

地浸采铀地下水本底值确定方法研究

连国玺^{1,2}, 孙娟³, 谢树军¹, 李梦姣³, 高思旖¹, 安毅夫³, 曹凤波³

(1. 生态环境部核与辐射安全中心, 北京 100082;
2. 北京师范大学环境学院, 北京 100875;
3. 中核第四研究设计工程有限公司, 河北石家庄 050021)

摘要: 地下水本底值是判定地浸采铀对地下水的的影响程度和确定修复目标值的重要基准。地浸矿山水文地质条件复杂多样、监测数据参差不齐, 目前地浸地下水本底值的确定缺少统一的方法和标准规范。因此, 提出了确定地浸地下水本底值的工作程序, 讨论了监测因子、取样范围、取样数量和密度、取样频次和取样深度等的确定原则, 并以新疆和内蒙古2个地浸铀矿山的监测数据为基础, 应用数理统计方法进行了论证。研究结果可为地浸采铀地下水本底值的确定提供指导。

关键词: 地浸采铀; 地下水; 本底值; 地下水修复; 监测

中图分类号: TL75⁺1; TD868 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8063(2024)01-0058-07

DOI: 10.13426/j.cnki.yky.2023.09.05

地浸采铀是中国天然铀生产的主流技术^[1-2], 中国地浸采铀主要工艺为酸法地浸和中性地浸, 酸法地浸的浸出剂一般为 $H_2SO_4 + H_2O_2$, 中性地浸的浸出剂为 $CO_2 + O_2$ 。浸出剂的注入可能造成地下水中 pH、硫酸盐、钡、铝、锰、镍、铁、铀、镭等组分发生变化, 导致地下水环境质量超标^[3-8]。地浸采铀终采后应进行地下水修复, 修复目标主要参考地下水本底值, 所以应在地浸采铀生产前确定地下水本底值^[9-10]。地下水本底值是反映地下水在未受地浸生产影响的情况下, 其放射性和非放射性组分的正常水平, 是反映天然状态下地下水环境原有化学组分的特性值^[11]。

在铀矿地质勘查过程中一般会布置水文孔, 对地下水中的各种组分进行调查, 初步获取地下水本底值。但由于勘查阶段水文孔较少, 尤其在一些水文地质条件较复杂的铀矿区, 不同采区地下水本底值差异显著, 地勘水文孔调查数据不能代表整个矿区的地下水本底水平。在地浸生产前的采区开拓阶段会施工多个抽注井, 这为矿区地下水本底值的获取提供了便利, 可以针对性地开

展地下水监测, 进而确定本底值。

目前, 中国尚无地浸地下水本底值的确定方法, 相应的工作程序、监测因子、样本需求、采样频次等均有待进一步规范。笔者梳理了地浸地下水本底值确定的工作程序, 并以新疆和内蒙古地浸采铀矿区生产前的地下水监测数据及多年地下水监测数据为基础, 应用数理统计分析方法, 分析确定地下水本底值的关键问题。

1 工作程序

确定地浸采铀矿区地下水本底值应首先开展资料调查, 收集地勘报告、环评报告、区域地下水本底值研究资料等, 若区域水文地质条件简单、已有监测数据充足且满足本底值确定要求, 可基于调研资料确定地下水本底值; 若区域水文地质条件复杂、存在地下水空间和时间异质性, 已有数据不能满足要求, 则应基于地浸开拓的生产井开展地下水水质补充监测, 并对监测数据进行数理统计分析, 确定地下水本底值。地浸采铀地下水本底值确定工作程序见图1。

收稿日期: 2023-09-11

第一作者简介: 连国玺(1980—), 男, 河北保定人, 硕士, 正高级工程师, 从事铀矿冶辐射防护和环境保护工作。

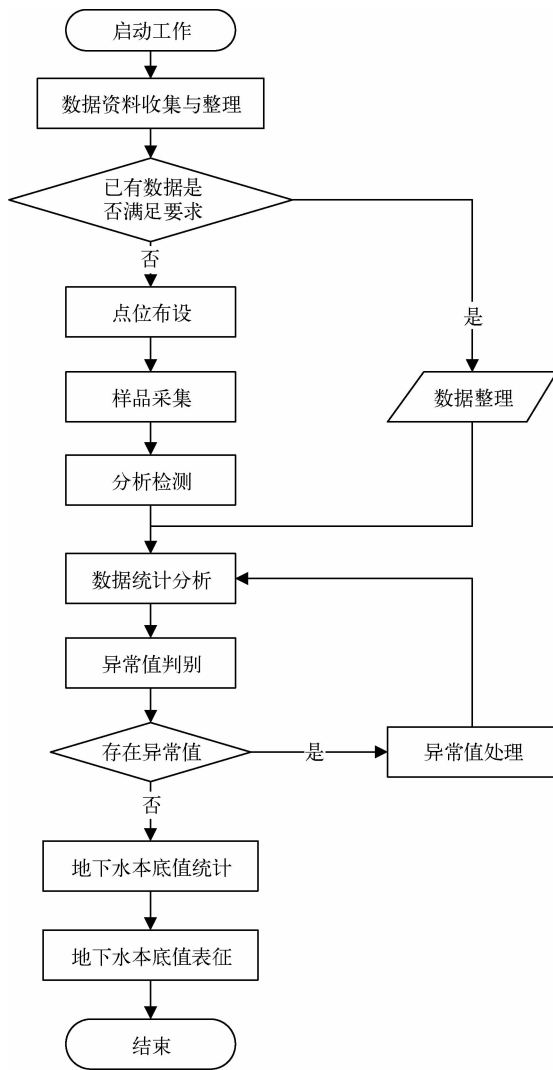


图 1 地浸采铀地下水本底值确定工作程序

Fig. 1 Work flow for determining groundwater baseline of in-situ leaching of uranium

2 本底值确定要点

对于需要进行地下水水质补充监测从而确定本底值的情况,应关注监测因子、取样范围、取样数量和密度、取样频次、取样深度等关键问题。

2.1 监测因子

因地下水地质构造、岩石组成、水文地球化学条件等不同,地下水中各因子的本底水平存在差异^[12]。注入到含水层的浸出剂会与砂岩或地下水中的物质发生化学反应,导致地下水中多种因子发生变化,确定本底值应尽可能涵盖相应因子。美国核管会(NRC)推荐的地浸采铀本底值监测因子清单见表 1^[13],其中痕量和微量元素 19 种,常规指标 10 种,物理指标 3 种,放射性指标 2 种。

中国《铀矿冶辐射环境监测规定》(GB 23726—2009)规定了地浸采铀本底调查的放射性指标为 U、²²⁶Ra、²¹⁰Pb、²¹⁰Po,但未对非放射性指标提出要求^[14]。《地下水质量标准》(GB/T 14848—2017)将地下水指标分为常规指标和非常规指标^[15],常规指标包括 20 项感官性状及一般化学指标、2 项微生物指标、15 项毒理学指标和 2 项放射性指标;非常规指标包括 54 项毒理学指标;其中与地浸采铀具有较大相关性的放射性指标为总 α 和总 β,非放射性指标有 pH、总硬度、TDS、SO₄²⁻、Cl⁻、S²⁻、Fe、Mn、Cu、Zn、Al 等。

鉴于地浸采铀对地下水水质影响的复杂性,建议地下水本底值调查的参考指标见表 2。若已开展了实验室浸出试验或现场浸出试验,可基于地下水水质变化调整表中监测因子。

表 1 NRC 推荐的地浸采铀地下水本底值监测因子

Table 1 NRC recommended monitoring factors of groundwater baseline of in-situ leaching of uranium

类型	监测因子
痕量和微量元素	As、Fe、Se、Ba、Pb、Ag、B、Mn、U、Cd、Hg、V、Cr、Mo、Zn、Cu、Ni、F ⁻ 、 ²²⁶ Ra
常规指标	碱度、Na、Mg、Ca、K、Cl ⁻ 、SO ₄ ²⁻ 、NO ₃ ⁻ 、HCO ₃ ⁻ 、CO ₃ ²⁻
物理指标	TDS、SS、pH
放射性指标	总 α、总 β

表 2 地浸采铀地下水本底值调查推荐监测因子

Table 2 Recommended monitoring factors in groundwater baseline survey of in-situ leaching of uranium

类型	监测因子
放射性指标	U、 ²²⁶ Ra、 ²¹⁰ Pb、 ²¹⁰ Po、总 α、总 β
常规指标	Fe、Mn、Cu、Zn、Al、Na、Hg、As、Se、Cd、Cr ⁶⁺ 、Pb、Ni、Mo、F ⁻ 、Cl ⁻ 、SO ₄ ²⁻ 、NO ₃ ⁻ 、HCO ₃ ⁻ 、S ²⁻
物理指标	pH、TDS、总硬度
其他特征指标	根据铀矿石成分、水文地球化学特征、浸出工艺、水冶工艺等判断可能引入或导致地下水组分明显升高的因子

2.2 取样范围

地浸采铀矿山一般由多个采区组成,每个采区包括几十到上百眼生产井,以采区还是以矿山为单元确定地下水本底值取决于采区之间地下水水质是否存在明显差异。若采区之间的地下水水质不存在明显差异,整个矿山可确定一组地下水本底值,否则应以采区为单元进行本底值的确定。

为了说明采区之间水质因子是否存在差异

性,收集了新疆 735 铀矿 X_a 、 X_b 采区和内蒙古通辽钱家店铀矿 N_a 、 N_b 采区生产井注入浸出液前地下水中 U 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 和 HCO_3^- 等监测数据,其中 X_a 采区有 24 组数据, X_b 采区有 23 组数据, N_a 采区有 96 组数据, N_b 采区有 93 组数据。应用双样本 t 检验方法分析了采区间的水质差异,双样本 t 检验是一种比较 2 个样本均值是否存在显著性差异的假设检验方法,分析软件为 Origin,显著性水平取值为 0.05,结果见表 3~表 4。

表 3 新疆 735 铀矿 X_a 和 X_b 采区地下水水质组分显著性分析结果

Table 3 Significant analysis results of groundwater quality components in X_a and X_b mining areas of 735 uranium mine in Xinjiang

项目	U		SO_4^{2-}		Cl^-		HCO_3^-	
	X_a 采区	X_b 采区	X_a 采区	X_b 采区	X_a 采区	X_b 采区	X_a 采区	X_b 采区
ρ_B 均值/(mg/L)	0.38	0.65	368.84	335.17	119.62	142.60	295.14	586.51
标准差	0.82	1.29	231.63	170.77	80.01	36.65	172.15	290.23
t 值	-0.76		0.57		-1.26		-4.18	
p 值	0.45		0.57		0.21		1.4×10^{-4}	
是否存在显著性差异	否		否		否		是	

表 4 内蒙古通辽钱家店铀矿 N_a 和 N_b 采区地下水水质组分显著性分析结果

Table 4 Significant analysis results of groundwater quality components in N_a and N_b mining areas of Qianjiadian uranium mine in Inner Mongolia

项目	U		SO_4^{2-}		Cl^-		HCO_3^-	
	N_a 采区	N_b 采区	N_a 采区	N_b 采区	N_a 采区	N_b 采区	N_a 采区	N_b 采区
ρ_B 均值/(mg/L)	0.53	0.49	89.91	98.24	131.21	134.24	1 950.02	1 950.62
标准差	0.30	0.23	30.04	77.59	17.38	13.88	274.55	219.23
t 值	1.02		-0.98		-1.32		-0.017	
p 值	0.31		0.33		0.19		0.99	
是否存在显著性差异	否		否		否		否	

由表 3 可见,新疆 735 铀矿的 X_a 和 X_b 采区地下水中, U 、 SO_4^{2-} 和 Cl^- 不存在显著性差异,但 HCO_3^- 存在显著差异,因此 2 个采区应分别确定地下水本底值。由表 4 可见,内蒙古通辽钱家店铀矿的 N_a 和 N_b 采区的地下水中, U 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 和 HCO_3^- 均不存在显著性差异,2 个采区水文地质条件差异性较小,可确定一组地下水本底值。从这 2 个铀矿的分析可知,即使是同一铀矿的不同采区,采区间的地下水本底数据仍有可能存在显

著性差异。因此,地下水本底值的确定以采区为单元更合理。

2.3 取样数量和密度

取样数量和密度与采区大小、地下水均质性等密切相关,也影响地下水本底值的确定。一般而言,取样数量越多,密度越大,水质数据代表性越好,但所需代价亦越大。基于新疆 735 铀矿 X_a 采区和内蒙古通辽钱家店铀矿 N_a 采区运行前的水质数据,采用单样本 t 检验方法,分析了不同取

样密度下水质数据的代表性。不同的取样密度对应不同数量的取样点,取样密度越大,取样点越多,通过分析不同取样点数量的样品与采区总体均值是否存在显著性差异,来确定适宜的取样点数量。

应用 Excel 中的随机抽样程序,从 X_a 采区的 24 组数据和 N_a 采区的 96 组数据中分别抽取了 4、6、8、10、12、14 个样本,随机抽取 10 次,则在每个样本数下均可随机获得 10 组数据,基于 0.05 的显著性水平,计算了各样本数下 10 组随机数据与采区所有数据的显著性差异,结果见表 5。可

以看出,随着样本数的增加,也就是取样密度的增大,10 组随机数据中不存在显著性差异的比例逐渐增加,对于 X_a 采区,当样本数为 6 时,不存在显著性差异的比例为 80%;当样本数为 12 时,不存在显著性差异的比例为 100%。对于 N_a 采区,当样本量为 6 时,不存在显著性差异的比例达到 100%。从 2 个采区随机抽样结果可知,采区内选取 6 个取样水质数据,则可基本代表整个采区的地下水水质情况。因此,建议单个采区内地下水取样数量应不少于 6 个,当采区范围较大或者非均质性较高时,可相应增加取样数量。

表 5 显著性差异与样本数量相关关系

Table 5 Correlation between significant difference and sample size

样本数	新疆 735 铀矿 X_a 采区			内蒙古通辽钱家店铀矿 N_a 采区		
	显著差异组数	不存在显著差异组数	不存在显著差异的占比/%	显著差异组数	不存在显著差异组数	不存在显著差异的占比/%
4	3	7	70	1	9	90
6	2	8	80	0	10	100
8	1	9	90	0	10	100
10	1	9	90	0	10	100
12	0	10	100	0	10	100
14	0	10	100	0	10	100

根据采区大小不同,应调整相应的取样数量。美国核管会推荐每 4 000 m^2 选 1 眼生产井进行取样监测,若采区面积较大且水文地质条件类似,则可减小取样密度,但至少每 16 000 m^2 应取 1 眼生产井。中国地浸单个采区控制的生产井一般为几十到一百多眼,控制面积几万到几十万平方米。收集了新疆 735、737、738 和 739 铀矿的采区开拓数据,分别以 4 000 m^2 和 16 000 m^2 为取样面积单元计算了采区取样数量,结果见表 6,取样井分布见图 2。

表 6 新疆地浸铀矿采区取样井代表性分析

Table 6 Representative analysis of sampling wells in mining areas in Xinjiang

矿山	采区数量/个	控制面积/ m^2	取样井数/眼	
			1 眼/4 000 m^2	1 眼/16 000 m^2
			735 铀矿	27
737 铀矿	19	$1.9 \times 10^4 \sim 1.4 \times 10^5$	5~35	1~9
738 铀矿	8	$2.0 \times 10^4 \sim 9.1 \times 10^4$	5~23	1~6
739 铀矿	28	$9.4 \times 10^3 \sim 5.6 \times 10^4$	2~14	1~3

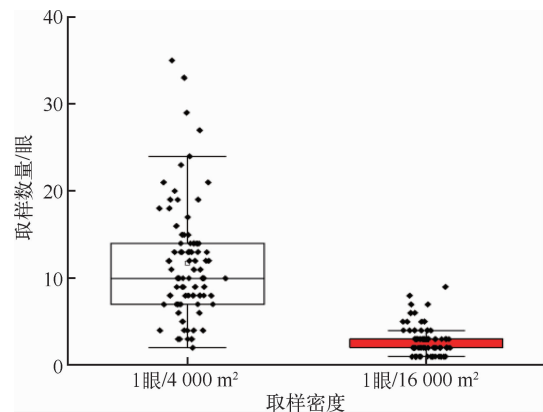


图 2 不同取样密度下铀矿取样井数量分布

Fig. 2 Distribution of the sampling wells number of in-situ leaching of uranium projects under different sampling densities

由图 2 可知,新疆地浸铀矿采区控制面积为 9 377~139 555 m^2 ,按照每 4 000 m^2 取 1 个样的取样密度,新疆地浸铀矿 82 个采区中,取样井数量为 2~35 眼,有 71 个采区取样井数量大于 6

眼;仅有 11 个采区因面积较小,取样井数量介于 2~5 眼;86.5%以上的采区可满足取样井 6 眼的要求。按照每 16 000 m²取 1 个样的取样密度,最大采区的取样数量为 9 眼。

综上,根据采区的大小,每 4 000~16 000 m²取 1 眼生产井是合理的,既可满足取样数量的要求,取样成本亦可接受。一般来讲,中国地浸采铀多采用五点型和七点型,井距为 25~30 m,单个生产单元控制面积约 2 000 m²,按照以上取样原则,即每 2~8 个生产单元取 1 眼生产井进行水质监测;当采区面积较大时,可降低取样密度,但最低取样密度不应大于每 8 个生产单元取 1 眼生产井。

2.4 取样频次

浅层地下水与地表连通性强,受地表降水影

响,地下水水质具有时间变异性,丰水期和枯水期的本底值一般存在明显的差别^[16]。地浸采铀含水层多为承压水,受季节变化影响相对较小。为了说明地下水水质的时间差异,选取了新疆 737 铀矿采区边界外 500 m 的监测井,分析了枯水期和丰水期的水质数据(丰水期取 5~9 月数据,枯水期取 11 月~次年 1 月数据),绘制了枯水期和丰水期的各指标箱式图,并分析了各指标的差异(图 3)。结果表明,总体上各水质指标随季节变化不大,变化趋势基本一致;应用双样本 t 检验对差异进行了计算,仅 Cl⁻ 在枯水期和丰水期存在显著性差异,U、SO₄²⁻、pH 等指标均不存在显著性差异。因此,一般来说地下水本底值监测取样 1 次即可,但在存在季节性变化的区域,建议增加取样频次。

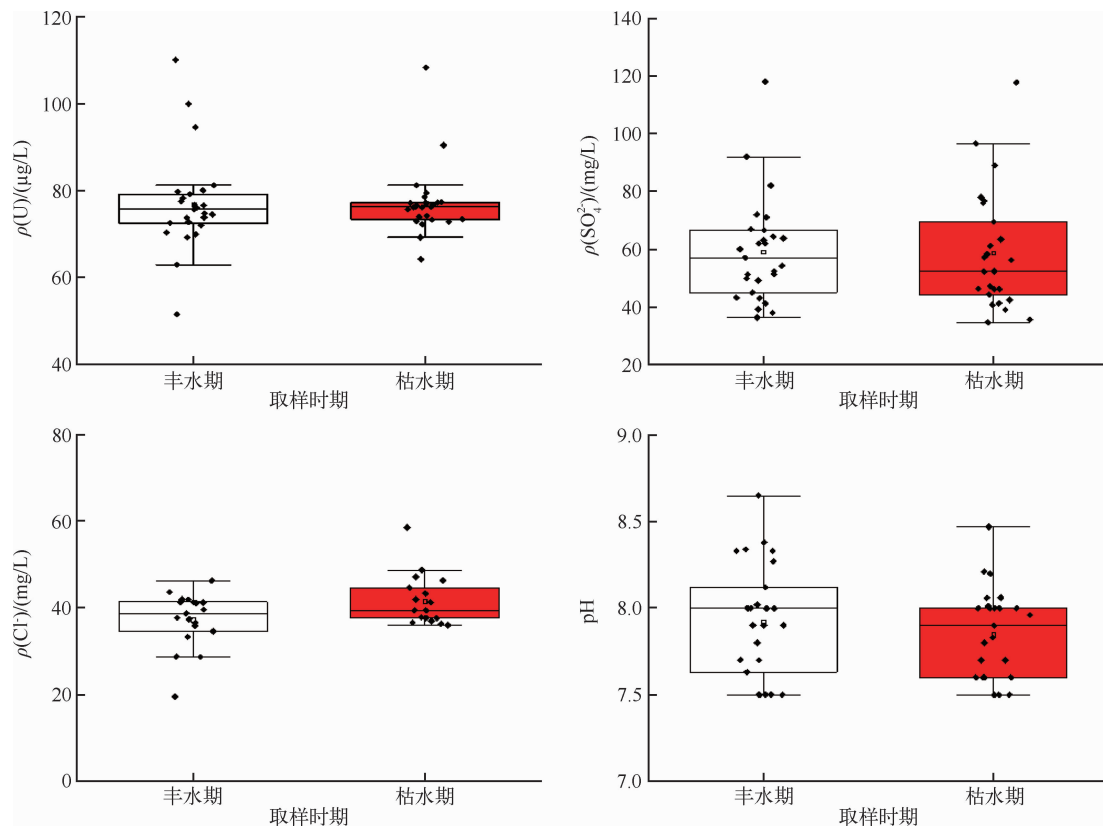


图 3 监测井水质枯水期和丰水期变化

Fig. 3 Water quality changes during dry season and wet season of monitoring wells

2.5 取样深度

地浸采铀含矿层深度一般为数百米,水位埋深多为几十米,承压水头较高。对于同一生产井,不同取样深度的水质差异性也是关注的焦

点^[17-18]。分别在新疆 735 铀矿和 737 铀矿选取监测井开展了不同水位埋深下地下水中 U、pH、SO₄²⁻、Cl⁻、HCO₃⁻ 等指标的取样监测,结果见图 4。可以看出,在取样深度不同时,各组分的监测

数据未出现明显差异,取样深度对监测数据的影响不大。虽然本次取样监测数据未发现不同深度的水质存在明显差异,但考虑到严谨性和科学性,

地下水取样时应优先使用定深取样器采集生产井过滤器段的地下水;若采用容器式取样装置,应按照地下水取样规范,尽可能洗井。

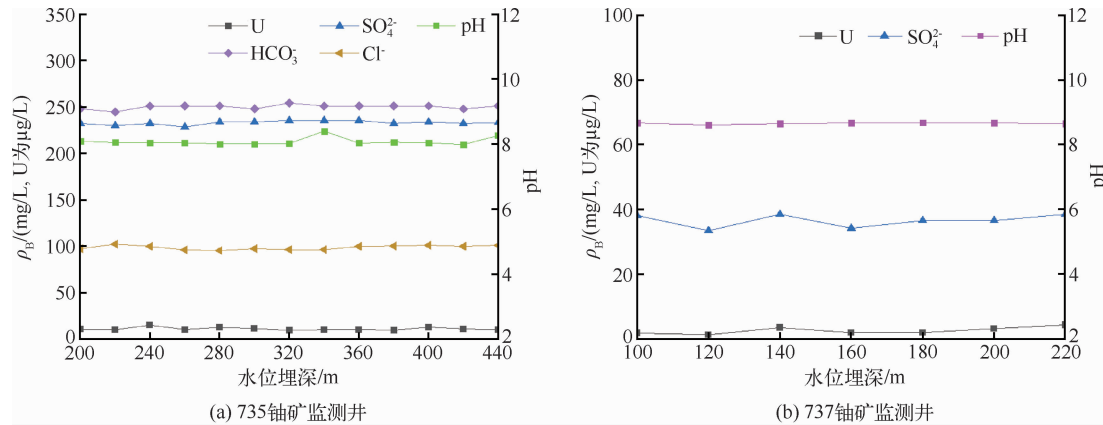


图 4 新疆不同地浸采铀矿山监测井水质与地下水水位埋深的关系

Fig. 4 Correlation between water quality and groundwater level depth of monitoring wells in different in-situ leaching of uranium projects in Xinjiang

3 结论

1) 鉴于地浸采区开拓前地下水数据不充分、代表性不强,应结合采区开拓,确定地下水本底值。

2) 应根据矿石组成和生产工艺确定地浸采铀本底值水质监测因子。以采区为单元确定地下水本底值,单个采区的取样量应不少于 6 个;根据采区大小,每 2~8 个生产单元取 1 眼生产井进行水质监测;一般取样 1 次即可,存在季节变化的情况应增加取样频次;尽可能在地浸生产井过滤器段采集地下水样品。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 左维,谭凯旋.新疆某地浸采铀矿山退役井场地下水污染特征[J].南华大学学报(自然科学版),2014,

28(4):28-34.

- [5] 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):1-8.
- [6] 何成垚,谭凯旋,李咏梅,等.新疆某铀矿酸法和 CO₂+O₂地浸采区地下水的污染特征及机理[J].有色金属(冶炼部分),2021(6):53-59.
- [7] ZHAO B, SUN Z, GUO Y, et al. Occurrence characteristics of uranium mineral-related substances in various environmental media in China: a critical review [J]. Journal of Hazardous Materials, 2023, 441:129856.
- [8] 安毅夫,孙娟,高扬,等.基于生物刺激的中性地浸采铀地下水修复试验研究[J/OL].铀矿冶:1-7 [2023-11-10]. https://doi.org/10.13426/j.cnki.yky.2023.07.02.
- [9] 耿婷婷,李颖智,张涛,等.地下水环境背景值研究进展的分析与建议[J].环境科学与管理,2018,43(5):33-35.
- [10] 王海峰,李建东,刘正邦,等.地浸采铀生产与地下水修复环境监测指示参量[J].铀矿冶,2023,42(3):81-87.
- [11] 徐乐昌,王德林,孙先荣,等.美国 Smith Ranch 铀矿地浸工艺与设施介绍[J].铀矿冶,2005,24(2):71-75.

- [12] 郭高轩,辛宝东,刘文臣,等.我国地下水环境背景值研究综述[J].水文地质工程地质,2010,37(2):95-98.
- [13] U. S. NRC. Standard review plan for in situ leach uranium extraction license applications, NUREG-1569[R]. Washington, DC:United States Nuclear Regulatory Commission, 2003.
- [14] 中华人民共和国环境保护部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.铀矿冶辐射环境监测规定:GB 23726—2009[S].北京:中国标准出版社,2009.
- [15] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.地下水质量标准:GB/T 14848—2017[S].北京:中国质检出版社,2017.
- [16] 寇文杰,谢振华,赵立新,等.探讨地下水背景值确定方法及其容易忽视的几个问题[J].安徽农业科学,2013,41(8):3603-3605.
- [17] 王海峰.地浸采铀监测井的取样方法与监测结果分析[J].铀矿冶,2002,21(2):57-61.
- [18] 温吉利,彭阳,胥建军,等.地浸采铀矿山监测井水样采集技术[J].铀矿冶,2018,37(2):153-160.

Determination Method of Groundwater Baseline of In-situ Leaching of Uranium

LIAN Guoxi^{1,2}, SUN Juan³, XIE Shujun¹, LI Mengjiao³, GAO Siyi¹, AN Yifu³, CAO Fengbo³

(1. Nuclear and Radiation Safety Center, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100082, China;

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

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

Abstract: The groundwater baseline is an important benchmark for determining the impact degree of in-situ leaching of uranium and determining the restoration target value. Due to the complex hydrogeological conditions and poor comparability of monitoring data, the determination of groundwater baseline still lacks a relatively contractual and unified technical method and standard specification. Therefore, the procedure of determining groundwater baseline is put forward, the monitoring factors, spatial scale, number and density of samples, sampling frequency and sampling depth are discussed and demonstrated by applying mathematical and statistical methods based on the monitoring data from two in-situ leaching of uranium projects in Xinjiang and Inner Mongolia. The research results can provide some guidance for determining groundwater baseline of in-situ leaching of uranium.

Key words: in-situ leaching of uranium; groundwater; baseline; groundwater restoration; monitor