

基于多目标优化算法的“水平井-直井” 系统流量决策方法

张宇¹, 马亮², 李召坤¹, 赵龙昊¹, 李星浩¹, 李沁慈¹

(1. 核工业北京化工冶金研究院, 北京 101149;
2. 中广核铀业发展有限公司, 北京 100029)

摘要: 抽注液量的设计既关乎浸出剂的有效溶浸范围又与井场运行成本有关。为了进行地浸采铀“水平井-直井”抽注系统的经济高效抽注液量决策, 提出一种基于多目标优化算法的“水平井-直井”系统抽注液量模拟优化决策方法。研究表明: 与均匀布置抽注液量的初始方案相比, 决策方案 R2 的运行成本降低了 51.14%, 其溶浸范围增加了 8.84%。该决策方法筛选出了 LK 矿区的 4 口“重点井”, 在方案决策及调整时, 应重点关注该类井的流量; 根据多目标优化的 Pareto 解集, 选取了 6 组不同有效溶浸范围和成本权重比例的抽注运行方案组合, 用以指导决策者进行方案选择。

关键词: 地浸采铀; 水平井; 多目标优化; Pareto; 深部铀矿; 抽注液量; 有效溶浸范围

中图分类号: TL211 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8063(2025)01-0030-07

DOI: 10.13426/j.cnki.yky.2024.06.05

地浸采铀是通过注液井将浸出剂注入含矿层, 选择性浸出有用矿物成分, 再将浸出液通过抽液井抽出至地表进行加工处理的采铀方法^[1]。目前, 地浸采铀已成为开采铀资源的重要方法^[2], 中国的地浸采铀产能将占天然铀产能的 90% 以上^[3]。地浸工艺井是浸出剂和浸出液出入矿层的唯一通道, 成井方式、成井质量及其对应的渗流场特征决定着地浸矿山的回收率和生产成本^[4-5]。随着中国铀矿勘察“探深找盲”工作的推进, 在伊犁、鄂尔多斯等盆地相继发现多个埋深超过 600 m 的大型砂岩铀矿床, 个别矿藏的埋深超过 750 m^[6-7]。矿藏埋深越深, 钻井的整体投资越高, 为提高该类矿床的经济可采性, 需要有新的开采技术。

水平井技术在石油行业、煤层气开采等方面得到了广泛应用^[8-12], 但国内外关于水平井在地浸采铀领域的研究和报道较少^[13-14]。对于已经施工完成即将投入生产的水平井来说, 抽注液量的优化设计至关重要。抽注液量优化应综合考虑浸采成本及浸采效果等因素^[15], 因此水平井地浸

采铀抽注液量的决策需重点权衡浸采成本和有效溶浸范围。为此, 采用混合多目标优化算法对“水平井-直井”抽注系统流量进行优化, 建立用于解决“水平井-直井”抽注系统流量决策的优化管理工具, 为管理决策者提供满足约束条件的最优管理策略。

1 多目标优化算法概述

对地浸采铀的决策管理问题, 多个目标间经常是相互矛盾的。在求解管理模型后, 状态变量包含多个相互冲突的信息, 决策者需权衡多方面因素, 从而选择具体的方案。多目标求解问题可表示为^[16]

$$\min_{x \in \Omega} F(x) = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_M(x)], \quad (1)$$

$$\text{std. } \begin{cases} C_m(x) = 0 \\ C_n(x) \leq 0 \end{cases}, \quad (2)$$

式中: x —决策变量; M —目标个数; C_m 、 C_n —等式、不等式的约束条件; Ω —决策变量空间。

在多目标管理模型的优化过程中, 对相互矛盾的管理目标同时优化必然导致某一目标性能的

收稿日期: 2024-06-07

基金项目: 中核集团集中研发项目(深部砂岩铀矿水平井钻成井与流场调控技术研究, 中核科发[2021]144号)。

第一作者简介: 张宇(1996—), 男, 河北廊坊人, 硕士, 助理工程师, 主要从事地浸采铀数值模拟研究。

通信作者简介: 李召坤(1990—), 男, 安徽六安人, 硕士, 高级工程师, 主要从事地浸采铀钻探技术与数值模拟研究。

改善以其他目标性能的降低为代价。因此,多目标优化结果是一组非劣解或 Pareto 解,相关定义如下(假设最小化管理目标):

Pareto 主导(Pareto dominance)为

$$\mu < v \Leftrightarrow \begin{cases} \mu_i < v_j, \exists i \in \{1, 2, \dots, M\} \\ \mu_j < v_j, \forall j \in \{1, 2, \dots, M\} \end{cases}; \quad (3)$$

Pareto 最优解集(Pareto-optimal set)为

$$P^\alpha = \{x \in \Lambda \mid \neg \exists x^* \in \Lambda, F(x^*) < F(x)\}; \quad (4)$$

Pareto 最优锋面(Pareto-optimal front)为

$$PF^\alpha = \{F(x) \mid x \in P^\alpha\}; \quad (5)$$

式中: μ, v —两种决策方案的目标向量, $\mu < v$ —目标向量 μ 优于或主导 v ; P^α —Pareto 最优管理方案构成的解集; Λ —决策变量的可行域内; PF^α —Pareto 最优解集的目标函数值。

2 模型设置

2.1 地质模型

LK 矿床的工业铀矿体是主要赋存于下侏罗统三工河组下段和西山窑组下段的层状砂体。根据矿床钻孔资料,该铀矿床分布深度大约在 720 m,分布在铀矿床上部和下部的煤层和泥岩构成了较好的隔水层。根据 LK 矿区的区域地质资料和钻孔测井数据,建立相应的地质模型(图 1),其中平面与纵向渗透率比均设置为 10,贮水系数

设置为 1×10^{-5} ,平面渗透率、给水度及有效孔隙度等参数根据岩性数据进行赋值,见表 1。

表 1 岩性参数

Table 1 Lithology parameter

岩性	平面渗透率/ (m/d)	给水度/ (m ³ /m ³)	有效孔隙度
煤	0.03	0.05	0.045
泥岩	0.03	0.05	0.045
泥沙互层	0.07	0.07	0.063
细粉砂	0.10	0.10	0.090
细砂	0.30	0.15	0.135
中砂岩	0.40	0.15	0.135
中粗砂岩	0.45	0.20	0.180
粗砂岩	0.50	0.25	0.225
粗砂岩、砂砾岩	0.60	0.25	0.225

将整个模拟区在平面上剖分为 76×120 个网格,每个网格的长和宽均为 5 m,在 GMS 中采用 solid—>MODFLOW 功能,将建立的三维地质结构和岩性属性插值到每个网格中;在垂直方向上将网格均分为 40 层,模拟的深度范围为距离地面 700~740 m。模拟区的左右均设置为定水头边界,水头设置为 720 m;其他区域均设置为隔水边界,模型顶部与底部为隔水边界。

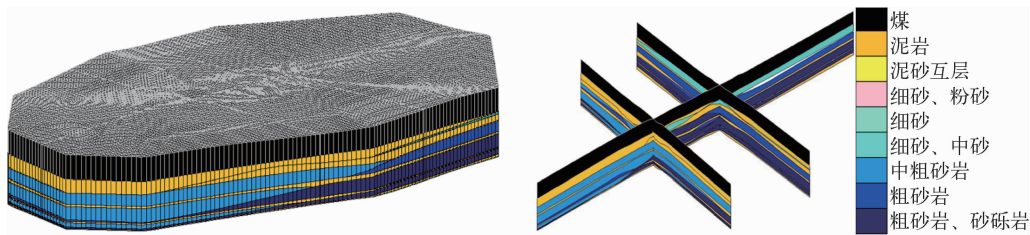


图 1 模拟区三维地质模型及剖面图

Fig. 1 3D geological model and cross-section of the simulation area

2.2 井参数设置

基于建立的研究区三维场地模型,根据 LK 矿床实际工艺井分布情况,在模型中添加 2 口水平井(H1、H2)和 8 口直井(V1、V2、V3、V4、V5、V6、V7 和 V8)。水平井位于模型第 33 层,水平段长度为 200 m。8 口直井分别位于水平井两侧,其中直井 V1、V2、V3 和 V4 位于第一口水平井的右上方,直井 V5、V6、V7 和 V8 位于两口水平井之间(图 2),

每口直井的对应开窗位置均为 5 m,与该井处的矿段中心对齐。

设置每口水平井初始注液量为 $200 \text{ m}^3/\text{d}$,每口直井抽液量为 $50 \text{ m}^3/\text{d}$ 。在模拟开始阶段,在水平井所在的网格均匀投放粒子,每个网格投放 $8 \times 8 \times 4$ 个粒子。运行 MODFLOW-CFP(地下水流模型)和 MODPATH(粒子示踪模型)模拟地下水流场和水平井注入液的有效溶浸范围。本研究的有

效溶浸范围定义为,在相应时间点所有被抽液井捕捉到的由注液井注入的粒子流经的网格总体积。

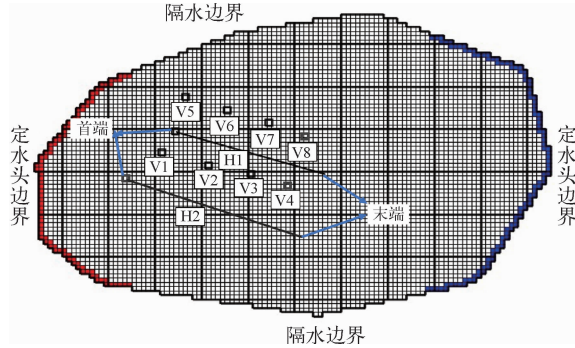


图2 初始模型设置

Fig. 2 Initial model setup

2.3 优化管理模型

2.3.1 多目标优化算法管理模型

将多目标优化算法与 MODFLOW-CFP 和 MODPATH 相耦合,模拟优化实际场地的有效溶浸范围,以每口井的抽注液量为决策变量,对有效溶浸范围和成本进行模拟优化。

选择实际场地模型中 2 口水平注液井、8 口垂直抽液井的抽注液量为决策变量,共计 10 个决策变量,管理期为 1 801 d,共 2 个应力期,−1 到 0 d 为第 1 个应力期;0 到 1 800 d 为第 2 个应力期,步长为 30 d,共 60 个时间步。水平井、直井均在第 2 个应力期开始工作。

目标函数:

$$\max f_1 = V_i, \quad (6)$$

$$\max f_2 = C_i; \quad (7)$$

约束条件:

$$Q_{1,\min} \leq Q_{1,i} \leq Q_{1,\max}, \quad (8)$$

$$Q_{P,\min} \leq Q_{P,i} \leq Q_{P,\max}, \quad (9)$$

$$Q_1 \leq Q_p \leq 1.03Q_1; \quad (10)$$

式中: f_1 —管理目标函数一; f_2 —管理目标函数二; V_i —不同抽注量下的溶浸范围, m^3 ; C_i —生产成本,万元; $Q_{1,i}$ —第 i 口水平注液井的总流量, m^3/d ; $Q_{1,\max}$ —单口水平注液井的最大总流量, m^3/d ,取 $600 m^3/d$; $Q_{1,\min}$ —单口水平注液井的最小注液流量, m^3/d ,取 $0 m^3/d$; $Q_{P,i}$ —第 i 口垂直抽液井的流量, m^3/d ; $Q_{P,\max}$ —单口垂直抽液井的最大流量, m^3/d ,取 $200 m^3/d$; $Q_{P,\min}$ —单口垂直抽液井的最小抽液流量, m^3/d ,取 $0 m^3/d$; Q_1 —研究

区总注液量, m^3/d ; Q_p —研究区总抽液量, m^3/d 。

2.3.2 LK 矿床生产成本

地浸采铀井场的生产成本主要有:1)井的基建费用。基于 LK 矿床实际井场成本,单口直井的基建费为 50 万元,单口水平井的基建费用约为 250 万元,LK 矿床的基建成本共 900 万元。2)井场的运行成本。该运行成本包括溶浸液的费用、井场运行用电、井场的维护费用,参照 LK 矿床实际计算,运行成本约为 $5.5 \text{ 元}/(m^3 \cdot d)$ 。

3 优化模拟结果分析

3.1 Pareto 解结果分析

多目标优化可以考虑在不同管理目标下权衡选择最优的决策方案。在多目标优化过程中,可以在 Pareto 解上选择权衡多方利益的最优解。图 3 中 R1、R2、R3 为非支配解集上不偏向任何一方目标函数的解,其中 R1 表示偏向最小生产成本的决策方案,R3 表示偏向最大有效溶浸范围的决策方案,R2 则是权衡两者关系后的折中方案。

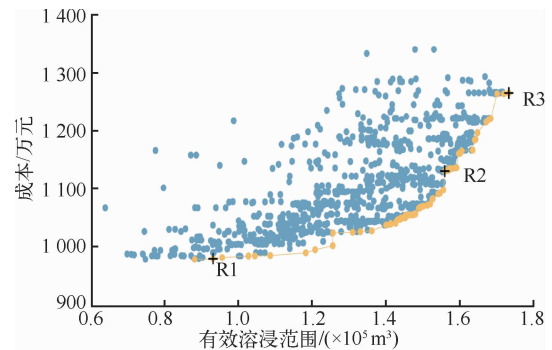


图3 管理目标空间内的 Pareto 解

Fig. 3 Pareto solutions within the objective space of management goals

对 3 个解的抽注方案进行分析,3 种典型的决策方案 R1、R2、R3 对应的成本分别为 987、1 115、1 297 万元,其中运行成本分别为 87、215、397 万元;其对应的有效溶浸范围分别为 8.81×10^4 、 1.60×10^5 、 $1.72 \times 10^5 m^3$ 。初始流场方案对应的成本为 1 340 万元,其中运行成本为 440 万元,其有效溶浸范围为 $1.47 \times 10^5 m^3$,初始流场方案的结果是在完成模型设置之后直接运行模型得到的相应结果。

3 种典型方案下所对应的溶浸范围见图 4。方案 R1 存在较明显的溶浸死角,溶浸死角主要集中在水平井的两端和直井之间的部位;而方案 R2、方案 R3 所对应的溶浸范围无明显溶浸死角。R3 相对 R1,其溶浸范围增大 95.23%,但运行成本增加了 3.56 倍;而 R2 比 R1 的溶浸范围增大了 81.61%,而其运行成本仅增加了 1.47 倍。与均匀布置流量的初始流场方案相比,R2 的运行成本降低了 51.14%,其溶浸范围增加了 8.84%。经过模拟优化后,在运行成本降低的情况下可提升有效溶浸范围;应用多目标优化可更好地找到适用的施工方案,合理安排生产成本与产出的比例关系。

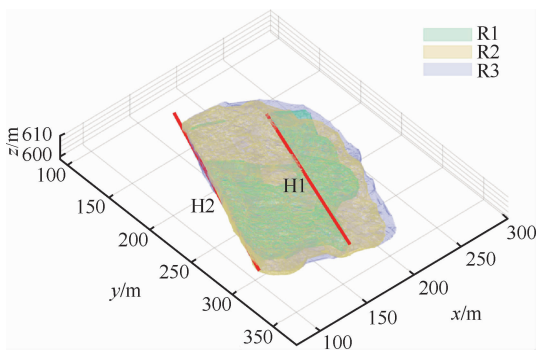


图 4 典型方案下溶浸范围对比
Fig. 4 Comparison of leaching ranges under typical scenarios

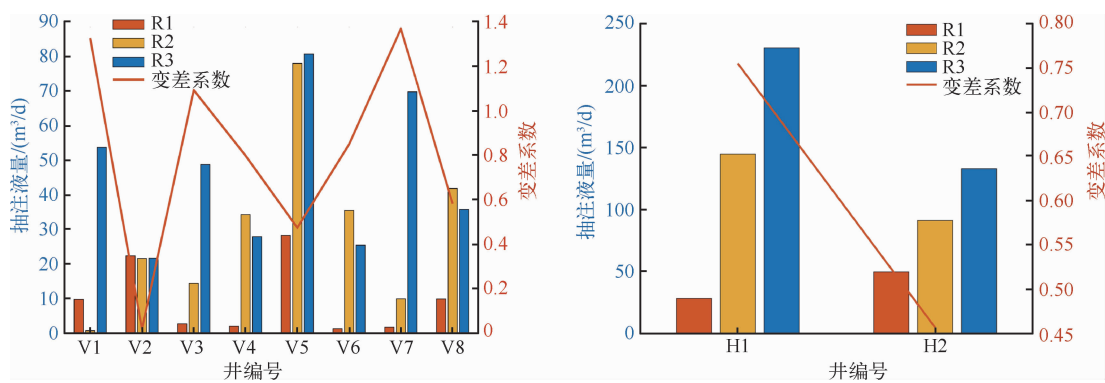


图 5 典型方案下抽/注液井流量分布及变差系数
Fig. 5 Flow rate distribution and variation coefficient of injection/extraction wells under typical scenarios

3.3 不同权重下的方案推荐

根据权重不同,为“水平井-直井”抽注运行系统提供不同决策方案。依据多目标优化的 Pareto 解集,选取了 6 组不同权重比例关系的组合,并得

3.2 变差系数分析

为分析 Pareto 中决策变量的变化程度,采用变差系数(Coefficient of Variation)进行分析。

$$C_{V,i} = \frac{\sqrt{\sum_{k=1}^N (p_{k,i} - p_{k,i}^{ave})^2 / (N-1)}}{p_{k,i}^{ave}}, \quad (11)$$

式中: $C_{V,i}$ —第 i 个决策变量的变差系数; N —Pareto 最优解的数量; $p_{k,i}$ —第 k 种决策方案下第 i 个决策变量; $p_{k,i}^{ave}$ —在 Pareto 解集中第 i 种决策变量的均值。

3 种典型方案下抽注液量的流量分布情况及其对应的变差系数值见图 5,每口井数据中间点对应的数值为该口井的变差系数值。可以看出,直井 V1、V7 和水平井 H1 的变差系数值较大,可认为这几口井为“重点井”;直井 V2 的变差分数值较小,可定义为“非重点井”;不属于“重点井”和“非重点井”的井定义为“普通井”。“重点井”的抽注液量调配对 LK 实际场地的管理运行决策影响较大。因此,在权衡最小化生产成本与最大化溶浸范围时,决策者可通过重点调控此类井的抽注液量以满足不同的管理需求。该结论也说明了在实际场地应用多目标优化算法的意义,即可在实际场地模型下区分出“重点井”“普通井”和“非重点井”,在运行决策时应重点优化调节“重点井”流量。

出每种组合对应的抽注液量关系(表 2)。表中前端直井指 V1 和 V5,中间直井指 V2、V3、V6 和 V7,末端直井指 V4 和 V8。对于水平井,注液的一端为首段,另一端为末端。可以看出,随着有效

溶浸范围权重占比的增大,总注液量逐渐增大,对
应生产成本也增大,总体呈非线性关系。通过多

目标优化可有效掌握此类权衡关系,并为决策者
提供更为合理的施工方案。

表 2 实际场地不同权重比例组合设置

Table 2 Combination settings of different weight ratios for the actual site

方案 编号	权重比例 (有效溶浸 范围·成本)	抽液量均值/(m ³ /d)			H1 注液量/ (m ³ /d)	H2 注液量/ (m ³ /d)	成本/ (10 ³ 万元)	溶浸范围/ (10 ⁵ m ³)
		前端直井	中间直井	末端直井				
1	0:10	10.50	14.14	20.13	45.20	75.63	980	0.89
2	2:8	20.79	21.45	35.84	98.46	101.20	1 040	1.41
3	4:6	25.86	24.25	56.99	135.81	105.90	1 070	1.49
4	6:4	29.79	30.16	60.72	180.46	121.21	1 110	1.56
5	8:2	35.67	50.41	52.56	220.85	156.42	1 210	1.65
6	10:0	52.32	56.82	66.59	282.19	180.94	1 280	1.74

随有效溶浸范围权重占比增大,位于水平井
末端的直井具有较高的抽液量,这说明位于水平
井末端的直井对于有效溶浸范围具有更高的贡献
度,其对有效溶浸范围在权衡解之间的增大具有
重要作用。因此,决策者可以更关注水平井末端
的抽液井,以此来满足各种不同权重关系下的施
工方案。同样,水平井 H1 在相对较低的有效溶浸范

围权重比下,其注液量明显小于水平井 H2,但随
着有效溶浸范围权衡比的升高,其注液量逐渐超
过水平井 H2。结合不同方案下的溶浸范围变化
图(图 6)来看,水平井 H1 在两侧都有直井,因
此随有效溶浸范围的权重占比增大,对于水平井
H1 右侧的溶浸范围扩大具有重要作用。决策者
可以通过调整此类水平注液井,来满足不同的施
工需求。

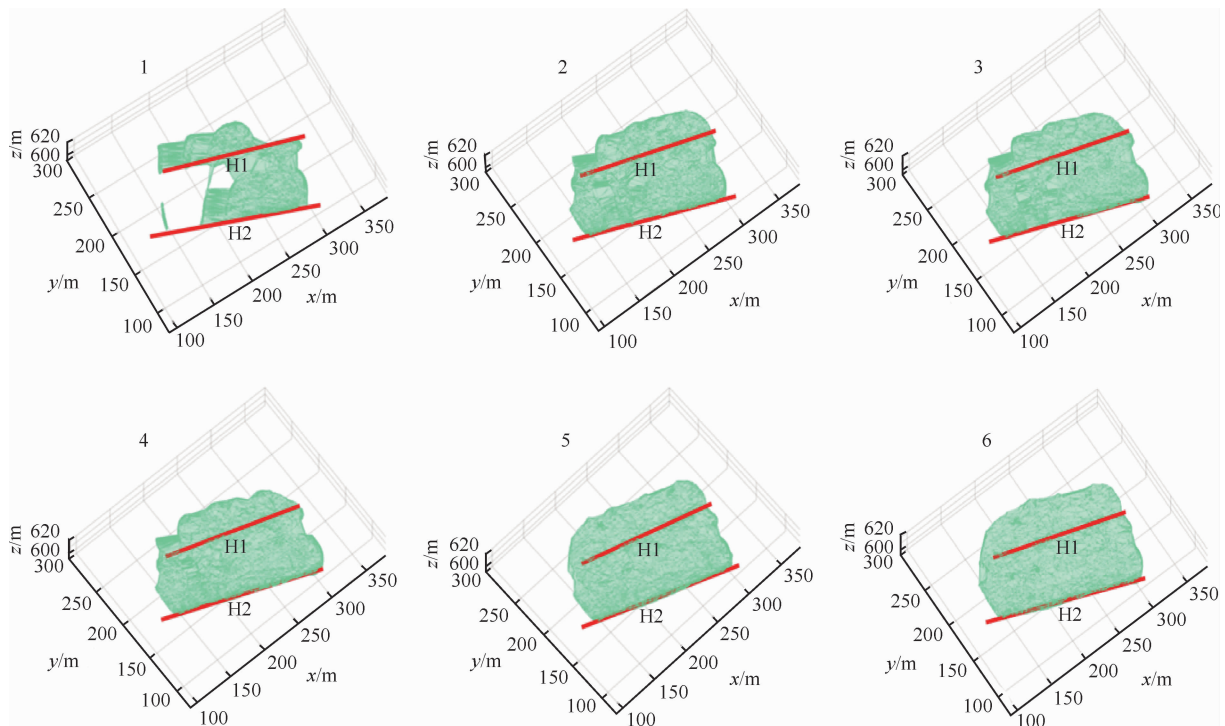


图 6 实际场地不同权重比下的有效溶浸范围

Fig. 6 Effective leaching range under different weight ratios for the actual site

4 结论

1) 筛选出了 Pareto 解中非支配解集上不偏向任何一方目标函数的解 R1、R2、R3, 其中 R1 表示更小的生产成本, R3 表示更大的溶浸范围, R2 则是权衡两者关系后的折中方案。与均匀布置流量的初始流场方案相比, R2 在运行成本降低 51.14% 的条件下, 溶浸范围增加了 8.84%。

2) 筛选出了 LK 矿区的“重点井”“普通井”“非重点井”, 在方案决策及调整时, 应重点关注 4 口“重点井”的流量。

3) 根据多目标优化的 Pareto 解集, 选取了 6 组不同有效溶浸范围和成本权重比例关系的抽注液量方案, 供决策者根据不同考量选择抽注液量方案。

参考文献:

- [1] 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): 29-36.
CHANG Yunxia, TAN Kaixuan, ZHANG Chong, et al. Simulation study on groundwater dynamics control of leaching range of in-situ uranium well field[J]. Journal of University of South China (Science and Technology), 2020, 34(5): 29-36(in Chinese).
- [2] 王飞飞, 刘池洋, 邱欣卫, 等. 世界砂岩型铀矿探明资源的分布及特征[J]. 地质学报, 2017, 91(9): 2021-2046.
WANG Feifei, LIU Chiyang, QIU Xinwei, et al. Characteristics and distribution of world's identified sandstone-type uranium resources[J]. Acta Geologica Sinica, 2017, 91(9): 2021-2046(in Chinese).
- [3] 邱文杰, 刘正邦, 杨蕴, 等. 砂岩型铀矿 CO₂ + O₂ 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 CO₂ + O₂ in-situ leaching in sandstone-type uranium ore[J]. Scientia Sinica: Technologica 2022, 52(4): 627-638 (in Chinese).
- [4] 李博, 刘晓阳, 胡柏石, 等. 地浸采铀工艺钻孔施工与成建井技术现状及改进建议[J]. 铀矿地质, 2012, 33(4): 252-256.
LI Bo, LIU Xiaoyang, HU Boshi, et al. Development status and improvement suggestions of well-drilling and well-constructing for uranium in-situ leaching[J]. Uranium Geology, 2012, 33(4): 252-256(in Chinese).
- [5] HARTLEY G S, GE O P. The Whiskey gap uranium project[R]. Los Angeles: North American Gem Ltd & International Ranger Corp, 2007: 23-26.
- [6] 苏学斌, 杜志明. 我国地浸采铀工艺技术发展现状与展望[J]. 中国矿业, 2012, 21(9): 79-83.
SU Xuebin, DU Zhiming. Development and prospect of China uranium in-situ leaching technology[J]. China Mining Magazine, 2012, 21(9): 79-83(in Chinese).
- [7] 谭亚辉, 廖文胜, 肖碧泉. 超深砂岩型铀矿地浸开采技术问题的探讨[J]. 铀矿冶, 2015, 34(3): 135-138.
TAN Yahui, LIAO Wensheng, XIAO Biquan, et al. Discussion on the problem of in-situ leaching mining ultra-deep sandstone-type uranium ore deposit[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2015, 34(3): 135-138(in Chinese).
- [8] 高文涛. 水平井钻井技术在石油开发中的发展应用[J]. 化工管理, 2022(24): 44-46.
GAO Wentao. Development and application of horizontal well drilling technology in oil development[J]. Chemical Engineering Management, 2022(24): 44-46(in Chinese).
- [9] 金涛, 张少敏, 李秀清, 等. 非常规油气藏水平井注采一体化技术探讨: 以四川盆地侏罗系油藏为例[J]. 天然气勘探与开发, 2023, 46(1): 119-126.
JIN Tao, ZHANG Shaomin, LI Xiuqing, et al. Injection-production integration for horizontal wells in unconventional oil and gas reservoirs: Examples from Jurassic reservoirs in Sichuan Basin[J]. Natural Gas Exploration and Development, 2023, 46(1): 119-126(in Chinese).
- [10] 李荣强, 吕爱民, 王建忠, 等. 低渗透油藏仿水平井注采井网产能[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(3): 439-443.
LI Rongqiang, LÜ Aimin, WANG Jianzhong, et al. Productivity of the imitation horizontal well pattern in low permeability reservoirs[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(3): 439-443(in Chinese).
- [11] 曹振义, 刘鹏程, 赵广民, 等. 低渗透油藏水平井注 CO₂ 井网优化与影响因素[J]. 现代地质, 2016, 30(2): 382-387.
CAO Zhenyi, LIU Pengcheng, ZHAO Guangmin, et al. Well pattern optimization and influencing factors for CO₂ injection of horizontal wells in low permeability reservoir [J]. Geoscience, 2016, 30

- (2):382-387(in Chinese).
- [12] 孙广义,刘英宪,翟上奇,等.水平注采井网水驱油规律研究[J].石油化工应用,2018,37(10):24-28.
SUN Guangyi, LIU Yingxian, ZHAI Shangqi, et al. Research on the law of water flooding in horizontal well pattern[J]. Petrochemical Industry Application, 2018, 37(10): 24-28(in Chinese).
- [13] 刘佳佳.深部砂岩铀储层水平井竖井联合开采渗流规律模拟研究[D].石家庄:石家庄铁道大学,2021.
- [14] 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):18-24.
- 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): 18-24(in Chinese).
- [15] LI Q, LI Z, XIE T, et al. Analysis of natural groundwater flowing into the flow field of in situ leaching mining [J]. Processes, 2023, 11 (2): 471-486.
- [16] 杨蕴.多目标进化算法及其在地下水优化管理中的应用研究[D].南京:南京大学,2012.

Flow Decision-making Method for the "Horizontal Well-Vertical Well" System Based on Multi-objective Optimization Algorithm

ZHANG Yu¹, MA Liang², LI Zhaokun¹, ZHAO Longhao¹, LI Xinghao¹, LI Qinci¹

(1. Beijing Research Institute of Chemical Engineering and Metallurgy, CNNC, Beijing 101149, China;

2. China General Nuclear Power Group (CGN) Uranium Resources Co., Ltd., Beijing 100029, China)

Abstract: The design of injection and extraction fluid volume is closely related to both the effective leaching range of the lixiviant and the operational cost of the well field. To facilitate economically efficient decision-making regarding injection and extraction fluid volume in the "horizontal well-vertical well" system within the in-situ leaching uranium mining domain, a simulation-based optimization decision method for the "horizontal well-vertical well" system is proposed, leveraging multi-objective optimization algorithms. The research indicate that, compared to the initial scheme of uniformly distributing injection and extraction fluid volume, the decision scheme R2 achieves an 8.84% increase in the leaching range while reducing operational costs by 51.14%. This method has identified four "key wells" in the LK mining area, emphasizing the importance of closely monitoring the flow rates of such wells during scheme decision-making and adjustments. Based on the Pareto solution set derived from the multi-objective optimization, six combinations of injection and extraction operational schemes with varying effective leaching ranges and cost-weight ratios are selected to guide decision-makers in their scheme selection.

Key words: in-situ leaching uranium; horizontal well; multi-objective optimization; Pareto; deep uranium deposit; pumping-injection liquid volume; effective leaching rang