

### 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

陈梦迪, 姜振蛟, 霍晨琛

## Stochastic modeling of in-situ sandstone-type uranium leaching in response to uncertain and heterogeneous hydraulic conductivity

CHEN Mengdi, JIANG Zhenjiao, and HUO Chenchen

在线阅读 View online: https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202112039

### 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

### 基于高斯过程回归的地下水模型结构不确定性分析与控制

Quantification and reduction of groundwater model structural uncertainty based on Gaussian process regression 钟乐乐,曾献奎,吴吉春 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 1-1

一种改进的地下水模型结构不确定性分析方法

An improved method of groundwater model structural uncertainty analysis 孙晓卓,曾献奎,吴吉春,孙媛媛 水文地质工程地质. 2021, 48(6): 24-33

### 基于CFP的岩溶管道流溶质运移数值模拟研究

A study of the solute transport model for karst conduits based on CFP 杨杨, 赵良杰, 苏春田, 夏日元 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 51-57

### 基于相关指标的裂隙岩体渗透系数估算模型研究

A model for estimating hydraulic conductivity of fractured rock mass based on correlation indexes 王玮, 钱家忠, 马雷, 王德健, 马海春, 赵卫东 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 82-89

基于改进稀疏网格替代模拟的地下水DNAPLs运移不确定性分析

Uncertainty analysis of groundwater DNAPLs migration based on improved sparse grids surrogate model 高鑫宇, 曾献奎, 吴吉春 水文地质工程地质. 2020, 47(1): 1-10

### 水位波动下包气带透镜体影响LNAPL迁移的数值模拟研究

A numerical simulation study of the effect of the vadose zone with lenses on LNAPL migration under the fluctuating water table 潘明浩, 时健, 左锐, 赵晓, 刘嘉蔚, 薛镇坤, 王金生, 胡立堂 水文地质工程地质. 2022, 49(1): 154–163



关注微信公众号,获得更多资讯信息

#### DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202112039

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):63-72.

CHEN Mengdi, JIANG Zhenjiao, HUO Chenchen. Stochastic modeling of in-situ sandstone-type uranium leaching in response to uncertain and heterogeneous hydraulic conductivity[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(2): 63-72.

### 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

陈梦迪1,姜振蛟1,霍晨琛2

(1. 地下水资源与环境教育部重点实验室(吉林大学),吉林长春 130021;2. 中核矿业科技集团有限公司,北京 101149)

摘要:砂岩型铀矿矿层渗透系数普遍具有空间非均匀性,但受试验和分析手段制约,非均匀渗透系数难以准确刻画,导致 地浸采铀过程预测出现偏差,限制了地浸采铀过程精细化管控。针对该问题提出一种矿层非均匀参数分布随机表征方法, 在此基础上,开展水盐耦合数值随机模拟,揭示不同渗透系数空间分布条件下,群井抽注所引起的溶浸剂储层内部迁移过 程和影响范围。在内蒙古某铀矿床应用结果显示:沿区域地下水流方向渗透系数增加,有利于注入溶浸剂疏散;相反,溶浸 剂易出现聚集效应。利用水位监测数据对模型边界条件进行识别与验证后,在均质假设条件下溶浸剂扩散速率为210 m<sup>2</sup>/d, 20 a 开采周期波及范围为1.53 km<sup>2</sup>;考虑矿层非均质性和参数不确定性,预测溶浸剂扩散速率为191~228 m<sup>2</sup>/d,波及范围为 1.47~1.74 km<sup>2</sup>。相比于均质假设,溶浸剂扩散速率和波及范围不确定性显著,分别为17.62%和17.65%。考虑渗透系数非 均质性和不确定性,使得溶浸剂迁移转化行为预测结果更具代表性,可为合理制定地浸采铀方案提供更加可靠的依据。 关键词:砂岩型铀矿;地浸采铀;渗透系数;非均质性;不确定性;溶质运移

中图分类号: P641.2 文献标志码: A 文章编号: 1000-3665(2023)02-0063-10

# Stochastic modeling of in-situ sandstone-type uranium leaching in response to uncertain and heterogeneous hydraulic conductivity

CHEN Mengdi<sup>1</sup>, JIANG Zhenjiao<sup>1</sup>, HUO Chenchen<sup>2</sup>

 (1. Key Laboratory of Groundwater Resources and Environment of the Ministry of Education, Jilin University, Changchun, Jilin 130021, China; 2. China Nuclear Mining Science and Technology Corporation, CNNC, Beijing 101149, China)

**Abstract:** Hydraulic conductivity in sandstone-type uranium-bearing formations is of high heterogeneity. However, restricted by the means of test and analysis, it is difficult to accurately describe the heterogeneous coefficient of permeability, which results in the deviation in the prediction of in-situ leaching uranium mining process and limits the fine control of in-situ leaching uranium mining process. To solve this problem, a random characterization method of heterogeneous parameter distribution of an ore bed is proposed in this paper. On this basis, water salt coupling numerical random simulation is carried out to reveal the internal migration process and

收稿日期: 2021-12-20; 修订日期: 2022-02-24 投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目:国家自然科学基金项目(42172268)

第一作者:陈梦迪(1999-),女,硕士研究生,主要从事多场耦合数值模拟研究。E-mail:mdchen608@126.com

通讯作者:姜振蛟(1986-),男,博士,教授,主要从事储层精细刻画与模拟研究。E-mail:zjjiang@jlu.edu.cn

influence range of leaching agent reservoir caused by pumping and injection of multiple wells under the conditions of different spatial distribution of coefficient of permeability. The application results in a uranium deposit in Inner Mongolia show that the coefficient of permeability increases along the direction of regional groundwater flow, which is conducive to the evacuation of the injected leaching agent. On the contrary, the leaching agent is prone to the aggregation effect. After identifying and verifying the boundary conditions of the model with groundwater level monitoring data, the diffusion rate of the solution is 210 m<sup>2</sup>/d under the assumption of homogeneity, and the diffusion area of the 20-year mining cycle is 1.53 km<sup>2</sup>. Considering the heterogeneity of the ore bed and the uncertainty of parameters, the expansion rate of the leaching agent area is predicted to be 191–228 m<sup>2</sup>/d, and the diffusion area of the leaching agent is 1.47–1.74 km<sup>2</sup>. Compared with the assumption of homogenization, the uncertainty of the diffusion rate and diffusion area of the leaching agent is 17.62% and 17.65%. Considering the

heterogeneity and uncertainty of coefficient of permeability, the prediction results of leaching agent migration and transformation behavior are more representative, which provides a more reliable reference for the design of in-situ leaching uranium mining scheme and the development of sandstone type uranium resources.

**Keywords**: sandstone-type uranium deposit; in-situ leaching; hydraulic conductivity; heterogeneity; uncertainty; solute transport

核能是重要的非碳能源,中国 2020 年全国运行核 电机组累计发电量为 3 662.43 亿千瓦时,占全国累计 发电量的 4.94%<sup>[1]</sup>。随着"双碳"目标的提出,未来 10~ 20 a 时间内,核能发电量将大幅度上升,对铀矿资源 保障提出更高的要求。目前中国具备商业开采价值 的铀矿资源主体为砂岩型铀矿。该类铀矿开采主要 采用原位地浸技术<sup>[2]</sup>,即通过注入硫酸或强碱+氧化剂 (构成溶浸剂),改变矿层铀价态并提高其迁移能力, 实现铀资源抽取和提纯<sup>[3]</sup>。由于含矿含水层具有空间 非均质性,使得溶浸剂注入含水层后发生非均匀流 动,影响溶浸剂与铀矿相互作用和浸出效率;同时,溶 浸剂的注入容易造成地下水污染。采用多场耦合数 值模拟技术,实现地浸采铀过程仿真与可视化,是提 高铀矿采收率、管控地下水污染风险的关键。

多场耦合数值模拟技术目前已相对成熟<sup>[4-13]</sup>,在 地浸采铀领域也得到了广泛应用,相关研究包括:地 浸过程溶浸液化学组分运移特征研究<sup>[14-17]</sup>、伴生矿物 对铀矿溶浸速率的影响分析<sup>[18-22]</sup>、不同抽注流量对渗 流场和浓度场的控制机理分析<sup>[23-24]</sup>、钻孔成井结构对 溶浸过程影响分析<sup>[25]</sup>等。然而,已有地浸采铀过程数 值模拟研究中,普遍假设含矿含水层为均质状态,忽 略了非均质渗透系数空间分布对抽注过程中渗流场 和浓度场的影响。究其原因是目前仍缺少有效方法 定量刻画含矿含水层渗透系数非均匀空间分布。

针对该问题,本研究提出了一种根据群井生产数 据快速反演渗透系数空间分布的解析算法,并开发了 计算程序<sup>[26]</sup>,该方法适用于局部的、开采井群覆盖区 域的渗透系数解释,所确定的渗透系数尚未能有效拓展至整个矿区,也未能被纳入渗流与溶质迁移耦合数 值模型用于分析矿区尺度地浸采铀过程。因此,本文 进一步提出基于局部渗透系数测试数据,生成矿区尺 度非均匀渗透系数空间分布的有效方法,在此基础上 结合内蒙古某铀矿地质与水文地质条件,分析渗透系 数非均匀性对地浸采铀过程影响,以更好地评价地浸 采铀现状条件下溶浸剂影响范围,为地浸采铀风险管 控提供依据。

### 1 研究方法

### 1.1 非均匀渗透系数确定方法

砂岩型铀矿采区钻孔分布密集,且在开采过程中 水位及流量监测数据详尽,通过数值反演以及新提出 的群井干扰解析反演算法可获得抽注井所在区域渗 透系数空间分布<sup>[27]</sup>。然而,地浸采铀过程中,渗流场 和溶浸剂浓度场影响范围通常远超出采区范围。若 不考虑采区外围渗透系数空间分布,将导致渗流和溶 质运移过程模拟结果出现严重偏差。为此,本文提出 依据采区内部渗透系数估计值,确定采区外围渗透系 数的方法。

在遍历性假设条件下<sup>[28]</sup>,若砂岩型铀矿层形成于 同一沉积环境,则采区外围渗透系数所服从的概率分 布与采区内部渗透系数所服从的概率分布一致。基 于该假设,设计渗透系数估算方法如下:

(1)开采区内部渗透系数概率分布估计;

(2)开采区外围区域控制点随机设置以及依托于

2023年

上述概率分布的随机抽样;

(3)基于克里格插值方法的区域尺度渗透系数空间分布估计。

渗透系数概率分布估计采用矩估计法,即通过开 采区实测渗透系数值的平均值、方差和偏度系数估 算,判断渗透系数所服从的概率分布函数。以正态分 布为例,其概率分布函数方程为<sup>[29]</sup>:

$$p = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(K-\bar{K})^2}{2\sigma^2}}$$
(1)

式中: *k*——渗透系数均值/(m·d<sup>-1</sup>);

*K*—参透系数/(m·d<sup>-1</sup>);
 *p*—参透系数分布概率;
 *σ*—渗透系数标准差/(m·d<sup>-1</sup>);

 $\sigma^2$ ——渗透系数方差。

利用 Python 语言中的 Scipy.Stats 模块, 根据概率 分布函数随机抽取渗透系数数值, 并赋给各控制点。 模块代码如下:

import scipy. stats as stats

import matplotlib. pyplot as plt

X = stats. truncnorm(0.06, 4.0, loc=0.76, scale=1.0)

K=X. rvs([47, 30])

plt. hist(K.flatten())

依托克里格插值方法进行矿区尺度参数估计,其 估值方程为<sup>[30]</sup>:

$$K^{*}(x) = \sum_{i=1}^{n} \lambda_{i} K(x_{i})$$
 (2)

式中: *K*(*x<sub>i</sub>*) — 通过上述概率分布函数随机抽样所获 得的渗透系数值/(m·d<sup>-1</sup>);

 $\lambda_i$ ——权重。

$$E(\varepsilon) = E[K(x) - K^*(x)] = 0$$
 (3)

$$\sigma_{s}^{2} = \min E \left\{ [K(x) - K^{*}(x)]^{2} \right\}$$
(4)

其中: E(ε)——估值偏差;

 $\sigma_{\varepsilon}^{2}$ ——均方误差。

基于拉格朗日乘子法<sup>[31]</sup>, 在 $E(\varepsilon) = 0$ 约束下 $\sigma_{\varepsilon}^2$ 最小 化为目标函数, 可得:

$$\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} & 1\\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} & 1\\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots\\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nn} & 1\\ 1 & 1 & \cdots & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1\\ \lambda_2\\ \vdots\\ \lambda_n\\ -\omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{10}\\ r_{20}\\ \vdots\\ r_{n0}\\ 1 \end{bmatrix}$$
(5)

即

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{n} \lambda_{i} r_{ij} - \omega = r_{i0} \\ \sum_{i=1}^{n} \lambda_{i} = 1 \end{cases}$$
(6)

- 其中: r<sub>ij</sub> 空间上 *i* 点与 *j* 点之间渗透系数的半变异 函数;
  - ω—拉格朗日算子,通过Python 中SciKit.Variogram
     确定。
- 含矿含水层溶浸剂迁移数值模拟方法 在非均质含矿含水层中水流运动方程可表达为:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( KM \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( KM \frac{\partial H}{\partial y} \right) = \mu \frac{\partial H}{\partial t}$$
(7)

式中:H---含水层水头/m;

M——含水层厚度/m;

K──渗透系数/(m·d<sup>-1</sup>);

μ——储水系数;

x、y——含水层中空间坐标/m;

溶浸剂迁移控制方程可表达为:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -v_x \frac{\partial C}{\partial x} - v_y \frac{\partial C}{\partial y} + D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2}$$
(8)

式中: C---溶浸剂质量浓度/(mg·L<sup>-1</sup>);

$$D_x$$
、 $D_y$ —— $x$ 、 $y$ 方向地下水弥散系数/(m<sup>2</sup>·d<sup>-1</sup>);  
 $v_x$ 、 $v_y$ —— $x$ 、 $y$ 方向地下水流速/(m·d<sup>-1</sup>)。  
其中,地下水流速根据达西定律可表示为·

$$v_x = -K\frac{\partial H}{\partial x}, v_y = -K\frac{\partial H}{\partial y}$$
(9)

弥散度计算公式为:

$$D = \alpha v + D_{\rm d} \tag{10}$$

其中: α — 弥散度/m;

上述方程通过 FEFLOW 软件、采用加辽金有限单 元法进行求解<sup>[32]</sup>。该软件是由德国 WASY 水资源规 划和系统研究所于 20 世纪 70 年代末开发,适用于渗 流、热迁移和溶质运移数值模拟,并且广泛应用于地 热、地表水与地下水转化、岩溶地下水模拟等领域。 本次研究采用了 PCG(preconditioned conjugate-gradient) 方法进行水流运动方程求解,获得水头和流速空间 分布数据后,通过 BICGSTAB(preconditioned and postconditioned BICGSTAB)对溶质运移方程进行求解,允 许误差为0.001。本次研究忽略浓度变化所引起的密 度流效应、不考虑溶浸剂与含铀矿物化学反应过程, 重点分析渗透系数空间非均质性对溶浸剂对流-弥散 过程的影响。

### 2 研究区概况

本次研究目标矿区位于内蒙古马尼特坳陷中部, 矿区自下而上揭露有白垩系赛汉组下段地层、赛汉组 上段地层和古近系伊尔丁曼哈组地层。其中,含矿含 水层位于赛汉组上段,岩性主要为河相沉积砂体及 粉砂质泥岩,局部为砾岩,厚度介于30~100m,平均 67m。含矿含水层下伏赛汉组下段地层,岩性以泥岩 为主;上覆伊尔丁曼哈组地层,岩性主体为泥岩和砂 质泥岩互层,形成连续隔水层。因此,本文集中分析 赛汉组上段含矿含水层渗透系数非均匀空间分布特 征及其对地浸采铀过程的影响,不考虑该含水层与其 上下临近含水层之间的水力联系。

该铀矿采用五点法开采,集中开采区覆盖面积约 0.6 km<sup>2</sup>,包含 261 个抽液孔和 341 个注液孔,如图 1(b)



Fig. 1 Hydrogeological conditions of concentrated mining area in the study area and spatial distribution and probability statistics of hydraulic conductivity in the observation area

所示。集中开采区北侧的注采单元(20口抽注井)具 备详实抽注液量和水位动态监测数据,如图1(a)、 图1(c)、表1所示。利用解析反演算法<sup>[24]</sup>,计算获 得了该抽注单元的渗透系数空间分布、覆盖面积 (0.06 km<sup>2</sup>),如图1(c)所示。结果显示:区内渗透系数 为0.06~4.00 m/d,服从偏态分布,如图1(d)所示,平 均渗透系数约为0.76 m/d,标准差为1.00 m/d。

表 1 采区监测数据与参数计算结果 Table 1 Data measurements and hydraulic conductivities estimated at the exploited zone

井号	降深 /m	注采强度 /(m <sup>3</sup> :d <sup>-1</sup> )	渗透系数 /(m·d <sup>-1</sup> )	井号	降深 /m	注采强度 /(m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	渗透系数 /(m·d <sup>-1</sup> )
	/111	/(III U )	/(mu /	-	/111	/(III u )	/(11 u /
#01	30.80	207.68	0.26	#11	37.32	221.85	0.30
#02	45.24	183.28	0.07	#12	48.93	190.65	0.06
#03	32.56	212.15	1.08	#13	31.16	119.41	0.53
#04	24.37	211.77	0.70	#14	25.46	199.72	3.02
#05	35.23	207.02	0.24	#15	45.00	207.48	0.11
#06	30.10	199.25	0.64	#16	34.00	129.30	0.09
#07	33.43	211.21	0.72	#17	27.79	215.37	0.23
#08	30.18	186.52	0.17	#18	25.60	216.75	1.31
#09	29.45	190.88	0.87	#19	26.72	214.09	3.91
#10	29.64	215.18	0.78	#20	35.27	208.55	0.16

由于各抽注井均为完整井,含水层中水流运动以 平面二维流为主。本文构建平面二维地下水渗流-溶 质运移数值模型,着重探讨水平方向渗透系数差异对 溶浸剂迁移过程影响,忽略垂向水流运动和溶质运移 过程。

### 3 结果

3.1 模拟区范围与边界条件

为了精细刻画地浸采铀渗流场和浓度场时空演 化过程,首先以集中开采区为核心,将模拟区拓展为 相对独立的水文地质单元。

根据图 1(a)地下水天然流场可知, F1 断层中部与 地下水流方向垂直或斜交,属透水断层; F2 断层与天 然地下水流方向平行,为阻水断层。选择 F1 和 F2 断 层分别作为模拟区的西北和东南部边界;并由集中 开采区向地下水流上游和下游分别拓展约 10 km,以 950 m 和 930 m 等水头线作为东北和西南部边界,进 而削弱边界对集中抽注流场和化学场模拟结果的影 响。圈定的模拟区总面积为 147.62 km<sup>2</sup>。在天然条件 下(抽注强度均为 0),采用平均渗透系数(1 m/d),模 拟区的西侧流量边界补给强度设置为 1×10<sup>-4</sup> ~ 4.5× 10<sup>-4</sup> m/d,计算水头与实测水头之间的绝对误差<2.0 m, 相对误差控制在 10 % 以内,水头分布和流速分布在 趋势上一致,如图 2(a)所示。

维持边界条件和参数与上述天然模型一致,按实际工程实施情况设置抽注井位和抽注强度,总注入强度为4.27×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d,注入溶浸剂质量浓度为7320 mg/L,总开采强度为4.47×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d。模拟预测20a内抽注过



Fig. 2 Refine the modeling domain according to groundwater level fitting results and leachate distribution

程所引起的水力影响范围和溶浸剂影响范围,据此进 一步缩小模拟区范围,以更加精细模拟集中开采区内 渗流和溶浸剂迁移过程。如图 2(b)所示,缩小后的模 拟区北东和南西边界水位在 20 a 模拟期内不受抽注 过程影响,设置为定水头边界,水头分别为907m和 885 m; 北西与南东边界与流线平行, 设置为隔水边 界。由于开采期内,溶浸剂并未拓展至模拟区边界位 置,因此将边界属性设置为0溶质通量。在均质假设 下,根据图1(d)所示的渗透系数估值结果,将模拟区 渗透系数由 0.1 m/d 增加至 4.0 m/d, 抽注过程模拟结 果显示上述边界属性不发生改变。据此,确定了本次 模拟区, 面积为 4.47 km<sup>2</sup> 如图 2(c) 所示。模拟区剖分为 174 820个单元格,单元网格最宽处尺寸不超过 20 m, 模拟对比显示,继续加密剖分不对计算精度产生明显 影响。根据矿层岩性特征和网格剖分尺寸,设置横向 弥散度为5m,纵向弥散度为10m,本文忽略弥散度不 确定性所导致的溶浸剂浓度计算误差。

### 3.2 非均匀渗透系数确定

利用 1.1 节所述基于局部渗透系数测试数据, 生成矿区尺度渗透系数空间分布的计算方法, 在模拟区随机设置 47 处控制点, 如图 3(a)所示。依据图 1(d) 所示的渗透系数概率分布, 利用 Python 中 Scipy.Stats 模块进行随机抽样, 获得 30 组×47 处数据, 分别赋予 47 处控制点; 对各组数据采用克里格插值, 获得 30 组 渗透系数空间分布, 代表模拟区随机渗透系数场, 并 选取 2 种非均质渗透系数空间分布情形: (1)集中开 采区低渗、外围高渗(情形 1), 如图 3(b)所示; (2)集 中开采区高渗、外围低渗(情形 2), 如图 3(c)所示, 分 析渗透系数非均匀分布对渗流场和浓度场扩散过程 的影响。

### 4 分析与讨论

### 4.1 溶浸剂迁移过程分析

基于上述2种渗透系数空间分布情形,分别开展现状开采条件下渗流与溶质迁移过程分析。截取其中1个注采单元(图4、图5),包括4口注液井和1口抽液井,对应2种不同渗透系数空间分布:情形1渗透系数沿着地下水流运动方向逐渐增加,如图4(a)所示;情形2渗透系数沿着地下水流运动方向逐渐降低,如图5(a)所示。结果显示:开采1d,通过各井注入的溶浸剂仅在注入井周围呈现近似同心圆型扩散,井间干扰弱;溶浸剂扩散过程主要受注入强度控制,尚未受到区域地下水流运动和宏观渗透系数空间非



(a)模拟区内随机控制点位







均匀分布影响。开采 10 d, 溶浸剂空间分布受区域地 下水流运动影响(北东至南西方向), 呈南西走向条带 状分布。此外, 在 2 种不同渗透系数场影响下, 溶浸 剂浓度空间分布存在一定差异。具体表现为: 情形 1 条件下, 沿着区域地下水流运动方向渗透系数逐渐 降低, 产生溶浸剂堆积效应, 使得 10 d 和 30 d 时注入 井周围影响范围内溶浸剂浓度较高, 如图 4(c)所示; 而情形2条件下,沿着区域地下水流运动方向渗透系数逐渐增加,产生溶浸剂疏散效应,使得10d和30d时注入井周围溶浸剂浓度较情形1偏低,如图5(c)所示。但随着抽注时间的延长,溶浸剂以弥散形式扩

散的影响逐渐显著,渗透系数空间非均质性对溶浸剂 空间分布的影响相对减弱,表现为不同渗透系数空间 特征下,溶浸剂影响范围及浓度空间分布基本一致, 如图 4(d)、图 5(d)所示。



Fig. 4 Spatial distribution of leachate concentration the hydraulic during pumpage and injection in response to conductivity increasing along the direction of groundwater flow



Fig. 5 Spatial distribution of leachate concentration the hydraulic during pumpage and injection in response to conductivity decreasing along the direction of groundwater flow

进一步统计不同渗透系数空间分布情形下,如 图 2(c)所示,矿区范围内溶浸剂影响面积随时间变化 曲线(图 6)。结果显示:溶浸剂影响范围扩散速率表 现为先快后慢,逐渐趋于稳定。结合图 4 和图 5 分析 获得的溶浸剂迁移过程可知,开采初期(数天),受注



Fig. 6 Influence range of leachate in the aquifer under the homogenous and heterogeneous hydraulic conductivity

入井注入强度影响,溶浸剂运移过程处于强制对流作 用下,以迁移为主;开采中期(数十天),溶浸剂迁移过 程受区域地下水流影响显著,溶浸剂扩散速率趋缓; 而在开采后期(数月),溶浸剂分布范围主要受弥散作 用控制,缓慢上升并趋于稳定。

如图 3(b)所示,开采区相对低渗、外围高渗情形下,溶浸剂影响面积扩散速率最快(平均为115 m²/d),且20 a 后影响范围也最大(1.6 km²);如图 3(c)所示,开采区相对高渗、外围低渗情形下,溶浸剂向开采区外围扩散过程受到一定程度抑制,表现为溶浸剂影响面积扩散速率最慢(平均为 97 m²/d),20 a 开采周期内的影响面积最小(约为 1.38 km²)。均匀渗透系数空间分布情况下,溶浸剂扩散过程介于前述 2 种情形之间。

4.2 开采末期渗流场与浓度场空间特征

在明确矿层非均质渗透系数对浓度场控制机理 基础上,随机生成30组渗透系数,代表现有技术手段 计算渗透系数空间分布时的不确定性。针对不同渗 透系数分布,模拟获得20a地浸开采该铀矿最大水位 降深为(21.0±4.0)m,最大水位上升幅度为(14±8.0)m; 模拟区约 1.61 km<sup>2</sup> 范围内含水层降深超过 2.0 m,同时 在开采区的上游约 1.34 km<sup>2</sup> 范围内出现水位抬升,如 图 7(a)所示。不同渗透系数条件下,溶浸剂影响面积 扩散速率为 191~228 m<sup>2</sup>/d,开采 20 a 后溶浸剂波及范 围介于 1.47~1.74 km<sup>2</sup>, 如图 7(c)、图 7(d)所示, 溶浸 剂影响范围小于地下水位波及范围, 说明该矿区抽注 液量控制下, 不会导致溶浸剂大范围扩散, 造成地下 含水层污染。



### 5 结论

(1)溶浸剂扩散过程受区域地下水流和渗透系数 空间非均质结构控制。沿区域地下水流方向渗透系 数增加,有利于注入溶浸剂疏散;相反,溶浸剂易出现 聚集效应。

(2)溶浸剂迁移主控因素随时间变化出现差异: 初期(数天)溶浸剂迁移受控于注入强度,在注入井周 围扩散;中期(数十天)受注入强度和区域流场控制, 沿着区域流场方向出现优势扩散;后期(数月)受弥散 作用控制,缓慢扩散并达到似稳定状态。

(3)内蒙古某铀矿渗透系数估值范围为 0.06~ 4.0 m/d, 据此随机生成了 30 组非均匀渗透系数, 代表 渗透系数估值的不确定性。模拟结果显示: 开采 20 a 后, 溶浸剂波及范围为 1.47~1.74 km<sup>2</sup>, 远小于抽注过 程对地下水位影响范围, 表明现状抽注强度下, 溶浸 剂扩散面积能够得到有效管控。

### 参考文献(References):

- [1] 田力.碳中和视角下的核能贡献[J].能源, 2021(5): 30-33. [TIAN Li. Nuclear energy contribution from the perspective of carbon neutralization[J]. Energy, 2021(5): 30-33. (in Chinese)]
- SHEN Nao, LI Jun, GUO Yongfan, et al. Thermodynamic modeling of in situ leaching of sandstone-type uranium minerals[J]. Journal of Chemical & Engineering Data, 2020, 65(4): 2017 2031.
- [3] 梁卫国,赵阳升,徐素国,等.原位溶浸采矿理论研究[J].太原理工大学学报,2012,43(3):382-387.
  [LIANG Weiguo, ZHAO Yangsheng, XU Suguo, et al. Theoretical study of in situ solution mining[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2012, 43(3):382 -387. (in Chinese with English abstract)]
- [4] STALLMAN R W. Numerical analysis of regional water levels to define aquifer hydrology[J]. Transactions, American Geophysical Union, 1956, 37(4): 451.

- [5] 陈小月,黄健民,卢薇.基于FEFLOW的广州金沙洲 地区地下水流场数值模拟研究[J].地下水,2014, 36(4):4-7. [CHEN Xiaoyue, HUANG Jianmin, LU Wei. Numerical simulation study of groundwater flow based on FEFLOW software in Jinshazhou of Guangdong Province[J]. Ground Water, 2014, 36(4):4 - 7. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 张森,潘杰,刘生财,等.基于FEFLOW的地下水污染数值模拟及预测——以宁波某印染厂为例[J].绍兴文理学院学报(自然科学),2017,37(1):21-27. [ZHANG Miao, PAN Jie, LIU Shengcai, et al. Numerical simulation and prediction of groundwater pollution based on FEFLOW: An illustrative study of a printing and dyeing factory in Ningbo[J]. Journal of Shaoxing University (Natural Science),2017,37(1):21-27. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 常云霞. 地浸采铀井场溶浸范围的地下水动力学控制模拟研究[D]. 衡阳:南华大学, 2020. [CHANG Yunxia. Simulation study on groundwater dynamics control of leaching range of in-situ uranium well field[D]. Hengyang: University of South China, 2020. (in Chinese with English abstract)]
- [8] YANG Jie, TAO Yuezan, REN Weixin, et al. Numerical simulation of groundwater contaminant transport in unsaturated flow[J]. Water Supply, 2020, 20(8): 3730 – 3738.
- [9] 邱文杰,刘正邦,杨蕴,等.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 - 638. [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 - 638. (in Chinese with English abstract)]
- [10] YANG Yun, QIU Wenjie, LIU Zhengbang, et al. Quantifying the impact of mineralogical heterogeneity on reactive transport modeling of CO<sub>2</sub> + O<sub>2</sub> in situ leaching of uranium[J]. Acta Geochimica, 2022, 41(1): 50 - 63.
- [11] 王泽江, 邵磊昌, 李秦, 等. 地下铀矿开采方法的数值模 拟技术研究[J]. 铀矿冶, 2017, 36(2): 73-80. [WANG Zejiang, SHAO Leichang, LI Qin, et al. Study on numerical modeling technology for underground mining method[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2017, 36(2): 73-80. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 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 threedimensional soil-groundwater coupled chromium

contamination based on FEFLOW[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(1): 164 - 174. (in Chinese with English abstract)

- [13] 孙启明,高茂生,党显璋.垃圾填埋场渗滤液变密度 地下水溶质运移模拟[J].吉林大学学报(地球科学 版), 2022, 52(4): 1265 - 1274. [SUN Qiming, GAO Maosheng, DANG Xianzhang. Simulation of solute transport in variable-density groundwater for landfill leachate[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2022, 52(4): 1265 - 1274. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 李春光, 谭凯旋. 地浸采铀地下水中放射性污染物迁移的模拟[J]. 南华大学学报(自然科学版), 2011, 25(3): 25-30. [LI Chunguang, TAN Kaixuan. Modeling the migration of radioactive contaminants in groundwater of in situ leaching uranium mine[J]. Journal of University of South China (Science and Technology), 2011, 25(3): 25-30. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 周义朋,沈照理,孙占学,等.某砂岩型铀矿地浸采铀 试验溶浸液化学组分运移模拟[J].中国矿业,2012, 21(增刊1):298-300. [ZHOU Yipeng, SHEN Zhaoli, SUN Zhanxue, et al. The simulation of leaching solution chemical components transportation during the in situ leaching uranium mining experiment in a sandstone-type uranium deposit[J]. China Mining Magazine, 2012, 21(Sup 1): 298 - 300. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 苏振兴,高文生,杜风雷,等.成层土中污染物迁移数 值模拟及参数敏感性分析[J].地质灾害与环境保护, 2020,31(4):53-62. [SU Zhenxing, GAO Wensheng, DU Fenglei, et al. Numerical simulation and parameter sensitivity analysis of pollutant migration in stratified soil[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2020, 31(4): 53 - 62. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 黄群英.某砂岩铀矿酸法地浸溶质运移与酸化进程分析[J].有色金属(冶炼部分),2015(6):50-54.
  [HUANG Qunying. Analysis of solute transportation and acidification process during in-situ acid leaching of sandstone uranium ore[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2015(6):50-54. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 汪润超,李寻,罗跃,等.基于数值模拟分析赤铁矿对 地浸采铀的影响[J].有色金属(冶炼部分),2021(8): 87-93. [WANG Runchao, LI Xun, LUO Yue, et al. Influence of hematite on in-situ leaching of uranium based on numerical simulation[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2021(8): 87-93. (in Chinese

with English abstract)

- [19] 汪润超,李寻,罗跃,等.基于TOUGHREACT模拟分 析黄铁矿对酸法地浸采铀的影响[J].有色金属工程, 2021, 11(8): 39 - 50. [ WANG Runchao, LI Xun, LUO Yue, et al. Influence of pyrite on acid in-situ leaching of uranium based on TOUGHREACT simulation[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2021, 11(8): 39 - 50. (in Chinese with English abstract)
- [20] 乔海明,徐高中,张复新,等.层间氧化带砂岩型铀成 矿过程中铁的地球化学行为——以新疆吐哈盆地十 红滩铀矿床为例[J]. 沉积学报, 2013, 31(3): 461-467. [ QIAO Haiming, XU Gaozhong, ZHANG Fuxin, et al. Study on iron geochemical behavior in the interlayer oxidation zone sandstone-type uranium metallogenetic process: A case from Shihongtan uranium deposit in the Turpan-Hami Basin of Xinjiang[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2013, 31(3): 461 - 467. (in Chinese with English abstract)]
- 孙冰,陈世团,周庆来,等.原地浸出采铀过程中浸出  $\lceil 21 \rceil$ 率影响因素分析[J]. 现代矿业, 2020, 36(8): 89-93. [ SUN Bing, CHEN Shituan, ZHOU Qinglai, et al. Analysis of factors affecting leaching rate in situ leaching of uranium[J]. Modern Mining, 2020, 36(8): 89 - 93. (in Chinese with English abstract)
- [22] ZHAO Lixin, LI Po. Relationship between chamosite alteration and Fe-plugging in sandstone pores during acid in situ leaching of uranium[J]. Minerals, 2021, 11(5): 497.
- 吉宏斌,黄群英,周义朋,等.抽注流量分配及抽注比 [23] 对地浸溶液扩散的影响[J]. 铀矿冶, 2017, 36(3): 172-181. [ JI Hongbin, HUANG Qunying, ZHOU Yipeng, et al. Influence of in-situ leaching solution diffusion with drawing injection flux distribution and drawing injection proportion[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2017, 36(3): 172 – 181. (in Chinese with English abstract)
- [24] 李梦姣,连国玺,曹凤波,等.非均一抽注技术在地浸 地下水环境保护中的应用[J]. 铀矿冶, 2017, 36(增刊 1): 98-104. [LI Mengjiao, LIAN Guoxi, CAO Fengbo, et al. Study on application of non-uniform drawing and injection flow technology in groundwater protection during in-situ leaching of uranium[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2017, 36(Sup 1): 98-104. (in Chinese with English abstract)
- [25] 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 - 306. [ZHOU Yipeng, LI Guangrong, XU Lingling, et al. Numerical simulation of influence of drilling filter on solution seepage during insitu leaching of uranium[J]. Journal of East China University of Technology (Natural Science), 2018, 41(4): 301 – 306. (in Chinese with English abstract)

- 陈帅,姜振蛟,霍晨琛.某铀矿地浸开采条件下的导 [26] 水系数计算与分析[J]. 铀矿冶, 2021, 40(2): 108-115. [ CHEN Shuai, JIANG Zhenjiao, HUO Chenchen. Calculation and analysis of hydraulic conductivity in insitu leaching uranium mine[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2021, 40(2): 108 - 115. (in Chinese with English abstract) ]
- 聂庆林,高广东,轩华山,等.抽水试验确定承压含水 [27] 层参数方法探讨[J].水文地质工程地质,2009,36(4): 37 - 40. [ 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. (in Chinese with English abstract)
- CRESSIE N A C. Statistics for Spatial Data[M]. New [28] York: John Wiley & Sons Inc, 1991.
- 宋述芳,吕震宙,王燕萍,问题驱动和思维引导下的 [29] 《正态分布》教学设计[J]. 高等数学研究, 2019, 22(4): 86 - 90. [ SONG Shufang, LV Zhenzhou, WANG Yanping. On problem-driven and thought-guided teaching design of normal distribution[J]. Studies in College Mathematics, 2019, 22(4): 86 - 90. (in Chinese with English abstract)
- [30] 张仁铎.空间变异理论及应用[M].北京:科学出版 社, 2005. [ZHANG Renduo. Spatial variation theory and its application[M]. Beijing: Science Press, 2005. (in Chinese with English abstract)
- 邱伯驺,李景功,潘杰.关于用拉格朗日乘数法求条 [31] 件极值的充分条件[J]. 工科数学, 1993, 9(增刊2): 26 - 31. [ QIU Bozou, LI Jinggong, PAN Jie. Sufficient conditions for finding conditional extremum by Lagrange multiplier method[J]. College Mathematics, 1993, 9(Sup 2): 26 – 31. (in Chinese)
- 陈秋锦.地下水模拟计算机软件系统 FEFLOW [32] [J]. 中国水利, 2003(18): 25-26. [CHEN Qiujin. A groundwater simulation computer software: FEFLOW [J]. China Water Resources, 2003(18): 25 - 26. (in Chinese)]

编辑:宗

爽