

# 某地浸铀矿山地下水本底值统计方法研究

李梦姣<sup>1</sup>, 曹凤波<sup>1</sup>, 刘晓超<sup>1</sup>, 陈帅瑶<sup>1</sup>, 葛佳亮<sup>1</sup>, 汤庆四<sup>2</sup>, 李喜龙<sup>2</sup>, 夏 旭<sup>2</sup>

(1. 中核第四研究设计工程有限公司, 河北 石家庄 050021;

2. 中核通辽铀业有限责任公司, 内蒙古 通辽 028000)

**摘要:** 地下水本底值是地浸铀矿山地下水环境管理的核心依据。针对某地浸铀矿山施工期地下水本底监测中样本量大、离散性强、空间异质性高等特点, 本研究构建了“Grubbs 异常检验—人工复核—数据分布类型判定—本底范围及均值计算”的地下水本底确定方法。以 1# 采区为例开展实证分析, 获取地下水特征因子本底水平与空间分布特征。该方法可有效区分天然浓度高值与人为异常值, 结果客观、代表性强, 可为地浸铀矿山地下水环境管理提供技术支撑, 也可同类铀矿山本底值确定提供技术参考。

**关键词:** 地浸采铀; 铀矿山; 地下水本底值; 统计分析; 异常值识别; Grubbs 检验; 数据分布

**中图分类号:** P641.3; TL75<sup>+</sup>1; TD868 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8063(2026)03-0113-08

**DOI:** 10.13426/j.cnki.yky.2026.04.14

地浸采铀工艺已成为中国铀矿开采的主流工艺之一<sup>[1-2]</sup>, 其产量占中国铀总产量的 90% 以上<sup>[3]</sup>。由于地浸采铀以地下含水层为介质, 开采过程中不可避免地会对地下水环境产生影响<sup>[4-5]</sup>。地下水环境本底值(也称地下水背景值)反映了未受人为活动显著干扰的地下水天然化学组分<sup>[6-7]</sup>, 是判别和评价生产活动对地下水环境影响的重要标尺<sup>[8-10]</sup>, 是制定修复目标的前提和基础<sup>[11]</sup>, 也是地下水环境保护工作中一项极为重要的基础性任务。

在水文地质条件较复杂的地区, 地下水环境本底数据常呈现显著差异<sup>[12-14]</sup>, 对地下水环境管理工作造成了极大困扰。现有调查方法(包括类比法、历时曲线法、数理统计法、趋势分析法、剖面图法及变差曲线法等)<sup>[15-17]</sup>多用于区域尺度的地下水本底值统计, 且侧重于数据统计, 较少结合场址客观条件进行异常值复核, 易将天然高值误判为人为异常。对于检测数据呈现大样本、高离散、强异质性数据特征的地浸铀矿山, 上述方法的局限性尤为突出, 目前尚缺乏专门适配此类数据特征的本底值确定方法。数理统计法客观性强、适用范围广, 尤其适用于海量监测数据的统计分析<sup>[18-19]</sup>, 但需针对性地加以改进。为此, 本研究结合中国北方某地浸铀矿山水文地质条件与本底监测数据特点, 采用“Grubbs 法+人工复核”双重异常值识别, 并结合

Kolmogorov-Smirnov 检验与 Shapiro-Wilk 检验综合判定数据分布类型, 以期科学确定地下水本底值, 为铀矿山地下水环境管理提供对比依据。

## 1 研究区概况

### 1.1 矿区概况

某地浸铀矿山矿区位于半开启型开鲁盆地内的钱家店凹陷带中, 该凹陷属渗入型自流盆地。盆地内地下水补给区位于东南部及西南部的蚀源区, 排泄区主要位于凹陷西北部, 以断裂构造排泄为主导形式。矿区内地下水类型主要有第四系潜水含水层、白垩系嫩江组承压含水层、白垩系姚家组承压水层、白垩系青山口组承压含水层。其中, 含矿层位于上白垩统姚家组下段含水层, 具有稳定的隔水顶、底板<sup>[20]</sup>。矿床范围内地下水径流缓慢, 水力坡度较小, 介于 1‰~2‰。

该区域地下水水化学类型较为复杂。其中, 在盆地边缘水动力强烈交替带, 含水层中发育低矿化度的  $\text{HCO}_3\text{-Ca}$  型水; 随着远离补给区, 在溶滤作用与阳离子交替吸附作用的共同驱动下, 地下水类型逐渐由  $\text{HCO}_3\text{-Ca}$  型水过渡为  $\text{SO}_4\text{-Na}$  型水; 随着地下水埋深逐渐增大, 水动力循环逐渐减缓, 在阳离子吸附交替和有机质还原硫酸盐的作用下, 地下水类型由  $\text{SO}_4\text{-Na}$  型水转变为  $\text{HCO}_3\text{-Na}$  型水, 沿着

收稿日期: 2026-04-15; 修回日期: 2026-04-26

基金项目: 铀资源探采与核遥感全国重点实验室基金项目(NKLUR-2024-QN-017)

通信作者: 曹凤波

承压含水层压力逐渐减小的方向,氯离子含量增高,水化学类型进一步转变为  $\text{HCO}_3 \cdot \text{Cl-Na}$  型水。铀矿体产于氧化-还原过渡带,水文地球化学环境处于半开启的氧化环境,从还原过渡带到氧化带,含氧含铀水的铀含量逐步升高。

### 1.2 环评阶段地下水环境现状监测

地下水环境本底是铀矿山在运行期地下水环境管理和退役时地下水修复目标制定的关键参考指标。在环境影响评价阶段,须按照《铀矿冶辐射环境监测规定》(GB 23726—2009)开展地下水环境本底监测工作<sup>[21]</sup>,监测点位多为铀矿地质勘查阶段所布设的水文孔。但由于水文孔较少,环评阶段的本底调查数据一般无法代表全矿区的地下水本底水平。

在环境影响评价阶段,本研究区内仅有 7 个水文孔可用于地下水环境本底监测。结合研究区及周边地下水监测数据来看,该区域地下水本底

值:pH 为 7.00~8.99,  $\rho(\text{HCO}_3^-)$  为 1 050~2 990 mg/L,  $\rho(\text{SO}_4^{2-})$  为 12~2 200 mg/L,  $\rho(\text{Cl}^-)$  为 51~3 110 mg/L。该区域地下水本底数据不仅样本量少,数据差异也较大,不利于后期地下水环境管理。

### 1.3 施工期监测方案制定

基于上述问题,结合地浸铀矿山特点和研究区环境影响评价报告相关要求<sup>[22]</sup>,在施工期采区开拓阶段依托新施工钻孔开展地下水本底监测。由于研究区地下水本底空间差异较大,为实现监测范围全覆盖,研究区采用“企业全覆盖自行监测+代表性点位第三方校核”的双层监测方案,见表 1。严格遵循《地下水采样技术规程》(DZ/T 0420—2022)与《地下水环境监测技术规范》(HJ 164—2020)要求,规范开展洗井、样品采集、保存及运输等工作。

表 1 施工期生产钻孔监测方案

Table 1 Monitoring scheme for production boreholes during the construction period

| 监测位置            | 监测频次               | 监测单位             | 监测项目                                                                        |
|-----------------|--------------------|------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| 所有生产钻孔          | 1 次                | 矿山               | $U_{\text{天然}}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、pH |
| 每个采区 5 个代表性生产钻孔 | 3 次<br>取样间隔至少 1 个月 | 具备 CMA 检验检测资质的单位 | $U_{\text{天然}}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、pH |

## 2 监测数据分析方法

### 2.1 数据分析技术路线

研究区共包含 10 个分采区,布设生产钻孔近千个,对每个钻孔均开展  $U_{\text{天然}}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、pH 等 5 项特征因子监测。监测数据集规模大、维度高、离散性强,且含水层非均质性显著,组分空间波动剧烈,大幅增加了地下水环境本底值的确定难度。

目前,数理统计中常用的可疑数据剔除方法包括 3 $\delta$  法、Dixon 法和 Grubbs 法等<sup>[23-25]</sup>。其中,3 $\delta$  法临界条件宽松、对轻度异常数据识别能力不足、容错性差;Dixon 法仅适配小样本、易受数据排序干扰、批量运算能力差;相比之下,Grubbs 法理论体系完善,引入了严格的临界值表与置信水平约束,可兼顾大、中、小样本条件,其检验逻辑更严谨,结果稳定性更强。因此,Grubbs 法更适配地下水大批量监测数据的异常筛查工作。笔者采用 Grubbs 法进行异常值检验,并结合矿区水文地球化学特点开展人工复核判定,

再开展数据形态分布类别判定,最终科学、系统地确定研究区地下水环境本底均值和范围值。技术路线见图 1。

### 2.2 异常值判定与处理

#### 2.2.1 异常值判定

由于研究区地下水化学组分存在天然空间差异,采样、运输与实验室分析等环节也可能存在系统误差,直接采用原始数据易导致统计结果出现系统性偏差<sup>[26-27]</sup>。为此,采用 Grubbs 法进行异常值初步筛查。先查阅 Grubbs 临界值表,根据显著性水平( $\alpha$  取 0.05)与样本量( $n$ , 取各因子的监测数据样本数量)确定临界值  $G(\alpha, n)$ ;再按式(1)<sup>[28]29</sup>计算各监测数据对应的  $G_i$ ;最后将各  $G_i$  值与临界值  $G(\alpha, n)$  对比,若  $G_i > G(\alpha, n)$ ,则将该数据判定为可疑异常值。

$$G_i = \frac{|X_i - \bar{X}|}{\delta}, \quad (1)$$

式中: $X_i$ —第  $i$  个监测数据,  $i \leq n$ ;  $n$ —监测数据个数;  $\bar{X}$ —监测数据算术平均值;  $\delta$ —监测数据的标准差;  $G_i$ —第  $i$  个监测数据的 Grubbs 系数。

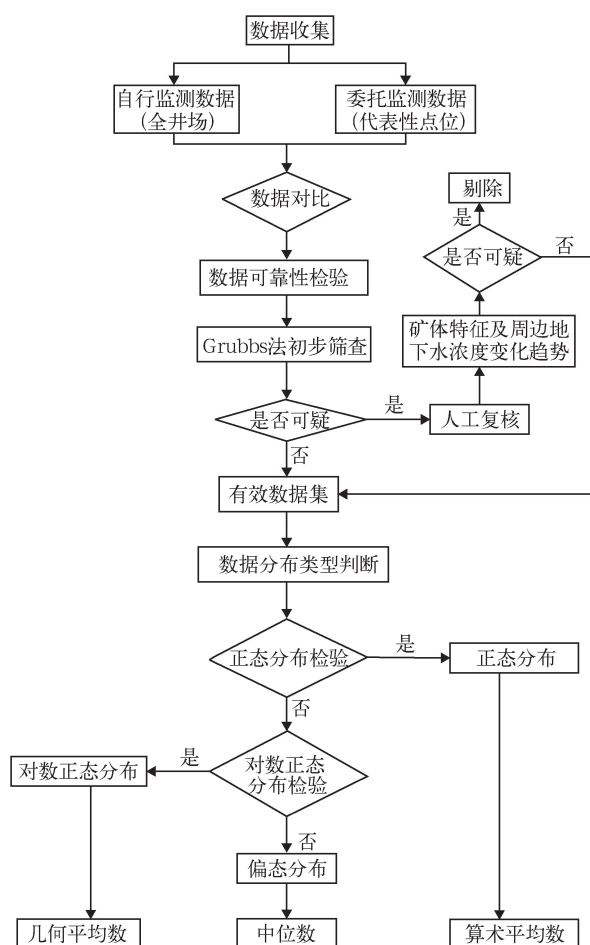


图1 监测数据分析技术路线图

Fig. 1 Technical route of monitoring data analysis

### 2.2.2 人工复核

结合矿体参数(品位、厚度、平米铀量)及周边钻孔监测数据,对筛查出的可疑异常值进行人工复核,从而明确异常成因系天然地质异常或人为取样测试误差。判定原则:1)地质成因一致性原则。若可疑异常值对应钻孔的矿体参数(品位、厚度、平米铀量)显著高于区域平均水平,则判定为天然地质高背景值,予以保留。2)空间连续性原则。若可疑异常值在周边一定范围内存在同样偏高的监测值,或呈现出合理的空间变化梯度,表明其具有空间连续性,则判定为天然异常区,予以保留。3)空间孤立性与不可解释性原则。若可疑异常值既无显著高矿体参数支撑,其周边监测值又处于稳定水平,无变化趋势,即呈“空间孤立”状态,则判定为非地质成因的异常值(如人为误差),予以剔除。

经上述人工复核,区分出天然地质成因高值与人为误差异常值,从而最大程度地还原研究区

实际的地下水化学分布特征,保证样本的代表性与可靠性,为后续数据统计分析工作提供支撑。

## 2.3 数据分布类型判定

### 2.3.1 数据分布形态检验

采用 SPSS 统计分析工具开展数据集的分布形态检验,结合 Kolmogorov-Smirnov(K-S 检验)与 Shapiro-Wilk(W 检验)方法的优势进行综合判定。其中,K-S 检验适用于大样本数据的整体分布形态判定,W 检验在小样本数据中检验效能更高、对分布偏离的敏感性更强,二者结合可弥补单一检验方法的局限性,提高分布类型判定的准确性。数据分布形态检验判定原则:若数据符合正态分布或对数正态分布,即判定为对应分布类型;若既不符合正态分布,也不符合对数正态分布,则判定为偏态分布。

### 2.3.2 均值确定方法

根据各因子数据分布类型,采用对应的统计方法计算本底均值。当样本服从正态分布时,采用算术平均值法,见式(2)<sup>[29]36</sup>;当样本服从对数正态分布时,采用几何平均值法,见式(3)<sup>[29]37</sup>;当样本服从偏态分布时,采用累积频率法,以中位数( $P_{50}$ )作为代表值,见式(4)<sup>[29]38</sup>。均值计算方法如下。

算术平均值法

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (2)$$

几何平均值法

$$\bar{x} = \exp \left[ \frac{1}{n} (\ln x_1 + \ln x_2 + \cdots + \ln x_n) \right] = \exp \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln x_i \right] \quad (3)$$

累积频率法中, $\bar{x}$  指累积频率为 50% 时对应的数值。

## 3 案例分析

以 1# 采区为例,开展地下水本底值统计分析。该采区共包含 96 个生产钻孔(图 2)。共收集自行监测数据 96 组(监测因子包括 pH、 $U_{\text{天然}}$ 、 $HCO_3^-$ 、 $SO_4^{2-}$  及  $Cl^-$ )和第三方委托监测数据 15 组,形成原始监测数据集。对比分析自行监测与委托监测数据,发现监测数据总体处于同一水平,说明自行监测数据稳定性良好,可用于后续统计分析。

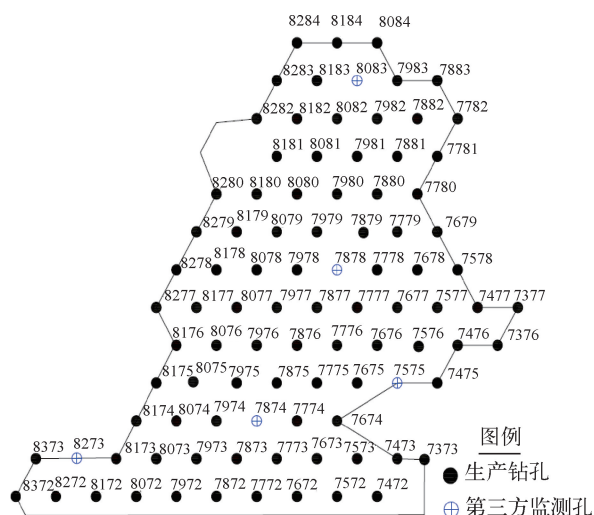


图2 1#采区监测布点图

Fig. 2 Monitoring point layout map of mining area 1#

### 3.1 异常值判定

采用 Grubbs 法进行异常值初步筛查, 设定  $\alpha=0.05$ ,  $n=96$ , 经查阅 Grubbs 异常值检验临界值表  $G(0.05, 96)$  为 3.193。按照式(1)计算各监测数据对应的 Grubbs 系数 ( $G_i$ ), 共筛选出 9 个

$G_i > 3.193$  的数据, 将其判定为可疑异常值。

### 3.2 人工复核

根据 2.2.2 节制定的人工复核原则, 对可疑异常值进行人工复核, 明确异常成因并判定是否剔除:

1)  $U_{\text{天然}}$  异常值复核。以 8081 孔为例,  $\rho(U_{\text{天然}})$  为 1.88 mg/L。经分析, 该钻孔的矿体参数均处于矿床平均水平, 且其周边 6 个钻孔中  $\rho(U_{\text{天然}})$  为 0.09~0.60 mg/L, 与该孔差异显著, 无合理地质成因支撑, 判定为异常值, 剔除。以 8372 孔为例,  $\rho(U_{\text{天然}})$  为 1.69 mg/L。该钻孔矿体参数整体高于矿床平均水平, 且其紧邻钻孔的  $\rho(U_{\text{天然}})$  为 1.48 mg/L, 判定为天然地质成因高值, 保留。

2) 非放射性因子异常值复核。以 7782 孔为例, 该孔  $\rho(\text{SO}_4^{2-})$  为 246 mg/L, 其周围生产孔  $\rho(\text{SO}_4^{2-})$  为 60~67 mg/L, 分布稳定且无明显上升趋势, 该高值无合理支撑, 判定为异常值, 剔除。

逐个分析异常数据, 各特征因子的散点分布见图 3。图中虚线外部为复核后剔除的异常数据, 虚线内部为保留的有效监测数据。

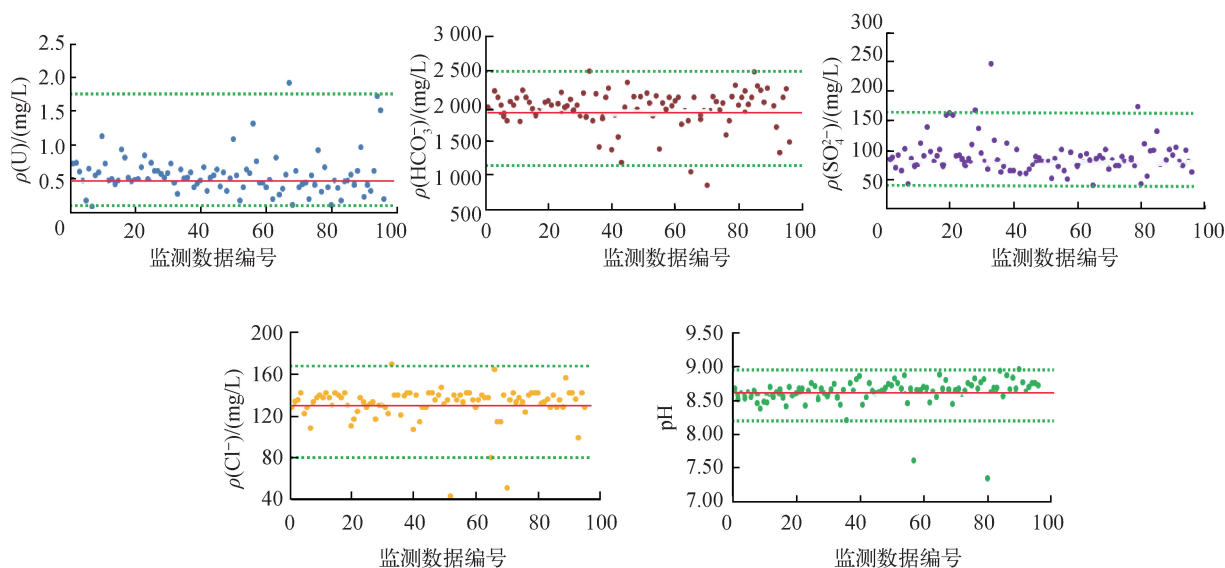


图3 1#采区各特征因子浓度散点图

Fig. 3 Scatter plot of concentration of various characteristic factors in mining area 1#

### 3.3 数据统计

基于上述筛查后的有效数据, 采用 SPSS 软件判定各特征因子的数据分布类型。结果表明, 1#采区 pH 符合正态分布, 其余因子符合偏态分布类型。基于各特征因子的数据形态分布类型计算地下水本底均值。经计算, 1#采区各特征因子

本底值统计结果见表 2。

### 3.4 可靠性分析

为从空间分布合理性角度验证地下水本底值统计方法的可靠性, 采用 Surfer 软件绘制各采区特征因子浓度等值线分布图(图 4)。可以看出, 研究区地下水各特征因子的浓度在空间

分布上连续性好、梯度变化自然,未见明显突变点与不合理高值区和低值区,且未出现因数据处理不当导致的空间畸变。结果表明本研究采用的本底统计方法合理、可靠,具有较强的代表性与稳定性。在各采区数据统计分析的基础上,整合有效数据,绘制研究区地下水特征因子浓度空间分布图,为全区地下水环境管理提供可视化数据支撑。以 pH 为例,其等值线分布见图 5。

表 2 1#采区本底值统计分析结果

Table 2 Statistical analysis results of background values for mining area 1#

| 特征因子                                       | 均值    | 统计范围值       |
|--------------------------------------------|-------|-------------|
| pH                                         | 8.67  | 8.20~8.96   |
| $\rho(\text{U}_{\text{天然}})/(\text{mg/L})$ | 0.454 | 0.058~1.690 |
| $\rho(\text{HCO}_3^-)/(\text{mg/L})$       | 1 976 | 1 175~2 490 |
| $\rho(\text{SO}_4^{2-})/(\text{mg/L})$     | 82    | 40~174      |
| $\rho(\text{Cl}^-)/(\text{mg/L})$          | 133   | 80~169      |

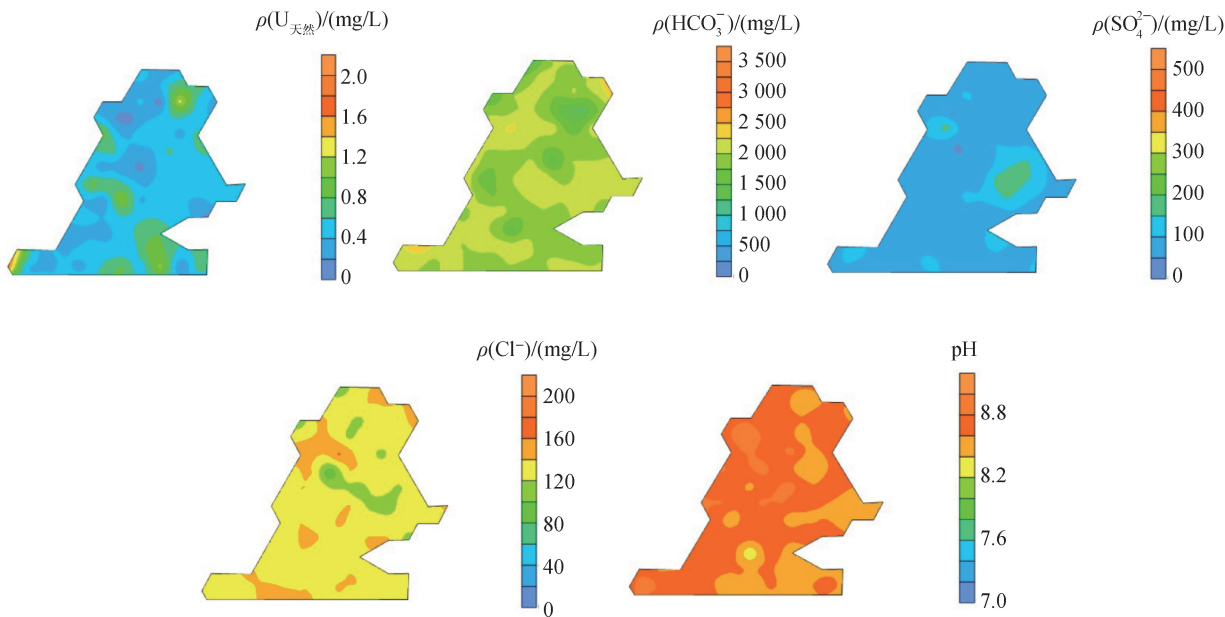


图 4 1#采区各特征因子浓度分布

Fig. 4 Concentration distribution of various characteristic factors in mining area 1#

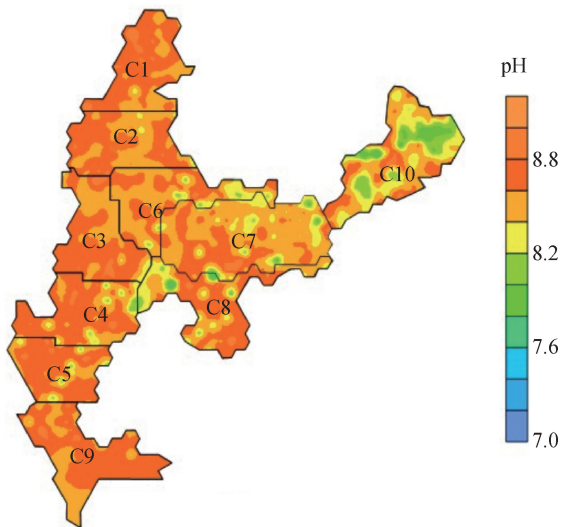


图 5 研究区地下水 pH 等值线分布

Fig. 5 Distribution of groundwater pH isoline in the study area

4 结论

1)建立了适用于地浸采铀矿山的地下水环境本底值确定方法体系,形成“数据收集—异常值检验—人工复核—分布判定—本底计算—空间制图”的标准化流程,解决了从传统小样本数据不足到当前大样本、高离散数据条件下本底值难以确定的技术难题。

2)通过该方法获取的本底均值和范围值,不仅可为地浸铀矿山运行期地下水环境影响评价及日常监管提供对比依据,还可为终采后地下水修复目标值的确定提供核心参数。

参考文献:

[1] 苏学斌,田野,任宇,等.先进地浸采铀技术与“国铀

- 一号”工程[J].核科学与工程,2025,45(5):819-831.
- Su Xuebin, Tian Ye, Ren Yu, et al. Advanced in-situ leaching uranium technologies and the National No. 1 Uranium Production Project[J]. Nuclear Science and Engineering, 2025, 45(5):819-831.
- [2] 孙占学, Fiaz Asghar, 赵凯, 等. 中国铀矿采冶回顾与展望[J]. 有色金属(冶炼部分), 2021(8):1-8.
- Sun Zhanxue, Fiaz Asghar, Zhao Kai, et al. Review and prospect of uranium and metallurgy in China [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2021(8):1-8.
- [3] 王海峰. 中国原地浸出采铀发展史:第二部分:知行合一, 百花齐放[J]. 有色金属(冶炼部分), 2025(12):221-232.
- Wang Haifeng. History of in-situ leaching of uranium in China: Part II :Combine theory with practice, all flowers bloom together [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2025(12):221-232.
- [4] 蒙萍, 李江, 李琪航, 等. 铀矿开采及铀污染地下水修复技术研究进展[J]. 有色金属(冶炼部分), 2025(10):39-52.
- Meng Ping, Li Jiang, Li Qihang, et al. Progress on uranium mining and remediation technologies of uranium-contaminated groundwater [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2025(10):39-52.
- [5] 贺桂成, 王湘雷, 黄炳香, 等. 草酸化纳米零价铁对铀污染地下水的修复行为及机理研究[J]. 铀矿冶, 2025, 44(4):100-111.
- He Guicheng, Wang Xianglei, Huang Bingxiang, et al. Research progress and mechanism analysis of OA-NZVI remediation of uranium contaminated groundwater[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2025, 44(4):100-111.
- [6] 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.
- Guo Gaoxuan, Xin Baodong, Liu Wenchen, et al. Review on the study of the environment background values of groundwater in China [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2010, 37(2):95-98.
- [7] 邱汉学, 黄巧珍. 地下水环境背景值及其确定方法[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 1994(增刊3):16-20.
- Qiu Hanxue, Huang Qiaozhen. The concept of groundwater environment background and its determination[J]. Periodical of Ocean University of China (Natural Science), 1994(S3):16-20.
- [8] 刘元章, 吴芮欣, 王旭, 等. 北京地区地下水环境背景值选取方案初步研究[J]. 城市地质, 2019, 14(4):10-16.
- Liu Yuanzhang, Wu Ruixin, Wang Xu, et al. Preliminary study on selection schemes of groundwater environmental background values in Beijing area [J]. Urban Geology, 2019, 14(4):10-16.
- [9] 邓远东, 冶雪艳, 杜新强. 地下水环境背景值研究进展及展望[J]. 中国环境科学, 2025, 45(5):2530-2545.
- Deng Yuandong, Ye Xueyan, Du Xinqiang. Progress and prospects of research on environmental background value of groundwater [J]. China Environmental Science, 2025, 45(5):2530-2545.
- [10] 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.
- Geng Tingting, Li Yingzhi, Zhang Tao, et al. Discussion of the problems and suggestions for natural background levels in groundwater [J]. Environmental Science and Management, 2018, 43(5):33-35.
- [11] 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.
- [12] 连国玺, 孙娟, 谢树军, 等. 地浸采铀地下水本底值确定方法研究[J]. 铀矿冶, 2024, 43(1):58-64.
- Lian Guoxi, Sun Juan, Xie Shujun, et al. Determination method of groundwater baseline of in-situ leaching of uranium [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2024, 43(1):58-64.
- [13] 樊丽芳, 陈植华. 地下水环境背景值的确定[J]. 西部探矿工程, 2004(7):90-92.
- Fan Lifang, Chen Zhihua. Determination of environment background value of groundwater [J]. West-China Exploration Engineering, 2004(7):90-92.
- [14] 刘畅, 甘圣斌. 地下水环境背景值的确定方法探讨[J]. 绿色科技, 2016(16):132-133.
- Liu Chang, Gan Shengbin. The determination method of groundwater environment background [J]. Journal of Green Science and Technology, 2016(16):132-133.

- [15] 宋小庆,彭钦,王伟,等.贵州岩溶区浅层地下水氯化物及硫酸盐环境背景值[J].地球科学,2019,44(11):3926-3938.  
Song Xiaoqing, Peng Qin, Wang Wei, et al. Analysis of environmental background values of chloride and sulfate in shallow groundwater in karst area of Guizhou [J]. Earth Science, 2019, 44 (11): 3926-3938.
- [16] 邵思慧,单强,李红超,等.冀东平原区地下水环境背景值研究:以唐山地区为例[J].地质找矿论丛,2025,40(3):356-363.  
Shao Sihui, Shan Qiang, Li Hongchao, et al. Study on groundwater environmental background values in the Jidong plain area: A case study of Tangshan region [J]. Contributions of Geology and Mineral Resources Research, 2025, 40(3): 356-363.
- [17] 王利源,高志鹏,王雨桐,等.大同盆地地下水环境背景值识别及预测[J/OL].地学前缘,2025-12-18. <https://doi.org/10.13745/j.esf.sf.2025.11.8>.  
Wang Liyuan, Gao Zhipeng, Wang Yutong, et al. Identification and prediction of environmental background concentrations of arsenic in groundwater of the Datong Basin [J/OL]. Earth Science Frontiers, 2025-12-18. <https://doi.org/10.13745/j.esf.sf.2025.11.8>.
- [18] 刘左,潘欢迎.湖北省平原岗区地下水环境背景值初步研究[J].安全与环境工程,2023,30(3):208-221.  
Liu Zuo, Pan Huanying. Preliminary study on groundwater environmental background value in plain area of Hubei Province [J]. Safety and Environmental Engineering, 2023, 30(3): 208-221.
- [19] 吴涛,李名升,王敏,等.深层地下水氟化物污染源及环境背景值测算研究[J].环境科学与技术,2026,49(2):94-100.  
Wu Tao, Li Mingsheng, Wang Min, et al. Study on pollution source identification and natural background levels of fluoride in deep groundwater [J]. Environmental Science & Technology, 2026, 49 (2): 94-100.
- [20] 董惠琦,李喜龙,张渤.内蒙古某铀矿 $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ 地浸采铀浸出试验研究[J].铀矿冶,2019,38(1):8-13.  
Dong Huiqi, Li Xilong, Zhang Bo. Experimental study on  $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  in-situ leaching of uranium in a uranium mine in Inner Mongolia [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2019, 38(1): 8-13.
- [21] GB 23726—2009 铀矿冶辐射环境监测规定[S].
- [22] 中核通辽铀业有限责任公司,中核第四研究设计工程有限公司.中核通辽铀业有限责任公司钱IV块原地浸出采铀工程环境影响报告书[R].石家庄:中核第四研究设计工程有限公司,2020:176.
- [23] 张慧娟,宋向东,王永茂.均匀分布下的异常数据检验[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2013,32(2):277-280.  
Zhang Huijuan, Song Xiangdong, Wang Yongmao. Procedures of testing outliers of uniform distribution [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2013, 32(2): 277-280.
- [24] 朱嘉欣,包雨恬,黎朝.数据离群值的检验及处理方法讨论[J].大学化学,2018,33(8):58-65.  
Zhu Jiaxin, Bao Yutian, Li Zhao. Discussion on the method for testing and treating outliers [J]. University Chemistry, 2018, 33(8): 58-65.
- [25] 王小凯,朱小文.计量检定中3种判别和剔除异常值的统计方法[J].中国测试,2018,44(增刊1):41-44.  
Wang Xiaokai, Zhu Xiaowen. Three statistical methods for distinguishing and eliminating outliers in metrological verification [J]. China Measurement and Test, 2018, 44(S1): 41-44.
- [26] 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.  
Kou Wenjie, Xie Zhenhua, Zhao Lixin, et al. On several methods for determining the groundwater background value and some easily neglected problems [J]. Journal of Anhui Agriculture Science, 2013, 41(8): 3603-3605.
- [27] 张航泊,宋亚娅,王友林,等.咸阳平原区潜水主要组分环境背景值研究[J].干旱区资源与环境,2020,34(4):128-134.  
Zhang Hangbo, Song Yaya, Wang Youlin, et al. Environmental background values of main components in shallow groundwater in Xianyang plain [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2020, 34(4): 128-134.
- [28] Grubbs F E. Procedures for detecting outlying observations in samples [J]. Annals of Mathematical Statistics, 1950, 21(1): 27-58.
- [29] 陈怀宇,周勤.环境地下水背景值调查与评价技术[M].北京:地质出版社,2019.

## Statistical Method for Background Values of Groundwater in an In-situ Leaching Uranium Mine

LI Mengjiao<sup>1</sup>, CAO Fengbo<sup>1</sup>, LIU Xiaochao<sup>1</sup>, CHEN Shuaiyao<sup>1</sup>, GE Jialiang<sup>1</sup>,  
TANG Qingsi<sup>2</sup>, LI Xilong<sup>2</sup>, XIA Xu<sup>2</sup>

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

2. Tongliao Uranium Co., Ltd., CNNC, Tongliao 028000, China)

**Abstract:** Background values of groundwater are the core basis for groundwater environmental management in in-situ leaching uranium mine. Aiming at the characteristics of large sample size, strong discreteness and high spatial heterogeneity in background values monitoring of groundwater during the construction period of an in-situ leaching uranium mine, this paper established a background values determination method consisting of Grubbs outlier test, manual review, data distribution type judgment, and values range & mean calculation. A case study was carried out in mining area 1# to obtain the background values and spatial distribution characteristics of groundwater characteristic factors. This method can effectively distinguish natural high concentration values from man-made abnormal values with objective and representative results. It can provide technical support for groundwater environmental management of in-situ leaching uranium mines and also serve as a technical reference for background values determination of similar uranium mines.

**Key words:** in-situ leaching of uranium; uranium mine; background values of groundwater; statistical analysis; outlier identification; Grubbs test; data distribution

~~~~~  
(Continued from page 34)

## Key Parameters for Casing Slotted Well in In-situ Leaching of Uranium

LI Xilong, YAN Jifan, LIU Xiaokui, KOU Wenjie  
(Tongliao Uranium Co., Ltd., CNNC, Tongliao 028000, China)

**Abstract:** In order to solve the problems of cumbersome construction process, irreplaceable filter and non-convertible function of extractable liquid in complex sandstone type uranium deposits in the traditional in-situ leaching uranium well configuration (such as large-diameter gravel filling well configuration), a new type of slotted well configuration and its construction technology were proposed. The configuration adopts a one-diameter to the end method, the casing is lowered through the whole hole and the reverse grouting is cemented, and then the industrial ore section is slapped by high-pressure hydraulic sandblasting technology to open up the hydraulic connection channel inside and outside the casing. Through laboratory tests, the key technical parameters of hydraulic sandblasting joints were studied, including the effects of spray pressure, nozzle diameter and moving speed on the depth and width of the joints. The results indicate the optimal slotted performance is achieved when the injection pressure is maintained 30 MPa, the nozzle diameter is set at 3.5 mm, and the moving speed is controlled at 90 mm/min. The slotted well configuration has the advantages of simple construction process, high efficiency, less consumables and high well quality, and is suitable for the mining of complex sandstone type uranium deposits to improve the recovery rate of uranium resources.

**Key words:** in-situ leaching of uranium; well configuration; slotted; slotted well; high-pressure hydraulic sandblasting; construction parameters; construction technology