

# 某铀矿液态流出物放射性调查及环境影响评价

钟春明<sup>1,2</sup>

(1. 核工业 230 研究所, 湖南 长沙 410007;  
2. 湖南省伴生放射性矿产资源评价与综合利用工程技术研究中心, 湖南 长沙 410007)

**摘要:** 对某铀矿产生的矿井水、尾矿库流出水、工艺废水等液态流出物的放射性进行调查、分析和评价, 掌握液态流出物的放射性水平和受纳水体的污染情况, 评价液态流出物通过各种污染途径对当地居民造成的辐射影响。结果表明, 矿井水、工艺废水和尾矿库流出水经处理后, 废水中的  $U_{\text{天然}}$ 、 $^{226}\text{Ra}$ 、 $^{210}\text{Pb}$  和  $^{210}\text{Po}$  的排放浓度均满足限值要求; 受纳水体下游河段中的  $U_{\text{天然}}$  浓度稍高于本底水平,  $^{226}\text{Ra}$ 、 $^{210}\text{Pb}$  和  $^{210}\text{Po}$  浓度均属正常本底水平。铀矿排放的液态流出物致 20 km 范围内居民最大个人剂量为  $1.45 \times 10^{-3}$  mSv/a, 最大集体有效剂量为  $2.35 \times 10^{-4}$  人·Sv/a, 关键居民组为 WNW 方位、 $>2 \sim 5$  km 区的人口组。该铀矿液态流出物在处理达标后排入受纳水体, 对当地的辐射影响较小。

**关键词:** 铀矿; 液态流出物; 放射性; 矿井水; 尾矿库流出水; 工艺废水; 调查; 评价

**中图分类号:** X591; TL75 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8063(2024)04-0119-08

**DOI:** 10.13426/j.cnki.yky.2024.04.15

随着能源需求的增长, 世界各国积极开发清洁能源<sup>[1-2]</sup>。中国核电对铀资源的需求量也越来越大。与其他矿种相比, 铀矿在采冶过程中产生的尾矿石、废渣、液态流出物, 及气态流出物等均具有放射性, 其中还包括铀系、钍系衰变链中的长寿命放射性核素<sup>[3-4]</sup>。液态流出物可能污染地表水、地下水, 还可能进入生物体内, 对周边生态环境和当地居民造成辐射危害<sup>[5]</sup>。

为此, 笔者对南方某铀矿产生的矿井水、尾矿库流出水、工艺废水等液态流出物进行调查、取样、分析和评价, 以实际监测数据和环境影响评价相结合的方式, 掌握铀矿开采过程中产生的液态流出物的放射性水平和对当地环境的辐射影响, 旨在为保障当地辐射安全、提升铀矿开采风险评估能力提供依据。

## 1 项目概况

南方某铀矿现有 2 处在开采矿井、1 处工艺废水处理厂和 1 处尾矿库流出水处理厂。对开采

的铀矿石进行破碎、堆浸, 采用密实移动床吸附塔处理堆浸产生的浸出合格液, 吸附尾液大部分返回用于配制淋洗剂, 饱和树脂被送至淋洗塔淋洗后得到淋洗合格液。采矿废石大部分回填井下, 少部分运至书楼丘废石场堆存, 水冶产生的废渣运至现有尾矿库堆存。利用废水处理设施对矿井水、工艺废水、尾矿库流出水进行处理, 处理合格后排放至同一受纳水体。

该铀矿所在地区属于中亚热带湿润型季风气候区, 具有光热充足、雨量充沛、雨热同季、无霜期长的特征, 多年平均降雨量为 1 715 mm, 降雨多集中于 3~7 月, 月平均最大降雨量为 290.9 mm (6 月), 月平均最小降雨量为 42.0 mm (11 月); 平均年蒸发量为 1 415 mm, 平均相对湿度 81%, 平均大气压为 1 001.98 hPa; 多年风频最大的风向为南风 and 东南风, 多年平均风速 1.1 m/s, 极端最大风速达 32 m/s。根据当地水文局调查数据, 受纳水体 2022 年水文参数见表 1。

收稿日期: 2024-04-26

基金项目: 中国核工业地质局地质基金项目(2023-24-3)。

第一作者简介: 钟春明(1986—), 男, 江西赣州人, 学士, 高级工程师, 主要从事物理分析、辐射环境监测和评价。

表1 受纳水体主要水文参数  
Table 1 Main hydrologic parameters of the receiving water

时段	水文参数				
	流量/(m <sup>3</sup> /s)	河宽/m	流速/(m/s)	河深/m	水力坡度/%
丰水期	0.39	2.80	0.20	0.77	0.68
枯水期	0.22	1.52	0.43	0.40	0.29

## 2 管理限值

根据项目实际情况及相关标准规定<sup>[6]</sup>,确定本项目公众年有效剂量约束值为0.1 mSv/a。本项目的受纳水体满足不低于5倍稀释倍数的要

求。矿井水、工艺废水、尾矿库流出水经处理后,排放口浓度应满足《铀矿冶辐射防护和辐射环境保护规定》(GB 23727—2020)<sup>[7]</sup>表3中的限值,见表2。液态流出物归一化排放管理限值应满足GB 23727—2020表5中的限值,见表3。

表2 外排废水中放射性核素排放限值  
Table 2 Emission limits for radioactive nuclides in discharged wastewater

参数	$\rho(U_{\text{天然}})$ /(mg/L)	$C(^{226}\text{Ra})$ /(Bq/L)	$C(^{230}\text{Th})$ /(Bq/L)	$C(^{210}\text{Po})$ /(Bq/L)	$C(^{210}\text{Pb})$ /(Bq/L)
数值	0.3	1.1	1.85	0.5	0.5

表3 液态流出物归一化排放量  
Table 3 Authorized limits for normalized releases of liquid effluent

液态流出物	归一化排放量/(Bq/100tU)			
	$U_{\text{天然}}$	$^{226}\text{Ra}$	$^{210}\text{Po}$	$^{210}\text{Pb}$
本项目排放量	$2.2 \times 10^7$	$2.4 \times 10^7$	$3.4 \times 10^6$	$5.2 \times 10^6$
管理限值	$9.5 \times 10^8$	$2.5 \times 10^8$	$6.5 \times 10^7$	$6.5 \times 10^7$

## 3 源项调查与方法

### 3.1 工程调查

该铀矿产生的废水主要包括矿井水、尾矿库流出水、工艺废水。

#### 3.1.1 矿井水

矿井水总排水量为2 860 m<sup>3</sup>/d,其中一号矿井排水量为1 890 m<sup>3</sup>/d,二号矿井排水量为970 m<sup>3</sup>/d。该铀矿矿井设有1套矿井水处理设施,用于处理矿井排水。该矿井水处理设施设计处理能力为5 000 m<sup>3</sup>/d,矿井水经高位水池后进入澄清池澄清,然后采用树脂吸附除铀工艺处理达标后外排;饱和树脂经淋洗后再生利用,淋洗合格液用罐车送水冶厂处理。

#### 3.1.2 尾矿库流出水

尾矿库流出水产生量为1 730 m<sup>3</sup>/d。尾矿库

坝下建有1套流出水处理设施,处理能力为6 000 m<sup>3</sup>/d。尾矿库流出水经离心泵打入污水池,再自流至锰砂吸附池,污水中的镭被锰砂吸附后排至泵池,部分处理后的水经清水泵打入反冲水高位池,作冲洗锰砂用;其余水外排。

#### 3.1.3 工艺废水

工艺废水主要为浸出液处理过程中产生的吸附尾液、转型尾液、沉淀母液等,含有铀、镭等放射性核素。工艺废水产生量为235 m<sup>3</sup>/d,水冶厂配备1套工艺废水处理设施,处理能力为500 m<sup>3</sup>/d。工艺废水采用石灰乳中和除铀、氯化钡除镭工艺,处理后的清液进入槽式排放池,检验合格后外排,产生的沉渣压滤后输送至尾矿库。

### 3.2 调查方案与监测仪器

根据《辐射环境监测技术规范》(HJ 61—2021)和《铀矿冶辐射环境监测规定》(GB

23726—2009)等进行液态流出物调查方案的制定<sup>[8-9]</sup>,矿井水、尾矿库流出水、工艺废水各排放口取样频率不少于1次/季度。同时,在受纳水体上游500 m、下游500 m和下游1 000 m处进行水样和底泥取样,取样时间为丰水期(7月)和枯水期(11月)。水样和底泥采集后按照相关要求固

定、运输,送至实验室采用标准测量<sup>[10-15]</sup>方法进行分析测量。

为了保障监测质量,实验室所使用的仪器设备都经过相关计量部门检定,监测分析人员都经过相关专业培训并取得上岗证,项目环境监测方法及仪器见表4。

表4 液态流出物分析测量方法及仪器

Table 4 Analytical method and instruments of liquid effluent

对象	核素	监测方法	监测仪器	检出限
地表水	$U_{\text{天然}}$	《环境样品中微量铀的分析方法》(HJ 840—2017)	MUA 型微量铀分析仪	0.02 $\mu\text{g/L}$
	$^{226}\text{Ra}$	《水中镭-226的分析测定》(GB 11214—89)	PC-2100 型镭氡分析仪	0.002 Bq/L
	$^{210}\text{Po}$	《水中钋-210的分析方法》(HJ 813—2016)	7200-4-1 型低本底 $\alpha$ 能谱仪	0.001 Bq/L
	$^{210}\text{Pb}$	《水中铅-210的分析方法》(EJ/T 859—1994)	MPC-9604 型气流式低本底 $\alpha$ 、 $\beta$ 测量仪	0.005 Bq/L
底泥	$U_{\text{天然}}$	《硅酸盐岩石化学分析方法 第30部分:44个元素量测定》(GB/T 14506.30—2010)	NexION 300X 型电感耦合等离子体质谱仪	0.003 $\mu\text{g/g}$
	$^{226}\text{Ra}$	《高纯锗 $\gamma$ 能谱分析通用方法》(GB/T 11713—2015)	GEM100-95 型高纯锗 $\gamma$ 能谱仪	5.0 Bq/kg

## 4 调查结果及评价

### 4.1 排放废水监测结果

对矿井水、工艺废水及尾矿库流出水,从处理后的排放口进行取样检测,主要分析流出物中的  $U_{\text{天然}}$ 、 $^{226}\text{Ra}$ 、 $^{210}\text{Po}$ 、 $^{210}\text{Pb}$  等核素。液态流出物排放口监测结果见表5。可以看出,矿井废水、尾矿

库流出水、工艺废水中的  $\rho(U_{\text{天然}})$  最高分别为 0.087、0.100、0.093 mg/L,均低于 0.3 mg/L 的排放限值;矿井水、尾矿库流出水、工艺废水中的  $C(^{226}\text{Ra})$  最高分别为 0.41、0.36、0.28 Bq/L,均低于 1.1 Bq/L 的排放限值; $^{210}\text{Pb}$  和  $^{210}\text{Po}$  排放活度浓度均满足 0.5 Bq/L 限值要求。

表5 液态流出物排放口监测结果

Table 5 Monitoring results of the liquid effluent discharge outlet

对象	$\rho(U_{\text{天然}})/(\text{mg/L})$		$C(^{226}\text{Ra})/(\text{Bq/L})$		$C(^{210}\text{Pb})/(\text{Bq/L})$		$C(^{210}\text{Po})/(\text{Bq/L})$	
	范围	均值	范围	均值	范围	均值	范围	均值
矿井废水	0.012~0.087	0.045	0.023~0.410	0.300	0.031~0.180	0.095	0.014~0.210	0.082
尾矿库流出水	0.016~0.100	0.060	0.037~0.360	0.170	0.011~0.150	0.084	0.010~0.240	0.053
工艺废水	0.012~0.093	0.018	0.016~0.280	0.074	0.009~0.046	0.025	0.008~0.057	0.027

### 4.2 受纳水体监测结果

矿井水、工艺废水及尾矿库流出水处理后排入同一受纳水体。受纳水体的水质和底泥检测结果分别见表6~表7。根据建矿前矿区放射性本底调查监测结果<sup>[16]</sup>,地表水中  $\rho(U_{\text{天然}})$  为 0.18~

0.98  $\mu\text{g/L}$ 、 $C(^{226}\text{Ra})$  为 0.037~0.107 Bq/L,土壤中  $w(U_{\text{天然}})$  为 1.9~16.8 mg/kg、 $a(^{226}\text{Ra})$  为 169 Bq/kg。由表6可知,受纳水体溪水中  $\rho(U_{\text{天然}})$  均值为 0.71~1.33  $\mu\text{g/L}$ 、 $C(^{226}\text{Ra})$  均值为 0.028~0.062 Bq/L。下游500 m处和下游

1 000 m处溪水中  $\rho(U_{\text{天然}})$  均值稍高于本底值, 溪水中  $C(^{226}\text{Ra})$  均值在本底值范围内。 $^{210}\text{Pb}$  和  $^{210}\text{Po}$  浓度较低, 属正常本底水平。由表 7 可知,

底泥中  $w(U_{\text{天然}})$  均值为 6.2 ~ 11.7 mg/kg,  $a(^{226}\text{Ra})$  均值为 71.7 ~ 121.5 Bq/kg, 属正常本底水平。

表 6 受纳水体的水质监测结果

Table 6 Water quality monitoring results of the receiving water

位置	$\rho(U_{\text{天然}})/(\mu\text{g/L})$		$C(^{226}\text{Ra})/(\text{Bq/L})$		$C(^{210}\text{Pb})/(\text{Bq/L})$		$C(^{210}\text{Po})/(\text{Bq/L})$	
	范围	均值	范围	均值	范围	均值	范围	均值
上游 500 m 处	0.18~1.02	0.71	0.008~0.067	0.028	0.009~0.018	0.012	0.007~0.024	0.015
下游 500 m 处	0.45~1.78	1.33	0.027~0.089	0.062	0.007~0.034	0.021	0.008~0.037	0.010
下游 1 000 m 处	0.24~1.37	1.09	0.012~0.078	0.047	0.008~0.029	0.016	0.006~0.025	0.011

表 7 受纳水体的底泥监测结果

Table 7 Sediment monitoring results of the receiving water

位置	$w(U_{\text{天然}})/(\text{mg/kg})$		$a(^{226}\text{Ra})/(\text{Bq/kg})$	
	范围	均值	范围	均值
上游 500 m 处	3.5~11.7	6.2	41.2~125.8	71.7
下游 500 m 处	9.1~20.4	11.7	86.7~184.7	121.5
下游 1 000 m 处	4.1~13.0	7.8	47.5~139.4	80.6

### 4.3 辐射评价与剂量估算

#### 4.3.1 源项统计

##### 1) 液态流出物源项统计

本项目液态源项主要为矿井水、工艺废水及尾矿库流出水排放废水, 主要考虑的核素为  $^{238}\text{U}$ 、

$^{234}\text{U}$ 、 $^{230}\text{Th}$ 、 $^{226}\text{Ra}$ 、 $^{210}\text{Po}$ 、 $^{210}\text{Pb}$ 。 $U_{\text{天然}}$ 、 $^{226}\text{Ra}$ 、 $^{210}\text{Po}$ 、 $^{210}\text{Pb}$  排放浓度采用表 5 监测结果中的最大值。根据  $U_{\text{天然}}$  监测值和天然铀同位素丰度推导得出  $^{238}\text{U}$  和  $^{234}\text{U}$  值, 根据  $^{226}\text{Ra}$  值和铀系衰变链推导出  $^{230}\text{Th}$  值。液态流出物源项排放参数见表 8。

表 8 液态流出物排放量统计

Table 8 Liquid effluent discharge statistics

项目	排放量/ $(\text{m}^3/\text{d})$	核素活度浓度/ $(\text{Bq}/\text{m}^3)$					
		$^{238}\text{U}$	$^{234}\text{U}$	$^{226}\text{Ra}$	$^{230}\text{Th}$	$^{210}\text{Pb}$	$^{210}\text{Po}$
矿井废水	2 860	1 874	1 874	302	363	69	50
尾矿库流出水	1 730	1 658	1 658	356	471	20	38
工艺废水	235	136	136	269	455	72	51

##### 2) 各河段核素浓度统计

根据上述矿井水、尾矿库流出水、工艺废水排放数据以及受纳水体水文参数, 采用《环境影响评价技术导则 地表水环境》(HJ 2.3—2018) 附录 E 中对受纳水体各河段放射性核素活度浓度进行扩散模型预测计算<sup>[17]</sup>。假定河道内流场为定常流

场, 河道的铅垂方向污染物浓度均匀分布; 在河道的横截面上, 当离排放点距离大于 40 倍河宽时, 横向均匀混合。在横向均匀混合前, 横断面上的最大浓度随下游距离呈反比变化。根据以上假设, 排放口下游距离  $x$  处的核素浓度见式(1)~式(6), 计算结果见表 9。

横向均匀混合前的核素浓度计算:

$$C(x, y) = \frac{Q}{F} \left[ 1 + 2 \sum_{n=1}^8 \exp\left(\frac{-n^2 \pi^2 x k_y}{u B^2}\right) \cos \frac{n \pi Y_s}{B} \cos \frac{n \pi y}{B} \right] \exp\left(-\frac{3.17 \times 10^{-8} \lambda x}{u}\right); \quad (1)$$

横向均匀混合后的核素浓度计算:

$$C(x) = \frac{Q}{F \cdot \sqrt{1 + \alpha}} \exp\left[\frac{xu}{2K_x}(1 - \sqrt{1 + \alpha})\right], \quad (2)$$

$$\alpha = 4 \times 3.17 \times 10^{-8} \lambda K_x / u^2, \quad (3)$$

$$K_x = 0.011 \times u^2 B^2 d / \sqrt{gI}, \quad (4)$$

$$K_y = 0.6 \times d^{2/3} \sqrt{gI}, \quad (5)$$

$$\text{当 } \alpha \ll 1 \text{ 时, } C(x) = \frac{Q}{F} \exp\left(\frac{-3.17 \times 10^{-8} \lambda u}{u}\right), \quad (6)$$

式中:  $C(x, y)$ —纵向距离  $x$ 、横向距离  $y$  点的核素平均活度浓度,  $\text{Bq}/\text{m}^3$ ;  $x$ —笛卡尔坐标系  $x$  向的坐标,  $\text{m}$ ;  $y$ —笛卡尔坐标系  $y$  向的坐标,  $\text{m}$ ;  $C(x)$ —距离排放口  $x$  处的核素平均活度浓度,  $\text{Bq}/\text{m}^3$ ;  $Q$ —核素排放率,  $\text{Bq}/\text{s}$ ;  $F$ —平均流量,  $F = F_r + F_0, \text{m}^3/\text{s}$ ,  $F_r, F_0$  分别为河水流量和废水排放流量;  $u$ —流速,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $B$ —河宽,  $\text{m}$ ;  $Y_s$ —排放点离岸边距离,  $\text{m}$ ;  $\lambda$ —核素衰变常数,  $\text{a}^{-1}$ ;  $K_y$ —横向弥散系数,  $\text{m}^2/\text{s}$ ;  $d$ —河深,  $\text{m}$ ;  $g$ —重力加速度,  $\text{m}/\text{s}^2$ ;  $I$ —水力坡度, 无量纲。

表 9 各河段放射性核素活度浓度

Table 9 Activity concentration of radionuclide in each river section

距排放口河段/km	核素活度浓度/( $\text{Bq}/\text{m}^3$ )					
	$^{238}\text{U}$	$^{234}\text{U}$	$^{226}\text{Ra}$	$^{230}\text{Th}$	$^{210}\text{Po}$	$^{210}\text{Pb}$
0~3	181	181	20.30	3.79	$3.92 \times 10^{-3}$	0.25
>3~9	4.32	4.32	0.49	$9.06 \times 10^{-2}$	$9.38 \times 10^{-5}$	$5.87 \times 10^{-3}$
>9~12	4.23	4.23	0.48	$8.88 \times 10^{-2}$	$9.18 \times 10^{-5}$	$5.75 \times 10^{-3}$
>12~19	3.80	3.80	0.43	$7.98 \times 10^{-2}$	$8.25 \times 10^{-5}$	$5.17 \times 10^{-3}$
>19~27	3.44	3.44	0.39	$7.23 \times 10^{-2}$	$7.47 \times 10^{-5}$	$4.68 \times 10^{-3}$
>27~30	3.06	3.06	0.34	$6.41 \times 10^{-2}$	$6.62 \times 10^{-5}$	$4.15 \times 10^{-3}$

4.3.2 评价范围

在以铀矿为中心的 20 km 半径范围内,按照 2、5、10、20 km 划分同心圆,再将同心圆划分成扇形段。评价区域内的居民饮水来源于山泉水或由山泉水、大气降水汇集而成的水库,受纳水体下游评价范围内无饮水途径。根据对铀矿周围居民点的实地调查统计结果,结合当地 2021 年国民经济和社会发展统计公报,本项目 20 km 范围内各子区的人口数划分情况见图 1。

4.3.3 主要污染途径

根据《环境影响评价技术导则 地表水环境》(HJ 2.3—2018)评价方法,利用模式矿山结合本项目和项目周围铀矿冶设施,选择放射性核素在环境中迁移和剂量估算模式以及相应计算参数,利用计算软件完成个人剂量及集体有效剂量的估算,并对设施所致最大个人剂量进行分析。辐射环境影响主要考虑吸入与食入内照射、水中浸没外照射、岸边沉积外照射(图 2)。

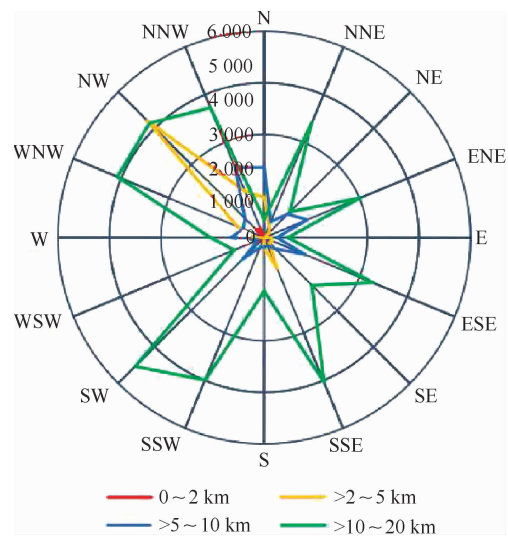


图 1 20 km 范围内 2022 年人口分布图  
Fig. 1 Population distribution in 2022 within the 20 km range

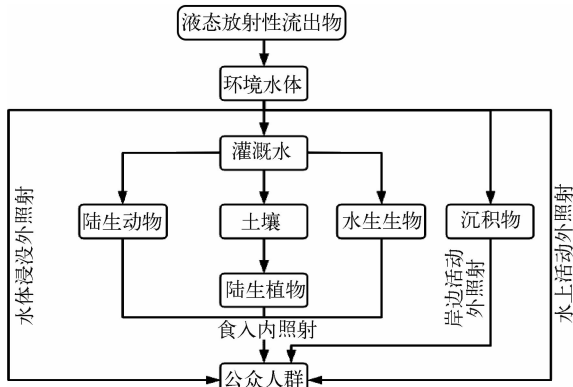


图 2 液态流出物照射途径

Fig. 2 The irradiation route of the liquid outflow

4.3.4 剂量估算

1) 各子区个人剂量

根据本项目 20 km 范围内各子区的人口数划分情况以及接纳水体流经方向,对液态流出物所致个人剂量按扇形区人口分布进行统计分析,

结果见表 10。可以看出,液态流出物所致有人扇形区个人剂量最大值出现在 WNW 方位、>2~5 km 区的人口组,其值为  $1.45 \times 10^{-3}$  mSv/a。

2) 各核素不同途径对个人剂量贡献

本项目液态流出物主要照射途径为岸边活动外照射、水中浸没外照射、水上活动外照射和食入内照射等。放射性核素随着水迁移,在周边土壤中沉积下来,通过食入水生生物、农产品等转移至人体,对人身造成辐射影响<sup>[18-19]</sup>。根据以上数据以及实地调查统计结果,估算出各核素不同照射途径对个人有效剂量的贡献值(表 11)。从照射途径来看,照射途径贡献份额从大到小依次为水生生物食入、农产品食入、动物产品食入、岸边活动,其中水生生物食入途径对个人剂量贡献最大,为  $3.42 \times 10^{-4}$  mSv/a,贡献份额 99.4%。从核素贡献来看,最大个人剂量贡献核素为<sup>210</sup>Pb,贡献占比为 35.3%;最小个人剂量贡献核素为<sup>238</sup>U,贡献占比为 2.88%。

表 10 液态流出物所致各区个人剂量

Table 10 Personal dose in each area due to liquid effluent

方位	所致个人剂量/(mSv/a)			
	0~2 km	>2~5 km	>5~10 km	>10~20 km
WSW	$2.92 \times 10^{-4}$	—	$1.02 \times 10^{-3}$	$8.95 \times 10^{-4}$
W	—	$1.02 \times 10^{-3}$	$1.02 \times 10^{-3}$	—
WNW	—	$1.45 \times 10^{-3}$	—	—
NW	—	$1.11 \times 10^{-3}$	$4.58 \times 10^{-4}$	—
合计	$2.92 \times 10^{-4}$	$3.58 \times 10^{-3}$	$2.48 \times 10^{-3}$	$8.95 \times 10^{-4}$

表 11 各核素不同照射途径对个人有效剂量的贡献

Table 11 Contribution of different routes of irradiation to the individual

核素	不同途径所致个人剂量/(mSv/a)				个人剂量合计/ (mSv/a)	核素贡献 份额/%
	岸边活动	水生生物食入	农产品食入	动物产品食入		
<sup>238</sup> U	$6.83 \times 10^{-9}$	$9.66 \times 10^{-6}$	$7.65 \times 10^{-8}$	$1.88 \times 10^{-7}$	$9.93 \times 10^{-6}$	2.88
<sup>234</sup> U	$9.27 \times 10^{-9}$	$1.06 \times 10^{-5}$	$8.34 \times 10^{-8}$	$2.05 \times 10^{-7}$	$1.09 \times 10^{-5}$	3.16
<sup>226</sup> Ra	$8.98 \times 10^{-8}$	$4.84 \times 10^{-5}$	$3.41 \times 10^{-7}$	$7.92 \times 10^{-9}$	$4.88 \times 10^{-5}$	14.2
<sup>230</sup> Th	$3.90 \times 10^{-8}$	$9.93 \times 10^{-5}$	$1.09 \times 10^{-8}$	$1.80 \times 10^{-8}$	$9.94 \times 10^{-5}$	28.9
<sup>210</sup> Po	$4.10 \times 10^{-11}$	$5.30 \times 10^{-5}$	$2.46 \times 10^{-7}$	$5.24 \times 10^{-7}$	$5.38 \times 10^{-5}$	15.6
<sup>210</sup> Pb	$1.64 \times 10^{-8}$	$1.21 \times 10^{-4}$	$2.55 \times 10^{-7}$	$9.74 \times 10^{-10}$	$1.21 \times 10^{-4}$	35.3
合计	$1.61 \times 10^{-7}$	$3.42 \times 10^{-4}$	$1.01 \times 10^{-6}$	$9.44 \times 10^{-7}$	$3.44 \times 10^{-4}$	100
照射途径 贡献份额/%	0.047	99.4	0.29	0.27	100	

## 3) 集体有效剂量

集体有效剂量估算与评价范围及评价范围内的人口数有关<sup>[20]</sup>, 计算式为

$$S = \sum_{i=1} (E_i \times R_i), \quad (7)$$

式中:  $S$ —集体有效剂量, 人·Sv/a;  $E_i$ — $i$ 子区的个人剂量代表值, Sv/a;  $R_i$ — $i$ 子区的人口数。

根据上述数据和式(7), 得到本项目液态流出物所致 20 km 范围内的集体剂量(表 12)。可以看出, 液态流出物所致 20 km 范围内集体剂量为  $2.35 \times 10^{-4}$  人·Sv/a。

表 12 所致 20 km 范围内集体有效剂量

Table 12 Due to a collective effective dose within 20 km

距离/km	集体有效剂量/(人·Sv/a)
0~2	$1.68 \times 10^{-5}$
0~5	$7.25 \times 10^{-5}$
0~10	$1.47 \times 10^{-4}$
0~20	$2.35 \times 10^{-4}$

## 5 结论

该铀矿液态流出物在处理达标后排入受纳水体, 致当地辐射影响较小。

1) 矿井水、工艺废水和尾矿库流出水中  $U_{\text{天然}}$  排放质量浓度均低于 0.3 mg/L 的排放限值,  $^{226}\text{Ra}$  排放活度浓度均低于 1.1 Bq/L 的排放限值;  $^{210}\text{Pb}$  和  $^{210}\text{Po}$  排放活度浓度均满足 0.5 Bq/L 限值要求。受纳水体上游、下游水中  $^{226}\text{Ra}$  浓度与建矿前本底基本处于同一水平; 下游 500 m 处和下游 1 000 m 处溪水中  $U_{\text{天然}}$  浓度较本底值略有升高; 受纳水体中  $^{210}\text{Pb}$  和  $^{210}\text{Po}$  浓度属正常水平。

2) 铀矿排放的液态流出物致 20 km 范围内居民最大个人剂量为  $1.45 \times 10^{-3}$  mSv/a, 最大集体有效剂量  $2.35 \times 10^{-4}$  人·Sv/a, 关键居民组为 WNW 方位、>2~5 km 区的人口组, 关键途径为水生生物食入内照射, 关键核素为  $^{210}\text{Pb}$ 。总剂量低于本项目的剂量约束限值(0.1 mSv/a)。

## 参考文献:

[1] 刘志勇, 朱术超, 徐侃, 等. 以世界一流为目标的核电运行研究与创新实践[J]. 国企管理, 2024(3): 103-110.

[2] ELAINE, HIRUO. Nuclear fuel cycle industry at 'important juncture,' officials say[J]. Nucleonics Week, 2018, 59(11): 8-9.

[3] 张帅, 哈日巴拉, 格日勒满达呼, 等. 内蒙古巴彦乌拉铀矿周边井水铀含量水平调查[J]. 辐射防护, 2023, 43(2): 137-144.

[4] 刘畅, 廉冰, 王彦, 等. 铀尾矿库周边农产品中镭-226及铀浓度调查分析[J]. 中国辐射卫生, 2022, 31(6): 682-686+693.

[5] 李娜娜. 某退役铀矿山放射性环境现状调查及评价[J]. 铀矿冶, 2023, 42(1): 80-90.

[6] 中国国家标准化管理委员会. 电离辐射防护与辐射源安全基本标准: GB 18871—2002[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.

[7] 生态环境部和国家市场监督管理总局. 铀矿冶辐射防护和辐射环境保护规定: GB 23727—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.

[8] 生态环境部. 辐射环境监测技术规范: HJ 61—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.

[9] 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, 2010.

[10] 环境保护部. 环境样品中微量铀的分析方法: HJ 840—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.

[11] 国家环境保护局. 水中镭-226的分析测定: GB 11214—89[S]. 北京: 中国标准出版社, 1990.

[12] 环境保护部. 水中钋-210的分析方法: HJ 813—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.

[13] 中国核工业总公司. 水中铅-210的分析方法: EJ/T 859—1994[S]. 北京: 中国标准出版社, 1994.

[14] 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. 硅酸盐岩石化学分析方法 第 30 部分: 44 个元素量测定: GB/T 14506.30—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.

[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. 高纯锗  $\gamma$  能谱分析通用方法: GB/T 11713—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.

[16] 潘自强. 中国核工业三十年辐射环境质量评价文集[M]. 北京: 原子能出版社, 1989.

[17] 中华人民共和国生态环境部. 环境影响评价技术导则 地表水环境: HJ 2.3—2018[S]. 北京: 中国环境出版社, 2018.

[18] 曲涛, 林金垚, 张志库. 连山关铀矿“三废”治理效果评价[J]. 工业安全与防尘, 1994(3): 8-9.

[19] 朱伟寿, 雷淑钦, 李仲修, 等. 新疆某铀矿山周边食

- 品放射性核素监测与分析[J]. 中国辐射卫生, 2021, 30(5): 546-550.
- 源安全:上册[M]. 北京:原子能出版社, 2007: 36-37.
- [20] 潘自强,程建平,马吉增,等. 电离辐射防护和辐射

## Radioactivity Investigation and Environmental Impact Assessment of Liquid Effluent From a Uranium Mine

ZHONG Chunming<sup>1,2</sup>

(1. Research Institute No. 230, CNNC, Changsha 410007, China;

2. Hunan Engineering Technology Research Center for Evaluation and Comprehensive Utilization of Associated Radioactive Mineral Resources, Changsha 410007, China)

**Abstract:** The radioactivity of investigation, analysis and evaluation of liquid effluent such as mine water, tailings pond effluent and process wastewater produced by a uranium mine were conducted, the radioactivity level of liquid effluent and the pollution of accepted water were mastered, and the radiation impact of liquid effluent on local residents through various pollution channels was evaluated. The results show that the discharge concentrations of U, <sup>226</sup>Ra, <sup>210</sup>Pb and <sup>210</sup>Po in the mine water, process wastewater and tailings pond effluent meet the limit requirements. The concentration of U in the middle and lower reaches of the accepted water body is slightly higher than the background level, and the concentrations of <sup>226</sup>Ra, <sup>210</sup>Pb and <sup>210</sup>Po are among the normal background levels. The maximum personal dose caused by liquid effluent from uranium mine was  $1.45 \times 10^{-3}$  mSv/a of 20 km, and the maximum collective effective dose was  $2.35 \times 10^{-4}$  man·Sv/a of 20 km. The key resident group was the population group of WNW orientation in the  $>2 \sim 5$  km area. The liquid effluent of uranium mining is discharged into the receiving water after reaching the standard, which has little impact on local radiation.

**Key words:** uranium mine; liquid effluent; radioactivity; mine water; tailings pond effluent; process wastewater; investigation; evaluation