

# 水平井网地浸采铀溶浸范围井储耦合和 粒子示踪模拟

杨 蕴<sup>1</sup>, 左海啸<sup>1</sup>, 李召坤<sup>2</sup>, 张 宇<sup>2</sup>, 常 勇<sup>1</sup>, 祝晓彬<sup>3</sup>, 吴剑锋<sup>3</sup>, 吴吉春<sup>3</sup>

(1. 河海大学 地球科学与工程学院, 江苏 南京 211100; 2. 核工业北京化工冶金研究院, 北京 101149;

3. 南京大学 地球科学与工程学院, 江苏 南京 210023)

**摘要:** 为探索水平井技术在我国砂岩型铀矿地浸采铀领域的可行性, 解析水平井网地浸采铀水动力过程和定量刻画溶浸范围是科学评判的基础和前提。水平井网地浸模式下地下水动力过程涉及井筒流与储层达西流的耦合(井储耦合), 通过研发井储耦合数值模拟技术, 构建水平井网地浸采铀地下水动力学模型, 开发基于 MODPATH 粒子示踪模拟和 Alpha-shape 算法的溶浸范围自动提取技术, 基于理想模型和实际场地模型的应用验证, 实现地浸开采过程中溶浸液流动状态和溶浸范围的模拟刻画。研究结果表明: 相比于传统的 MODFLOW 模型, 井储耦合模型可刻画水平井注液过程中井储交互流量及变化, 且交互流量值与储层渗透系数  $K$  值变化呈正相关; 在井储耦合渗流模拟的基础上, 可自动提取模拟时段内被抽液井有效捕捉的粒子迹线所包络的范围, 识别抽液井不同捕获流量贡献率对应的溶浸范围, 95% 流量贡献率对应的溶浸范围为 100% 流量贡献率对应范围体积的 40%, 表明溶浸液从水平井注入储层至浸出液被竖井抽出, 地浸开采前期流量交互主要集中于溶浸范围内部, 而外部迹线的流速低, 对抽液流量的贡献率低且浸出率低。

**关键词:** 地浸采铀; 水平井网; 水动力; 溶浸范围; 数值模拟  
**中图分类号:** P641 **文献标志码:** A

## Quantitative Characterization of Horizontal Well Leaching Range Using Coupled Well-Reservoir Coupling Model and Particle Tracing Technology

YANG Yun<sup>1</sup>, ZUO Haixiao<sup>1</sup>, LI Zhaokun<sup>2</sup>, ZHANG Yu<sup>2</sup>,  
CHANG Yong<sup>1</sup>, ZHU Xiaobin<sup>3</sup>, WU Jianfeng<sup>3</sup>,  
WU Jichun<sup>3</sup>

(1. School of Earth Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China; 2. Beijing Research Institute of Chemical Engineering and Metallurgy, Beijing 101149, China; 3. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing

210023, China)

**Abstract:** To explore the feasibility of horizontal well technology in in-situ leaching (ISL) of sandstone-type uranium mines in China, it is essential to analyze the hydrodynamic processes and quantitatively characterize the leaching range. The hydrodynamic processes of groundwater in the horizontal well ISL involve well-reservoir coupling simulation, which refers to the coupling of wellbore turbulence and reservoir Darcy flow. By developing numerical simulation techniques for well-reservoir coupling, constructing a groundwater flow model for uranium leaching in the horizontal well network, and creating automatic extraction techniques for the leaching range using particle tracking simulation with MODPATH and the Alpha-shape algorithm, the simulation and characterization of the flow state of the solution and the leaching range during ISL can be achieved. The research results indicate that, compared to the traditional MODFLOW model, the well-reservoir coupling model more accurately depict the interaction flow rate and its variations between the well and reservoir during the injection process in the horizontal well, and the interaction flow rate is positively correlated with the permeability coefficient ( $K$ ) of the reservoir. Based on the well-reservoir coupling simulation, the range enveloping the particle trajectories captured by the pumping wells during the simulation period can be automatically extracted. By identifying the leaching range corresponding to the flow rate contribution of pumping wells, it is determined that the leaching range corresponding to a 95% flow rate contribution is 40% of the volume corresponding to a 100% flow rate contribution. This indicates that the flow interaction, from the injection of leaching solution

收稿日期: 2023-07-14

基金项目: 核技术创新联合基金(U2167212); 江苏省基础研究计划面上项目(BK20211208)

第一作者: 杨 蕴, 教授, 工学博士, 主要研究方向为复杂条件下地下水数值模拟、优化和软件系统开发。

E-mail: yy\_hhu@hhu.edu.cn



论文  
拓展  
介绍

from the horizontal well into the reservoir to the extraction of pregnant solution by vertical wells, is primarily concentrated within the leaching range in the early stage of ISL. The flow velocity along the outer trajectories is lower, resulting in a reduced contribution to both the pumping flow rate and the leaching rate.

**Keywords:** in-situ leaching; horizontal well network; hydrodynamics; leaching range; numerical simulation

天然铀是核军工“基石”、核电“粮仓”，必须要有足够强大的铀资源供应能力才能为实现我国从核工业大国走向核工业强国提供战略保障。据国际原子能机构(IAEA)、经合组织核能署(OECD-NEA)、世界核能协会(WNA)等官方报道,我国砂岩型铀矿是最主要的铀矿资源,占我国天然铀总产能的90%<sup>[1]</sup>,其具有“低品位、低渗透、强非均质性”特征,主流采用的铀矿采冶技术是地浸采铀工艺<sup>[1-2]</sup>。简单说来,地浸采铀就是通过钻孔向铀矿层注入化学试剂,将矿层中的天然 $U^{4+}$ 氧化为 $U^{6+}$ 随之从孔中抽出<sup>[2-3]</sup>。井网布置和运行条件控制着地下水动力场进而影响采铀效率,目前竖井抽、注是主流的地浸采铀方式,常用的布井方式包括行列式和网格状(包括五点型、七点型等)<sup>[4-5]</sup>,竖井地浸采铀易形成纺锤形、高水头差的流场特征,井间距较大时易在抽、注液井之间形成大面积溶浸死角,需通过减小竖井间距和增加井覆盖率来提高铀浸出产能,但这将大幅增加地浸运行成本。

水平井技术研究始于20世纪80年代,在美国、加拿大等国家得到工业化应用,随着其技术的日臻完善,水平井技术在石油、页岩气开采中获得广泛而成功的应用,成为提高资源开采率和经济性的重要方式<sup>[6-8]</sup>。前期相关研究成果表明,相对于竖井开采模式,水平井开采系统在薄层和低渗透性油藏中具有一定的优势,能有效增大注入量、降低注入压力和提高油藏采出程度<sup>[7-10]</sup>。类似于油藏条件,我国砂岩型铀矿多发育于大中型自流盆地河流相或三角洲相沉积的层间氧化带<sup>[2,11]</sup>,矿层往往集中分布于砂岩含水层中,呈现与岩层走向近似的薄层状,理论上沿着矿层走向布置水平井能大大增加溶浸液与矿体的接触面积,提高铀矿浸出率。然而,目前水平井网地浸采铀工艺(井网布设示意如图1)尚处于试验论证阶段,水平井网地浸模式下地下水动力过程涉及井筒流与储层达西流的耦合(井储耦合),如何构建水平井网地浸采铀井储耦合地下水动力学模型、计算不

同井网布置条件下渗流场分布?如何计算井储耦合模拟下的渗流流线,进而确定溶浸范围?这是判断水平井技术在我国砂岩型铀矿地浸采铀领域可行性的前提,也是进一步提出科学的水平井网开采模式以实现优化调控和高效运行的基础。

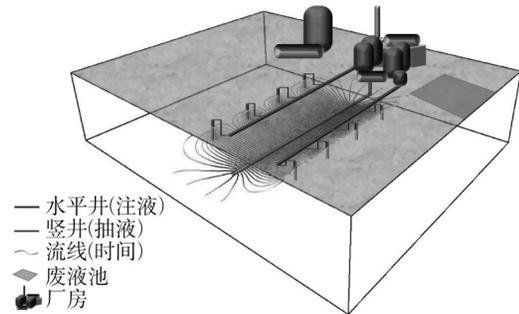


图1 水平井地浸采铀井网模式

Fig. 1 Horizontal wellfield pattern in in-situ leaching of Uranium

传统的MODFLOW程序被广泛应用于调查竖井井网模式下不同井距<sup>[4-5]</sup>、抽注比<sup>[12-13]</sup>和钻孔过滤器<sup>[14]</sup>等对溶浸液渗流规律的影响<sup>[15-17]</sup>。MODFLOW程序刻画井筒流通常处理为流量或压力边界,忽略了井筒几何参数和流态对于井壁流量和压力的影响,不能量化井储耦合机制,难以评价井储界面流体的交互量的变化。此外,地浸采铀过程中溶浸液渗流范围(简称溶浸范围)代表着含矿含水层中化学溶浸液所能运移到的范围,该范围直接关系到矿床的浸出率,是地浸开采的重要经济技术评价指标<sup>[18-20]</sup>。溶浸范围的确定方法包括地球物理探测(探测反演溶浸液溶质浓度分布)、惰性离子溶质运移模拟、地下水流动力学模拟(确定井场边缘的流速场)<sup>[4,16]</sup>,这些方法可以确定溶浸液注入后在含矿含水层中溶质组分的扩散范围,但注入的溶质组分扩散至采区外围不一定会被抽液井捕捉抽出,一定程度上高估了实际溶浸范围和溶浸率。周义朋等<sup>[21]</sup>提出采用粒子示踪模拟技术来刻画溶浸液的渗流路径和范围,本文在此基础上采用Alpha-shape算法可以进一步去除未到达抽液孔的示踪迹线,能有效圈定有效溶浸范围。鉴于此,本文通过研发井储耦合数值模拟技术,构建水平井网地浸采铀地下水动力学模型,在井储耦合模拟基础上开发有效溶浸范围自动提取技术,为后续水平井网地浸采铀渗流特征和溶浸范围的定量刻画提供模拟工具。

# 1 模拟技术

区别于传统的竖井地浸采铀工艺,为探索水平井技术在我国砂岩型铀矿地浸采铀领域的可行性,同时克服传统MODFLOW程序在刻画井筒流的缺陷,研发井储耦合数值模拟技术和基于MODPATH粒子示踪模拟的有效溶浸范围自动提取技术,形成一套水平井网地浸采铀水动力过程模拟和溶浸范围定量刻画的技术方法,总体模拟技术流程如图2所示。

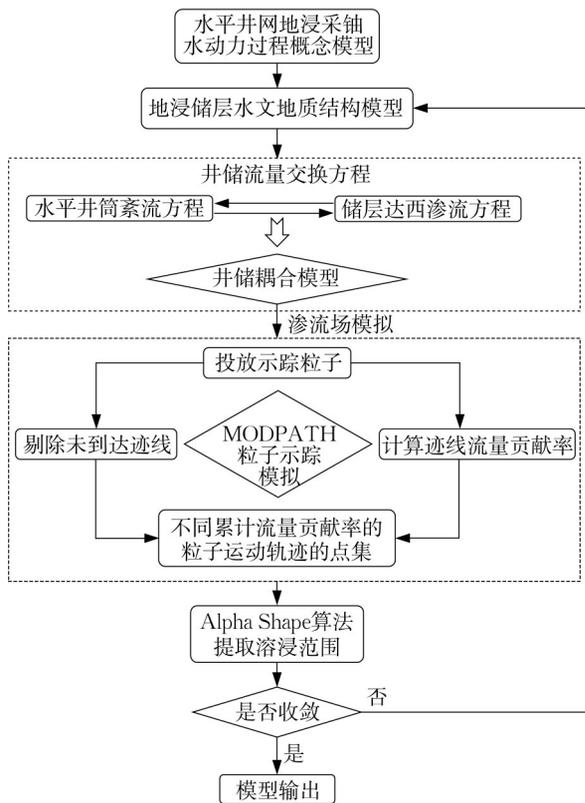


图2 水平井网地浸采铀渗流模拟和溶浸范围自动提取技术流程

Fig. 2 Flowchart for simulating the seepage flow and automatically extracting the leaching range in horizontal well network in-situ leaching

## 1.1 井储耦合数值模拟技术

水平井网地浸工艺通过在薄层状铀矿层中布设水平井进行注液、抽液,对应水平井两侧布设竖井注液、抽液,形成溶浸液抽、注平衡以达到溶浸采铀的目的(图1)。水平井网地浸采铀过程中水平井筒内水流和储层之间的渗流是相对独立的水动力系统,根据不同的完井方式通过水平井壁与储层之间发生水力联系,通常将模拟区划分为井筒和储层两

部分,采用双重介质模型分别刻画含矿储层中的达西渗流和水平井筒流,基于储层与水平井内水头差建立两者之间水力交换量本构关系,实现水平井网地浸采铀水动力过程的井储耦合模拟。

溶浸液进入含铀储层的渗流过程采用MODFLOW程序<sup>[22]</sup>模拟,为

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

式中: $K_x, K_y, K_z$ 分别为渗透主方向上沿 $x, y, z$ 方向上的渗透系数; $h$ 为地下水水位的高度,量纲为L; $W$ 为源汇项,量纲为 $T^{-1}$ ;  $S_s$ 为储水系数; $t$ 为时间,量纲为T。

井筒流可能为层流或紊流2种状态,通过设置雷诺数( $Re$ )确定井筒流状态。雷诺数 $Re < 2000$ 为层流状态, $Re > 4000$ 为紊流状态, $Re = 2000 \sim 4000$ 为过渡状态。

当水平井注液、抽液过程中井筒内水流呈层流状态时,圆管中地下水流采用Hagen-Poiseuille公式<sup>[23]</sup>:

$$Q = -A \frac{gd^2 \partial h}{32\nu \partial x} = -A \frac{\rho g d^2 \Delta h}{32\mu \tau \Delta l} \quad (2)$$

式中: $d$ 为管道直径,量纲为L; $A$ 为管道横截面积,量纲为 $L^2$ ; $\rho$ 为地下水密度,量纲为 $M \cdot L^{-3}$ ; $g$ 为重力加速度,量纲为 $L \cdot T^{-2}$ ; $\nu$ 为运动黏滞系数,量纲为 $L^2 \cdot T^{-1}$ , $\nu = \mu / \rho$ ; $\partial h / \partial x$ 为管道的水力坡度, $\partial h / \partial x = \Delta h / \tau \Delta l$ , $\Delta h$ 为水头变化前后差值,量纲为L, $\Delta l$ 为水头差值相应的距离,量纲为L, $\tau$ 为管道曲折率,量纲为一。

水平井注液、抽液过程中井筒内的渗流速度均较大,流态一般呈紊流状态,采用Darcy-Weisbach公式<sup>[24]</sup>计算:

$$Q_a = -2A \lg \left\{ \frac{k_a}{3.71d} + \frac{2.51\nu}{d \sqrt{2gd \frac{\partial h_a}{\partial x}}} \right\} \sqrt{2gd \frac{\partial h_a}{\partial x}} \quad (3)$$

式中: $Q_a$ 为水平井内流量,量纲为 $L^3 \cdot T^{-1}$ ; $\partial h_a / \partial x$ 为水平井内水力坡度; $k_a$ 为水平井壁平均的粗糙高度,量纲为L。

根据水平井在储层中所处位置,依据MODFLOW的网格剖分将水平井划分为若干段,每段中采用中间节点表征该段水平井的平均水头,井筒—储层相邻两段之间采用式(3)计算流量。假设水平井节点与周围储层之间的交换量与两者之间的

水头差呈线性关系,为

$$Q_{cr} = \alpha_{j,i,k} (h_n - h_{j,i,k}) \quad (4)$$

式中: $\alpha_{j,i,k}$ 为MODFLOW网格单元 $j,i,k$ 处的交换系数,量纲为 $L^2 \cdot T^{-1}$ <sup>[25]</sup>,为管壁水力传导度 $\alpha$ (量纲为 $L \cdot T^{-1}$ )乘以水力交换面积除以管道半径,与井壁的渗透性如开孔数量和大小有关等有关; $h_{j,i,k}$ 为MODFLOW网格单元 $j,i,k$ 处的水头值,量纲为 $L$ ; $h_n$ 为对应的水平井节点的水头值,量纲为 $L$ 。

对于每个水平井节点,可建立质量守恒方程为

$$\sum_{i=1}^p Q_{ip} - Q_{cr} + Q_R = 0 \quad (5)$$

式中: $p$ 为水平井被分为 $p$ 个节点; $Q_{ip}$ 为水平井第 $i$ 个节点处管道流进和流出量之差; $Q_{cr}$ 为水平井节点与周边储层节点之间的交换量; $Q_R$ 为水平井的源汇项(注液为正,抽液为负)。模型建立后,对于每个模拟步长,先固定MODFLOW模型中储层的水头值,联立式(2)(当水平井注液或抽液过程中井筒内呈紊流状态时,使用式(3)进行计算)、式(4)和式(5)求解水平井节点的水头值,然后将该值代入式(4)解出 $Q_{cr}$ ,作为源汇项赋值给MODFLOW中对应的储层网格,最后求解储层中网格的水头值。

## 1.2 溶浸范围自动提取技术

基于井储耦合模型求解水平井网地浸采铀渗流场,采用MODPATH模块的粒子向前示踪模拟技术计算溶浸液在矿层中的运移轨迹。剔除在模拟时段内未能被抽液井捕捉到的粒子迹线,提取投放粒子可到达抽液井的所有粒子迹线所包含的范围作为有效溶浸范围。

实现有效溶浸范围的自动提取的关键问题是根据计算的粒子轨迹点自动准确提取其边界,本文采用Alpha-shape算法提取基于粒子轨迹所包络的范围。Alpha-shape算法由Edelsbrunner提出,最初被用于点集轮廓的构建,目前该算法已被广泛用于医学、农业和建筑行业提取器官、树木和建筑物轮廓<sup>[26-27]</sup>。Alpha-shape基于点集提取的轮廓范围受 $\alpha$ 参数影响(图3),假设数据内有 $n$ 个随机点,在任意两点之间以 $\alpha$ 系数为半径构建圆,若圆内无其他随机点,则认为这两点是边界点。 $\alpha$ 值越大,提取的轮廓越接近于凸包,即在平面上能包含所有给定点的最小凸多边形,溶浸范围易被高估; $\alpha$ 值越小,提取的轮廓范围越精确,建议取偏小的 $\alpha$ 值。为避免 $\alpha$ 取值带来的不确定性,采用MATLAB函数库中boundary函数提取溶浸范围,该函数的收缩因子 $s$ 用于设置生成边界的紧凑程度,当 $s$ 设置为1时能生成包围点集的紧凑边界。经大量的理想和实际例子测试, $s$ 为1

时基本能准确从粒子轨迹点集中提取边界面。

具体的溶浸范围自动提取的步骤可概括如下(见图2):①建立水平井网地浸采铀井储耦合模型,计算地浸采铀渗流场;②建立粒子示踪模型,在水平井所在网格处均匀投放粒子;③求解粒子运动轨迹,剔除在模拟时段内未被抽液井捕捉的粒子迹线;④进一步计算统计每条粒子迹线的流量贡献率(占抽液井捕获总流量的比率),获取不同累计流量通量贡献率的粒子示踪轨迹的点集;⑤获取采用Alpha-shape算法识别不同累计贡献率下的粒子示踪轨迹点集的边界,进而估算有效溶浸范围体积。

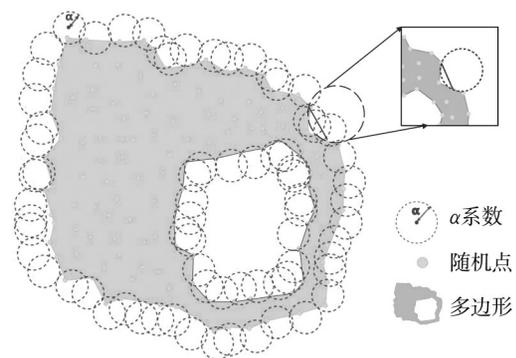


图3 Alpha-shape算法概念图

Fig. 3 Concept diagram of Alpha-shape algorithm

## 2 实例应用

分别通过二维理想模型和试验场地三维模型来应用和验证水平井网地浸采铀井储耦合模拟和溶浸范围的自动提取技术。

### 2.1 二维理想模型

#### 2.1.1 模型概况

设置水平井网地浸采铀理想算例用于探究井储耦合模型模拟水平井注液过程中井储交互流量及变化,并与传统MODFLOW模拟结果进行对比分析。模型设置为 $500\text{ m} \times 400\text{ m} \times 50\text{ m}$ 的承压含水层,平面剖分为 $50 \times 40$ 个网格,每个网格大小为 $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ ,垂直方向上剖分为1层(含水层厚度为 $50\text{ m}$ )。水平面上,左右边界均设置为定水头边界,水位为 $85\text{ m}$ ,上下两侧为零通量边界;垂向上,考虑到实际地浸含水层段上下存在稳定的隔水岩段,上下边界均设置为零通量边界。

#### 2.1.2 模型参数设置

在模拟区中部设置一口水平井注入溶浸液,长度为 $180\text{ m}$ ,在水平井两侧分别设置两口竖井抽取浸出液(图4),抽、注液量设置为平衡状态,即总注液量

等于总抽液量,具体设置2组抽、注液方案,取值参见表1。左侧区域水平渗透系数 $K_x$ 量级为 $0.1 \text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$ ,右侧区域 $K_x$ 量级为 $0.01 \text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$ ,由于含水层处于承压状态,设置贮水系数为 $1\times 10^{-5}$ 。

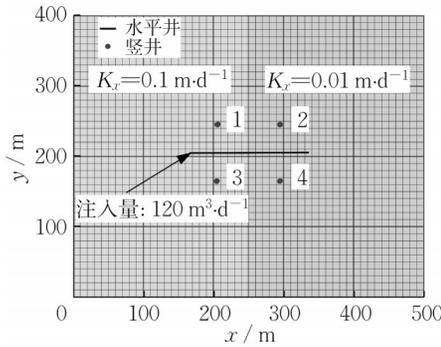


图4 理想模型平面示意图

Fig. 4 Schematic plan of ideal model

表1 水平井和竖井抽、注液量

Tab. 1 Pumping and injection rates of horizontal and vertical wells

水平井/竖井	液量/( $\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ )	
	方案 I	方案 II
水平井	+120	+120
竖井 1	-30	-40
竖井 2	-20	-20
竖井 3	-30	-40
竖井 4	-40	-20

注:“+”为注液量;“-”为抽液量。

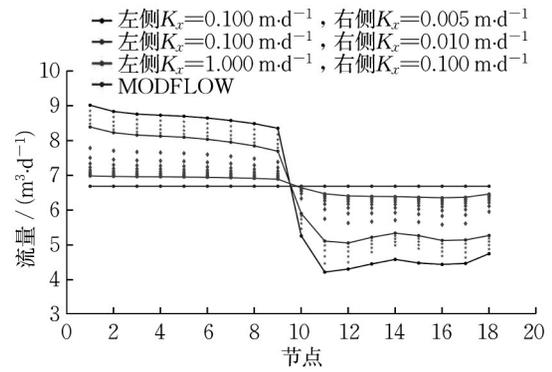
采用井储耦合模型和MODFLOW模型来模拟水平井网地浸采铀渗流场,并进行对比分析。MODFLOW模型刻画井筒流仅能处理为定流量或定水头边界,本次考虑将水平井注液量均匀注入所在网格,单个网格注入量均为 $6.667 \text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ 。2个模型其余模型参数设置保持一致,模拟期设定为1800d,应力期步长设置为30d,共计60个应力期。同时,第1个模拟时间步长在水平井所在每个网格一次性投放100个粒子,共计1800个粒子,进行粒子示踪模拟,追踪溶浸液的运移轨迹。

### 2.1.3 模拟分析

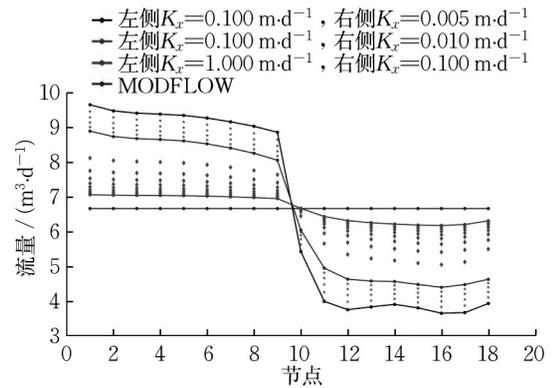
#### 2.1.3.1 井储交互流量

图5为水平井沿程井储交互量的模拟值,可以看出采用井储耦合模型能有效模拟出水平井井储交互流量沿程发生变化;但因MODFLOW井筒流模型内边界条件设置的限制,水平井筒与储层之间交互流量的模拟结果为恒定值,不能模拟出由于介质非均质性产生的水平井沿程交互流量的差异。

考虑到渗透系数差异性对模拟结果的影响,针



a 抽/注液方案 I



b 抽/注液方案 II

图5 水平井沿程井储流量交互量变化

Fig. 5 Changes in the interaction of flow rate between well-reservoir along the horizontal well

对表1中2种抽、注液方案,井储耦合模型设置了15个左右两侧区域 $K_x$ 的组合方案,见表2。①抽/注液方案 I:左右两侧交互流量值与储层 $K_x$ 值变化呈正相关,当左侧 $K_x=0.100 \text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$ ,随着右侧 $K_x$ 逐渐增大( $0.005 \rightarrow 0.010 \text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$ ),两侧交互流量的差异越来越小;当左侧 $K_x$ 从 $0.100 \text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$ 增大到 $1.000 \text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$ ,右侧 $K_x$ 等比从 $0.010 \text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$ 增大到 $0.1000 \text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$ ,井储耦合模型的交互流量逐渐趋于平缓。在所有渗透系数组合方案中,左侧 $K_x=0.100 \text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$ 、右侧 $K_x=0.005 \text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$ 时,左侧节点的交互流量均在 $8.5 \text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ 以上,右侧节点交互量均在 $5.0 \text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ 以下,左右两侧区域水平井与储层交互流量差最高可达41.2%。②抽/注液方案 II:渗流规律与抽、注液方案 I类似,左侧 $K_x=0.100 \text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$ 、右侧 $K_x=0.005 \text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$ 时,在左侧区域抽液流量大于右侧区域的叠加影响下,左侧节点的交互流量均在 $9.0 \text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ 以上,右侧节点交互量均在 $4.0 \text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ 以下,左右两侧区域水平井与储层交互流量差最高可达55.6%。

井储耦合模型能有效模拟出随渗透系数变化水平井沿程交互流量的变化规律,随着 $K_x$ 的增大,井

表 2 模型渗透系数组合方案  
Tab. 2 Hydraulic conductivity schemes of the model

方案编号	左侧区域 $K_x/(m \cdot d^{-1})$	右侧区域 $K_x/(m \cdot d^{-1})$	方案编号	左侧区域 $K_x/(m \cdot d^{-1})$	右侧区域 $K_x/(m \cdot d^{-1})$
1	0.1	0.005	9	0.4	0.040
2	0.1	0.006	10	0.5	0.050
3	0.1	0.007	11	0.6	0.060
4	0.1	0.008	12	0.7	0.070
5	0.1	0.009	13	0.8	0.080
6	0.1	0.010	14	0.9	0.090
7	0.2	0.020	15	1.0	0.100
8	0.3	0.030			

储耦合模型中水平井各节点与储层的交互流量趋近于 MODFLOW 模型的交互流量,而在低渗透和非均质条件下,采用井储耦合模型,能模拟水平井沿程交互流量的差异。进一步通过统计分析表明,在不同的渗透系数量级下,储层渗透系数和水平井筒交互流量的关系呈指数型关系,其中左侧  $K_x$  量级为  $0.100 m \cdot d^{-1}$  时,拟合关系式为  $q = -0.78 \ln K_x + 6.772, R^2 = 0.921$ ; 右侧  $K_x$  量级为  $0.010 m \cdot d^{-1}$  时,拟合关系式为  $q = 0.734 \ln K_x + 8.352, R^2 = 0.964$ 。

### 2.1.3.2 水平井网地浸采铀渗流场

图 6 为井储耦合模型和 MODFLOW 模型水平井网地浸采铀渗流场模拟结果对比图。模拟区域左侧  $K_x$  高于右侧区域,在相同补给条件下左侧区域水力传导能力强,导致右侧区域在水平井和竖井处产生较大的水力梯度。抽注液方案 I 中,MODFLOW 模型右侧区域水平井段的注入量大于井储耦合模型右侧水平井段的注入量,在右侧区域水平井段附近 MODFLOW 模型计算的最高地下水位 (98 m) 大于井储耦合模型计算的最高地下水位 (90 m)。在抽、注液方案 II 中,右侧区域水平井段附近 MODFLOW 模型计算的最高地下水位 (102 m) 大于井储耦合模型计算的最高地下水位 (92 m)。MODFLOW 模型在右侧区域计算的水力梯度大,更多的溶浸液向外围扩散,被竖井捕获的时间延长;井储耦合模型随着介质渗透性的变化,水平井与储层之间交互流量存在差异,整体模拟的水力梯度变小,外部溶浸液却易被抽液井捕获,可有效提高地浸采铀前期的浸出效率。

### 2.1.3.3 溶浸范围

分别在井储耦合模型和 MODFLOW 模型的水平井中投放示踪粒子,进行粒子示踪模拟得到粒子迹线轨迹,提取模拟期末被抽液井捕获的所有粒子迹线所包络的有效溶浸范围 (100% 流量贡献率),如图 7 所示,由于 MODFLOW 模型低估了左侧区域水

平井段溶浸液的注入量,同时高估了右侧区域水平井段溶浸液的注入量,2 个模型提取的有效溶浸范围存在差异。左侧  $K_x$  高值区域井储耦合模型计算的溶浸范围略大于 MODFLOW 模型计算出的,右侧  $K_x$  低值区域井储耦合模型计算的溶浸范围小于 MODFLOW 模型计算出的,且右侧区域相对变化幅度大于左侧区域,表明在低渗透性条件下,水平井注液量对于地浸采铀溶浸范围影响更为敏感。

我国北方砂岩型铀矿储层中地层岩性一般具有低渗透、强非均质性的特征,据实际经验不同,井筒过滤器段的溶浸液注入量存在差异,因此采用井储耦合模型考虑了井筒流与储层达西渗流的耦合机制,可更为合理地刻画水平井沿程交互流量的变化和溶浸范围,模拟结果更为合理。

## 2.2 试验场地模型

### 2.2.1 场地描述

选取我国北方典型砂岩型铀矿水平井网地浸采铀试验场为模拟对象,含铀矿段泥岩和砂岩交互沉积,介质非均质性强。场地钻孔揭露的地层岩性包括:煤层、泥岩、中砂岩、细砂岩、泥岩—砂岩互层、粗砂岩、砂砾岩。研究区含铀矿段上部为煤系地层,下部为泥岩地层,煤系岩层和泥岩层在整个研究区分布稳定,具有良好的隔水性;含铀矿段为砂岩层(中砂岩、细砂岩、粗砂岩、砂砾岩),局部夹泥岩层(泥岩—砂岩互层),为含水层。

### 2.2.2 条件设置

根据模拟层段含水层、隔水层设置和地层岩性,构建三维地质结构模型,在垂直方向均匀剖分成 30 层,将三维岩性属性插值到每个网格中(图 8a)。模型左、右两侧均设置为定水头边界,水位分别设置为 670 m 和 669 m,其余边界设置为零通量边界,模型顶部与底部为隔水边界。地下水从左向右流,初始流场的地下水水平平均水力梯度约为 0.002。

根据场地实际情况设置 1 个水平井和 4 个竖井

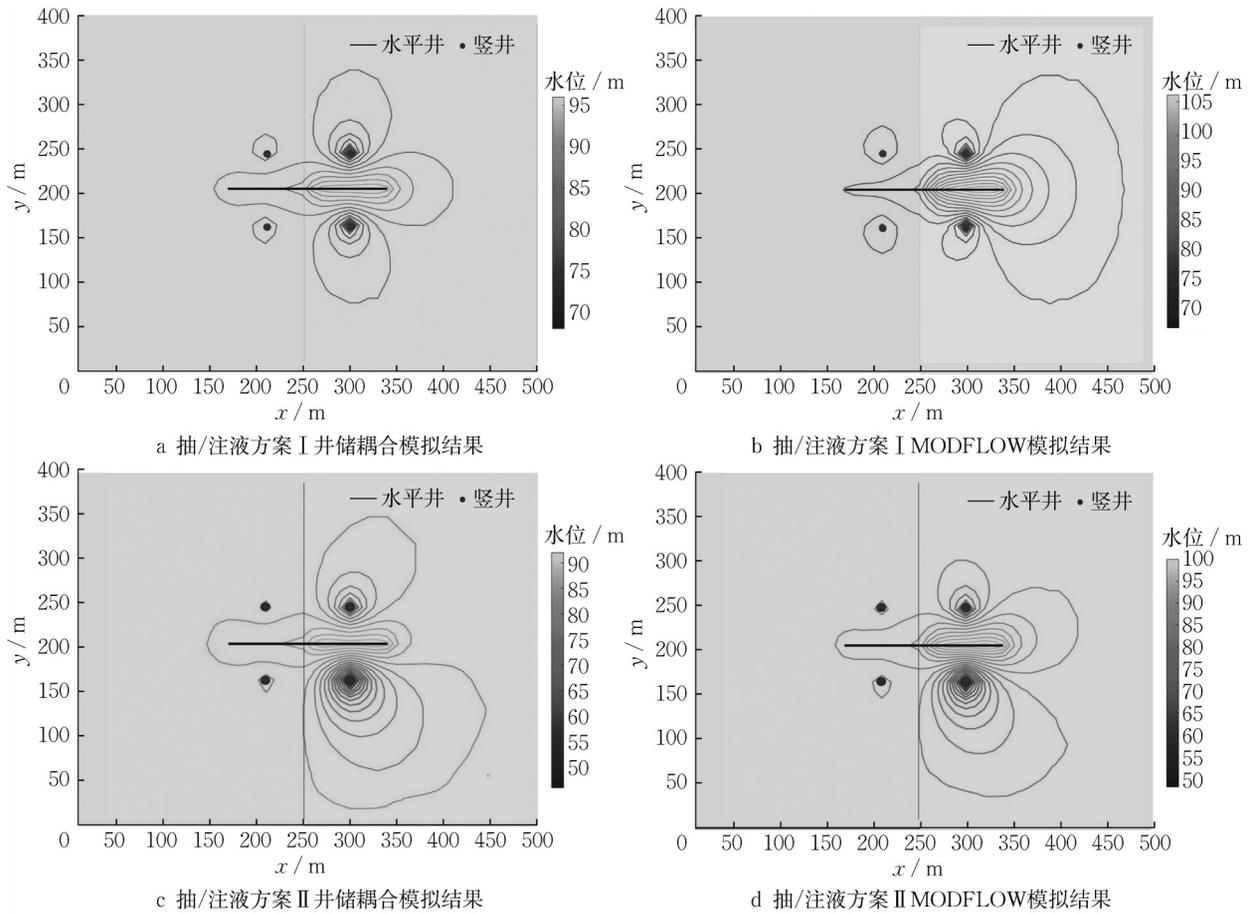


图6 不同模型计算地下水流场对比

Fig. 6 Comparison of groundwater flow calculated using different models

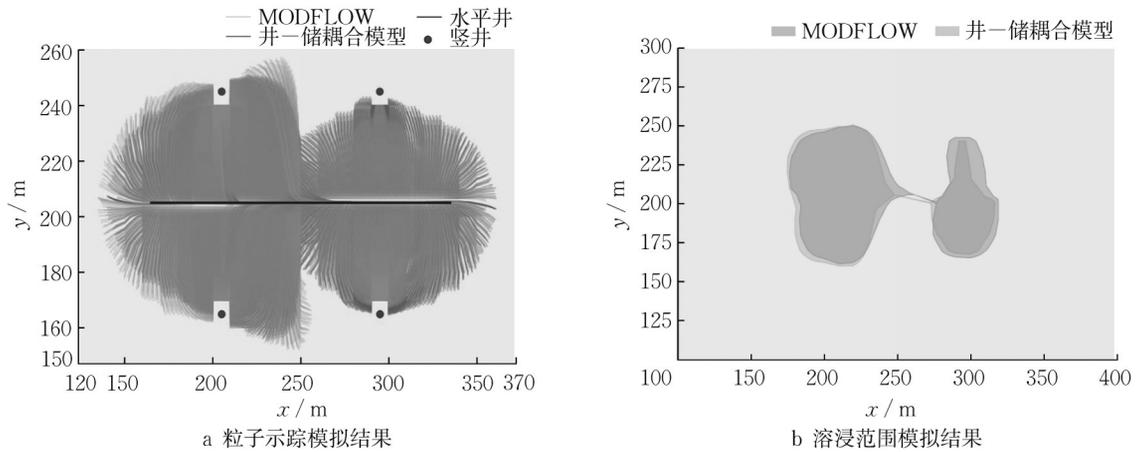


图7 不同模型中粒子迹线轨迹和有效溶浸范围的对比

Fig. 7 Comparison of particle trajectory and effective leaching range in different models

(图8b),井网参数参见表3。模拟期设置为3 600 d, 应力期步长为30 d,共计120个应力期。模拟初始阶段在水平井所在网格均匀投放粒子,每个网格投放150个粒子,共计6 900个,运行井储耦合模型模拟地下水流场和采用粒子示踪模拟计算迹线轨迹,提取溶浸范围。

### 2.2.3 模拟分析

模拟得到了三维视图下粒子轨迹和有效溶浸范围,为区分不同竖井捕获区范围,采用不同深浅色的粒子迹线表示,如图9所示。结果表明由于竖井距离水平井垂直距离不同,每个竖井捕捉到的粒子范围存在差别,竖井2与水平井垂直距离相对较大,捕

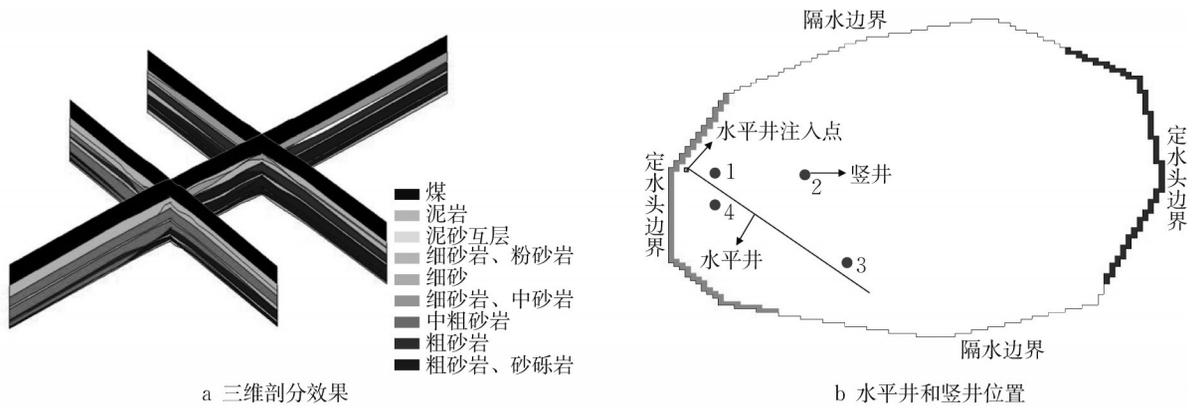


图 8 模拟区实际场地模型

Fig. 8 Actual site model of the simulation area

表 3 实际场地井网参数设置

Tab. 3 Horizontal well network parameters of actual site

名称	坐标	长度/m	抽、注液量/(m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	过滤器层位
水平井	起点(51.17,178.31) 终点(51.17,178.31)	240	+120	16
竖井1	(80.62, 216.70)		-40	20—22/24—26
竖井2	(176.17, 182.78)		-40	22—25/27—28
竖井3	(80.62, 216.70)		-20	17—20
竖井4	(223.94, 280.76)		-20	20—23

获的粒子范围相对更广,但粒子被竖井2捕获所需的时间也更长,其余3个竖井因与水平井的垂直距离较小,其所捕获的粒子范围较小。与场地实际水平井网地浸采铀示踪试验观测数据对比,竖井2接收到示踪剂的时间最长,一定程度验证了井储耦合模型的合理性。

溶浸范围自动提取技术可自动提取模拟时段内被抽液井有效捕捉的粒子迹线所包络的范围。图10为不同捕获流量贡献率下的溶浸范围,经计算100%流量贡献率下的溶浸范围为 $3.41 \times 10^5 \text{ m}^3$ ,95%贡献率下的溶浸范围为 $1.27 \times 10^5 \text{ m}^3$ ,90%贡献率下的溶浸范围为 $1.15 \times 10^5 \text{ m}^3$ 。100%和95%流量贡献率下的溶浸范围相差约60%,而95%与90%流量贡献率相比,溶浸范围变化不明显。模拟结果表明溶浸液从水平井注入储层至浸出液被竖井抽出,流量交互主要集中于溶浸范围内部,而外部迹线的流速低,地浸开采前期其对抽液流量的贡献率低且浸出率低。

### 3 结语

在传统MODFLOW模型基础上,耦合并筒流研发了井储耦合数值模拟技术,创建水平井网地浸采铀地下水动力学模型,开发了基于MODPATH粒子示踪模拟技术和Alpha-shape算法的溶浸范围自

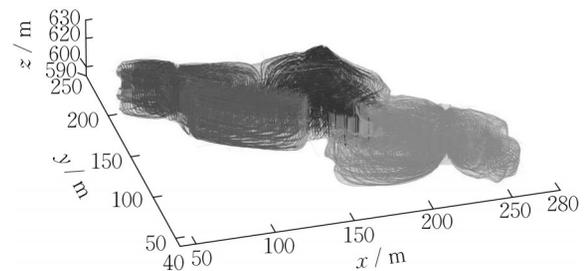


图 9 实际场地水平井网地浸采铀粒子示踪和溶浸范围模拟  
Fig. 9 Tracer of uranium particles and leaching range for in-situ leaching of uranium in actual site horizontal well network

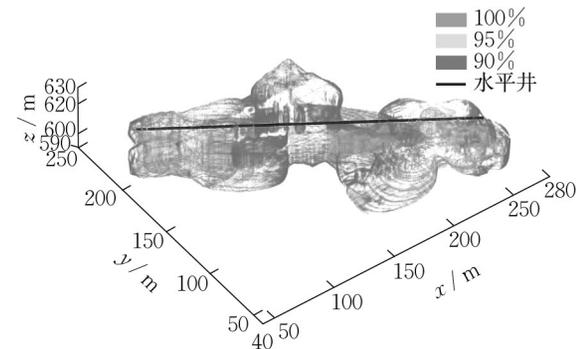


图 10 不同流量贡献率条件下的溶浸范围  
Fig. 10 Leaching range at different flow contribution rates

动提取技术,实现水平井网模式地浸采铀渗流场和溶浸范围的模拟刻画,为探索水平井技术在我国砂岩型铀矿地浸采铀领域的可行性提供技术支撑。主要研究结论如下:

(1)井储耦合模型与MODFLOW模型相比,可定量刻画水平井沿程井储交互流量及其变化,储层渗透系数和水平井筒交互流量的关系呈指数型关系;MODFLOW模型刻画井筒流低估了渗透性强的区域水平井段的注入量,高估了渗透性弱区域水平井段的注入量,导致提取的有效溶浸范围存在差异,且含水层的低渗透性条件下注液量对于地浸采铀溶浸范围影响更为敏感。我国北方砂岩型铀矿具有低渗透性和强非均质性特征,合理计算水平井网地浸采铀井储交互流量对于精准刻画溶浸范围意义重大。

(2)识别了抽液井不同捕获流量贡献率对应的溶浸范围,95%流量贡献率对应的溶浸范围为100%流量贡献率对应范围体积的40%,表明溶浸液从水平井注入储层至浸出液被竖井抽出,流量交互主要集中于溶浸范围内部,而外部迹线的流速低,地浸开采前期其对抽液流量的贡献率低且浸出率低。

#### 作者贡献声明:

杨 蕴:构思设计、提出理论框架、论文撰写与修改。  
左海啸:验证理论方法、数据分析、论文撰写与修改。  
李召坤:数据收集、论文修改。  
张 宇:数据收集、论文修改。  
常 勇:提出理论框架、论文修改及审阅。  
祝晓彬:论文审阅与修改。  
吴剑锋:构思设计、论文审阅。  
吴吉春:项目支持、论文审阅。

#### 参考文献:

- [1] 苏学斌. 钱家店矿床原地浸出采铀工程与实践[M]. 北京:中国原子能出版社, 2017.  
SU Xuebin. Qianjiadian mine in-situ leaching uranium mining project and practice [M]. Beijing: China Atomic Energy Press, 2017.
- [2] 张金带, 李子颖, 苏学斌, 等. 核能矿产资源发展战略研究[J]. 中国工程科学, 2019, 21(1): 113.  
ZHANG Jindai, LI Ziyang, SU Xuebin, *et al.* Development strategy of nuclear energy mineral resources [J]. Strategic Study of CAE, 2019, 21(1): 113.
- [3] 蔡煜琦, 张金带, 李子颖, 等. 中国铀矿资源特征及成矿规律概要[J]. 地质学报, 2015, 89(6): 1051.  
CAI Yuqi, ZHANG Jindai, LI Ziyang, *et al.* Outline of Uranium resources characteristics and metallogenetic regularity in China [J]. Acta Geologica Sinica, 2015, 89(6): 1051.
- [4] 邱文杰, 刘正邦, 杨蕴. 砂岩型铀矿 CO<sub>2</sub>+O<sub>2</sub>地浸采铀的反应运移数值模拟[J]. 中国科学(技术科学), 2022, 52(4): 627.  
QIU Wenjie, LIU Zhengbang, YANG Yun, *et al.* Reactive transport numerical modeling of CO<sub>2</sub>+O<sub>2</sub> in-situ leaching in sandstone-type uranium ore [J]. Scientia Sinica (Technologica), 2022, 52(4): 627.
- [5] 纪文贵, 罗跃, 刘金辉, 等. 考虑渗透系数不确定性的地浸过程溶浸范围随机模拟[J]. 原子能科学技术, 2023, 57(6): 1099.  
JI Wengui, LUO Yue, LIU Jinhui, *et al.* Stochastic simulation of leaching range in in-situ process considering uncertainty of permeability coefficient [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2023, 57(6): 1099.
- [6] 孙峰, 逢铭玉, 张启汉, 等. 水平井压裂多裂缝同步扩展数值模拟[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(7): 1083.  
ZHANG Feng, PANG Mingyu, ZHANG Qihan, *et al.* Numerical simulation of simultaneous propagation of multiple fractures in horizontal well [J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2017, 48(7): 1083.
- [7] 郭建春, 马莅, 卢聪, 等. 中国致密油藏压裂驱油技术进展及发展方向[J]. 石油学报, 2022, 43(12): 1788.  
GUO Jianchun, MA Li, LU Cong, *et al.* Process and development directions of fracturing flooding technology for tight reservoirs in China [J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(12): 1788.
- [8] 高成路, 李术才, 周宗青, 等. 岩体力学压裂应力—渗流耦合近场动力学模拟[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2022, 5(4): 470.  
GAO Chenglu, LI Shucai, ZHOU Zongqing, *et al.* Peridynamics simulation of stress-seepage coupling in hydraulic fracturing of rock mass [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2022, 5(4): 470.
- [9] 张连平, 王世民. 封闭地热系统水平井采热储层内渗流与传热的有限元模拟[J]. 地球物理学报, 2023, 66(1): 314.  
ZHANG Lianping, WANG Shimin. Finite-element modeling of porous flow and heat transfer in a reservoir with heat extraction by a horizontal well of a closed geothermal system [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2023, 66(1): 314.
- [10] 程巍, 雷洁珩, 雷泽勇, 等. 淹没水射流清洗地浸采铀生产井的数值模拟与分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020, 51(9): 2580.  
CHENG Wei, LEI Jiehang, LEI Zeyong, *et al.* Numerical simulation and analysis of in-situ leaching uranium production well cleaned by submerged water jet [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2020, 51(9): 2580.
- [11] 刘玉龙, 扶海鹰, 胡南, 等. 强风强化氧化型砂岩铀矿组合浸出工艺及浸出动力学模型[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(11): 3783.  
LIU Yulong, FU Haiying, HU Nan, *et al.* Combined leaching

- process for strongly weathered and oxidized sandstone uranium ore and its kinetic model [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2021, 52(11): 3783.
- [12] 杨蕴,南文贵,邱文杰,等.非均质矿层 $\text{CO}_2+\text{O}_2$ 地浸采铀溶浸过程数值模拟与调控[J].*水动力学研究与进展*, 2022, 37(5): 639.  
YANG Yun, NAN Wengui, QIU Wenjie, *et al.* Numerical simulation and regulation of  $\text{CO}_2+\text{O}_2$  in-situ leaching process in heterogeneous sandstone-type uranium ore [J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2022, 37(5): 639.
- [13] 李召坤,周根茂,李坡,等.地浸“水平井注一直井抽”井场流场数值模拟与井网优化[J].*铀矿冶*, 2021, 40(1): 18.  
LI Zhaokun, ZHOU Genmao, LI Po, *et al.* Numerical simulation and well pattern optimization of horizontal well injection-vertical well pumping in ISL flow field [J]. *Uranium Mining and Metallurgy*, 2021, 40(1): 18.
- [14] 常云霞,谭凯旋,张翀,等.地浸采铀井场溶浸范围的地下水动力学控制模拟研究[J].*南华大学学报(自然科学版)*, 2020, 34(5): 29.  
CHANG Yunxia, TAN Kaixuan, ZHANG Chong, *et al.* Simulation study on groundwater dynamic control of leaching range of in-situ uranium well field [J]. *Journal of University of South China(Science and Technology)*, 2020, 34(5): 29.
- [15] 陈梦迪,姜振蛟,霍晨琛.考虑矿层渗透系数非均质性和不确定性的砂岩型铀矿地浸采铀过程随机模拟与分析[J].*水文地质工程地质*, 2023, 50(2): 63.  
CHEN Mengdi, JIANG Zhenjiao, HUO Chenchen, *et al.* Stochastic modeling of in-situ sandstone-type uranium leaching in response to uncertain and heterogeneous hydraulic conductivity[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2023, 50(2): 63.
- [16] 周义朋,黎广荣,徐玲玲,等.地浸采铀钻孔过滤器对溶液渗流影响的数值模拟[J].*东华理工大学学报(自然科学版)*, 2018, 41(4): 301.  
ZHOU Yipeng, LI Guangrong, XU Lingling, *et al.* Numerical simulation of influence of drilling filter on solution seepage during in-situ leaching of uranium [J]. *Journal of East China University of Technology (Natural Science)*, 2018, 41(4): 301.
- [17] 陈茜茜,罗跃,李寻,等.基于PHT3D软件的酸法地浸采铀过程模拟探讨[J].*有色金属(冶炼部分)*, 2019(11): 32.  
CHEN Qianqian, LUO Yue, LI Xun, *et al.* Discussion on reactive transport modeling of in-situ uranium acid leaching with PHT3D [J]. *Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy)*, 2019(11): 32.
- [18] YAZIKOV V G, ROGOV Y I, ROGOV A Y. Technological wells schemes and location parameters optimization for uranium geotechnology [M]: [s.l.]: Mine Planning and Equipment Selection, 2000.
- [19] 阙为民,谭亚辉,曾毅群,等.原地浸出采铀反应动力学和物质运移[M]:北京:原子能出版社, 2002.  
QUE Weimin, TAN Yahui, ZENG Yiqun, *et al.* Reaction kinetics and mass transport of in-situ leaching of uranium [M]. Beijing: China Academic Journal Electronic Publishing House, 2002.
- [20] 程宗芳,阳奕汉,赖永春.地浸工艺在铀矿冶中的应用及其效益分析[J].*铀矿冶*, 2007(4): 180.  
CHENG Zongfang, YANG Yihan, LAI Yongchun. Application of in-situ leaching technology in uranium mining & metallurgy and its benefit analysis [J]. *Uranium Mining and Metallurgy*, 2007(4): 180.
- [21] 周义朋,沈照理,孙占学,等.应用粒子示踪模拟技术确定地浸采铀溶浸范围[J].*中国矿业*, 2015, 24(2): 117.  
ZHOU Yipeng, SHEN Zhaoli, SUN Zhanxue, *et al.* Application study on particle tracer technique to calculate the in-situ leaching area of uranium mining [J]. *China Mining Magazine*, 2015, 24(2): 117.
- [22] 吕国芳,郭和杰.基于Alpha Shape的三维模型体积研究[J].*计算技术与自动化*, 2023, 42(1): 160.  
LV Guofang, GUO Hejie. Volume research of 3D model based on Alpha Shape [J]. *Computing Technology and Automation*, 2023, 42(1): 160.
- [23] HARBAUGH A W, BANTA E R, HILL M C, *et al.* MODFLOW-2000, the U. S. Geological survey modular ground-water model—user guide to modularization concepts and the ground-water flow process [R]. Reston: U. S. Geological Survey, 2000.
- [24] VENNARD J K, STREET R L. Elementary fluid mechanics [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1961.
- [25] MANNING F S, THOMPSON R E. Oilfield processing of petroleum[M]. Tulsa, Oklahoma: PennWell Books, 1991.
- [26] 李庆,高祥伟,费鲜芸,等.利用Alpha-shape算法进行树冠三维模型构建[J].*测绘通报*, 2018(12): 91.  
LI Qing, GAO Xiangwei, FEI Xianyun, *et al.* Construction of tree crown three-dimensional model using Alpha-shape algorithm [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2018(12): 91.
- [27] 常勇,刘玲.岩溶地区水文模型综述[J].*工程勘察*, 2015, 43(3):37.  
CHANG Yong, LIU Ling. Review of karst hydrological models [J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2015, 43(3):37.