

地浸铀矿山终采区地下水中铀的自然衰减 数值模拟预测

杨冰¹, 孟童¹, 张昊岩¹, 连国玺², 李梦姣¹

(1. 中核第四研究设计工程有限公司, 河北 石家庄 050021;

2. 北京师范大学 环境学院, 北京 100875)

摘要: 地浸铀矿山终采区地下水环境修复问题是社会各界关注的焦点, 当前对地浸终采区地下水 U 浓度的长期变化情况尚不清楚。综合利用野外调查及数值模拟方法, 以中国北方某“CO₂ + O₂”地浸铀矿山典型终采区为研究对象, 在识别终采区地下水 U 分布特征的基础上, 定量预测了不同时间地下水中 U 的自然衰减趋势, 量化了 U 浓度在较长时间尺度上的变化情况。结果表明, 终采区地下水中 $\rho(U)$ 为 0.273~5.24 mg/L, $\rho(U)$ 低于 2.5 mg/L 的取样点占比为 64%; 在地浸铀矿山终采后, 地下水流向趋向于区域地下水的流向; 当不考虑 U 自然衰减作用时, 地下水中 U 在终采 100 年时可迁移至下游 167 m 处, 预测迁移距离较保守; 当考虑 U 的自然衰减作用时, 终采 100 年时 U 的迁移距离仅为 42 m, 采区内地下水中的 $\rho(U)$ 由模拟初始条件设置的 2.5 mg/L 降至 1.0 mg/L。自然衰减作用可降低地浸终采区地下水中 U 的迁移距离和浓度水平, 监控自然衰减技术 (Monitored Natural Attenuation, MNA) 可作为未来地浸铀矿山地下水修复的备选方案。

关键词: 地浸铀矿山; 监控自然衰减; 地下水; 铀; 数值模拟

中图分类号: TL212; X523 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8063(2025)01-0093-08

DOI: 10.13426/j.cnki.yky.2024.06.12

监控自然衰减 (Monitored Natural Attenuation, MNA) 是指在污染场地中, 通过实施有计划的监测方案, 基于场地自然发生的物理、化学及生物等作用 (包括稀释、扩散、挥发、吸附、化学性或生物性稳定、生物降解以及放射性衰减等), 使土壤和地下水中污染物的数量、毒性、可迁移性降低到风险可接受水平^[1]。该技术对放射性及非放射性元素均有修复效果^[2], 且成本较低、无二次污染。学者利用 U、S 同位素方法证明了当地质条件有利于氧化还原反应时, 自然衰减可作为一种具有成本效益的修复方案; 硫酸盐还原过程是地下水中 U 自然衰减的主要作用^[3-4]。Reimus 等利用野外试验研究了地浸铀矿山地下水中 U 的自然衰减情况, 通过注入含 U 溶液, 对比抽出液中 U 的回收率来验证 U 在含水层中的自然衰减情况, 试验一年后, 抽出液中含有 39% 的 U^[5]。U 共有 3 种天然同位素, 半衰期分别为 4.47×10^9

(²³⁸U)、 7.04×10^8 (²³⁵U) 和 2.46×10^5 (²³⁴U) 年。目前, 长时间尺度下地下水中 U 的自然衰减情况尚不清楚, 准确预测地浸铀矿山终采区地下水中 U 的自然衰减行为, 对地下水修复方案的选择与制定至关重要。

GMS 软件在地下水污染物运移模拟预测领域应用广泛^[6-8], 利用数值模拟技术可实现污染物迁移情况的长期预测。GMS 软件中的“概念建模”方法可较全面反映研究区的水文地质条件, 其中 MODFLOW 及 MT3DMS 模块可较好地解决地浸铀矿山流场预测及溶质运移预测问题^{[9-10][11]99}。目前, 对地浸铀矿山地下水的数值模拟工作大多聚焦于对流场变化情况的预测^[12-13]; 而 U 的地球化学性质活泼, 在地下水中迁移时会发生吸附-解吸^[14-16]、氧化-还原^[17-18]等多种水文地球化学反应, 利用适当参数表征 U 因化学反应而发生的固液两相间的迁移情况是合理预测 U

收稿日期: 2024-06-27

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (CO₂ + O₂ 地浸铀矿山退役采区地下水铀的生物地球化学过程及反应运移机理, 项目编号 42072273)。

第一作者简介: 杨冰 (1988—), 男, 河北保定人, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为地浸采铀及地下水修复。

迁移范围的基础。分配系数(K_d)是环境影响评估的重要参数,可用来预测地下水中 U 的反应运移情况^{[19],[20]};当其表示为 pH、 Eh 以及配位体浓度的函数时,还可表征 U 在固液两相间的分配情况^[21]。

以中国北方某“ $CO_2 + O_2$ ”地浸铀矿山的典型终采区(C7采区)为研究对象,通过野外取样调查确定采区终采时地下水中 U 的分布情况;结合该铀矿区域水文地质条件,利用 GMS 软件建立 C7 采区数值模型;以 K_d 综合反映地下水中 U 因吸附、还原等过程的自然衰减情况,预测长时间序列地下水中 U 的迁移范围,以期自然衰减技术的可行性提供依据。

1 研究区概况

1.1 采区概况

C7 采区 2012 年投产运行,共有 27 口抽液井、74 口注液井,采用“五点型”与“七点型”相结合的井型,其中“五点型”抽注液井间距为 30 m,“七点型”抽注液井间距为 28 m,累计浸采率已达 80%。该采区与其他采区相对位置见图 1。

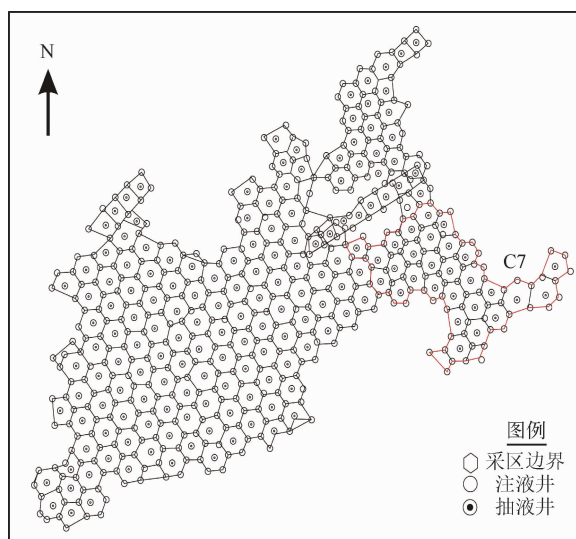


图 1 C7 采区相对位置示意图

Fig. 1 Location of C7 mining area

1.2 水文地质条件

研究区铀矿床构造上处于松辽盆地西南部开鲁拗陷钱家店次级凹陷内,区域上属于松辽平原辽河水文地质单元^[22]。C7 采区含矿含水层为姚家组下段^[23],岩性主要为浅灰色、浅红色含粉砂

细-中粒砂岩、中细砂岩、细砂岩。采区终采时,利用抽水试验获得的渗透系数为 0.55~0.62 m/d,水位埋深为 18.54~54.30 m。受生产阶段抽注影响,采区内部流场发生了明显变化,等水位线见图 2,区域地下水整体流向仍保持由西南向东北。

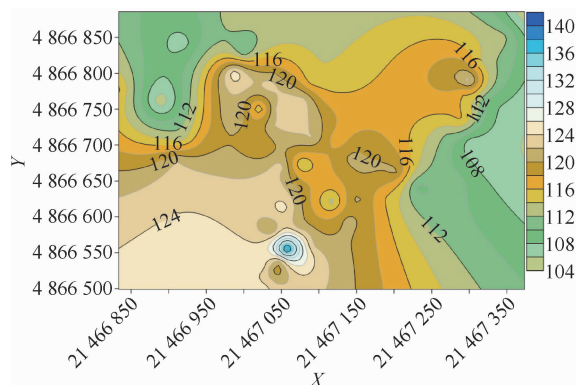


图 2 C7 采区终采阶段水头等值线图

Fig. 2 Flow field of C7 mining area at post-mining stage

1.3 终采区地下水铀分布现状

地下水样品采集遵循《地下水环境监测技术规范》(HJ 164—2020)中的地下水采样方法,取样深度为对应含矿层深度位置。2022 年 8—11 月,共采集 C7 采区内 39 口井的地下水样品。样品采集前,先利用潜水泵抽出 3 倍以上井筒体积的水,之后利用 SS Geosub2 电动潜水泵定深采集深度 250 m 处的地下水样品,该深度为研究区含矿含水层对应深度。采出地下水样品后,用 0.45 μm 孔径的滤膜过滤,并用 1:1 的 HNO_3 将地下水样品酸化至 $pH < 2$ 之后,使用 ICP-AES(i CAP6000, Thermo)电感耦合等离子体原子发射光谱法测定地下水中的 U 浓度。样品测试前进行空白样品及标准物质测定,以控制测试质量。

结果表明,终采区地下水中 $\rho(U)$ 为 0.273~5.24 mg/L,其中仅有 1 口井地下水中 $\rho(U)$ 大于 5.0 mg/L; $\rho(U)$ 大于 2.5 mg/L 的样品数为 14,占比约为 36%; $\rho(U)$ 小于 1.0 mg/L 的样品数为 18,占比约为 46%。 $\rho(U)$ 分布情况见图 3。可以看出,C7 采区地下水中 $\rho(U)$ 存在较大的空间变异性,这主要受控于铀矿品位与生产过程。

2 地下水铀自然衰减预测模型

利用 GMS 软件进行终采区地下水铀自然衰减预测,计算模块为 MODFLOW 与 MT3DMS。

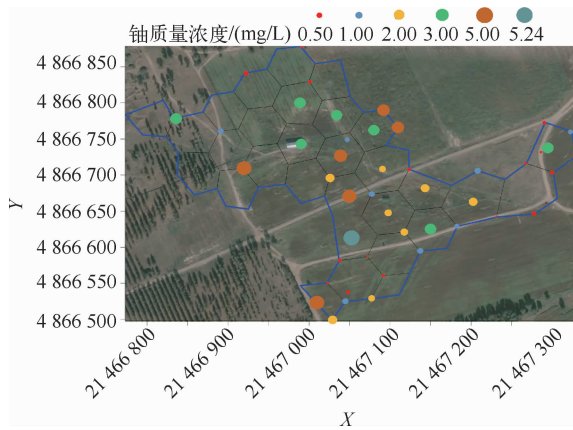


图 3 C7 采区地下水 U 分布情况

Fig. 3 Distribution of groundwater U in C7 mining area

2.1 概念模型

2.1.1 模拟范围及边界条件

在本研究中,忽略其他采区生产对 C7 采区的影响。结合区域地下水流向,在垂直水流方向采区边界上、下游约 1 000 m 处,设置为通用水头边界;在平行水流方向采区两侧约 600 m 处,设置为零流量边界(图 4)。

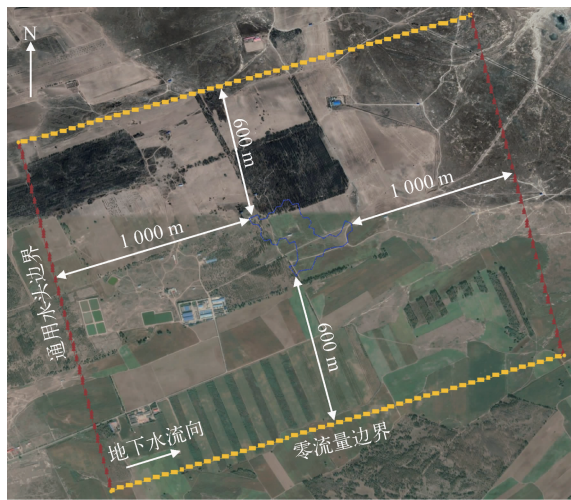


图 4 模型边界条件示意图

Fig. 4 Boundary conditions of the model

2.1.2 初始条件

利用 Dipper-T 水位计测试了 C7 采区 56 口井的水位埋深,为 17.8~53.6 m;结合井口标高获取初始水头,为 104.21~140.34 m。根据地下水样品 $\rho(U)$ 测试结果,64% 的地下水样品 $\rho(U) < 2.5 \text{ mg/L}$,可以保守地认为终采区地下水 $\rho(U)$ 在该浓度水平时,即可以不再进行人工干预,而靠自然衰减作用处理。因此,C7 终采时采区内部

$\rho(U)$ 取统一值(2.5 mg/L)用于后续模拟预测。

2.1.3 模型参数

根据现场抽水试验结果设置采区内部渗透系数,参考投产前数值确定采区外部渗透系数,根据前期室内试验结果选择分配系数^[24],弹性贮水率、孔隙度及弥散度选择经验值。模型主要参数见表 1。

表 1 模型主要参数一览表

Table 1 Main parameters of the model

参数分区	主要参数	取值	依据
采区内	渗透系数/(m/d)	0.6	现场抽水试验
	弹性贮水率/(1/m)	10^{-4}	经验值
	孔隙度	0.32	经验值
	弥散度/m	10	经验值
采区外	分配系数/(m^3/mg)	10^{-10}	文献 ^[20] ⁶
	渗透系数/(m/d)	0.1	文献 ^[11] ⁹⁸
	弹性贮水率/(1/m)	10^{-4}	经验值
	孔隙度	0.30	经验值
	弥散度/m	10	经验值
	分配系数/(m^3/mg)	10^{-8}	文献 ^[20] ⁶

2.2 数值模型

模型共剖分了 21 402 个网格,单个网格大小约为 13 m×10 m。共设置了 365 个盈利期,总模拟时长 36 500 d。

3 结果与讨论

3.1 流场变化情况

地下水中放射性核素的分布受控于水流系统及地球化学特征,地下水流速、含水介质的氧化还原条件等都会影响地下水中 U 的迁移。因此,水文地质条件及渗流系统的演化对放射性核素在地下水中的迁移影响较大^[25]。在地浸采区生产时,抽注液井运行且总抽液量大于总注液量,受抽注液井运行情况的影响,采区内流场会发生明显的变化,在注液井周围形成高水头区,在抽液井周围形成低水头区,而采区整体形成指向其内部的水力梯度。采区终采后,原有的抽注液井停止运行,在天然水力梯度的影响下,采区内部流场会向整体区域流场的形态演化。根据模拟结果(图 5),C7 采区在终采 1 年后,地下水流向又变为由西南指向北东,与矿床所处区域地下水整体流向一致。



图5 C7采区终采后区域流场变化情况

Fig. 5 Change of regional flow field of C7 mining area at post-mining stage

3.2 不考虑自然衰减时 U 的迁移范围

当不考虑化学反应对地下水中 U 迁移的影响时, U 仅在对流、水动力弥散作用下进行迁移。不考虑 K_d 时的溶质运移模拟结果见图 6。可以看出, 终采 1 年后, C7 采区内残余浸出液中的 U 在天然流场的影响下, 向下游迁移了约 18 m; 10 年后, 地下水中 U 向下游的迁移距离增加到 37 m; 50 年后, 地下水中 U 向下游迁移距离为 96 m; 100 年时, 地下水中 U 向下游迁移的距离达到 167 m。从整体上看, 污染羽中心已经迁移至采区外部。根据前人的研究结果, 终采区中污染物向下游迁移的速度远低于区域地下水流速^[26]。因此, 在不考虑各种水岩相互作用造成的地下水中 U 的自然衰减情况时, 预测得到的地下水中 U 的迁移距离偏保守。

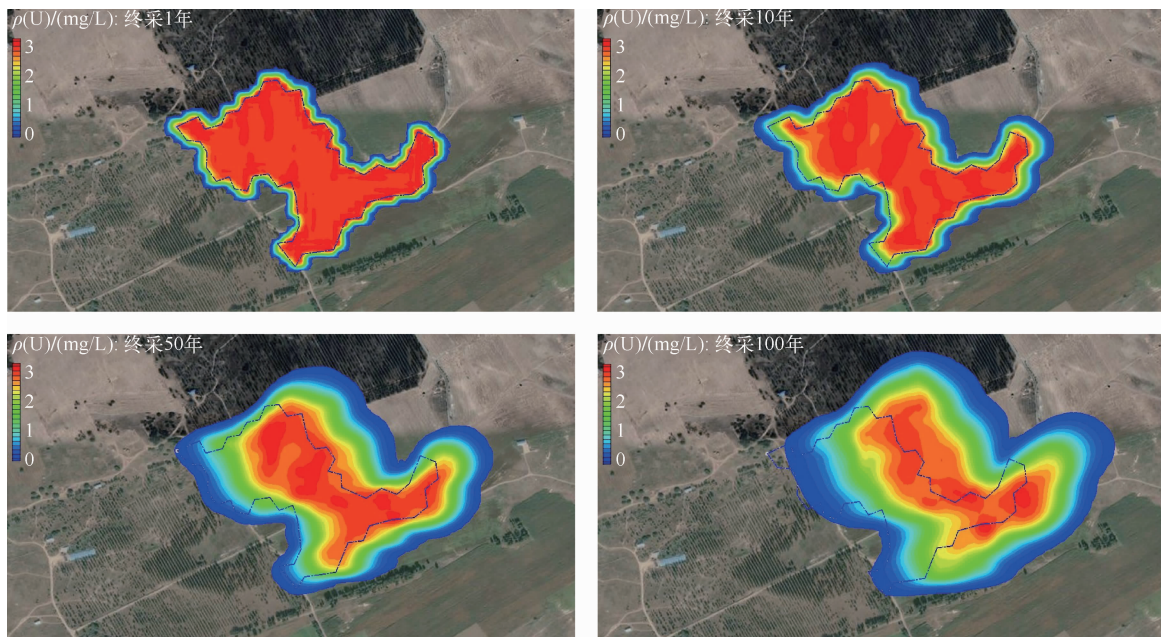


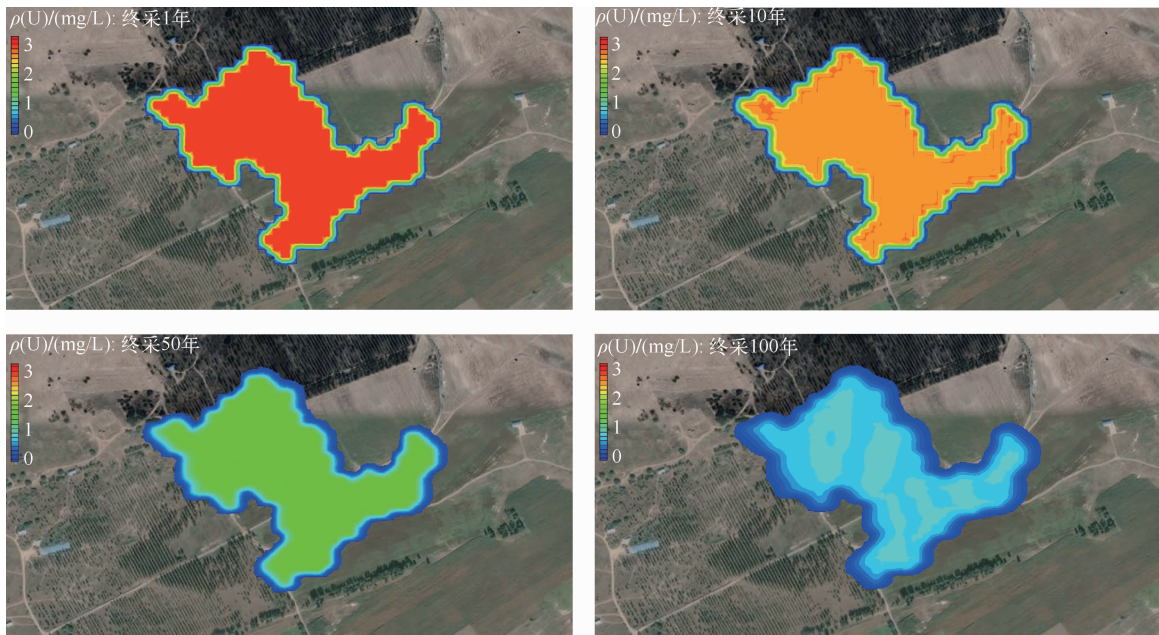
图6 不考虑 K_d 时不同时间地下水中 U 的迁移距离

Fig. 6 Transport distance of groundwater U at different time without K_d

3.3 考虑自然衰减时 U 的迁移范围

地下水中 U 的化学性质活泼, 砂岩对地下水中 U 的吸附作用明显^[27-28], 黄铁矿等还原性物质的存在也会进一步降低地下水中 U 的可迁移性^[29-31]。通过在模型中加入 K_d 值, 以反映 U 因吸附、还原等作用而发生的自然衰减情况, 从模拟结果(图 7)可得出, 受自然衰减作用的影响, 地下水中 U 的迁移距离明显减小, 采区终采 1 年后, 其迁移距离约 13 m; 终采 10 年后, 其迁移距离约

为 18 m; 终采 50 年后, U 的迁移距离为 31 m; 采区终采 100 年时, 其迁移距离仅为 42 m, 相较于不考虑 U 的自然衰减过程时, 迁移距离减小了约 75%, 大部分 U 浓度较高的残余浸出液仍在采区内分布。同时, 由于自然衰减作用, 地下水中 $\rho(U)$ 也有较明显的降低趋势, 在采区终采 100 年后, 采区内大部分区域地下水 $\rho(U)$ 由初始的 2.5 mg/L 降至 1.0 mg/L 以下。

图 7 考虑 K_d 时不同时间地下水中 U 的迁移距离Fig. 7 Transport distance of groundwater U at different time with K_d

4 结论

1) 地浸采区终采后,流场形态会发生明显变化。在天然水力梯度影响下,生产阶段形成的“降落漏斗”会逐渐消失,终采区流场形态向区域流场形态演化,地下水流向趋向区域地下水流向。

2) 当不考虑 U 在地下环境中的自然衰减作用时,其迁移距离主要受控于地下水的渗流速度及水动力弥散作用,地下水中 U 的迁移距离偏大;当考虑 U 的自然衰减作用时,地下水中 U 的迁移距离明显减小,U 浓度显著降低。 K_d 可作为集总性参数,反映吸附、还原等作用造成的地下水中 U 的自然衰减情况。

3) 自然衰减作用可以明显降低地下水中 U 的浓度,监控自然衰减技术具有作为地浸铀矿山地下水修复方案的可行性。

参考文献:

- [1] 李元杰,王森杰,张敏,等.土壤和地下水污染的监控自然衰减修复技术研究进展[J].中国环境科学,2018,38(3):1185-1193.
LI Yuanjie, WANG Jieshen, ZHANG Min. Research progress of monitored natural attenuation remediation technology for soil and groundwater pollution [J]. China Environmental Science, 2018, 38 (3):

- 1185-1193(in Chinese).
[2] 孟童,杨冰,连国玺,等.地浸铀矿山地下水修复技术研究进展[J].铀矿冶,2023,42(4):39-46.
MENG Tong, YANG Bing, LIAN Guoxi, et al. Research progress on groundwater remediation technology at in-situ leaching uranium mines[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2023, 42 (4): 39-46 (in Chinese).
[3] LIU Z Z, LI C G, TAN K X, et al. Study of natural attenuation after acid in situ leaching of uranium mines using isotope fractionation and geochemical data[J]. Science of the Total Environment, 2023, 865:161033.
[4] LIU Z Z, TAN K X, LI C G, et al. Geochemical and S isotopic studies of pollutant evolution in groundwater after acid in situ leaching in a uranium mine area in Xinjiang[J]. Nuclear Engineering and Technology, 2023, 55(4):1476-1484.
[5] REIMUS P W, DANGELMAYR M A, CLAY J T, et al. Uranium natural attenuation downgradient of an in situ recovery mine inferred from a cross-hole field test[J]. Environmental Science & Technology, 2019, 53(13):7483-7493.
[6] 李明,张刘俊,冯涛,等.污染场地地下水中砷的运移模拟研究[J].安全与环境工程,2022,29(2):141-150.
LI Ming, ZHANG Liujun, FENG Tao, et al. Simula-

- tion study on arsenic transport in groundwater of contaminated sites [J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2022, 29(2): 141-150 (in Chinese).
- [7] 高志鹏, 郭华明, 屈吉鸿. 卫河流域河流-地下水系统氮素运移的数值模拟[J]. *地学前缘*, 2018, 25(3): 273-284.
- GAO Zhipeng, GUO Huaming, QU Jihong. Numerical simulation of nitrogen transport in river-groundwater system in the Weihe River Basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 2018, 25(3): 273-284 (in Chinese).
- [8] 邓红卫, 贺威, 胡建华, 等. Fe^0 -PRB 修复地下水硝酸盐污染数值模拟[J]. *中国环境科学*, 2015, 35(8): 2375-2381.
- DENG Hongwei, HE Wei, HU Jianhua, et al. Numerical simulation of Fe^0 -PRB in rehabilitating groundwater contaminated by nitrate [J]. *China Environmental Science*, 2015, 35(8): 2375-2381 (in Chinese).
- [9] ZHANG C, XIE T T, TAN K X, et al. Hydrodynamic simulation of the influence of injection flow rate regulation on in-situ leaching range [J]. *Minerals*, 2022, 12(7): 787.
- [10] 郭芷琳, 马瑞, 张勇, 等. 地下水污染物在高度非均质介质中的迁移过程: 机理与数值模拟综述[J]. *中国科学: 地球科学*, 2021, 51(11): 1817-1836.
- GUO Zhilin, MA Rui, ZHANG Yong, et al. Contaminant transport in heterogeneous aquifers: A critical review of mechanisms and numerical methods of non-fickian dispersion [J]. *Scientia Sinica: Terrae*, 2021, 51(11): 1817-1836 (in Chinese).
- [11] 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(S1): 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(S1): 98-104 (in Chinese).
- [12] 杨冰, 陈帅瑶, 连国玺, 等. 某酸法地浸铀矿山全采区地下水流场变化数值模拟[J]. *中国矿业*, 2021, 30(12): 146-153.
- YANG Bing, CHEN Shuaiyao, LIAN Guoxi, et al. Numerical simulation of groundwater flow field change in the whole mining area of an acid in-situ leaching uranium mine [J]. *China Mining Magazine*, 2021, 30(12): 146-153 (in Chinese).
- [13] 霍晨琛, 肖诗伟, 陈帅, 等. 某地浸铀矿山开采条件下地下水流场特征分析[J]. *铀矿冶*, 2022, 41(4): 359-367.
- HUO Chenchen, XIAO Shiwei, CHEN Shuai, et al. Analysis of groundwater flow field characteristics under mining conditions of an in-situ leaching uranium mine [J]. *Uranium Mining and Metallurgy*, 2022, 41(4): 359-367 (in Chinese).
- [14] 杨冰, 惠淑君, 郭华明, 等. 地浸井场外围含水层砂岩对铀的吸附行为[J]. *环境科学学报*, 2020, 40(11): 3958-3963.
- YANG Bing, HUI Shujun, GUO Huaming, et al. Adsorption of uranium on aquifer sandstone obtained near in-situ leaching uranium mine [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, 40(11): 3958-3963 (in Chinese).
- [15] 惠淑君, 杨冰, 郭华明, 等. 不同因素对砂岩含水层介质吸附铀的影响[J]. *地学前缘*, 2021, 28(5): 68-78.
- HUI Shujun, YANG Bing, GUO Huaming, et al. Factors affecting uranium adsorption on aquifer sandstone [J]. *Earth Science Frontiers*, 2021, 28(5): 68-78 (in Chinese).
- [16] 崔迪, 杨冰, 郭华明, 等. 砂岩含水介质中铀的吸附和迁移行为研究[J]. *地学前缘*, 2022, 29(3): 217-226.
- CUI Di, YANG Bing, GUO Huaming, et al. Adsorption and transport of uranium in porous sandstone media [J]. *Earth Science Frontiers*, 2022, 29(3): 217-226 (in Chinese).
- [17] 杨岚芝, 周义朋, 徐玲玲, 等. $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ 浸铀体系铀的 E_h -pH 优势场分布特征[J]. *有色金属(冶炼部分)*, 2022(12): 60-66.
- YANG Lanzhi, ZHOU Yipeng, XU Lingling, et al. Pourbaix diagram of uranium in $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ leaching system of sandstone type uranium ore [J]. *Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy)*, 2022(12): 60-66 (in Chinese).
- [18] HANSSON N L, SALEH M, TAM P L, et al. Influence of groundwater composition on the reductive precipitation of U(VI) on corroding iron foil surfaces [J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2023, 577: 154324.
- [19] MANOJ S, THIRUMURUGAN M, ELANGO L. Determination of distribution coefficient of uranium from physical and chemical properties of soil [J].

- Chemosphere, 2020, 244[2024-12-16].
- [20] 杨冰,孟童,郭华明,等.基于 K_d 的某酸法地浸铀矿山地下水铀运移模拟[J].地学前缘, 2024, 31(3): 381-391.
YANG Bing, MENG Tong, GUO Huaming, et al. K_d -based transport modeling of uranium in groundwater at an acid leaching uranium mine[J]. Earth Science Frontiers, 2024, 31(3): 381-391 (in Chinese).
- [21] DEGUELDRE C, MCGOWAN S. Simulating uranium sorption onto inorganic particles: The effect of redox potential [J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2020, 225:106408.
- [22] 禹宝利,张振强.松辽盆地南部钱家店凹陷姚家组含水层水成铀矿作用分析[J].铀矿冶, 2022, 41(4):346-351.
YU Baoli, ZHANG Zhenqiang. Analysis on hydrogenic uranium mineralization of Yaojia Formation aquifer in Qianjiadian Depression of South Songliao Basin[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2022, 41(4):346-351(in Chinese).
- [23] 任锦荣,夏毓亮,张振强.松辽盆地南部钱家店铀矿床钱 II 块元素地球化学特征研究[J].铀矿冶, 2022, 41(4):339-345.
REN Jinrong, XIA Yuliang, ZHANG Zhenqiang. Characteristics of element geochemistry of qian II block of Qianjiadian uranium deposit in South Songliao Basin[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2022, 41(4):339-345(in Chinese).
- [24] YANG B, CUI D, MENG T, et al. Characteristics and influencing factors of uranium adsorption by sandstones outside an acid in situ leaching uranium mining area [J]. Environmental Earth Sciences, 2023, 82(22):532.
- [25] ANITA ERÖSS, KATALIN CSONDOR, BÁLINT IZSÁK, et al. Uranium in groundwater: The importance of hydraulic regime and groundwater flow system's understanding [J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2018, 195:90-96.
- [26] DONG Y H, XIE Y Q, LI G M, et al. Efficient natural attenuation of acidic contaminants in a confined aquifer [J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(7):5389-5396.
- [27] BAQER Y, THORNTON S, STEWART D I, et al. Analysis of uranium sorption in a laboratory column experiment using a reactive transport and surface complexation model [J]. Transport in Porous Media, 2023, 149(2):423-452.
- [28] KENNEY J, LEZAMA-PACHECO J, FENDORF S, et al. Uranium surface processes with sandstone and volcanic rocks in acidic and alkaline solutions [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2023, 645:715-723.
- [29] MA B, FERNANDEZ-MARTINEZ A, KANG M L, et al. Influence of surface compositions on the reactivity of pyrite toward aqueous U(VI) [J]. Environmental Science & Technology, 2020, 54(13): 8104-8114.
- [30] YANG Z W, KANG M L, MA B, et al. Inhibition of U(VI) reduction by synthetic and natural pyrite [J]. Environmental Science & Technology, 2014, 48(18):10716-10724.
- [31] HUA B, DENG B L. Reductive immobilization of uranium(VI) by amorphous iron sulfide [J]. Environmental Science & Technology, 2008, 42(23): 8703-8708.

Numerical Simulation Prediction of Natural Attenuation of Groundwater Uranium in a Post-mining Area at an In-situ Leaching Uranium Mine

YANG Bing¹, MENG Tong¹, ZHANG Haoyan¹, LIAN Guoxi², LI Mengjiao¹

(1. The Fourth Research and Design Engineering Corporation, CNNC, Shijiazhuang 050021, China;

2. School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: The remediation of groundwater environment in the post-mining area at in-situ leaching uranium mines has aroused widespread public concern. The long-term change of groundwater U concentration in the post-mining area is still unclear. Field investigation and numerical simulation methods were comprehensively used in this study, and a typical post-mining area of a “CO₂+O₂” in-situ leaching uranium mine in northern China was taken as the research object. On the basis of identifying the distribution characteristics of groundwater U in the post-mining area, the natural attenuation trend of U in groundwater at different times was quantitatively predicted, and the long-term change of U concentration was quantified. The results show that the concentration of U in the groundwater in the post-mining area is 0.273~5.24 mg/L, and the sampling points with U concentration lower than 2.5 mg/L accounted for 64%. The simulation results show that in the post-mining stage, the groundwater flow direction tend to the regional groundwater flow direction. When the natural attenuation process of U is not considered, U in groundwater migrate to 167 m downstream after 100 years of final mining, and the predicted migration distance is conservative. When the natural attenuation of U is considered, the migration distance of U is only 42 m after 100 years of final mining. The concentration of U in the groundwater in the mining area is reduced from the initial 2.5 mg/L to below 1.0 mg/L. Natural attenuation can reduce the migration distance and the concentration of groundwater U in the post-mining area, and the monitored natural attenuation (MNA) technology can be used as an alternative scheme for groundwater remediation at in-situ leaching uranium mines in the future.

Key words: in-situ leaching uranium mine; monitored natural attenuation; groundwater; uranium; numerical simulation