极限学习机(KELM);拉丁超立方抽样(LHS)

**中图分类号:**P641.8 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2025)01-0085-07

## Alternative model of groundwater flow in Baotu Spring area based on KELM

WANG Zijian<sup>1</sup>, LUO Qiankun<sup>1</sup>, LI Yingchun<sup>2</sup>, LIU Xin<sup>1</sup>, DENG Yaping<sup>1</sup>, QIAN Jiazhong<sup>1</sup>

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Public Geological Survey Management Center of Anhui Province, Hefei 230092, China)

**Abstract:** In this paper, the Baotu Spring area in Jinan City is used as the study region to establish a regional groundwater flow numerical simulation model. Based on this, the kernel extreme learning machine (KELM) is used to develop an alternative model to the numerical model of groundwater flow in the spring area. The Latin hypercube sampling (LHS) method was used to obtain 60 sets of groundwater extraction scenarios for training the KELM model. The performance of the developed alternative model was evaluated by comparing the simulation results of the numerical model with the output of the alternative model. The results show that the groundwater levels output by the alternative model are basically close to those obtained from the simulation of the numerical model, and the running time of the alternative model is reduced by about 99.62%, indicating that the KELM model can be used as an alternative model to the numerical model of the groundwater flow in the Baotu Spring area to improve the efficiency of solving the regional groundwater optimal management model.

**Key words:** groundwater numerical simulation; Baotu Spring area; alternative model; kernel extreme learning machine (KELM); Latin hypercube sampling (LHS)

## 0 引言

泉水作为天然的地下水排放点,是构成区域水资源的重要部分<sup>[1]</sup>。一些泉水(如娘子关泉、银泉、月牙泉等)具有独特的自然景观和历史价值,

是重要的旅游资源,为当地带来了不可估量的经济效益<sup>[2]</sup>。然而,由于日益增加的人类活动的影响以及缺乏科学有效的水资源管理,全球范围内许多泉水都面临着干涸的风险<sup>[3-4]</sup>。

济南素有“泉城”的美誉,以趵突泉为代表的

收稿日期:2023-02-10;修回日期:2023-03-02

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2022YFC3702204);安徽省自然科学基金资助项目(JZ2022AKZR0451)

作者简介:王子健(1998—),男,安徽凤阳人,合肥工业大学硕士生;

骆乾坤(1984—),女,河北石家庄人,博士,合肥工业大学副研究员,硕士生导师,通信作者,E-mail:QKLuo@hfut.edu.cn;

钱家忠(1968—),男,安徽凤阳人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师。

泉群不仅是济南市重要的水资源<sup>[5-6]</sup>,更是济南旅游业发展的主要动力。然而,由于对地下水的过度开采,自 1972 年以来,济南泉群面临着日益严重的干涸问题<sup>[7]</sup>。为了解决这一问题,当地政府做了诸多努力,包括提出泉水保护计划(如人工回灌补给、引黄河水灌溉等)以及发布保护泉水的政策法规<sup>[8-9]</sup>。因此,如何保证趵突泉等泉水的持续喷涌是一项具有重要意义的研究课题,国内学者已经做了一些相关研究<sup>[6,10-11]</sup>。而地下水资源的优化管理被视为解决这一问题的有效途径。

地下水资源优化管理的常用方法是建立研究区地下水的模拟-优化模型并进行数值求解。通常模拟-优化模型由 2 部分组成,其中,模拟模型被用于模拟含水介质中地下水的物理过程(如水流流动、污染物运移等),进而获得优化模型所需的变量(如地下水位、污染物浓度等)。优化模型通常由目标函数和约束条件组成,其核心思想是在由约束条件和先验范围提供的变量取值空间内最大化或最小化目标函数,从而达到寻优的目的。文献[6]建立基于模拟-优化方法的趵突泉泉域地下水多目标优化管理模型,对泉域内地下水井的开采量进行优化,得到的开采方案可以在不影响泉水正常喷涌的前提下开采更多的地下水资源。然而,优化模型多采用进化算法进行求解,在寻优过程中需要对模拟模型进行反复调用,由此带来的巨大计算负担已经成为阻碍模拟优化方法在地下水优化管理领域推广应用的瓶颈<sup>[12]</sup>。

替代模型的出现和应用为解决优化求解过程中大量运行模拟模型所产生的巨大计算负荷问题提供了一种可行的方法。以模拟模型为基础,对替代模型进行合理训练后,可以使其在功能上有效地逼近模拟模型<sup>[13]</sup>。用替代模型取代模拟模型,用于优化模型的迭代求解,可以在保证求解准确性的同时大幅度减少计算量,提高模拟-优化模型的计算效率<sup>[14]</sup>。在地下水的相关领域,建立替代模型的方法主要包括克里金法<sup>[15]</sup>、人工神经网络<sup>[16]</sup>、支持向量机<sup>[17]</sup>、核极限学习机(kernel extreme learning machine, KELM)<sup>[18]</sup>等。其中, KELM 模型具有极强的泛化能力,在学习速度方面也有显著优势,适用于处理复杂的线性回归问题<sup>[19]</sup>。

本文以济南市趵突泉泉域地下水模拟模型的替代模型为研究对象。首先根据现有资料,对泉域的地质、水文地质条件进行概化,建立趵突泉泉域地下水数值模拟模型。然后,以开采井的

开采量为输入变量,以地下水位值为输出变量,基于 KELM 模型建立模拟模型的替代模型;同时,使用拉丁超立方抽样(Latin hypercube sampling, LHS)方法获得足够多的样本数据用于训练替代模型。最后通过对比模拟模型和替代模型的输出结果,评估所建立的替代模型的性能,为趵突泉泉域地下水资源优化管理提供模型基础。

## 1 研究方法

### 1.1 地下水流模拟模型

一般来说,使用地下水流模拟模型计算地下水资源优化管理模拟优化模型中的状态变量(在本研究中为地下水位)。本文使用地下水建模软件(groundwater modeling system, GMS)建立趵突泉泉域的水文地质概念模型,使用软件内置的三维有限差分地下水模拟模块 MODFLOW 求解地下水流动方程。

### 1.2 KELM 模型

KELM 模型是对极限学习机(extreme learning machine, ELM)模型的改进。传统的 ELM 模型由输入层、隐含层和输出层组成<sup>[20]</sup>。KELM 模型定义了一个核函数,以此来代替 ELM 模型的隐含层映射,其在拟合能力和泛化能力方面均显著强于 ELM 模型<sup>[21]</sup>。

本文在建立 KELM 模型时使用了高斯核函数。给定  $n$  个训练样本  $(x_i, y_i), i=1, 2, \dots, n$ , 高斯核函数表示为:

$$K(x_i, x_j) = \exp\left(-\frac{\|x_i - x_j\|^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

其中:  $\sigma > 0$ , 表示核函数的带宽;  $j=1, 2, \dots, n$ 。

KELM 的核矩阵定义为:

$$\mathbf{K}_{\text{KELM}} = \mathbf{M}\mathbf{M}^T \quad (2)$$

$$K_{\text{KELM}(i,j)} = \mathbf{m}(x_i)^T \mathbf{m}(x_j) = K(x_i, x_j) \quad (3)$$

其中:  $\mathbf{M}$  为样本输入在特征空间中的映射矩阵;  $\mathbf{m}(x_i)$  为  $x_i$  映射后的特征向量。

结合式(2)、式(3), KELM 输出函数为:

$$f(x) = \mathbf{m}(x)^T \mathbf{M}^T \left( \mathbf{M}\mathbf{M}^T + \frac{\mathbf{I}}{C} \right)^{-1} \mathbf{L} = \begin{bmatrix} K(x, x_1) \\ \vdots \\ K(x, x_N) \end{bmatrix}^T \left( \mathbf{K}_{\text{KELM}} + \frac{\mathbf{I}}{C} \right)^{-1} \mathbf{L} \quad (4)$$

其中:  $\mathbf{I}$  为单位矩阵;  $C$  为正则化系数;  $\mathbf{L} = [y_1 \ y_2 \ \dots \ y_n]^T$ 。

### 1.3 LHS 方法

替代模型的精度和性能在很大程度上受用于

训练模型的样本数据的选取方法的影响<sup>[22]</sup>。LHS 是分层抽样的一种,其核心思想是对输入变量的先验范围进行分层<sup>[23]</sup>。在抽样过程中,通过使用采样点覆盖所有的采样区域,LHS 可以有效地提高样本对变量先验范围的覆盖率,可以更好地反映变量的整体分布。一般来说,对多变量问题的 LHS 采样过程分为以下 2 个步骤。

1) 分层抽样。根据需要的样本数量(假设为  $N$ )对各个变量的先验范围进行分区,每个分区的概率是相等的。对于每个变量,在其  $N$  个分区中各随机选择一个样本点,共计  $N$  个采样值。

2) 打乱排序。将各变量的  $N$  个采样值进行重新排序并组合得到样本数据集。若两变量之间是相互独立的,则数据集中这两变量的采样值的相关性应尽可能小。

此外,在使用 LHS 方法时,需要遵循 2 个原则:① 变量在各个分区内的样本点的选择是随机的;② 一个分区只能抽取一个样本点。

## 2 趵突泉泉域地下水流数值模拟

### 2.1 研究区概况

趵突泉泉域位于山东省济南市,泉域范围如图 1 所示。根据以往的研究资料<sup>[10-11]</sup>确定南部边界为地表分水岭,火成岩岩体和石炭、二叠系地层共同构成了北部边界;泉域的东、西边界分别为东坞断裂和马山断裂,泉域面积约为 1 486 km<sup>2</sup>。地势上,南部山区海拔 500~600 m,北部平原海拔 25~50 m,总体趋势为南高北低。济南是典型的暖温带大陆性季风气候,为半干旱半湿润地区。年平均降水量约为 648 mm<sup>[24]</sup>,受季风影响,降水分布表现出较为明显的季节性,全年 70% 以上的降水集中在 6—9 月份。同时,降水自西北向东南递增,北部平原降水相对较少,空间分布不均。泉域内主要河流有黄河、小清河、玉符河、北沙河等,大气降水是区内河川径流的主要补给来源。

泉域总体上为单斜构造,地层南老北新,出露的地层包括寒武系、奥陶系、第四系沉积岩以及前震旦系变质岩。研究区内发育有多条断裂,规模较大的有 3 个,除作为泉域东西边界的 2 处断裂外,泉域内还存在千佛山断裂,位置如图 1 所示,3 处断裂的大致走向均为北北西。

泉域主要含水层为第四纪多孔介质含水层和寒武系—奥陶系裂隙岩溶含水层。第四纪多孔含水层主要分布在玉符河和北沙河冲积扇中,含水层厚度为 10~30 m<sup>[10-11,25]</sup>。寒武系—奥陶系裂

隙岩溶水在裂隙与岩溶连接良好的地区较为丰富。

泉域最重要的补给是大气降水。在寒武系和奥陶系岩石占优势的南部山区,地下水主要受降水入渗的补给<sup>[10-11,24]</sup>。其他补给来源包括河流渗漏、水库渗漏和侧向径流。地下水流向大致为 SE—NW,在地形和断层的影响下,当地下水流到达研究区北部时,由于火成岩的阻挡,水流向上流动到达地表,形成趵突泉、黑虎泉等泉系(图 1)。研究区地下水系统的主要排泄方式包括泉、抽取地下水以及浅层地下水的蒸发。

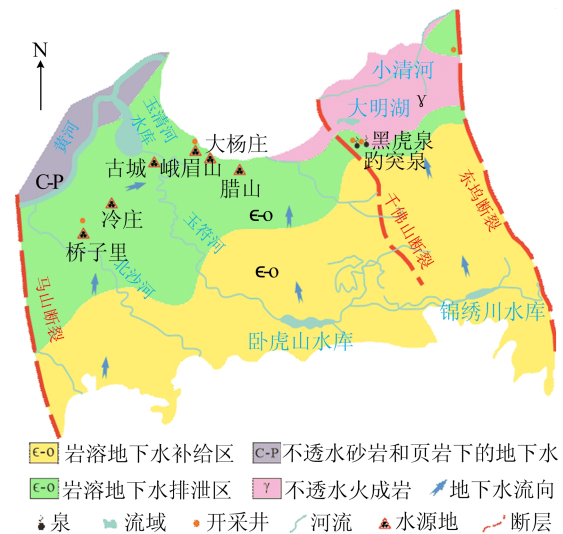


图 1 趵突泉泉域水文地质图

### 2.2 水文地质概念模型和数学模型

本文使用的数值模型是在文献<sup>[6]</sup>研究的基础上建立的。泉域所在的水文地质单元的范围与研究区的范围一致,即以东坞断裂、马山断裂为东西边界,以南部分水岭为南部边界,以北部火成岩为北部边界。根据水文地质条件,将泉域的含水层概化为 3 层:第 1 层为潜水含水层,其主要组成成分为第四系的松散沉积物;第 2 层为第四系的黏土,可视作相对隔水层;第 3 层覆盖整个研究区,为裂隙岩溶含水层。

3 个含水层的范围和位置如图 2 所示,其中第 2 层与第 1 层的平面范围一致。图 2 给出了 3 个含水层的边界条件及水文地质参数分区<sup>[11,24]</sup>,数字代表分区编号。降雨入渗补给系数的分区以地层的出露情况为依据,根据以往的研究资料<sup>[26]</sup>,将泉域的出露地层分为城镇建筑区、第四系区、奥陶系裸露区、奥陶系隐伏区、寒武系崮山—长山组裸露区、寒武系崮山—长山组隐伏区、

寒武系张夏组裸露区、寒武系张夏组隐伏区 8 类, 降雨入渗补给系数分别设置为 0.001、0.300、

0.450、0.380、0.330、0.150、0.010、0.010, 详细的分区情况如图 3 所示。

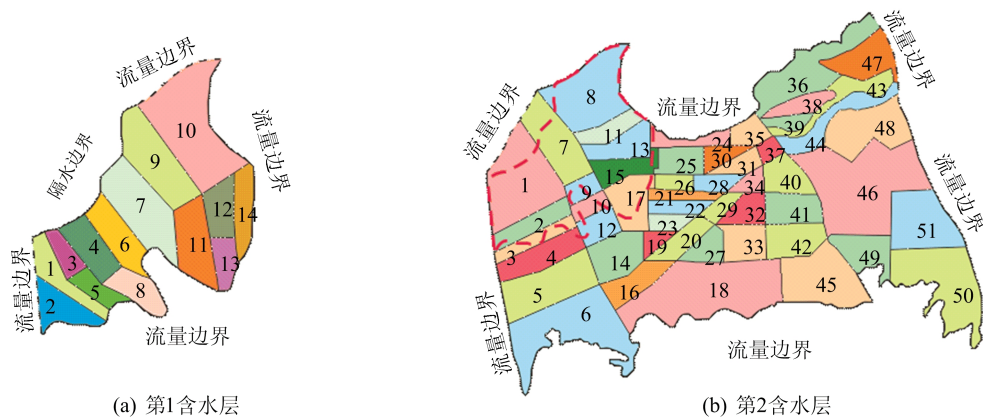


图 2 水文地质参数分区和边界条件

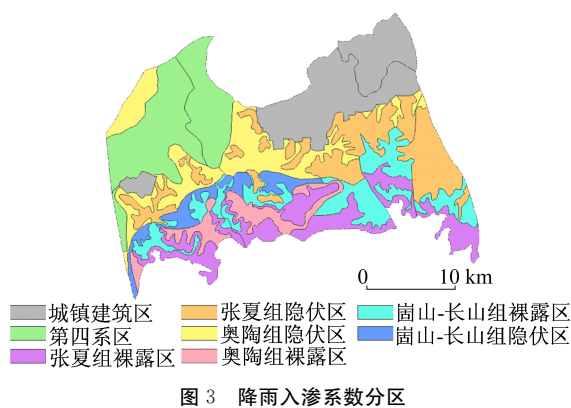


图 3 降雨入渗系数分区

研究区地下水源汇项包括入渗补给量、地下水回灌量、泉出流、蒸散发、侧向径流量以及地下水开采量。本文将地下水开采量作为替代模型的输入变量, 保持其余源汇项不变。

使用等效多孔介质模型对研究区含水介质进行概化, 研究区地下水流为非均质各向异性三维非稳定流。因此, 泉域的地下水数学模型具体表达式为:

$$\left\{ \begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} h \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy} h \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \\ & \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zz} h \frac{\partial H}{\partial z} \right) + W = \mu^* \frac{\partial H}{\partial t}, \quad x, y, z \in \Omega, t \geq 0; \\ & H(x, y, z, 0) = H_0, \quad x, y, z \in \Omega; \\ & K_n \frac{\partial H}{\partial n} \Big|_{\Gamma_1} = 0, \quad x, y, z \in \Gamma_1, t \geq 0; \\ & \frac{h_r - H}{\sigma} = K_n \frac{\partial H}{\partial n} \Big|_{\Gamma_2}, \quad x, y, z \in \Gamma_2, t \geq 0 \end{aligned} \right. \quad (5)$$

其中:  $K_{xx}$ 、 $K_{yy}$ 、 $K_{zz}$  分别为  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的渗透系数;  $H_0$  为水位标高;  $W$  为源汇项;  $\mu^*$  为给水度或

储水系数;  $\Omega$  为渗流区域;  $H$  为初始水位;  $K_n$  为边界法向方向的渗透系数;  $n$  为边界的法向方向;  $\Gamma_1$ 、 $\Gamma_2$  分别为渗流区的隔水边界、混合边界;  $\sigma$  为混合边界的厚度;  $h_r$  为混合边界的外界水头。

### 2.3 模型识别和验证

使用 GMS 中内置的三维有限差分地下水模拟模块 MODFLOW 对式(5)中的数学模型进行数值求解。采用快速和谐搜索算法(fast harmony search, FHS)进行参数(渗透系数、给水度、贮水系数)的识别<sup>[6, 27-28]</sup>。识别结果见文献[28]。

## 3 趵突泉泉域地下水替代模型

### 3.1 建立替代模型

在建立好的数值模拟模型基础上, 选择源汇项中开采井的开采量为替代模型的输入变量。研究区内有 5 口开采井, 开采井的位置如图 1 所示。5 口开采井在 4 个模拟应力期内都设置了相应的开采量, 即替代模型的输入变量有 20 个。在数值模拟模型中, 每口井中不同应力期内设置的真实开采量见表 1 所列。

表 1 真实开采量 单位:  $m^3/d$

井号	应力期 1	应力期 2	应力期 3	应力期 4
1	20 140.80	2 157.11	0	0
2	3 754.83	1 865.00	2 059.67	2 032.50
3	0	0	12 746.96	924.91
4	193.67	823.78	17 261.56	1 959.33
5	6 342.89	5 307.78	785.78	0

假设开采量符合均匀分布, 根据经验确定开采量的先验范围上、下限分别为真实值的 110%、

90%,输入变量具体范围见表 2 所列。

建立替代模型的步骤如下:

1) 抽取开采量样本数据。已有研究表明过多的训练样本并不会提高替代模型的精度。经过综合考虑,本文使用 LHS 方法在开采量先验范围内抽取训练样本 60 组,作为替代模型的输入值。

2) 运行模拟模型。分别将 60 组训练样本代入数值模拟模型中,得到 2012 年 10 月 1 日至 2013 年 9 月 30 日(为一个完整的水文年且具有质量较好的地下水位观测数据)内趵突泉和黑虎

泉的水位模拟值。

3) 编写替代模型程序并对其进行训练。采用 Python 语言编写 KELM 模型程序,利用训练样本和对应的地下水位数据对所构建的替代模型进行训练。

4) 检验模型。在输入变量先验范围内利用 LHS 方法重新抽取 20 组检验样本,重复步骤 2) 中操作得到对应的地下水位值,利用步骤 3) 中训练完成的替代模型和重新抽取的样本数据得到另一组地下水位值,并与数值模拟模型的模拟结果进行比较,评估替代模型的精度。

表 2 开采量的先验范围

单位:m<sup>3</sup>/d

井号	应力期 1	应力期 2	应力期 3	应力期 4
1	[18 162.70,22 154.80]	[1 941.40,2 372.82]	[0,10]	[0,10]
2	[3 379.35,4 130.32]	[1 853.70,2 051.50]	[1 853.70,2 265.63]	[1 829.25,2 235.75]
3	[0,10]	[0,10]	[11 472.26,14 021.65]	[832.42,1 017.40]
4	[174.30,213.03]	[741.40,903.16]	[15 535.40,18 987.71]	[1 763.40,2 155.27]
5	[5 708.60,6 977.18]	[4 777.00,5 838.56]	[707.20,864.36]	[0,10]

### 3.2 替代模型的性能评估

通常采用相关性系数  $R^2$  和均方根误差  $E_{RMSE}$ 、中央处理器 (central processing unit, CPU) 计算时间 3 个指标对各替代模型的性能进行评价。 $R^2$  是描述两变量相关性的指标,一般来说,在大尺度范围内  $R^2 > 0.7$  时,认为模型有较好的逼近精度。 $E_{RMSE}$  是反映模型预测误差大小的指标,其值越接近于 0,模型越准确。CPU 计算时间用来衡量模型的计算时效性,用时越少,计算时效性越高。 $R^2$  和  $E_{RMSE}$  的计算公式为:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (m_i - \hat{m}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (m_i - \bar{m})^2} \quad (6)$$

$$E_{RMSE} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (m_i - \hat{m}_i)^2 / n} \quad (7)$$

其中: $m_i$  为数值模型输出的地下水位值; $\hat{m}_i$  为替代模型输出的地下水位值; $\bar{m}$  为替代模型输出的地下水位值的均值; $n$  为检验样本数量。

使用数值模拟模型输出的地下水位值,分别对趵突泉和黑虎泉建立 KELM 替代模型。对两口泉建立的替代模型的评价指标结果进行评价,结果见表 3 所列。

从表 3 可以看出,趵突泉和黑虎泉替代模型输出的地下水位值与数值模型模拟得到的地下水位值的  $R^2$  均大于 0.78,并且  $E_{RMSE}$  均处于较小的

水平,说明基于 KELM 模型建立的地下水流模拟模型的替代模型在地下水位输出结果上在很大程度上接近模拟模型,具有较好的模拟精度。

表 3 替代模型评价指标结果

泉名	$R^2$	$E_{RMSE}/m$
趵突泉	0.782 324	0.009 520
黑虎泉	0.850 219	0.013 133

在检验样本中随机选取 1 组数据,对数值模拟模型的模拟结果和替代模型的输出值进行对比,结果如图 4 所示。从图 4 可以看出,对趵突泉和黑虎泉建立的替代模型输出的地下水位值与泉域地下水数值模型模拟得到的两处泉水处的地下水位值的变化趋势吻合度很高。替代模型与模拟模型在趵突泉和黑虎泉处的最大绝对误差分别为 0.112 3、0.091 9 m。因此,本文基于 KELM 模型建立的替代模型可以建立泉域地下水开采量到地下水位映射关系。

此外,在同一台计算机上运行一次模拟模型和基于 KELM 的替代模型所需的时间分别为 159.00、0.61 s,使用替代模型可减少约 99.62% 的 CPU 计算时间。因此,本文基于 KELM 建立的趵突泉域地下水流数值模拟模型的替代模型具有很高的求解效率,可望在一定程度上突破模拟优化方法求解复杂大区域水资源管理相关问题的

计算瓶颈。

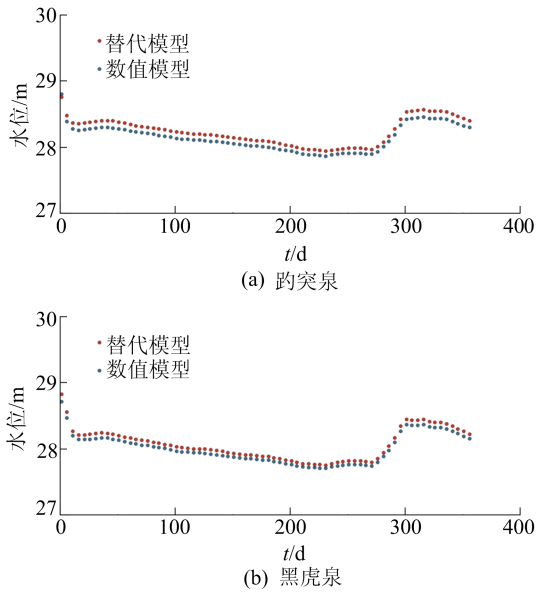


图 4 替代模型输出水位值与数值模型输出水位值对比

## 4 结 论

本文在趵突泉泉域地下水数值模拟模型的基础上,以地下水开采量为输入变量,以趵突泉和黑虎泉地下水位值为输出变量,使用 KELM 建立泉域地下水数值模拟模型的替代模型。通过比较地下水数值模型和 KELM 替代模型输出的地下水位值及两模型的 CPU 计算时间,验证了 KELM 替代模型的有效性和高效性。研究结果可为突破传统模拟优化方法求解趵突泉泉域水资源优化管理问题时的计算瓶颈提供新的思路,为求解研究区相关的优化模型提供基础。

### [参 考 文 献]

- [1] ROSSI P M, MARTTILA H, JYVÄSJÄRVI J, et al. Environmental conditions of boreal springs explained by capture zone characteristics[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 531:992-1002.
- [2] GHOSH D K, WANG D, BILSKIE M V, et al. Quantifying changes of effective springshed area and net recharge through recession analysis of spring flow[J]. *Hydrological Processes*, 2016, 30(26):5053-5062.
- [3] AGARWAL A, BHATNAGA N K, NEMA R K, et al. Rainfall dependence of springs in the midwestern himalayan hills of uttarakhand[J]. *Mountain Research and Development*, 2012, 32(4):446-455.
- [4] DASS B, ABHISHEK, SEN S, et al. Assessment of spring flows in Indian Himalayan micro-watersheds; a hydro-geological approach[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 598:126354.
- [5] CHEN Y, SHU L C, LI H, et al. Identification of preferential recharge zones in karst systems based on the correlation between the spring level and precipitation; a case study from Jinan spring basin[J]. *Water*, 2021, 13(21):3048.
- [6] LUO Q K, YANG Y, QIAN J Z, et al. Spring protection and sustainable management of groundwater resources in a spring field[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 582:124498.
- [7] LIU X M, HU L T, SUN K N. Analysis of spring flow change in the Jinan city under influences of recent human activities[J]. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 2018, 379:263-268.
- [8] WANG X Q, WANG C X, WANG B T, et al. Protection of urban features during urbanization based on the roles of springs in Jinan [J]. *Chinese Journal of Population Resources and Environment*, 2017, 15(2):93-102.
- [9] WU Q, XU H. A three-dimensional model and its potential application to spring protection[J]. *Environmental Geology*, 2005, 48(4):551-558.
- [10] QIAN J Z, ZHAN H B, WU Y F, et al. Fractured-karst spring-flow protections: a case study in Jinan, China[J]. *Hydrogeology Journal*, 2006, 14(7):1192.
- [11] KANG F X, JIN M G, QIN P R. Sustainable yield of a karst aquifer system: a case study of Jinan springs in northern China[J]. *Hydrogeology Journal*, 2011, 19(4):851-863.
- [12] 杨蕴, 宋健, 朱琳, 等. 基于 KELM 地面沉降替代模型的地下水多目标管理模型研究[J]. *南京大学学报(自然科学)*, 2019, 55(3):349-360.
- [13] ZHOU Z H, WU J X, TANG W. Ensembling neural networks; many could be better than all[J]. *Artificial Intelligence*, 2002, 137(1/2):239-263.
- [14] 李小兰, 曾献奎, 王栋, 等. 基于优化自适应稀疏网格替代模型的地下水模拟参数不确定性分析[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2022, 52(4):1234-1243.
- [15] 张双圣, 刘汉湖, 强静, 等. 地下水污染监测井优化设计及污染源识别[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2019, 46(6):120-132.
- [16] CHEN C W, WEI C C, LIU H J, et al. Application of neural networks and optimization model in conjunctive use of surface water and groundwater[J]. *Water Resources Management*, 2014, 28(10):2813-2832.
- [17] 胡国杰, 魏晓妹, 蔡明科, 等. 混沌支持向量机模型及其在地下水动态预报中的应用[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2011, 39(2):229-234.
- [18] 侯泽宇, 卢文喜, 王宇. 基于替代模型的地下水 DNAPLs 污染源反演识别[J]. *中国环境科学*, 2019, 39(1):188-195.
- [19] ZHAO Y, QU R Z, XING Z X, et al. Identifying groundwater contaminant sources based on a KELM surrogate model together with four heuristic optimization algorithms [J]. *Advances in Water Resources*, 2020, 138:103540.
- [20] HUANG G, SONG S J, GUPTA J N D, et al. Semi-supervised and unsupervised extreme learning machines[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2014, 44(12):2405-2417.
- [21] CHEN H Y, MIAO F, CHEN Y J, et al. A hyperspectral

- image classification method using multifeature vectors and optimized KELM[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2021, 14:2781-2795.
- [22] 伊燕平,卢文喜,张耘,等. 基于径向基函数神经网络的地下水数值模拟模型的替代模型研究[J]. 水土保持研究, 2012, 19(4):265-269.
- [23] SHIELDS M D, ZHANG J X. The generalization of Latin hypercube sampling[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2016, 148:96-108.
- [24] 济南市水文局, 济南市城乡水务局. 济南市水资源公报 [EB/OL]. [2022-12-10]. [http://jnwater.jinan.gov.cn/art/2018/12/21/art\\_27547\\_2761410.html](http://jnwater.jinan.gov.cn/art/2018/12/21/art_27547_2761410.html).
- [25] 济南市城乡水务局. 济南市地下水资源调查与评价[R]. 济南:济南市城乡水务局, 2008.
- [26] 吴义锋. 济南市岩溶地下水数值模拟研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2004.
- [27] 骆乾坤, 王佩, 朱国荣. 水文地质参数识别的快速和谐搜索算法[J]. 水文地质工程地质, 2011, 38(4):14-19.
- [28] 王宿轩. 基于 MODFLOW 和进化算法的济南泉域地下水数值模拟研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2017.

(责任编辑 吴亮)

## (上接第 84 页)

- [10] DOU F, LI X, XING H, et al. 3D geological suitability evaluation for urban underground space development: a case study of Qianjiang newtown in Hangzhou, Eastern China [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2021, 115(1):104052.
- [11] DOU F, XING H, LI X, et al. 3D Geological suitability evaluation for urban underground space development based on combined weighting and improved TOPSIS[J]. Natural Resources Research, 2022, 31(1):693-711.
- [12] 窦帆帆, 李晓晖, 袁峰, 等. 地下空间地质适宜性三维评价系统设计与应用[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(增刊 2):529-535, 574.
- [13] 郝英红, 李晓晖, 陈忠良, 等. 城市地下空间开发地质环境质量三维评价方法研究:以合肥市滨湖新区为例[J]. 地理与地理信息科学, 2021, 37(1):11-16.
- [14] 蒋杰. 杭州市钱塘新区地下空间开发地质适宜性评价[D]. 北京:中国地质科学院, 2021.
- [15] 赵思成, 胥犇, 李晓军, 等. 山地城市核心区地下空间开发适宜性三维评价[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2022, 50(1):70-78.
- [16] 赵团芝, 侯艳声, 胡新锋. 宁波市地下空间开发利用地质环境适宜性评价[J]. 城市地质, 2016, 11(4):88-93.
- [17] 姜云, 吴立新, 车德福. 地下空间资源质量熵权与可变模糊集组合评估[J]. 中国矿业大学学报, 2009, 38(6):872-877, 896.
- [18] 沈育志. 结合实例探讨地下空间开发地质适宜性评价方法[J]. 资源信息与工程, 2017, 32(3):149-150, 152.
- [19] 吴立新, 姜云, 车德福, 等. 城市地下空间资源质量模糊综合评价与 3D 可视化[J]. 中国矿业大学学报, 2007, 36(1):97-102.
- [20] 杨康. 基于基聚类器对齐的聚类集成方法研究[D]. 太原:山西大学, 2021.
- [21] GIONIS A, MANNILA H, TSAPARAS P. Clustering aggregation[J]. ACM Transactions on Knowledge Discovery from Data, 2007, 1(1):4-34.
- [22] 李玥. 基于聚类集成的特征选择方法研究[D]. 西安:西安邮电大学, 2021.
- [23] JIA W H, MICHELINE K, JIAN P, et al. 数据挖掘概念与技术[M]. 范明, 孟小峰, 译. 北京:机械工业出版社, 2007:59-63.
- [24] ZHOU Z, TANG W. Clusterer ensemble[J]. Knowledge-Based Systems, 2006, 19(1):77-83.
- [25] 周红, 林孟, 陈江畅. 基于 GIS 和 SWMM 的城市雨洪模型构建模拟与效益评价:以厦门市马銮湾片区为例[J]. 现代城市研究, 2020(12):112-119.
- [26] 黄建南. 厦门地下空间开发利用规划与岩土工程研究[D]. 北京:北京工业大学, 2009.
- [27] 黄建南, 耿家强, 林树枝. 地下空间工程适宜性探讨[J]. 福建建设科技, 2009(6):4-7.
- [28] 任国林, 尹子良, 闫运来, 等. 厦门花岗岩风化壳工程地质分带及风化岩石的工程地质特征[J]. 福建地质, 1990(2):100-110.
- [29] 姜云, 吴立新, 杜立群. 城市地下空间开发利用容量评估指标体系的研究[J]. 城市发展研究, 2005(5):47-51, 75.
- [30] 郑桂森, 卫万顺, 王继明, 等. 城市区域地质条件适宜性评价量化指标研究[J]. 城市地质, 2018, 13(1):9-17.
- [31] 李红昌, 查甫生, 康博. 城市地下空间评估指标体系:以南通市为例[J]. 合肥工业大学学报(社会科学版), 2020, 34(5):113-120.
- [32] 邢怀学, 窦帆帆, 葛伟亚, 等. 城市地下空间开发利用地质适宜性三维评价指标体系研究:以杭州市为例[J]. 地质论评, 2022, 68(2):607-614.
- [33] 王松泉, 李友. 地下空间开发地质环境质量评价指标体系研究[J]. 绿色科技, 2021, 23(14):173-176.
- [34] 郭超, 阎长虹, 刘军熙, 等. 基于 GIS 的东营市浅层地下空间质量评估[J]. 工程地质学报, 2014, 22(2):334-340.
- [35] 欧孝夺, 杨荣才, 周东, 等. AHP 法在南宁市地下空间开发地质环境适宜性评价中的应用[J]. 桂林工学院学报, 2009, 29(4):474-480.
- [36] DAVIES D, BOULDIN D. A cluster separation measure [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1979(2):224-237.
- [37] TANG W, HU J, ZHANG H, et al. Kappa coefficient: a popular measure of rater agreement[J]. Shanghai Archives of Psychiatry, 2015, 27(1):62-67.

(责任编辑 吴亮)