# 某退役铀矿山放射性环境现状调查及评价

李娜娜[1,2]

(1. 核工业北京地质研究院,北京 100029;
2. 国家原子能机构高放废物地质处置创新中心,北京 100029)

**摘要**: 对江西某退役铀矿山的放射性环境进行调查与分析,查明了该退役铀矿山的污染源项,确定了治理项目。结果表明,5 处废石堆的氡析出率均超过了 0.74 Bq/(m$^2$ · s)的管理限值,废石中 $w(U_{天然})$和 $a(^{226}Ra)$高于当地本底值;工业场地和运矿道路的土壤均受到了不同程度的污染;4 个有水坑口流出水中 $\rho(U_{天然})$高于 0.3 mg/L 的排放限值,经矿井水处理设施处理后可达标排放;矿区遗留的设备、管线和构筑物的 α 表面污染水平和 β 表面污染水平均较高;该铀矿山退役治理前致公众最大个人剂量为 $5.94\times10^{-4}$ mSv/a。

**关键词**: 退役铀矿山;放射性环境;源项;核素;管理限值
**中图分类号**: X591 **文献标志码**: A **文章编号**: 1000-8063(2023)01-0080-11
**DOI**: 10.13426/j.cnki.yky.2022.08.01

随着核工业的快速发展,放射性废物的处理和处置已成为环保领域需要解决的重大问题之一[1]。铀矿普查勘探与采冶工作遗留的废弃设施,对周围环境构成潜在放射性危害[2-4]。铀矿停产后,在所属区域遗留了大量的铀矿冶废物和设施,其中坑井口、地表塌陷区、露天采场废墟等有$^{222}$Rn 逸出;废石堆、污染工业场地等$^{222}$Rn 析出率超出管理限值;被污染的设备、管线等在无人看管时,可能会被当地居民使用,导致当地居民直接或间接受到辐射危害;同时有水坑口涌水中铀浓度可能超标,危害地表水环境。其中,铀废石堆的放射性核素含量高,含铀及铀系全部衰变子体,半衰期相当长,对公众的集体剂量贡献非常高[5]。因此,亟需对关停铀矿山进行退役治理。

对关停铀矿山的放射性环境现状进行调查及评价,可以准确掌握污染源项和治理前环境放射性水平,是制定全面有效治理方案的依据和基础。笔者调查了江西某退役铀矿山的污染源源项,并基于调查结果进行了环境评价和公众剂量估算,为后续制定退役治理方案,开展退役治理环境影响评价提供了关键数据和依据。

## 1 项目概况

项目位于江西省境内的山区,该区气候温和潮湿、雨量充沛,无霜期长,具有山地气候特征。区内树木成林、植被发育,主要为针、阔叶混交林以及部分的草本植被和疏林草坡;分布有山牛、野猪等野生动物,矿山退役范围附近未见珍稀保护动物。区域地势陡峻,沟谷切割剧烈,以山地丘陵为主。地表水系多为间隙性水系,没有较大的地表水体,仅有“V”字形的溪谷;在暴发山洪时,地表溪流才能形成比较明显的流量,平常以小溪流为主。该矿区外排废水受纳水体为 1 条小溪,溪水最大流量 0.083 m$^3$/s、最小流量 0.014 m$^3$/s,溪流自南向北流经矿区。

该矿山共有 4 条坑道,分别形成了 782、742、702、662 m 勘查中段。矿山运行时采用井下开采工艺,矿区不涉及水冶设施,也无尾矿库。矿区因资源枯竭而自然终产退役。生产时遗留地表的设施见图 1,包括:7 个坑(硐)口,其中 1~3 硐无水流出,4~7 坑有水流出;在坑(硐)口附近有 5 个废石堆和 1 处工业场地。

## 2 管理限值

公众年有效剂量约束值为 0.3 mSv/a[6]4。废石堆等设施经退役、关闭与环境整治后,表面氡析出率应不大于 0.74 Bq/(m$^2$ · s)[6]11。土地去污整治

**收稿日期**: 2022-08-01

**第一作者简介**: 李娜娜(1983—),女,山西太原人,博士,高级工程师,主要从事矿山退役治理、放射性废物处置与处理工作。

后，任何 100 $m^2$ 范围内土层中 $^{226}Ra$ 的平均活度浓度扣除当地本底值后不超过0.18 Bq/g[6]11。

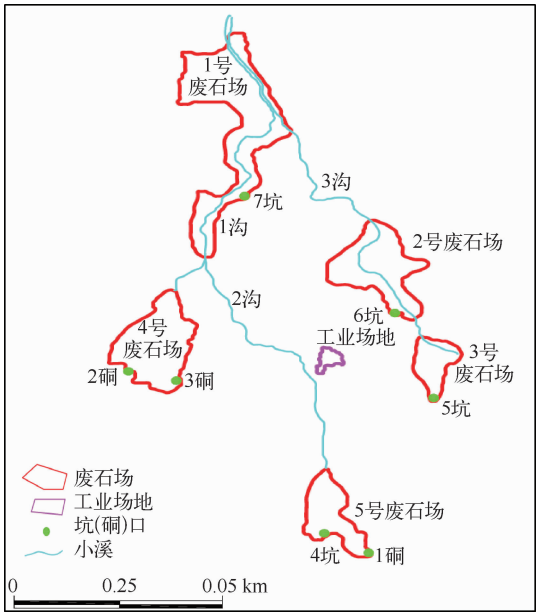



**图 1　遗留设施平面布置图**

**Fig. 1　Layout of legacy facilities**

污染设备、器材、废旧钢铁等经过去污处理后，其 α、β 放射性表面污染水平分别降低到 0.08 Bq/$cm^2$ 和 0.8 Bq/$cm^2$[6]11。

本项目的受纳水体具有足够稀释能力，满足不低于 5 倍稀释倍数的要求。退役治理后坑(井)口流出水排放浓度限值见表 1[6]5。

**表 1　废水中放射性核素排放限值**

**Table 1　Limits of radionuclides emission in waste water**

| $\rho(U_{天然})$/(mg·$L^{-1}$) | $C(^{226}Ra)$/(Bq·$L^{-1}$) | $C(^{210}Pb)$/(Bq·$L^{-1}$) | $C(^{210}Po)$/(Bq·$L^{-1}$) |
|---|---|---|---|
| 0.3 | 1.1 | 0.5 | 0.5 |

## 3　污染源源项与分析

### 3.1　调查方案与监测仪器

参照《辐射环境监测技术规范》(HJ/T 61—2021)[7]进行调查，方案见表 2。采用国家和核工业颁布或推荐的标准测量方法[8-17]进行测量，项目环境监测方法及监测仪器见表 3。

**表 2　污染源源项调查方案**

**Table 2　Investigation plan for pollution source**

| 测量项目 | 监测场所 | 布点原则 |
|---|---|---|
| γ 辐射剂量率 | 废石堆、工业场地 | 原则上按 20 m×20 m 间距布置 γ 辐射剂量率监测点。在监测过程中，根据设施具体情况适度调整网格布置，保证每个设施(或场地)不少于 5 个监测点 |
| | 运矿道路 | 原则上按 10 m 间距布设监测断面，每个断面在左、中、右布设 3 个 γ 辐射剂量率监测点。在实际操作中，根据道路路基和功能的不同，适当调整监测断面间距 |
| $^{222}Rn$ 析出率 | 废石堆 | 按裸露面积每 300～600 $m^2$ 布置 1 个监测点，其布点密度根据地形情况和环境 γ 辐射剂量率均匀程度进行适当放宽或加密 |
| 氡浓度 | 坑井口 | 每个坑井口(包括有水和无水)在坑口断面上测定 3 个数据 |
| 固体物质中的 $U_{天然}$ 和 $^{226}Ra$ 含量 | 废石堆 | 每个废石堆取不少于 5 个样，根据设施具体情况适度增加取样数量 |
| | 运矿道路 | 一般按 40～80 m 间距布设监测断面，每个断面分别在 0～15 cm、15～30 cm、30～45 cm、45～60 cm、60～75 cm、75～90 cm 处取样并进行分析；另外留存一定深度样，以备补充确定是否满足 180 Bq/kg 的污染深度要求 |
| | 工业场地 | 按 30 m×30 m 面积布置监测网格，每个工业场地不少于 5 个监测点，根据现场地形情况可适当调整网格布置；在深度方向上每隔 15 cm 取 1 个样，取至 90 cm 深处并进行分析；另外留存一定深度的土壤样，以备补充确定是否满足 180 Bq/kg 的污染深度要求 |
| | 污染溪流、河沟底泥 | 取样位置与污染溪流、河沟中水样的取样位置相同，对底泥中铀、镭含量取样分析；在深度方向上每隔 20 cm 取 1 个样，取至 60 cm 深处并进行分析；另外留存一定深度的底泥样，以备补充确定是否满足 180 Bq/kg 的污染深度要求 |
| 水中铀、镭含量 | 有水坑井口流出水 | 在每个有水坑井口的坑口断面处测定流速和流量；对坑口流出水连续 3 天取 3 次样分析水中的铀、镭含量 |
| | 受污染溪沟水体 | 在临河废石堆和废水排放口及其下游 50、500 m 布置取样点，并设对照点；在每个断面取样分析水中的铀、镭含量 |
| 表面 α、β 放射性 | 被污染设备、器材、管线 | 设备和工作台每 100～400 $cm^2$ 布设 1 个监测点，根据初步调查结果适当加密或放宽；每个被污染设施不少于 3 个监测点 |
| | 被污染建构(筑)物 | 建(构)筑物按 1～2 $m^2$ 布设 1 个测点，每个独立建构(筑)物不少于 5 个监测点 |

**表 3 源项调查监测方法及仪器**

**Table 3 Monitoring methods and instruments for source investigation**

| 项目和核素 | | 监测方法及依据 | 监测仪器 | 检出限 |
|---|---|---|---|---|
| γ辐射剂量率 | | 《环境γ辐射剂量率测量技术规范》(HJ 1157—2021) | BH3103B 型γ剂量率仪 | 0.01～10 μGy/h |
| 氡浓度 | | 《环境空气中氡的测量方法》(HJ 1212—2021) | RAD7 测氡仪 | 3 Bq/m³ |
| 氡析出率 | | 《表面氡析出率测定 积累法》(EJ/T 979—95) | RAD7、闪烁室、REM-3 型氡析出率仪 | 0.001 Bq/(m²·s) |
| 土壤、底泥、废石 | $U_{天然}$ | 《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) | NexION350X 型电感耦合等离子体质谱仪 | 0.003 ng/m³ |
| | $^{226}Ra$ | 《土壤中放射性核素的γ能谱分析方法》(GB/T 11743—2013) | GMX50P4 型高纯锗多道γ谱仪 | 8 Bq/g |
| 地表水 | $U_{天然}$ | 《环境样品中微量铀的分析方法》(HJ 840—2017) | MUA 激光测铀仪 | 0.02 μg/L |
| | $^{226}Ra$ | 《水中镭-226 的分析测定》(GB/T 11214—89) | FH463B(FD-125)智能定标器 | 0.002 Bq/L |
| | $^{210}Pb$ | 《水中铅-210 的分析方法》(EJ/T 859—1994) | CLB-108 型低本底α测量仪 | 0.008 Bq/L |
| | $^{210}Po$ | 《水中钋-210 的分析方法》(HJ 813—2016) | CLB-108 型低本底α测量仪 | 0.004 Bq/L |
| 表面污染 | 总α<br>总β | 《表面污染测定——第 1 部分:β发射体($E_{\beta max}$>0.15 MeV)和α发射体》(GB/T 14056.1—2008) | LB124 型α、β表面污染测量仪 | 0～5 000 cps<br>0～50 000 cps |

## 3.2 调查结果

### 3.2.1 当地环境本底值

选择矿区上风向(东北方向)、与矿区距离 11.3 km 处作为对照点,进行辐射环境质量本底监测。监测介质有空气、土壤和受纳水体上游,监测项目为氡、$U_{天然}$、$^{226}Ra$ 和γ辐射剂量率等(表 4)。

**表 4 当地环境本底值监测结果**

**Table 4 Monitoring results of local environmental background value**

| 监测介质 | 监测项目 | 监测频次 | 均值 |
|---|---|---|---|
| 陆地 | γ辐射剂量率/(nGy·h⁻¹) | 10 | 113.7 |
| | 氡析出率/(Bq·m⁻²·s⁻¹) | 10 | 0.020 |
| 空气 | $C_{Rn}$/(Bq·m⁻³) | 6 | 9.68 |
| 土壤 | $w(U_{天然})$/(mg·kg⁻¹) | 1 | 10.9 |
| | $a(^{226}Ra)$/(Bq·kg⁻¹) | | 90.0 |
| 小溪 | $\rho(U_{天然})$/(μg·L⁻¹) | 1 | 0.026 |
| | $C(^{226}Ra)$/(Bq·L⁻¹) | | 0.022 |
| | $C(^{210}Po)$/(Bq·L⁻¹) | | 0.011 |
| | $C(^{210}Pb)$/(Bq·L⁻¹) | | 0.012 |

### 3.2.2 污染源项调查结果

#### 3.2.2.1 有水坑口

该矿点停产后遗留地表的各类坑(井)口有 7 个,其中有水坑口共有 4 个,各坑口流出水的排水量和水质监测结果见表 5。

**表 5 各坑口流出水水量、水中核素监测结果**

**Table 5 Monitoring results of water yield and radionuclides of different pit effluents**

| 编号 | 水量/(m³·d⁻¹) | | $\rho(U_{天然})$/(mg·L⁻¹) | $C(^{226}Ra)$/(Bq·L⁻¹) |
|---|---|---|---|---|
| | 丰水期 | 枯水期 | | |
| 4 坑 | 61.3 | 12.1 | 1.36 | 0.357 |
| 5 坑 | 55.3 | 13.8 | 1.14 | 0.222 |
| 6 坑 | 75.2 | 15.6 | 0.67 | 0.267 |
| 7 坑 | 105.4 | 29.4 | 0.47 | 0.101 |

从表 5 可看出,4 个坑口流出水中的 $\rho(U_{天然})$ 均高于《铀矿冶辐射防护和辐射环境保护规定》(GB 23727—2020)的排放限值(0.3 mg/L),水中 $C(^{226}Ra)$ 均小于废水排放控制目标值(1.1 Bq/L)。

#### 3.2.2.2　矿井水处理设施

该矿点建设有矿井水处理站，处理工艺为：井下排水先进入地表贮水池，经自然沉淀去除较大颗粒的泥砂后，自流进入预处理设施；预处理设施采用絮凝沉淀工艺，絮凝剂通过管道混合器添加在废水中；经过絮凝沉淀后的废水进入离子交换塔中进行树脂吸附，当树脂吸附饱和后，再用碳酸氢钠＋氯化钠溶液进行单塔淋洗，淋洗合格液送水冶厂处理，吸附尾液检测达标后排入就近受纳水体。该处理站外排水监测结果见表 6。

**表 6　矿井水处理站外排水监测结果**

**Table 6　Monitoring results of discharge wastewater from mine water treatment station**

| 水量/($m^3$ · $d^{-1}$) | | $\rho(U_{天然})$/(mg · $L^{-1}$) | | $C(^{226}Ra)$/(Bq · $L^{-1}$) | | $C(^{210}Pb)$/(Bq · $L^{-1}$) | | $C(^{210}Po)$/(Bq · $L^{-1}$) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 丰水期 | 枯水期 | 范围 | 均值 | 范围 | 均值 | 范围 | 均值 | 范围 | 均值 |
| 297 | 71 | 0.002～0.058 | 0.02 | 0.02～0.24 | 0.10 | 0.03～0.031 | 0.031 | 0.024～0.026 | 0.025 |

从表 6 可看出，4 个有水坑口流出水总量为 71～297 $m^3/d$，处理后 $\rho(U_{天然})$ 为 0.002～0.058 mg/L，满足废水排放限值 0.3 mg/L 要求；处理后坑口水中 $C(^{226}Ra)$ 为 0.02～0.24 Bq/L，小于废水排放控制目标值(1.1 Bq/L)；$C(^{210}Pb)$、$C(^{210}Po)$均满足《铀矿冶辐射防护和辐射环境保护规定》(GB 23727—2020)的要求。

#### 3.2.2.3　废石堆

该矿区遗留地表废石堆5个，堆存废石总量达 277 286 t，总治理面积为60 012 $m^2$，各废石堆的相关参数及监测结果见表 7。可以看出，废石的平均比活度约 $2.97\times10^4$ Bq/kg；废石堆表面氡析出率为 0.75～1.52 Bq/($m^2$ · s)，5 处废石堆表面氡析出率均超过 0.74 Bq/($m^2$ · s)的管理限值，$w(U_{天然})$和 $a(^{226}Ra)$更是超过了当地的本底水平；γ 辐射剂量率为(30～662)$\times10^{-8}$ Gy/h，明显高于当地本底水平(表 4)。5 处废石堆均需要稳定化、无害化处置。

**表 7　5 处废石堆监测结果**

**Table 7　Monitoring results of five waste rock heaps**

| 编号 | 裸露面积/$m^2$ | 废石量/t | 测点数/个 | $^{222}Rn$ 析出率/(Bq · $m^{-2}$ · $s^{-1}$) | | γ 辐射剂量率/($10^{-8}$Gy · $h^{-1}$) | | $w(U_{天然})$/(mg · $kg^{-1}$) | $a(^{226}Ra)$/(Bq · $kg^{-1}$) | 平均比活度/(Bq · $kg^{-1}$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | 范围 | 均值 | 范围 | 均值 | | | |
| 1 废 | 21 996 | 137 430 | 50 | 0.88～1.23 | 1.01 | 54～550 | 95.6 | 238 | 1 134 | |
| 2 废 | 12 190 | 45 036 | 26 | 0.93～1.27 | 1.05 | 61～540 | 119 | 297 | 1 250 | |
| 3 废 | 4 780 | 31 139 | 14 | 0.79～1.21 | 1.03 | 64～471 | 160 | 276 | 964 | $2.97\times10^4$ |
| 4 废 | 13 705 | 47 318 | 35 | 0.75～1.19 | 1.0 | 30～258 | 125 | 366 | 985 | |
| 5 废 | 7 341 | 16 363 | 16 | 0.92～1.52 | 1.15 | 52～662 | 190 | 495 | 763 | |

#### 3.2.2.4　工业场地

该矿区有 1 处工业场地。该工业场地的面积为 1 188 $m^2$。γ 辐射剂量率为(63～134)$\times10^{-8}$ Gy/h，$^{222}Rn$ 析出率均值为 0.71～1.33 Bq/($m^2$ · s)，均高于当地背景值。工业场地土壤中铀、镭垂直分布监测数据见表8。结果显示，$w(U_{天然})$为 7.1～17.7 mg/kg，取样深度为0～45 cm 时超过当地背景值；$a(^{226}Ra)$为 166～1 806 Bq/kg，均高于当地背景值，且只有深度为 45～75 cm 的土壤方可满足扣除当地本底值后不超过 0.18 Bq/g 的管理限值。可见，矿区工业场地受到了不同程度的污染。

**表 8 工业场地土壤中铀、镭垂直分布监测结果**

**Table 8 Monitoring results of U and $^{226}Ra$ vertical distribution in mine yard soils**

| 取样深度/cm | 测点数/个 | $w(U_{天然})$/(mg·kg$^{-1}$) | | $a(^{226}Ra)$/(Bq·kg$^{-1}$) | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 范围 | 均值 | 范围 | 均值 |
| 0～15 | 3 | 15.0～17.1 | 16.1 | 1 615～1 806 | 1 711 |
| 15～30 | 3 | 13.8～17.7 | 15.8 | 1 121～1 674 | 1 398 |
| 30～45 | 3 | 11.4～11.7 | 11.6 | 563～576 | 570 |
| 45～60 | 3 | 7.5～9.4 | 8.5 | 192～259 | 226 |
| 60～75 | 3 | 7.1～10.4 | 8.8 | 166～167 | 167 |

#### 3.2.2.5 矿区道路

矿区有1条道路(分为16段),各段道路监测数据见表9～10。结果显示约有14 719 m道路被污染,各段运矿道路的γ辐射剂量率均值在(38～108)×10$^{-8}$ Gy/h,高于当地的背景值(表9)。矿区污染道路土壤中的$w(U_{天然})$均值为9.9～174.0 mg/kg,$a(^{226}Ra)$均值为59.1～1 502.1 Bq/kg(表10)。所有路段0～30 cm深度土层中,$a(^{226}Ra)$平均值扣除当地本底值(90 Bq/kg)后高于0.18 Bq/g的管理限值;7条路段在土壤取样深度达到30～45 cm时,$a(^{226}Ra)$平均值可满足管理限值;8条路段在土壤取样深度达到45～60 cm时,$a(^{226}Ra)$平均值可满足管理限值;而有1条路段(9路)在土壤取样深度达到75 cm时,监测点位土壤中的$a(^{226}Ra)$才能满足管理限值要求。

**表 9 道路基本情况及γ辐射剂量率监测结果**

**Table 9 Basic information of road and monitoring results of γ dose rate**

| 编号 | 路面结构 | 长/m | 宽/m | 测点数/个 | γ辐射剂量率/(10$^{-8}$ Gy·h$^{-1}$) | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 范围 | 均值 |
| 1路 | 混凝土 | 340 | 3.5 | 102 | 28～63 | 46 |
| 2路 | 泥结碎石 | 1708 | 4.3 | 498 | 70～112 | 90 |
| 3路 | 混凝土 | 710 | 3.5 | 71 | 35～70 | 52 |
| 4路 | 泥结碎石 | 539 | 4.4 | 162 | 35～70 | 51 |
| 5路 | 混凝土 | 564 | 3.5 | 153 | 25～70 | 53 |
| 6路 | 泥结碎石 | 5235 | 4.2 | 706 | 29～70 | 53 |
| 7路 | 混凝土 | 210 | 3.5 | 21 | 22～57 | 38 |
| 8路 | 泥结碎石 | 2 790 | 4.4 | 452 | 35～70 | 52 |
| 9路 | 泥结碎石 | 558 | 4.4 | 171 | 43～177 | 95 |
| 10路 | 泥结碎石 | 126 | 4.3 | 54 | 42～176 | 82 |
| 11路 | 泥结碎石 | 319 | 4.5 | 147 | 42～181 | 108 |
| 12路 | 泥结碎石 | 125 | 4.4 | 63 | 43～256 | 108 |
| 13路 | 泥结碎石 | 251 | 4.3 | 96 | 43～153 | 73 |
| 14路 | 泥结碎石 | 302 | 4.3 | 114 | 42～202 | 73 |
| 15路 | 泥结碎石 | 160 | 4.5 | 48 | 21～108 | 90 |
| 16路 | 泥结碎石 | 782 | 4.3 | 52 | 35～71 | 52 |

**表 10　不同路段土壤中铀、镭垂直分布监测结果**

**Table 10　Monitoring results of U and $^{226}$Ra vertical distribution in transportation road soils**

| 名称 | 取样深度/cm | 测点数/个 | $w(U_{天然})/(mg \cdot kg^{-1})$ | | $a(^{226}Ra)/(Bq \cdot kg^{-1})$ | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 范围 | 均值 | 范围 | 均值 |
| 1 路 | 0～15 | 2 | 61.1～171.5 | 116.3 | 283.5～606.5 | 445.0 |
| | 15～30 | 2 | 82.7～166.7 | 124.7 | 372.5～675.5 | 524.0 |
| | 30～45 | 2 | 43.2～61.6 | 52.4 | 64.0～204.0 | 149.0 |
| | 45～60 | 2 | 10.6～20.1 | 15.35 | 58.5～72.5 | 68.0 |
| 2 路 | 0～15 | 3 | 61.3～171.5 | 122.5 | 379.5～885.9 | 632.7 |
| | 15～30 | 3 | 82.3～178.4 | 137.2 | 205.2～890.1 | 684.9 |
| | 30～45 | 3 | 39.3～170.4 | 131.1 | 606.0～1 212 | 865.8 |
| | 45～60 | 3 | 39.7～92.6 | 66.2 | 105.0～245.1 | 175.2 |
| | 60～75 | 3 | 7.0～18.3 | 14.1 | 74.5～90.0 | 83.5 |
| 3 路 | 0～15 | 2 | 70.4～119.0 | 94.7 | 266.4～501.6 | 384.0 |
| | 15～30 | 2 | 65.5～99.8 | 82.7 | 369.3～675.9 | 522.6 |
| | 30～45 | 2 | 36.2～55.6 | 45.9 | 53.0～84.0 | 68.5 |
| 4 路 | 0～15 | 3 | 60.2～175.5 | 121.5 | 303.6～696.9 | 536.1 |
| | 15～30 | 3 | 81.2～176.7 | 136.2 | 236.4～596.4 | 436.8 |
| | 30～45 | 3 | 37.1～161.6 | 133.5 | 296.1～789.9 | 553.5 |
| | 45～60 | 3 | 35.5～94.1 | 67.3 | 105.3～229.8 | 172.8 |
| | 60～75 | 3 | 12.1～17.1 | 13.6 | 67.0～93.5 | 88.5 |
| 5 路 | 0～15 | 2 | 62.3～147.7 | 105.0 | 395.0～571.0 | 733.0 |
| | 15～30 | 2 | 77.7～138.2 | 108.0 | 427.0～677.0 | 552.0 |
| | 30～45 | 2 | 43.2～52.2 | 47.7 | 89.5～183.5 | 136.5 |
| | 45～60 | 2 | 15.6～22.8 | 19.2 | 63.5～72.5 | 68.0 |
| 6 路 | 0～15 | 9 | 61.1～171.5 | 122.5 | 378.6～883.5 | 632.7 |
| | 15～30 | 9 | 82.2～178.4 | 137.2 | 235.2～890.1 | 684.9 |
| | 30～45 | 9 | 39.3～171.2 | 131.1 | 246.0～942.0 | 865.8 |
| | 45～60 | 9 | 39.7～92.8 | 66.2 | 105.3～243.6 | 175.2 |
| | 60～75 | 9 | 12.1～18.3 | 13.2 | 63.0～190.0 | 93.5 |
| 7 路 | 0～15 | 2 | 111.2～196.9 | 154.0 | 535.0～1 071 | 803.0 |
| | 15～30 | 2 | 88.4～172.3 | 130.3 | 618.0～1 162 | 876.5 |
| | 30～45 | 2 | 48.2～56.1 | 52.2 | 87.0～184.0 | 135.5 |
| | 45～60 | 2 | 17.1～20.2 | 18.7 | 62.0～78.0 | 70.0 |
| 8 路 | 0～15 | 6 | 63.6～171.5 | 117.7 | 295.2～865.5 | 468.6 |
| | 15～30 | 6 | 84.1～178.1 | 149.4 | 270.6～668.1 | 444.3 |
| | 30～45 | 6 | 49.3～170.1 | 133.2 | 309.6～942.3 | 694.8 |
| | 45～60 | 6 | 39.1～91.1 | 67.9 | 105.0～245.1 | 115.2 |
| | 60～75 | 6 | 7.0～18.3 | 14.3 | 71.5～92.5 | 82.0 |
| 9 路 | 0～15 | 3 | 16.9～73.3 | 56.4 | 185.7～483.3 | 372.0 |
| | 15～30 | 3 | 21.9～821 | 54.7 | 180.0～390.3 | 300.3 |
| | 30～45 | 3 | 31.1～67.5 | 51.9 | 134.1～503.7 | 336.0 |
| | 45～60 | 3 | 18.8～93.9 | 62.6 | 104.4～487.8 | 348.6 |
| | 60～75 | 3 | 11.3～29.3 | 22.6 | 70.5～246.9 | 176.4 |
| | 75～90 | 3 | 7.9～18.4 | 13.1 | 71.5～88.5 | 79.5 |
| 10 路 | 0～15 | 3 | 18.8～87.9 | 62.8 | 237.3～553.8 | 395.7 |
| | 15～30 | 3 | 30.9～77.2 | 51.5 | 102.9～360.3 | 257.4 |
| | 30～45 | 3 | 22.0～65.9 | 44.0 | 104.7～244.2 | 174.6 |
| | 45～60 | 3 | 3.0～12.8 | 9.9 | 41.4～82.8 | 59.1 |
| 11 路 | 0～15 | 3 | 75.6～163.8 | 126.0 | 378.3～882.6 | 630.6 |
| | 15～30 | 3 | 40.1～187.0 | 133.6 | 314.4～1 179 | 786.0 |
| | 30～45 | 3 | 20.0～93.5 | 66.8 | 69.3～242.7 | 173.4 |
| | 45～60 | 3 | 6.6～18.4 | 13.1 | 23.7～111.3 | 79.5 |

表 10(续) 不同路段土壤中铀、镭垂直分布监测结果

Table 10 Monitoring results of U and $^{226}$Ra vertical distribution in transportation road soils

| 名称 | 取样深度/cm | 测点数/个 | $w(U_{天然})$/(mg·kg$^{-1}$) | | $a(^{226}Ra)$/(Bq·kg$^{-1}$) | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 范围 | 均值 | 范围 | 均值 |
| 12 路 | 0～15 | 3 | 89.2～222.9 | 148.6 | 216.0～1 008 | 720.3 |
| | 15～30 | 3 | 47.6～178.3 | 118.9 | 246.0～1 149 | 821.1 |
| | 30～45 | 3 | 91.8～214.3 | 153.1 | 476.1～1 333 | 952.2 |
| | 45～60 | 3 | 30.3～131.4 | 101.1 | 120.3～240.9 | 172.2 |
| 13 路 | 0～15 | 3 | 82.8～215.3 | 165.6 | 321.6～1 608 | 1 072 |
| | 15～30 | 3 | 81.1～211.0 | 162.3 | 564.3～1 129 | 806.1 |
| | 30～45 | 3 | 71.2～199.4 | 142.4 | 602.7～1 507 | 1 005 |
| | 45～60 | 3 | 56.3～157.6 | 112.6 | 121.2～242.7 | 173.4 |
| 14 路 | 0～15 | 3 | 39.4～110.3 | 78.7 | 464.4～1 006 | 774.0 |
| | 15～30 | 3 | 29.0～101.4 | 72.5 | 288.3～1 009 | 720.9 |
| | 30～45 | 3 | 50.1～108.5 | 83.5 | 414.0～966.3 | 690.3 |
| | 45～60 | 3 | 17.0～63.8 | 42.5 | 88.5～265.5 | 177.0 |
| 15 路 | 0～15 | 3 | 53.2～149.0 | 106.4 | 382.5～1 244 | 957.0 |
| | 15～30 | 3 | 63.8～178.8 | 127.7 | 901.2～1 953 | 1 502 |
| | 30～45 | 3 | 35.8～166.9 | 119.2 | 732.6～1 570 | 1 047 |
| | 45～60 | 3 | 13.8～56.7 | 43.6 | 69.6～2 61.9 | 174.6 |
| 16 路 | 0～15 | 3 | 79.8～239.4 | 159.6 | 407.7～1 530 | 1 020 |
| | 15～30 | 3 | 69.6～243.5 | 174.0 | 592.8～1 483 | 988.5 |
| | 30～45 | 3 | 37.3～93.4 | 62.3 | 69.9～245.1 | 175.2 |
| | 45～60 | 3 | 4.2～18.3 | 14.1 | 39.9～140.4 | 100.5 |

#### 3.2.2.6 矿区周边小溪

该矿区坑口流出水的主要受纳水体为小溪，小溪源项调查结果见表 11。可以看出，小溪水中 $\rho(U_{天然})$均值为 0.67～1.36 μg/L，$C(^{226}Ra)$均值为 0.222～0.357 Bq/L，$C(^{226}Ra)$高于本底水平(0.022 Bq/L)；底泥中 $a(^{226}Ra)$均值为 0.286～0.431 Bq/g，超过了退役治理的管理限值要求。调查结果说明受纳水体受到了放射性污染。

表 11 小溪放射性监测结果

Table 11 Radioactivity monitoring results of the stream

| 编号 | 流量/(m$^3$·d$^{-1}$) | 长/m | 宽/m | 底泥 | | | 溪水 | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | $w(U)$/(mg·kg$^{-1}$) | $a(^{226}Ra)$/(Bq·g$^{-1}$) | 厚/m | 取样数/个 | $\rho(U)$/(μg·L$^{-1}$) | | $C(^{226}Ra)$/(Bq·L$^{-1}$) | |
| | | | | | | | | 范围 | 均值 | 范围 | 均值 |
| 1 沟 | 4 320 | 100 | 8 | 17.3 | 0.286 | 0～0.2 | 3 | 0.22～1.05 | 0.67 | 0.112～0.440 | 0.267 |
| 2 沟 | 4 320 | 80 | 8 | 35.9 | 0.431 | 0～0.2 | 3 | 0.63～1.64 | 1.14 | 0.117～0.325 | 0.222 |
| 3 沟 | 6 912 | 500 | 10 | 18.5 | 0.311 | 0～0.2 | 6 | 1.11～1.92 | 1.36 | 0.142～0.645 | 0.357 |

#### 3.2.2.7 设备和管线

采矿生产结束后，地表及坑道内遗留大量的设备、器材、管线等。设备、器材、管线表面 α、β 污染监测数据见表 12。可以看出，设备、器材、管线 α 表面污染水平为 0.10～1.26 Bq/m$^2$，β 表面污染水平为 1.03～14.93 Bq/m$^2$，高于管理限值，说明这些设备、器材、管线受到了一定程度的放射性污染，不能直接使用。

#### 3.2.2.8 建(构)筑物

该工区采矿生产结束后，地表遗留的建(构)筑物的总建筑面积为 2 273.3 m$^2$，共布设了 5 430 个监测点，结果显示 α 表面污染水平为 0.25～16.01 Bq/m$^2$，均值 2.28 Bq/m$^2$；β 表面污染水平为 2.23～159.62 Bq/m$^2$，均值 22.11 Bq/m$^2$。大部分建(构)筑物受到了不同程度的污染，需要进行治理。

**表 12　设备、器材、管线表面 α、β 污染监测结果**

**Table 12　Monitoring results of $\alpha$ and $\beta$ for facilities, equipment and pipeline surface**

| 名称 | 数量 | 测点/个 | α 表面污染水平/(Bq·m$^{-2}$) | | β 表面污染水平/(Bq·m$^{-2}$) | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 范围 | 均值 | 范围 | 均值 |
| 轨道 | 9 326 m | 466 | 0.26～0.99 | 0.65 | 5.18～10.20 | 6.51 |
| 道岔 | 100 付 | 102 | 0.29～0.87 | 0.58 | 2.09～7.86 | 5.25 |
| 电线电缆 | 26 270 m | 264 | 0.14～1.04 | 0.55 | 2.05～8.37 | 4.31 |
| 电线杆 | 50 条 | 100 | 0.10～0.31 | 0.21 | 1.13～3.18 | 2.27 |
| 风管 | 7 341 m | 74 | 0.43～0.75 | 0.54 | 1.51～5.31 | 3.80 |
| 水管 | 22 023 m | 221 | 0.37～0.65 | 0.47 | 3.61～6.71 | 5.17 |
| 设备 | 261 台 | 1 263 | 0.19～1.26 | 0.72 | 1.03～14.93 | 6.03 |

### 3.3　治理项目确定

根据各源项的监测结果和相应的管理限值，以及治理项目的确定原则，确定了该矿区退役治理项目和治理部位，见表 13。

**表 13　退役治理细目清单**

**Table 13　Detailed list of decommissioning treatment**

| 项目及部位 | 详情 | 治理原因 |
|---|---|---|
| 坑(硐)口 | 共 7 个：含 2 个无水坑口，4 个有水坑口以及 1 个斜井 | 与井下采场、巷道贯通，有$^{222}$Rn 气逸出，有误入或坠入潜在危害，构成不安全因素；部分有水坑口的水质超过相应管理限值 |
| 废石场 | 共 5 个，总裸露面积 60 012 m$^2$ | 均属于铀矿冶废物，堆存总量为 27.73 万 t；表面氡析出率均值超过管理限值 |
| 工业场地 | 共 1 处，总裸露面积 1 188 m$^2$ | γ 辐射水平较高，表面氡析出率均值超过管理限值 |
| 道路 | 16 段，总长 14 719 m | γ 辐射水平较高 |
| 小溪 | 共 3 段，总长 680 m | 底泥中$^{226}$Ra 含量超过管理限值 |
| 设备 | 共 411 台 | 受到不同程度的表面污染 |
| 管线 | 共 64 960 m | 受到不同程度的表面污染 |
| 建(构)筑物 | 31 个 | 受到不同程度的表面污染 |

## 4　退役治理前放射性现状评价

该项目退役治理前的气态放射性流出物主要为废石堆、工业场地和坑(硐)口不断释放的$^{222}$Rn 及其子体；液态流出物为有水坑口涌出的含有铀镭等放射性废水。

### 4.1　气态流出物源项统计

#### 4.1.1　废石场和工业场地氡释放量

本矿区不存在露天采场废墟和塌陷区，放射性气体来源主要有废石堆、工业场地。5 个废石堆和工业场地氡释放量见表 14。氡释放量计算公式为[18]

$$F_{Rn} = S \cdot \delta \cdot t, \qquad (1)$$

式中：$F_{Rn}$—氡释放量，Bq/a；$S$—废石场或污染场地的裸露面积，m$^2$；$\delta$—氡析出率，Bq/(m$^2$·s)；$t$—氡释放时间，取 3.15×10$^7$ s/a。

**表 14　废石场和工业场地氡释放量**

**Table 14　Radon release amount of waste rock heaps and industrial yard**

| 源项名称 | 裸露面积/m$^2$ | 氡析出率/(Bq·m$^{-2}$·s$^{-1}$) | 氡释放量/(Bq·a$^{-1}$) | 源型 |
|---|---|---|---|---|
| 1 号废石场 | 21 996 | 1.01 | 7.01×10$^{11}$ | 面源 |
| 2 号废石场 | 12 190 | 1.05 | 4.04×10$^{11}$ | 面源 |
| 3 号废石场 | 4 780 | 1.03 | 1.55×10$^{11}$ | 面源 |
| 4 号废石场 | 13 705 | 1.00 | 4.32×10$^{11}$ | 面源 |
| 5 号废石场 | 7 341 | 1.15 | 2.66×10$^{11}$ | 面源 |
| 工业场地 | 1 188 | 0.96 | 3.60×10$^{11}$ | 面源 |

#### 4.1.2 坑(硐)口氡释放量

该项目退役工程需治理的坑(硐)口总计 7 个,各坑(硐)口的氡浓度较高,考虑将坑(硐)口纳入气态流出物之中。假设坑(硐)口内的氡全部由坑(硐)口附近的风带出,未考虑坑(硐)口处风灌入井内的因素,选取全年平均风速(1.2 m/s)进行估算。

坑(硐)口氡释放量计算公式为

$$F_{Rn} = C_{Rn} \cdot v \cdot S \cdot t, \quad (2)$$

式中:$F_{Rn}$—氡释放量,Bq/a;$C_{Rn}$—坑(硐)口氡浓度,Bq/m$^3$;$v$—坑(硐)口附近风速,取 1.2 m/s;$S$—坑(硐)口面积,m$^2$;$t$—氡释放时间,取3.15×10$^7$ s/a。

坑(硐)口氡释放量见表 15。

**表 15 坑(硐)口氡释放量**

**Table 15 Radon release amount of pit heads**

| 源项类型 | 宽/m | 高/m | 排气口风速/(m·s$^{-1}$) | 氡活度浓度/(Bq·m$^{-3}$) | 坑口面积/m$^2$ | 氡释放量/(Bq·a$^{-1}$) | 源型 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 硐 | 2.6 | 2.3 | 1.2 | 2 251 | 5.98 | 5.09×10$^{11}$ | 点源 |
| 2 硐 | 2.6 | 2.3 | 1.2 | 2 217 | 5.98 | 5.02×10$^{11}$ | 点源 |
| 3 硐 | 2.6 | 2.8 | 1.2 | 1 947 | 7.28 | 5.36×10$^{11}$ | 点源 |
| 4 坑 | 2.6 | 2.3 | 1.2 | 3 015 | 5.98 | 6.82×10$^{11}$ | 点源 |
| 5 坑 | 2.6 | 2.3 | 1.2 | 2 954 | 5.98 | 6.68×10$^{11}$ | 点源 |
| 6 坑 | 2.6 | 2.3 | 1.2 | 2 676 | 5.98 | 6.06×10$^{11}$ | 点源 |
| 7 坑 | 2.6 | 2.3 | 1.2 | 3 522 | 5.98 | 7.97×10$^{11}$ | 点源 |

### 4.2 液态流出物源项统计

液态源项主要为各矿井的坑(硐)口流出水,废水主要包括 $U_{天然}$、$^{226}Ra$ 等放射性核素。这些废水收集后经矿井水处理设施处理后,排入就近受纳水体。

计算时,治理前液态流出物水量以及 $U_{天然}$、$^{226}Ra$、$^{210}Pb$、$^{210}Po$ 含量均采用表 5 中外排废水实测最大值,$^{238}U$ 和 $^{234}U$ 根据 $U_{天然}$ 计算得出,$^{230}Th$ 含量根据 $^{226}Ra$ 计算得出,结果见表 16。

**表 16 液态流出物中的放射性核素含量**

**Table 16 Radionuclides contents in effluents**

| 水量/(m$^3$·d$^{-1}$) | $C_B$/(Bq·m$^{-3}$) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | $^{238}U$ | $^{230}Th$ | $^{226}Ra$ | $^{210}Pb$ | $^{210}Po$ |
| 297 | 713.4 | 328.3 | 240 | 31 | 26 |

### 4.3 各源项所致公众剂量估算与评价

#### 4.3.1 气态流出物致公众剂量估算

由于工业场地位于该关停铀矿山遗留设施的中心位置(图 1),因此以项目工业场地为中心进行估算与评价。5 km 范围内只有 1 处环境敏感目标,为 NW 方向居民点。剂量估算考虑的照射途径是吸入内照射,主要核素为气态 $^{222}Rn$。计算公式见式(3)[18],各源项对敏感目标个人剂量贡献值见表 17。

$$D^{e}_{Rn} = T \cdot C_{Rn} \cdot DF_{Rn}, \quad (3)$$

式中:$D^{e}_{Rn}$—$^{222}Rn$ 及其子体所致的个人有效剂量当量,mSv/a;$C_{Rn}$—$^{222}Rn$ 浓度,Bq/m$^3$;$T$—受照射时间,h/a,全年取 8 760 h;$DF_{Rn}$—$^{222}Rn$ 及其子体剂量转换因子,取 2.44×10$^{-6}$ mSv/(Bq·h·m$^{-3}$)。

结果显示各源项对居民点空气中氡贡献浓度为 1.19×10$^{-2}$ Bq/m$^3$,所致该居民点的最大个人剂量为 2.54×10$^{-4}$ mSv/a。

**表 17 各源项对个人剂量贡献值**

**Table 17 Contribution value of each source term to individual dose**

| 源项类型 | 贡献值/(mSv·a$^{-1}$) | 份额/% |
|---|---|---|
| 1 号废石场 | 2.12×10$^{-5}$ | 8.34 |
| 2 号废石场 | 1.30×10$^{-5}$ | 5.11 |
| 3 号废石场 | 4.92×10$^{-6}$ | 1.94 |
| 4 号废石场 | 5.13×10$^{-6}$ | 2.02 |
| 5 号废石场 | 4.27×10$^{-6}$ | 1.68 |
| 1 硐 | 2.24×10$^{-5}$ | 8.81 |
| 2 硐 | 2.27×10$^{-5}$ | 8.93 |
| 3 硐 | 2.31×10$^{-5}$ | 9.09 |
| 4 坑 | 2.99×10$^{-5}$ | 11.76 |
| 5 坑 | 3.36×10$^{-5}$ | 13.22 |
| 6 坑 | 3.16×10$^{-5}$ | 12.43 |
| 7 坑 | 4.15×10$^{-5}$ | 16.33 |
| 工业场地 | 8.55×10$^{-7}$ | 0.34 |

#### 4.3.2　液态流出物致公众剂量估算

该项目液态途径包括食入内照射、水中浸没照射、岸边活动外照射和水上活动外照射 4 个方面，计算中主要考虑的放射性核素为$^{238}$U、$^{234}$U、$^{226}$Ra、$^{230}$Th、$^{210}$Pb 和$^{210}$Po，计算结果见表 18。从照射途径来看，水生生物食入途径对最大个人剂量贡献最大，为 $3.38\times10^{-4}$ mSv/a，贡献份额占 4 种照射途径总和的 99.43%。从产生照射的核素来看，$^{210}$Pb 为主要照射剂量核素，贡献占比为 49.32%。

**表 18　主要核素不同照射途径对个人剂量的贡献**

**Table 18　Contribution values of main radionuclides to individual dose through different irradiation routes**

| 核素 | 不同途径所致个人剂量/(mSv·a$^{-1}$) | | | | 合计剂量/(mSv·a$^{-1}$) | 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 | | |
| $^{238}$U | $1.17\times10^{-8}$ | $3.64\times10^{-6}$ | $4.02\times10^{-8}$ | $3.64\times10^{-8}$ | $3.73\times10^{-6}$ | 1.10 |
| $^{234}$U | $1.58\times10^{-8}$ | $3.94\times10^{-6}$ | $4.35\times10^{-8}$ | $3.94\times10^{-8}$ | $4.04\times10^{-6}$ | 1.19 |
| $^{230}$Th | $4.43\times10^{-8}$ | $4.74\times10^{-5}$ | $4.64\times10^{-7}$ | $1.55\times10^{-9}$ | $4.79\times10^{-5}$ | 14.10 |
| $^{226}$Ra | $7.06\times10^{-9}$ | $5.54\times10^{-5}$ | $9.80\times10^{-9}$ | $8.97\times10^{-9}$ | $5.54\times10^{-5}$ | 16.32 |
| $^{210}$Po | $3.65\times10^{-12}$ | $6.04\times10^{-5}$ | $5.37\times10^{-7}$ | $1.08\times10^{-7}$ | $6.11\times10^{-5}$ | 17.97 |
| $^{210}$Pb | $2.62\times10^{-9}$ | $1.67\times10^{-4}$ | $5.56\times10^{-7}$ | $9.08\times10^{-10}$ | $1.68\times10^{-4}$ | 49.32 |
| 合计 | $8.15\times10^{-8}$ | $3.38\times10^{-4}$ | $1.65\times10^{-6}$ | $1.95\times10^{-7}$ | $3.40\times10^{-4}$ | 100 |
| 照射途径贡献份额/% | 0.02 | 99.43 | 0.49 | 0.06 | 100 | |

## 5　结论

通过放射性环境本底调查，确定了该铀矿山退役治理项目和治理部位，查明了退役治理前放射性环境水平。

1)该矿区 4 个有水坑口流出水中 $\rho(U_{天然})$ 均高于 0.3 mg/L 的排放限值，$C(^{226}Ra)$ 低于废水排放控制目标值(1.1 Bq/L)。流出水经过矿井水处理设施处理后可达标排放。受纳水体中 $\rho(U_{天然})$ 和 $C(^{226}Ra)$ 高于本底水平，受纳水体底泥中 $a(^{226}Ra)$ 也超过了退役治理的管理限值要求。

2)5 个废石场和工业场地的氡析出率均高于 0.74 Bq/(m·s)的管理限值，γ 辐射剂量率高于当地背景值；工业场地 0～45 cm 深土壤中 $w(U_{天然})$ 和 $a(^{226}Ra)$ 均高于当地本底值；矿区道路的 γ 辐射剂量率均高于当地背景值，土壤大部分监测点取样深度达到 45 cm 时，土壤中 $a(^{226}Ra)$ 才能满足管理限值的要求。

3)矿区内设备、器材、管线、建(构)筑物均受到了不同程度的表面污染，需要进行治理。

4)矿区气态源项致居民点最大个人剂量为 $2.54\times10^{-4}$ mSv/a，液态源项致居民点最大个人剂量为 $3.40\times10^{-4}$ mSv/a，共计 $5.94\times10^{-4}$ mSv/a，总剂量低于 0.3 mSv/a 的剂量约束限值。

## 参考文献：


[1] 廖燕庆，卢德雄，彭崇，等. 广西某铀矿山退役治理后环境放射性调查与分析[J]. 辐射防护，2017，37(1)：62-66.

[2] 邱国华. 铀矿山探采冶设施退役治理工程放射性环境影响评价[J]. 铀矿地质，2008，24(3)：188-192.

[3] 赵其文，王国全. 新疆伊犁铀矿冶退役场所辐射环境影响现状调查[J]. 辐射防护，2015，35(4)：253-256.

[4] 覃国秀，刘庆成，刘毅，等. 某铀矿山退役分矿环境放射性现状调查[J]. 铀矿地质，2009，25(1)：60-64.

[5] 潘英杰，徐乐昌，薛建新，等. 国外铀矿冶设施的退役治理[J]. 铀矿冶，2012，31(2)：92-95.

[6] 生态环境部，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.

[7] 环境保护部. 辐射环境监测技术规范：HJ/T 61—2021[S]. 北京：中国标准出版社，2021.

[8] 生态环境部. 环境 γ 辐射剂量率测量技术规范：HJ

1157—2021[S]. 北京:中国标准出版社,2021.
[9] 生态环境部. 环境空气中氡的测量方法:HJ 1212—2021[S]. 北京:中国标准出版社,2021.
[10] 中国核工业总公司. 表面氡析出率测定积累法:EJ/T 979—95[S]. 北京:中国标准出版社,1995.
[11] 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. 土壤中放射性核素的γ能谱分析方法:GB/T 11743—2013[S]. 北京:中国标准出版社,2013.
[12] 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.
[13] 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.
[14] 国家环境保护局和核工业部. 水中镭-226 的分析测定:GB/T 11214—1989[S]. 北京:中国标准出版社,1989.
[15] 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.
[16] 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,2016.
[17] 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. 表面污染测定——第 1 部分:β 发射体($E_{\beta max}$ > 0.15 MeV)和 α 发射体:GB/T 14056.1—2008[S]. 北京:中国标准出版社,2008.
[18] 核工业标准化研究所. 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,2002.

## Investigation and Evaluation of Environmental Radioactivity for a Decommissioned Uranium Mine

LI Nana[1,2]

(1. Beijing Research Institute of Uranium Geology, CNNC, Beijing 100029, China;
2. CAEA Innovation Center for Geological Disposal of High-Level Radioactive Waste, Beijing 100029, China)

**Abstract**: The radioactive environment of a decommissioned uranium mine in Jiangxi province was investigated and analyzed. The pollutant sources of the mine and decommissioning management projects were determined. The results show that all the radon exhalation rates of five waste rock heaps exceed 0.74 Bq/(m$^2$ · s), moreover, the content of natural uranium and $^{226}$Ra in waste rocks are higher than local background value. The soils of yard and roads are polluted to varying degrees. The content of natural uranium in effluents sampled from four pits are higher than the emission limits of 0.3 mg/L, however, the effluents can reach the emission standard after being treated. The α and β surface contamination level of equipment, pipeline and facilities are all in high level. The value of public maximum individual effective dose contributed by this decommissioned uranium mine before treatment is $5.94\times10^{-4}$ mSv/a.

**Key words**: decommissioned uranium mine; radioactive environment; pollutant source; radioactive nuclides; emission limits