

# 锡林郭勒草原矿区地下水化学特征与健康风险评价

崔伊彤

北京市朝阳区水土保持与科技管理中心, 北京

收稿日期: 2025年10月15日; 录用日期: 2025年11月26日; 发布日期: 2025年12月8日

## 摘要

为研究矿区对锡林郭勒草原地下水化学特征构成的影响以及地下水中重金属对人体健康的潜在危害, 以锡林郭勒草原矿区为研究区, 对区内30个地下水样品中的常规指标和金属元素进行测定和分析。基于内梅罗综合指数法分析了研究区内地下水化学特征, 应用USEPA健康风险评价模型评价了研究区地下水健康风险。水质评价结果表明: 研究区内某些监测点的水质浓度超出了《地下水质量标准》(GB/T 14848-2017)中III类的标准限值, 研究区地下水水质较差, 需加强该地区的地下水污染防治工作。健康风险评价结果表明: 致癌物的健康风险值远高于非致癌物的健康风险值, 且儿童暴露的健康风险高于成人, 但通过饮用水途径摄入的六种重金属对成人和儿童造成的整体健康风险均未超出可接受的最大限度, 表明研究区地下水金属元素致癌风险较低。

## 关键词

地下水, 水质分析, 内梅罗综合指数法, 健康风险评价

# Chemical Characteristics and Health Risk Assessment of Groundwater in Xilingol Grassland Mining Area

Yitong Cui

Beijing Chaoyang District Soil and Water Conservation and Technology Management Center, Beijing

Received: October 15, 2025; accepted: November 26, 2025; published: December 8, 2025

## Abstract

To study the influence of mining areas on the chemical characteristics of groundwater in Xilingol Grassland and the potential hazards of heavy metals in groundwater to human health, the Xilingol grassland mining area was taken as the research area, and the conventional indicators and metal elements in 30 groundwater samples in the area were determined and analyzed. The chemical characteristics of groundwater in the study area were analyzed based on the Nemerow Composite index method, and the groundwater health risk in the study area was evaluated by applying the USEPA health risk assessment model. The water quality assessment results show that the water quality concentration at some monitoring points in the study area exceeds the standard limit of Class III in the "Groundwater Quality Standard" (GB/T 14848-2017). The groundwater quality in the study area is poor, and the prevention and control of groundwater pollution in this area needs to be strengthened. The results of the health risk assessment show that the health risk values of carcinogens are much higher than those of non-carcinogens, and the health risk exposure of children is higher than that of adults. However, the overall health risks caused by the intake of six heavy metals through drinking water to both adults and children have not exceeded the acceptable maximum limit, indicating that the carcinogenic risk of metal elements in groundwater in the study area is relatively low.

## Keywords

Groundwater, Water Quality Analysis, Nemerow Index, Health Risk Assessment

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

锡林郭勒草原位于内蒙古自治区锡林郭勒盟，是国家级自然保护区，也是我国第一个草原类自然保护区，同时也是目前我国最大的草原与草甸生态系统类型的自然保护区。锡林郭勒草原野生高等植物 600 余种，各类野生动物 200 余种[1]，草原类型复杂、保存较为完好、生物多样性丰富，是我国温带草原中具有代表性和典型性的草原。

锡林郭勒盟在自然条件方面优势显著，地下蕴藏着种类繁多、储量可观的矿产资源，在国家能源产业布局中占据重要地位。曾经的锡林郭勒盟，为了“抓经济、抓工业、抓项目”，集中投资建设了一批露天煤矿，带动了经济发展，但也带来了沉重的生态环境压力，因此开展锡林郭勒草原矿区地下水质量评价刻不容缓。本文以白音华煤矿区附近地下水进行取样测试为基础，初步分析其地下水化学特征与水质评价，并进行健康风险评估，从而为研究区治理地下水影响较大的污染物提供依据。

## 2. 研究区概况

锡林郭勒草原坐落于内蒙古自治区东部的锡林郭勒高原(东经 110°50'至 119°58'、北纬 41°30'至 46°45')，这片草原面积达 17.96 万平方公里，优良牧草占比高达 50%，是一处自然资源颇为优越的天然牧场。锡林郭勒草原的主要煤矿区位置在内蒙古自治区锡林郭勒盟西乌珠穆沁旗的白音华镇区域内，白音华煤矿区包含四个露天矿，是内蒙古自治区内十大煤田之一。研究区经纬度介于东经 118°20'~118°42'，北纬

44°44'~45°1'之间, 紧邻白音华四个露天煤矿区。白音华煤矿区近年来生态环境问题突出, 为当地居民生产生活带来严重问题。

### 3. 样品采集及评价方法

#### 3.1. 样品采集

如图 1 所示, 本研究在研究区采集 30 个样点的地下水样品, 均为井水样品, 平均水温 4.2℃, 研究区地理位置和采样点分布见图 1。

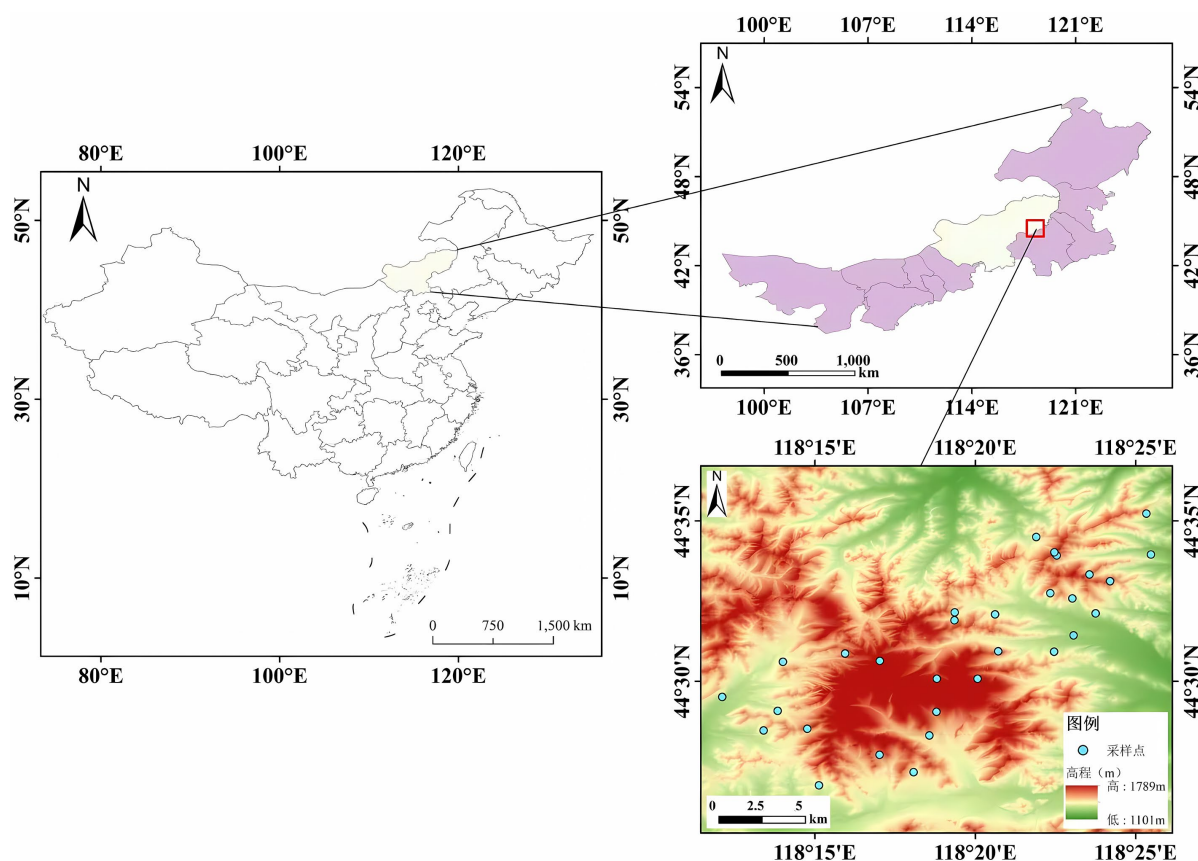


Figure 1. Location of the study area and distribution of sampling regions

图 1. 研究区位置及采样区分布图

#### 3.2. 水质评价

##### 3.2.1. 评价方法

评价方法采用内梅罗综合指数法[2], 指数计算中标准值使用《地下水质量标准》(GB/T 14848-2017)中的 III 类标准限值。

##### 3.2.2. 内梅罗综合指数法

内梅罗指数法计算过程简洁, 在单因子评价法的基础上, 考虑标准指数最高值和平均值的影响, 是一种较为全面、准确的评价水质的方法。计算公式如下:

$$P_i = C_i / C_o \quad (1)$$

$$P_N = \sqrt{\frac{P_{i,\max}^2 \bar{P}_i^2}{2}} \tag{2}$$

式中： $P_i$ 为单因子污染指数； $C_i$ 为各指标实测浓度，mg/L； $C_o$ 为各指标计算标准浓度，mg/L； $P_N$ 为内梅罗指数； $P_{i,\max}$ 为最大污染指数； $\bar{P}_i$ 为平均污染指数。单因子污染指数和内梅罗综合污染指数的评价标准如表 1 所示。

**Table 1.** The evaluation criteria of single-factor pollution index and comprehensive pollution index [3]  
**表 1.** 单因子污染指数和综合污染指数的评价标准[3]

| $P_i$            | 污染水平 | $P_N$              | 污染评价 |
|------------------|------|--------------------|------|
| $P_i \leq 1$     | 清洁   | $P_N \leq 0.7$     | 无污染  |
| $1 < P_i \leq 2$ | 轻度污染 | $0.7 < P_N \leq 1$ | 低污染  |
| $2 < P_i \leq 3$ | 中度污染 | $1 < P_N \leq 2$   | 中度污染 |
| $P_i > 3$        | 重度污染 | $P_N > 2$          | 强污染  |

3.3. 健康风险评估方法

健康风险评估是借助对有害因素给人体带来不良作用的发生几率进行估算，以此来评定处于该有害因素暴露状态下的个体其健康遭受影响的风险程度[4]。健康风险评估方法和模型众多，原理基本一致。本文采用美国环境保护署(USEPA)推荐的健康风险评估模型进行风险评估，是国内外应用比较广泛的模型。在研究过程中，人群被分为成人和儿童两大类来进行分析，以便更细致地了解不同年龄层面对各种污染物暴露的健康风险差异。水体中金属元素通过饮水和皮肤接触 2 种途径暴露[5]，但皮肤接触途径引起的健康风险较饮用途径存在数量级差距，可忽略不计[6]，因此文中只对地下水经饮用途径引起的健康风险进行评价。

3.3.1. 健康风险评估模型

地下水中由致癌性金属污染物引发的健康危害风险用致癌物评价模型评价，由非致癌性金属污染物导致的健康危害风险用非致癌物评价模型评价。

致癌物评价模型：

$$R_c = \sum R_{ci} = \sum [1 - \exp(-D_i \cdot q_i)] / L \tag{3}$$

式中： $R_{ci}$ 为致癌金属污染物  $i$  经饮用途径进入人体产生的个人年平均健康风险值( $a^{-1}$ )； $q_i$ 为致癌金属污染物  $i$  经饮用途径的致癌系数； $L$ 为居民平均寿命。

非致癌物评价模型：

$$R_n = \sum R_{ni} = \sum (D_i / RfD_i) \times 10^{-6} / L \tag{4}$$

式中： $R_{ni}$ 为非致癌金属污染物  $i$  经饮用途径进入人体产生的个人年平均健康风险值( $a^{-1}$ )； $RfD_i$ 为非致癌金属污染物  $i$  经饮用途径的健康风险系数。

$D_i$ 通过以下公式计算：

$$D_i = A \times C_i / B \tag{5}$$

式中： $D_i$ 为重金属  $i$  经饮用途径的单位体重日均暴露剂量( $mg \cdot kg^{-1} \cdot d^{-1}$ )； $C_i$ 为重金属  $i$  的实测浓度( $mg/L$ )； $A$ 为人均日饮水量； $B$ 为人均体重。

地下水中重金属通过饮水途径产生的健康危害风险总值  $R$  计算公式如下：

$$R = R_c + R_n \tag{6}$$

式中： $R$  为地下水中重金属通过饮用途径的健康危害风险总值； $R_c$  为经饮水途径的各致癌污染物产生的致癌风险总值； $R_n$  为经饮水途径的各非致癌污染物产生的健康危害风险总值。

3.3.2. 各参数选择

本文致癌污染物的致癌强度系数和非致癌污染物的参考剂量参照国际癌症研究中心(IARC)和世界卫生组织(WHO)的推荐值[7]-[11]。前人在重金属健康风险评价中对重金属的选取，一般选取  $\text{Cr}^{6+}$ 、 $\text{Cd}$  和  $\text{As}$  为致癌污染物。考虑到本次水样  $\text{Cr}^{6+}$  未检出，因此在本次研究中，仅将重金属  $\text{Cd}$  和  $\text{As}$  归类为致癌污染物，而  $\text{Mn}$ 、 $\text{Cu}$ 、 $\text{Zn}$ 、 $\text{Pb}$  及  $\text{Hg}$  则被归类为非致癌污染物。针对这些污染物，各自对应的致癌风险系数  $q_i$  以及非致癌污染物的健康风险参考剂量  $RfD_j$  值详见表 2。

Table 2. The carcinogenic coefficient and health risk coefficient of heavy metals [12] [13]

表 2. 重金属致癌系数与健康风险系数[12] [13]

| 致癌污染物致癌系数 $q_i$ |     |                      | 非致癌污染物健康风险系数 $RfD_j$ |                    |                      |                    |
|-----------------|-----|----------------------|----------------------|--------------------|----------------------|--------------------|
| Cd              | As  | Mn                   | Cu                   | Zn                 | Pb                   | Hg                 |
| 6.1             | 1.5 | $4.6 \times 10^{-2}$ | $5 \times 10^{-3}$   | $3 \times 10^{-1}$ | $1.4 \times 10^{-3}$ | $3 \times 10^{-4}$ |

本次研究中，考虑到不同年龄段人群生理状态的不同，将样本划分为儿童及成人 2 个群体进行健康风险评估，其对应的人均日饮水量，成人取 2.2 L，儿童取 1.0 L [14]，人均体重成人取 56 kg [8]，儿童取 22 kg [15]。居民平均寿命根据内蒙古自治区卫生健康委员会公布的数据，内蒙古牧民人均预期寿命已达 75.3 岁 [16]，所以  $L$  取 75.3a。

4. 结果与讨论

4.1. 水质特征

首先对地下水各水质指标数值的分布类型进行检验，已检出指标基本符合对数正态分布，对数正态分布在地下水水质数据分析中较为常见。

4.1.1. 水质常规指标统计分析

对比《地下水质量标准》(GB/T 14848-2017)规定的 III 类水标准， $\text{Na}^+$ 、 $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{NO}_2^-$  和  $\text{F}^-$  部分采样点质量浓度超过 III 类标准限值，超标率见表 3，最大值分别是标准限值的 2.6875、2.5708、1.5148、6.116、2.878 和 2.389 倍； $\text{Na}^+$ 、 $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$  和  $\text{NO}_2^-$  的变异系数均超过 1，说明这 6 类常规指标表现出较大幅度的变化。

Table 3. Statistics of routine water quality indicators in the study area

表 3. 研究区水质常规指标统计

|              | 平均值   | 最大值  | 最小值  | 中位数  | 标准差   | 变异系数% | 超标率 | III 类水标准 |
|--------------|-------|------|------|------|-------|-------|-----|----------|
| pH           | 7.763 | 7.94 | 7.36 | 7.82 | 0.152 | 0.02  | 0   | 6.5~8.5  |
| $\text{K}^+$ | 1.659 | 4.0  | 0.7  | 1.6  | 0.71  | 0.43  | -   | -        |

续表

|                               |        |        |       |        |         |       |        |        |
|-------------------------------|--------|--------|-------|--------|---------|-------|--------|--------|
| Na <sup>+</sup>               | 108.13 | 537.5  | 5.3   | 56.3   | 119.272 | 1.103 | 15.63% | 200.00 |
| Ca <sup>2+</sup>              | 75.088 | 181.2  | 32.2  | 69.8   | 31.431  | 0.42  | -      | -      |
| Mg <sup>2+</sup>              | 28.722 | 101.5  | 7.6   | 19.5   | 22.914  | 0.80  | -      | -      |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>  | 1.985  | 18.3   | 0.04  | 0.12   | 5.735   | 2.89  | 6.25%  | 0.5    |
| Cl <sup>-</sup>               | 71.331 | 642.7  | 8.5   | 28.15  | 119.522 | 1.68  | 6.25%  | 250.00 |
| SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | 88.596 | 378.7  | 0.221 | 26.6   | 106.207 | 1.20  | 9.38%  | 250.00 |
| HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | 402.36 | 1111.8 | 144   | 379.85 | 205.37  | 0.51  | -      | -      |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>  | 16.791 | 122.32 | 0.43  | 8.115  | 24.664  | 1.47  | 21.88% | 20.00  |
| NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>  | 0.202  | 2.878  | 0.002 | 0.067  | 0.54    | 2.67  | 3.13%  | 1.00   |
| F <sup>-</sup>                | 0.643  | 2.389  | 0.02  | 0.427  | 0.554   | 0.86  | 15.63% | 1.00   |

4.1.2. 金属元素质量浓度统计分析

将研究区内地下水各项重金属指标与《地下水质量标准》(GB/T 14848-2017) III 类水标准限值相对照后发现, Hg、As、Cd、Cu 以及 Zn 的含量未出现超标情况。而 Mn 超标率达 25%, 其最大值是标准限值的 4.46 倍; Pb 超标率为 12.5%, 最大值为标准限值的 3.55 倍。综上, 在研究区的地下水中, Pb 和 Mn 是导致重金属超标的主要元素。详见表 4。

Table 4. Statistics on the mass concentration of metal elements in groundwater of the study area  
表 4. 研究区地下水金属元素质量浓度统计

|    | 平均值                   | 最大值                   | 最小值                   | 中值                    | 标准差                   | 变异系数% | 超标率   | III 类水标准 |
|----|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-------|-------|----------|
| Cd | $1.60 \times 10^{-4}$ | $3.10 \times 10^{-4}$ | $5.00 \times 10^{-5}$ | $1.30 \times 10^{-4}$ | $1.00 \times 10^{-4}$ | 0.62  | 0     | 0.005    |
| As | $4.20 \times 10^{-3}$ | $9.40 \times 10^{-3}$ | $3.00 \times 10^{-4}$ | $3.70 \times 10^{-3}$ | $2.80 \times 10^{-3}$ | 0.66  | 0     | 0.01     |
| Mn | $1.28 \times 10^{-1}$ | $4.46 \times 10^{-1}$ | $4 \times 10^{-3}$    | $5.4 \times 10^{-2}$  | $1.44 \times 10^{-1}$ | 1.12  | 25%   | 0.10     |
| Cu | $3.39 \times 10^{-3}$ | $2.20 \times 10^{-2}$ | $6.00 \times 10^{-4}$ | $1.71 \times 10^{-3}$ | $4.40 \times 10^{-3}$ | 1.30  | 0     | 1.00     |
| Zn | $4.17 \times 10^{-2}$ | $6.01 \times 10^{-1}$ | $9.00 \times 10^{-4}$ | $3.91 \times 10^{-3}$ | $1.24 \times 10^{-1}$ | 2.97  | 0     | 1.00     |
| Pb | $3.72 \times 10^{-3}$ | $3.55 \times 10^{-2}$ | $9.00 \times 10^{-5}$ | $4.90 \times 10^{-4}$ | $8.18 \times 10^{-3}$ | 2.20  | 12.5% | 0.01     |

4.1.3. 地下水水质评价

研究区元素内梅罗综合污染指数  $P_N$  计算结果见表 5。可以看出, 各元素综合污染指数的大小顺序为:  $NH_4^+ > Mn > NO_3^- > Pb > NO_2^- > Na^+ > Cl^- > F^- > SO_4^{2-} > As > Zn > Cd > Cu$ 。  $NH_4^+$ 、Mn、 $NO_3^-$ 、Pb、 $NO_2^-$  污染指数大于 2, 处于强污染水平, 占总数的 38.5%;  $Na^+$ 、 $Cl^-$ 、 $F^-$ 、 $SO_4^{2-}$  污染指数介于 1~2 之间, 处于中度污染水平, 占总数的 30.8%; As 污染指数介于 0.7~1 之间, 处于轻污染水平, 占总数的 7.7%; Zn、Cd、Cu 污染指数小于 0.7, 处于无污染水平, 占总数的 23.08%。综合来看, 研究区地下水水质较差。



**Table 5.** Statistics of the evaluation results of the Merlot Pollution Index in the study area  
**表 5.** 研究区内梅罗污染指数评价结果统计

| 统计指标                          | $P_i$    |         |             | $P_N$       | $P_N$ 评价 |
|-------------------------------|----------|---------|-------------|-------------|----------|
|                               | 最小值      | 最大值     | 平均值         |             |          |
| Na <sup>+</sup>               | 0.0265   | 2.6875  | 0.540625    | 1.938       | 中度污染     |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>  | 0.08     | 36.6    | 3.9700      | 26.032      | 强污染      |
| Cl <sup>-</sup>               | 0.034    | 2.5708  | 0.285325    | 1.822       | 中度污染     |
| SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | 0.000884 | 1.5148  | 0.3544      | 1.100       | 中度污染     |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>  | 0.0215   | 6.116   | 0.8395      | 4.365       | 强污染      |
| NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>  | 0.002    | 2.878   | 0.202286    | 2.040       | 强污染      |
| F <sup>-</sup>                | 0.02     | 2.389   | 0.642531    | 1.749       | 中度污染     |
| Cd                            | 0.01     | 0.062   | 0.032       | 0.049       | 无污染      |
| As                            | 0.03     | 0.94    | 0.42333     | 0.729       | 轻污染      |
| Mn                            | 0.04     | 4.46    | 1.277826    | 3.280582211 | 强污染      |
| Cu                            | 0.0006   | 0.02203 | 0.0033944   | 0.01576139  | 无污染      |
| Zn                            | 0.0009   | 0.60149 | 0.041663913 | 0.426336781 | 无污染      |
| Pb                            | 0.009    | 3.545   | 0.371967    | 2.520454765 | 强污染      |

4.2. 健康风险评价

4.2.1. 健康风险分析

根据健康风险评价模型计算得到研究区地下水重金属元素的健康风险结果见表 6。通过饮用水途径的致癌物的健康风险值远高于非致癌物的健康风险值，高出 3~4 个数量级。ICRP 推荐的最大可接受风险水平为  $5.0 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$  [17]，研究区 6 种重金属通过饮用水径对成人与儿童引起的总健康风险均未超过最大可接受水平，但是可以发现经饮用水途径儿童暴露的健康风险更高。

**Table 6.** Health risks of chemical and non-chemical carcinogens through the drinking water route ( $\text{a}^{-1}$ )  
**表 6.** 经饮用水途径的化学致癌物质和非化学致癌物质的健康风险( $\text{a}^{-1}$ )

| 项目        | 金属元素 | 成人                             | 儿童                             |
|-----------|------|--------------------------------|--------------------------------|
| 致癌 $R_c$  | Cd   | $5.09\text{E-}07\text{a}^{-1}$ | $5.89\text{E-}07\text{a}^{-1}$ |
|           | As   | $3.29\text{E-}06\text{a}^{-1}$ | $3.80\text{E-}06\text{a}^{-1}$ |
| 非致癌 $R_n$ | Mn   | $1.45\text{E-}09\text{a}^{-1}$ | $1.68\text{E-}09\text{a}^{-1}$ |
|           | Cu   | $3.54\text{E-}10\text{a}^{-1}$ | $4.09\text{E-}10\text{a}^{-1}$ |
|           | Zn   | $7.25\text{E-}11\text{a}^{-1}$ | $8.39\text{E-}11\text{a}^{-1}$ |
|           | Pb   | $1.39\text{E-}09\text{a}^{-1}$ | $1.60\text{E-}09\text{a}^{-1}$ |
| 总健康风险 R   |      | $3.80\text{E-}06\text{a}^{-1}$ | $4.40\text{E-}06\text{a}^{-1}$ |

#### 4.2.2. 不确定性分析

(1) 美国环境保护署(USEPA)强调,全面的健康风险评估应当涵盖对存在于大气、土壤、水以及食物链中的污染物进行详尽分析,并评估这些污染物通过食入、吸入和皮肤接触三种途径进入人体后可能产生的健康影响。本研究仅限于探讨重金属通过饮水这一单一途径对人体健康构成的风险,并且所涵盖的重金属种类并不全面。因此,基于本文研究所计算出的总健康风险结果实际上可能低于实际情况。

(2) 在本次地下水健康风险评估过程中,将致癌物与非致癌物所导致的健康风险值分开予以计算。然而,黄磊等人在2010年的研究表明,致癌污染物同样具备非致癌危害效应,因此非致癌物的健康危害风险实际上是低于实际情形的。

(3) 在本次健康风险评估里,参数的选取大多参照前人的研究成果,并未对研究区域的具体状况展开调查,从而得出适用于该研究区的参数,诸如日均饮水量、体重等。由于参数存在一定的不确定性,致使所得出的结论缺乏针对性。

### 5. 结论

(1) 在研究区中,存在部分点位的质量浓度超出了III类水标准限值。超标率较高的有 $\text{NO}_3^-$ 和Mn,超标率超过了20%。

(2) 研究区内,地下水水质较差。该区域人口分布较为稀疏,但采矿区域相对集中。煤矿区水环境污染的主要根源为矿井涌水,矿井涌水在流动进程中,会经矿井巷道底部的采矿裂隙,亦或是地表风化裂隙,渗入周边的含水层;又或者直接通过地表沟渠排放,进而流入周边河流,最终导致了周边地下水遭受污染。鉴于此,有必要大力强化该地区的地下水污染防治工作。

(3) 健康风险评估的结果显示,致癌物质的健康风险值显著高于非致癌物质的健康风险值,并且儿童暴露于这些物质所面临的健康风险高于成人,但总体健康风险并未超出最大可接受水平。这表明该研究区地下水中的金属元素致癌风险相对较低。这一结论提示虽然目前的风险处于可控范围内,但仍需关注并进一步监测与管理以确保长期的水质安全和公众健康。

### 参考文献

- [1] 内蒙古大学生命科学学院,锡林郭勒国家级自然保护区管理局. 锡林郭勒国家级自然保护区综合科学考察报告[M]. 呼和浩特: 内蒙古大学出版社, 2000.
- [2] 李名升, 张建辉, 梁念, 等. 常用水环境质量评价方法分析与比较[J]. 地理科学进展, 2012, 31(5): 617-624.
- [3] 付蓉洁, 辛存林, 余爽, 等. 石期河西南子流域地下水重金属来源解析及健康风险评价[J]. 环境科学, 2023, 44(2): 796-806.
- [4] 封丽, 张君, 封雷, 等. 三峡库区主要城镇饮用水源地水质健康风险评价[J]. 环境污染与防治, 2016, 38(2): 44-49.
- [5] Xia, F., Niu, X., Qu, L.Y., Dahlgren, R.A. and Zhang, M. (2021) Integrated Source-Risk and Uncertainty Assessment for Metals Contamination in Sediments of an Urban River System in Eastern China. *Catena*, **203**, Article 105277. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105277>
- [6] Saha, N., Rahman, M.S., Ahmed, M.B., Zhou, J.L., Ngo, H.H. and Guo, W. (2017) Industrial Metal Pollution in Water and Probabilistic Assessment of Human Health Risk. *Journal of Environmental Management*, **185**, 70-78. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.10.023>
- [7] 徐美娟, 鲍波, 陈春燕, 等. 宁波市地表水重金属污染现状和健康风险评价[J]. 环境科学, 2018, 39(2): 729-737.
- [8] US EPA (1999) Guidance for Performing Aggregate Exposure and Risk Assessments. U. S. EPA.
- [9] US EPA. (2008) EPA/600/R-06/096F, Child-Specific Exposure Factors Handbook. US EPA.
- [10] 环境保护部. 中国人群暴露参数手册(成人卷) [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2013: 90-780.
- [11] 段小丽, 王宗爽, 李琴, 等. 基于参数实测的水中重金属暴露的健康风险研究[J]. 环境科学, 2011, 32(5): 1329-1339.



- 
- [12] 乔晓辉, 陈建平, 王明玉, 等. 华北平原地下水重金属山前至滨海空间分布特征与规律[J]. 地球与环境, 2013, 41(3): 209-215.
- [13] 王贞岩, 王姝, 付腾飞, 等. 秦皇岛海岸带地下水重金属特征及健康风险评价[J]. 环境化学, 2021, 40(4): 1157-1166.
- [14] 张清华, 韦永著, 曹建华, 等. 柳江流域饮用水源地重金属污染与健康风险评价[J]. 环境科学, 2018, 39(4): 1598-1607.
- [15] 环境保护部. 中国人群暴露参数手册(儿童卷) [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2016: 30-560.
- [16] 于长洪, 张云龙, 等. 骏马奔腾勇向前 壮美北疆尽欢歌[N]. 经济参考报, 2019-10-22(A05).
- [17] 车飞, 于云江, 胡成, 等. 沈抚灌区土壤重金属污染健康风险初步评价[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(7): 1439-1443.