

某 $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ 地浸铀矿山终采区地下水铀的分布特征及自然衰减规律

杨 冰¹, 孟 童², 张昊岩², 赵利信¹

(1. 核工业北京化工冶金研究院, 北京 101149;

2. 中核第四研究设计工程有限公司, 河北 石家庄 050021)

摘要:近年来,我国已有多座 $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ 地浸铀矿山面临终采退役,因此开展地浸终采区地下水修复相关研究具有重要意义。自然衰减修复技术是一种经济有效的修复方案,国外多个地浸铀矿山的修复案例已证实其可行性,但目前关于 $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ 铀矿地浸终采区地下水中 U 的自然衰减规律尚未形成系统认识。为此,以我国某 $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ 地浸铀矿山典型终采区为研究对象,在野外调查取样基础上,利用水化学分析及多元统计等方法,分析确定了其地下水 U 的分布特征及自然衰减规律。结果表明:终采区地下水水化学类型转为 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4\text{-Na}$ 型与多阴离子-Na 型;终采区地下水中 U 质量浓度为 0.11~7.99 mg/L,且与其他主要组分相关性不强;69% 的地下水样品存在 U 的自然衰减现象,U 浓度衰减率为 4.72%~77.14%,衰减速率为 0.112~10.227 mg/(L·a)。研究结果证实,该 $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ 地浸铀矿山具有自然衰减能力,自然衰减修复技术可作为其地下水修复方案。

关键词:铀矿山; $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ 地浸; 地下水; 修复; 铀; 水化学特征; 自然衰减修复技术

中图分类号:X703; TL212 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-2617(2026)04-0585-06

DOI:10.13355/j.cnki.sfyj.2026.04.015

原地浸出是砂岩型铀矿的主流生产工艺,包括酸法地浸、中性($\text{CO}_2 + \text{O}_2$)地浸和碱法地浸^[1-2]。 $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ 地浸体系为弱酸-中性环境,适用于提取低品位、低渗透性砂岩型铀矿资源,具有成本低、对地下水环境影响小等优势^[3]。但在地浸采区终采时,地下水中仍有多种元素高于本底值,仍存在一定污染问题^[4]。随着多年生产运行,目前我国已有多座 $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ 地浸铀矿山达到设计浸采率,面临终采退役。因此,选取一种适用于 $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ 地浸铀矿山终采区地下水修复的技术已成为亟需解决的问题。

美国 Smith Ranch-Highland、Ruth 等多座 $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ 地浸铀矿山均采用抽出-处理技术进行地下水修复^[5-6],但实践表明,该技术成本高昂,经济效益较低^[7]。近年来,自然衰减修复技术以其成本低、环境友好等优势受到广泛推荐。该技术是利用含矿含水层中的物理、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、生物代谢及放射性衰减等)来降低地下水中污染物浓度^[2]。在自然衰减过程中,氧化还原、吸附-解吸和溶解沉淀等作用均能显著影响地下水中 U 的迁移转化^[8]。

国外多座矿山的修复案例也验证了自然衰减修复技术的可行性。如针对美国 Smith Ranch Highland 矿山水的自然衰减试验研究^[9]结果表明,自然衰减修复技术最高可去除地下水中 50% 的 U,修复效果较好;针对哈萨克斯坦 Irkol 铀矿床地下水,开展自然衰减修复 13 年后,含水层水质几乎恢复到采矿前的本底状态^[10];针对乌兹别克斯坦 Bukinai 铀矿床地下水,自然衰减修复 11 年后,污染羽面积减少近一半,预测 15~20 年后,地下水水质可接近本底状态^[11]。由此可见,自然衰减修复技术对 $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ 地浸铀矿山终采区地下水具有一定修复潜力。

收稿日期:2026-01-12; **修订日期:**2026-05-09

基金项目:煤炭重大专项(2024ZD1700205)。

第一作者简介:杨冰(1988—),男,博士研究生,高级工程师,主要研究方向为原地浸出采矿。

我国目前开展的地下水自然衰减修复场地试验较少。西北某酸法地浸铀矿山开展了为期 13 年的地下水自然衰减监测,结果显示,该区域污染物浓度在随地下水迁移过程中呈下降趋势,自然衰减作用明显^[12]。相关数值模拟研究也表明,自然衰减作用可明显降低地浸铀矿山终采区含矿含水层地下水中 U 、 SO_4^{2-} 等污染物浓度^[13-14]。但不同铀矿采区水文地质条件和地球化学特征均会影响自然衰减效果^[15],导致目前对地浸铀终采区地下水中铀的自然衰减规律与特征尚未形成系统认识。因此,以我国某 $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ 地浸铀矿山典型终采区为研究对象,在野外取样分析的基础上,利用水化学分析方法并结合 Piper 三线图及多元统计分析等手段,确定了终采区地下水水化学类型,揭示了地下水中典型溶解组分分布特征及相关关系,量化了地浸铀终采区地下水 U 自然衰减规律,为自然衰减修复技术的应用提供基础数据。

1 研究区概况

研究区位于内蒙古自治区东南部,地理坐标位于东经 $121^\circ 55' \sim 123^\circ 5'$,北纬 $43^\circ 15' \sim 44^\circ 14'$ 内。该研究区分布有上白垩统碎屑岩孔隙-裂隙承压水含水岩系,包括嫩江组含水层和姚家组含水层,其中姚家组含水层为该铀矿床的含矿含水层。根据沉积旋回和隔水层分布情况,姚家组可分为姚家组上段含水岩组和姚家组下段含水岩组,姚家组下段上部含水岩组是主矿体的赋存部位。姚家组下段含水层较稳定,隔水顶底板均为泥岩,其含水层岩性为浅灰色、灰白色细砂岩,含砾细砂岩,含炭质细砂岩,中细砂岩,中砂岩,泥质粉砂岩,深灰色粉砂质泥岩,灰黑色含炭泥砾岩,紫红色泥岩^[16]。矿物成分以石英、黏土矿物为主,含少量的长石、云母,普遍含碳酸盐,极少含黄铁矿^[17]。

含矿含水层地下水从西南流向东北,其补给主要来自大气降水、第四系潜水及矿床南部的西辽河,排泄的方向与流向一致。铀矿床含矿含水层初始地下水水化学类型以 $\text{HCO}_3^- \text{Na}$ 和 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{Cl-Na}$ 型为主^[16,18]。

2 材料与方法

2.1 样品采集与处理

2021—2023 年,在研究区采集地下水样品 47

个,其中抽液井地下水样品 13 个,注液井样品 30 个,单元内部井 4 个,地下水取样点分布情况如图 1 所示。

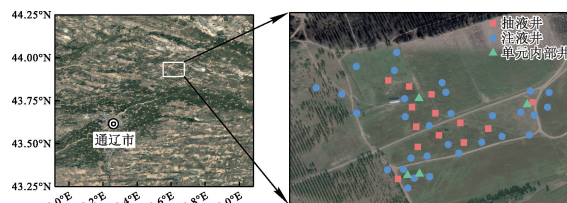


图 1 取样点位置示意

Fig. 1 Schematic image of of groundwater sampling wells locations

采集地下水样品时,利用低流速潜水泵抽取约 3 倍井筒体积的水量以清洗井管,利用 Aqua Troll 400 便携式水质仪(美国 In situ 公司)现场测定 pH、氧化还原电位(ORP)、总溶解固体(TDS)和溶解氧(DO)等水质指标,待各指标稳定后开始样品采集^[19]。样品采出后,现场完成碱度滴定,之后将水样用 $0.45 \mu\text{m}$ 孔径的滤膜过滤,并转移至 500 mL 的高聚四氟乙烯取样瓶中;取样瓶在使用前用待测水样润洗 3 次,并将水样注满取样瓶以排出瓶内空气。用于阳离子浓度测定的样品,采集后立即用 1:1 的稀 HNO_3 溶液酸化至 $\text{pH} < 2$ 。样品均用封口膜密封后旋紧瓶盖,存放于 4°C 冰箱,并于两周内完成测试分析。

2.2 测试方法

阳离子(包括 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 等)浓度用电感耦合等离子体原子发射光谱法(ICP-AES, iCAP6000, Thermo)分析测定。 Cl^- 、 SO_4^{2-} 浓度由离子色谱(iICS2000, Thermo)测定。 U 浓度用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)分析测定。标准曲线溶液使用国家钢铁材料中心生产的标液配制。测试方法参照 HJ 776—2015、HJ 84—2016 和 HJ 700—2014。

2.3 数据处理

除了本试验取样检测的数据,还收集了 13 口抽液井停产前一年内每个月的 U 浓度数据,用于 U 的自然衰减情况分析。采用 SPSS 25.0 对所有数据进行统计处理;采用 Origin 2021 绘制 Piper 图和等值线图;采用 Spearman 相关系数分析地下水中主要组分的相关性。

3 试验结果与讨论

3.1 地下水水化学类型

地下水水化学类型(图 2)是揭示其化学成分特征的重要依据。终采区地下水样品中阳离子质量浓度排序为 $\rho(\text{Na}^+) > \rho(\text{Mg}^{2+}) > \rho(\text{Ca}^{2+}) > \rho(\text{K}^+)$, 阴离子质量浓度排序为 $\rho(\text{HCO}_3^-) > \rho(\text{SO}_4^{2-}) > \rho(\text{Cl}^-) > \rho(\text{CO}_3^{2-})$ 。其中, Na^+ 毫克当量百分数高达 78.8%, HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 毫克当量百分数分别为 44.6% 和 33.0%。研究区 12.7% 的取样井仍然保持铀矿开采前的背景状况 (HCO_3^- -Na 型和 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{Cl}$ -Na 型^[16,18])。78.8% 与 8.5% 的取样井地下水水化学类型分别转变为 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^{2-}$ -Na 型与多阴离子-Na 型。其中, 抽液井和注液井水化学类型均以 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^{2-}$ -Na 型为主, 单元内部井则包含了 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^{2-}$ -Na 型、 HCO_3^- -Na 型和 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{Cl}$ -Na 型水。

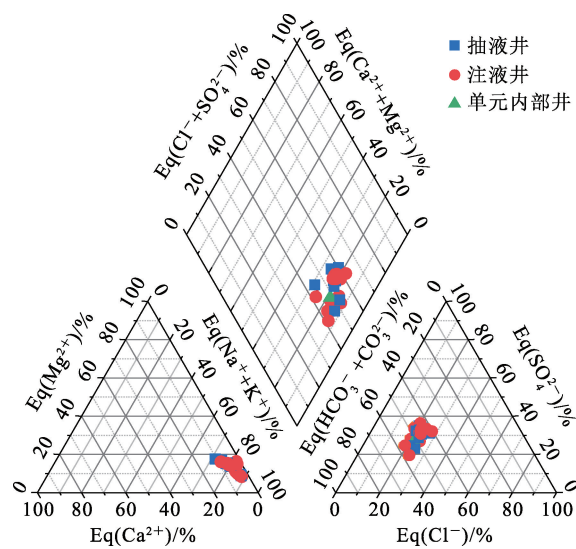


图 2 终采区地下水水化学类型
Fig. 2 Hydrogeochemical types of groundwater in final mining area

终采区大多数井位的地下水水化学类型相较于铀矿开采前的背景状况发生了较明显变化, 说明地浸终采区地下水受生产活动影响较大, 这与人研究结果^[20]一致。Na⁺ 几乎不参与地浸生产中的离子反应过程, 地下水中阳离子始终以 Na⁺ 为主, 因此地浸生产活动对 Na⁺ 的影响较小。对比生产前, SO₄²⁻ 在阴离子中占比显著增加。生产期间注入的 O₂ 使得围岩中黄铁矿发生

明显溶解^[21], 生成的 SO₄²⁻ 进入地下水, 导致采区内部地下水中 SO₄²⁻ 在阴离子中的占比升高。而 HCO₃⁻ 占比在阴离子中也始终保持较高水平, 这不仅与地下水中 HCO₃⁻ 背景浓度高有关 (1 647.19~2 181.42 mg/L)^[17], 也与生产期间注入的 CO₂ 有关。

3.2 地下水 U 分布特征

水样测试结果统计分析结果见表 1。可知: 地下水中 pH、TDS, 以及 Ca²⁺、K⁺、Mg²⁺、Na⁺、Cl⁻、SO₄²⁻、HCO₃⁻ 浓度等指标的变异系数相对较小, 这表明多数溶解组分在地下水中分布较为均匀。DO、ORP、U 浓度 3 项指标的变异系数大于 0.5, 在空间分布上存在较大的非均质性。铀矿床各点位的铀矿品位、含矿含水层孔渗结构等均存在明显的非均质特征, 受限于生产井井型、井距的覆盖面积, 整个地浸生产过程中也存在“溶浸死角”, 生产阶段注入铀矿层的 O₂ 的运移与消耗具有空间差异性, 导致铀矿体不同位置 U 的浸出效率不同, 终采区地下水中 U 浓度变化较大, 因而 DO、U 浓度 2 个指标的变异系数较大。ORP 可反映地下水的氧化还原环境, 其值受 DO 含量控制, 因此, 该指标的变异系数也偏大。

表 1 研究区水样水化学指标统计
Table 1 Statistics of chemical indicators of all samples

指标	最小值	最大值	平均值	中位数	标准差	变异系数
pH	6.28	9.85	7.4	7.11	0.812	0.11
ORP/mV	-174	244	41.2	74.5	109	2.65
DO/(mg·L ⁻¹)	0	57.4	9.73	3.75	13.6	1.40
$\rho(\text{U})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	0.102	7.99	1.75	0.902	1.8	1.03
TDS/(mg·L ⁻¹)	1 352	6 602	4 716	4 960	1147	0.24
$\rho(\text{Ca}^{2+})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	7.42	135	86.6	98.3	29.4	0.34
$\rho(\text{K}^+)/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	6.04	24.5	19.6	20.2	3.42	0.17
$\rho(\text{Mg}^{2+})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	23.6	176	133	150	40.4	0.30
$\rho(\text{Na}^+)/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	429	1 620	1 400	1 510	293	0.21
$\rho(\text{Cl}^-)/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	161	888	618	657	146	0.24
$\rho(\text{SO}_4^{2-})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	233	1 660	1 231	1 390	371	0.30
$\rho(\text{HCO}_3^-)/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	694	2 620	2 206	2 390	430	0.19

图 3 为相关性矩阵热图, 其中 P 代表显著性水平。可知, U 与地下水中其他组分无显著相关性 ($P > 0.05$), 这表明终采区地下水中 U 浓度主

要受控于地浸生产,与地下水本底状态及其他组分关系不大。利用 Kriging 方法绘制 U 浓度等值线图,以确定含矿含水层地下水中 U 的空间分布状态(图 4)。可以看出:采区终采后,地下水 U 浓度呈一定程度下降趋势,但在采区不同区域存在较大差别,整体来看,在天然地下水流向的上游方向与采区内部单元处,U 浓度仍较高,而在地下水流向下游方向与采区边界单元处,U 浓度较低,终采区下游及外围 U 质量浓度均低于 1.5 mg/L。

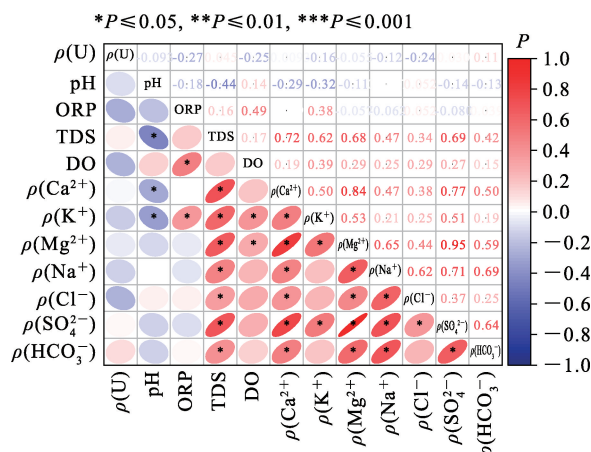


图 3 相关性矩阵热图

Fig. 3 Correlation matrix heatmap

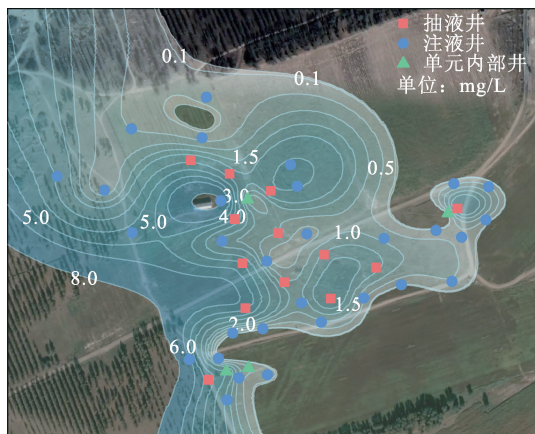


图 4 U 质量浓度等值线

Fig. 4 Contour map of U concentrations

3.3 地下水 U 的自然衰减规律

结合停采前 U 浓度数据及本次检测结果,对抽液井地下水中 U 的自然衰减情况进行定量分析。停产后,终采区地下水未采取任何修复措施。现阶段地下水取样时间距不同抽液井停产时间的时间间隔为 0.33~8.33 年。

地下水终采区抽液井 U 质量浓度已由稳定生产时的 6~20 mg/L 降至 1.64~5.24 mg/L (中值,2.69 mg/L)。将试验测得的各抽液井地下水中 U 质量浓度与停产前进行对比分析,得到各抽液井地下水中 U 质量浓度衰减情况,结果见表 2。

表 2 各抽液井 U 质量浓度衰减情况

Table 2 U mass concentration attenuation of groundwater in all pumping wells

抽液井	停产前 $\rho(\text{U})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$ ①	监测时距 停产时的 时间间隔 /a	监测时 $\rho(\text{U})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	衰减率/ %	衰减速率/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{a}^{-1})$
1#	7.146	8.33	2.64	63.06	0.541
2#	4.059	5.50	5.24	-29.09	-0.215
3#	3.901	5.33	2.52	35.40	0.259
4#	3.167	5.50	1.64	48.21	0.278
5#	2.571	5.50	1.15	55.27	0.258
6#	4.779	5.33	4.44	7.10	0.064
7#	4.062	5.00	2.69	33.77	0.274
8#	2.565	2.08	2.74	-6.82	-0.084
9#	2.663	1.92	2.70	-1.38	-0.019
10#	2.985	1.92	4.02	-34.69	-0.540
11#	3.747	1.58	3.57	4.72	0.112
12#	3.956	1.25	1.64	58.54	1.853
13#	4.375	0.33	1.00	77.14	10.227

注:①为该生产井停产前一年数据的平均值。

由表 2 看出:9 口抽液井存在 U 质量浓度自然衰减现象,占总井数的 69%,U 质量浓度衰减率为 4.72%~77.14%,衰减平均速率为 0.112~10.227 mg/(L·a);衰减率>50%的抽液井占总井数的 31%,衰减率为 30%~50%的抽液井为 3#、4# 和 7#,衰减率<10%的抽液井为 6# 和 11#;2#、8#、9# 和 10# 抽液井地下水中 U 质量浓度较关停前有所上升,增长率为 1.38%~34.7%。结合表 1 可知,这是因为该终采区地下水中仍存在一定含量溶解氧,而在溶浸液停止注入后,部分孔位的氧化环境仍可使含铀组分继续氧化析出,从而造成个别取样点位地下水 U 浓度升高。该采区停产后,未开展地下水修复活动,地下水中 U 浓度的降低仅依靠自然衰减作用,这表明自然衰减修复技术可作为 CO₂+O₂ 地浸铀矿山终采区一种潜在的地下水修复方案。

4 结论

为评估自然衰减修复技术在我国 CO₂+O₂地浸铀矿山终采区地下水铀污染修复中的适用性,针对该类型矿山典型终采区地下水中铀的分布特征与自然衰减规律开展了研究,结论如下:

1) 受地浸生产影响,采区内部地下水水化学组分会发生一定程度变化,地下水水化学类型由背景状态的 HCO₃-Na 型水和 HCO₃·Cl-Na 型水变为 HCO₃·SO₄-Na 型水与多阴离子-Na 型水。

2) 终采区地下水中 U 浓度的变异系数较大,且与其他主要组分浓度的相关性不强,表明其分布的主控因素为地浸生产活动。停产后,U 浓度空间分布特征表现为:在天然地下水流向上游方向与采区边界单元处,U 浓度较高;而在地下水流向下游与边界单元处,U 浓度较低。

3) 该 CO₂+O₂地浸铀矿山终采区地下水中 U 存在明显的自然衰减现象,虽然个别抽注井地下水样品显示出因地下仍保持氧化环境而导致 U 浓度上升,但综合分析认为,自然衰减修复技术仍可作为 CO₂+O₂地浸铀矿山终采区地下水 U 污染修复的一种潜在方案。该技术的长期有效性和达标可行性尚需结合修复目标进一步验证。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 王君,胥国龙,陈梅芳,等.铀提取技术的演进与挑战[J].湿法冶金,2026,45(3):273-283.
Wang Jun, Xu Guolong, Chen Meifang, et al. The evolution and challenges of uranium extraction technology [J]. Hydrometallurgy of China, 2026, 45(3): 273-283.
- [3] 孙占学,马文洁,刘亚洁,等.地浸采铀矿山地下水环境修复研究进展[J].地学前缘,2021,28(5):215-225.
Sun Zhanxue, Ma Wenjie, Liu Yajie, et al. Research progress on groundwater contamination and remediation in in-situ leaching uranium mines[J]. Earth Science Frontiers, 2021, 28(5): 215-225.
- [4] 连国玺,孙娟,李梦姣,等.我国地浸采铀地下水修复若干问题的思考[J].中国矿业,2023,32(10):80-87.
Lian Guoxi, Sun Juan, Li Mengjiao, et al. Thoughts about the groundwater restoration of in-situ leaching uranium mining in China[J]. China Mining Magazine, 2023, 32(10): 80-87.
- [5] Borch T, Roche N, Johnson T E. Determination of contaminant levels and remediation efficacy in groundwater at a former in situ recovery uranium mine[J]. Journal of Environmental Monitoring, 2012, 14(7): 1814.
- [6] Schmidt C. Groundwater restoration and stabilization at the Ruth-ISL test site in Wyoming, USA[C]//In Situ Leaching of Uranium: Technical, Environmental and Economic Aspects. Vienna: IAEA, 1987: 97-126.
- [7] Davis J A, Curtis G P. Consideration of geochemical issues in groundwater restoration at uranium in-situ leach mining facilities: NUREG/CR-6870[R]. U. S. Geological Survey, 2007.
- [8] 鄢雨萌,苏东,苏小四,等.控制砂岩型铀矿床中铀迁移转化的主要水文地球化学作用实验[J].地球科学与环境学报, 2020, 42(2): 256-266.
Yan Yumeng, Su Dong, Su Xiaosi, et al. Experiment on hydrogeochemical effects affecting uranium migration in sandstone-type uranium deposit[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2020, 42(2): 256-266.
- [9] 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.
- [10] Yazikov V G, Zabaznov V U. Experience with restoration of ore-bearing aquifers after in situ leach uranium mining[C]//International Symposium on the Uranium Production Cycle and the Environment. Vienna: IAEA, 2000: 396-403.
- [11] Fazlullin M I, Novoseltsev V V, Farber V J, et al. Restoration experience on uranium ore-bearing aquifers after in situ leach via hydrogeochemical methods [C]//Working Material In Situ Leach Uranium Mining. Kazakhstan: IAEA, 2002: 132-140.
- [12] Dong Yanhui, Xie Yueqing, Li Guomin, et al. Efficient natural attenuation of acidic contaminants in a confined aquifer[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(7): 595.
- [13] 杨冰,孟童,张昊岩,等.地浸铀矿山终采区地下水中铀的自然衰减数值模拟预测[J].铀矿冶,2025,44(1):93-100.
Yang Bing, Meng Tong, Zhang Haoyan, et al. Numerical simulation prediction of natural attenuation of groundwater uranium in a post-mining area at an in-situ leaching uranium mine[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2025, 44(1): 93-100.
- [14] 徐海珍,高艳丽,李国敏.地下水中酸性污染羽的自然净化作用数值模拟研究[J].工程地质学报, 2013, 21(6): 926-931.
Xu Haizhen, Gao Yanli, Li Guomin. Reactive transport modeling of natural attenuation of acid groundwater plumes[J]. Journal of Engineering Geology, 2013, 21(6): 926-931.
- [15] 赵萌,姜永海,冯帆,等.典型地球化学与水文地质特征对污染物自然衰减影响研究进展[J].地质科技通报, 2023, 42(3): 250-261.
Zhao Meng, Jiang Yonghai, Feng Fan, et al. Research

- advances on the influence of typical geochemical and hydrogeological characteristics on the natural attenuation of pollutants[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(3): 250-261.
- [16] 任锦荣, 夏毓亮, 张振强, 等. 松辽盆地钱家店铀矿床地浸开采水文地质条件研究[J]. 铀矿冶, 2022, 41(1): 21-29. Ren Jinrong, Xia Yuliang, Zhang Zhenqiang, et al. Study on the hydrological conditions of Qianjiadian sandstone type uranium for in-situ leaching mining in Songliao Basin[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2022, 41(1): 21-29.
- [17] 张振强. 松辽盆地南部上白垩统地浸砂岩型铀矿成矿条件研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2006.
- [18] 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.
- [19] 张宏鑫, 吴亚, 罗炜宇, 等. 雷州半岛岭北地区地下水水文地球化学特征[J]. 环境科学, 2020, 41(11): 4924-4935. Zhang Hongxin, Wu Ya, Luo Weiyu, et al. Hydrogeochemical investigation of groundwater in the Lingbei area, Leizhou Peninsula [J]. Environmental Science, 2020, 41(11): 4924-4935.
- [20] Lu Chongsheng, Xiu Wei, Yang Bing, et al. Natural attenuation of groundwater uranium in post-neutral-mining sites evidenced from multiple isotopes and dissolved organic matter[J]. Environmental Science & Technology, 2024, 58(28): 12674-12684.
- [21] Lu Chongsheng, Xiu Wei, Guo Huaming, et al. Multi-isotope based identification and quantification of oxygen consuming processes in uranium hosting aquifers with $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ in situ leaching[J]. Water Resources Research, 2023, 59(3): 033980.

Distribution and Natural Attenuation Characteristics of Groundwater Uranium in the Post-mining Area of $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ In-situ Leaching Uranium Mine

YANG Bing¹, MENG Tong², ZHANG Haoyan², ZHAO Lixin¹

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

2. The Fourth Research and Design Engineering Corporation of CNNC, Shijiazhuang 050021, China)

Abstract: In recent years, several $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ in-situ leaching uranium mines in China have been facing final mining closure and decommissioning. Natural attenuation technology is an economically effective solution, and its feasibility has been demonstrated by multiple remediation cases of in-situ leaching uranium mines abroad. However, a systematic understanding of the natural attenuation patterns of groundwater uranium at in-situ leaching uranium mines has not yet been established. This study focuses on a typical post-mining area of a $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ in-situ leaching uranium mine in China. Based on field investigation and sampling, hydrochemical analysis and multivariate statistical methods were employed to determine the distribution characteristics and natural attenuation patterns of U in groundwater. The results show that the hydrochemical types of groundwater in the post-mining area has shifted to $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^{2-}$ -Na type and multi-anion-Na type. The concentrations of groundwater U in the post-mining area are 0.11-7.99 mg/L and exhibit weak correlations with other major components. Natural attenuation of U concentrations is observed in 69% of the groundwater samples, with attenuation ratios ranging from 4.72% to 77.14% and attenuation rates ranging from 0.112 and 10.227 mg/(L · a). The research results demonstrate that this $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ in-situ leaching uranium mine possesses natural attenuation capacity, and natural attenuation technology can serve as a remediation scheme for groundwater in post-mining areas of in-situ leaching sites.

Key words: uranium mine; $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ in situ leaching; groundwater; remediation; uranium; water chemical characteristics; natural attenuation remediation technology