

DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2023.06.016

• 论 著 •

某退役铀矿山周围土壤样品中 $^{210}\text{Pb}$ 和 $^{210}\text{Po}$ 的联测结果分析钟春明<sup>1,2</sup>, 张鑫<sup>1,2</sup>, 黄宇琦<sup>1,2</sup>

1. 核工业二三〇研究所, 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:** 目的 对退役铀矿山周边土壤样品中 $^{210}\text{Pb}$ 和 $^{210}\text{Po}$ 活度浓度进行联测结果分析, 以评价退役铀矿山周边土壤放射性污染现状。方法 针对退役铀矿山周边土壤样品, 通过恒温自沉积将 $^{210}\text{Po}$ 和 $^{210}\text{Pb}$ 子体 $^{210}\text{Bi}$ 镀于铜片上, 用低本底 $\alpha$ 、 $\beta$ 测量仪测量总 $\alpha$ 和总 $\beta$ 计数, 计算出土壤中 $^{210}\text{Pb}$ 和 $^{210}\text{Po}$ 的活度浓度, 并用地质累积指数法进行放射性污染评价。结果 退役铀矿山矿区土壤中 $^{210}\text{Pb}$ 活度浓度为 $873.7 \sim 2315.5 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $^{210}\text{Po}$ 活度浓度为 $956.0 \sim 2315.5 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 周边农田土壤中 $^{210}\text{Pb}$ 活度浓度为 $54.2 \sim 257.8 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $^{210}\text{Po}$ 活度浓度为 $59.1 \sim 234.5 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。根据地质累积指数法评价结果, 周边农田污染等级为 $0 \sim 2$ , 农田处于无污染到中度污染之间。结论 退役铀矿山周边土壤铀系放射性较高, 需关注铀系子体 $^{210}\text{Pb}$ 和 $^{210}\text{Po}$ 在周边土壤中的转移、扩散和食入, 以及造成的辐射环境影响。

**关键词:** 退役铀矿山; 土壤;  $^{210}\text{Pb}$ ;  $^{210}\text{Po}$ ; 活度浓度

中图分类号: X591 文献标识码: A 文章编号: 1004-714X(2023)06-0685-06

Combined determination of  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{210}\text{Po}$  in soil samples around a decommissioned uranium mineZHONG Chunming<sup>1,2</sup>, ZHANG Xin<sup>1,2</sup>, HUANG Yuqi<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:** **Objective** To evaluate the current situation of radioactive contamination in the soil around a decommissioned uranium mine by combined determination of  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{210}\text{Po}$  activity concentrations. **Methods** Soil samples were collected around a decommissioned uranium mine.  $^{210}\text{Po}$  and the  $^{210}\text{Pb}$  decay product  $^{210}\text{Bi}$  were plated on a copper sheet by self-deposition at a constant temperature. Gross  $\alpha$  and gross  $\beta$  counts were measured using a low-background  $\alpha/\beta$  counter. The activity concentrations of  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{210}\text{Po}$  in soil were calculated. The radioactive contamination was evaluated using geological accumulation index. **Results** The activity concentrations of  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{210}\text{Po}$  in the soil around the decommissioned uranium mine were  $873.7\text{--}2315.5$  and  $956.0\text{--}2315 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ , respectively. The activity concentrations of  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{210}\text{Po}$  in nearby farmland soil were  $54.2\text{--}257.8$  and  $59.1\text{--}234.5 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ , respectively. Evaluation with the geological accumulation index showed that the level of nearby farmland contamination was  $0\text{--}2$ , indicating zero to moderate radioactive contamination of the farmland. **Conclusion** The relatively high radioactivity around the decommissioned uranium mine requires attention to the transfer, diffusion, and ingestion of the uranium decay products  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{210}\text{Po}$  in the surrounding soil to avoid radioactive contamination of the environment.

**Keywords:** Decommissioned uranium mine; Soil;  $^{210}\text{Pb}$ ;  $^{210}\text{Po}$ ; Activity concentration

伴随中国核工业六十多年来的快速发展, 越来越多的铀矿山因资源枯竭, 因不具备开采价值而退役。退役铀矿山中的尾矿库、废石堆经风化雨淋、地表径流等外界作用后, 存在放射性核素向周围环境扩散风险, 危害当地土壤环境<sup>[1-2]</sup>。亟需对退役铀矿山周围环境进行放射性核素监测<sup>[3]</sup>。

$^{210}\text{Pb}$ 和 $^{210}\text{Po}$ 属于铀系中氦衰变子体, 广泛存在于自然界中。其中,  $^{210}\text{Pb}$ 的半衰期为 $22.20 \text{ a}$ , 由 $^{214}\text{Po}$ 通过 $\alpha$ 衰变产生,  $^{210}\text{Pb}$ 通过 $\beta$ 衰变成 $^{210}\text{Bi}$ ;  $^{210}\text{Po}$ 的半衰期为 $138.4 \text{ d}$ , 衰变时放出 $\alpha$ 射线。 $^{210}\text{Pb}$ 和 $^{210}\text{Po}$ 是自然辐射剂量的最大贡献者, 通过食入途径摄入人体的 $^{210}\text{Pb}$ 和 $^{210}\text{Po}$ 占个人有效剂量的 $80\%$ <sup>[4-5]</sup>。 $^{210}\text{Pb}$ 和 $^{210}\text{Po}$

基金项目: 中国核工业地质局铀矿地质项目 (202324-3)

作者简介: 钟春明 (1986—), 男, 江西赣州人, 高级工程师, 从事物理分析、辐射环境监测和评价。E-mail: 363450767@qq.com

不仅具有极高的化学毒性,还具有很强的放射毒性,可通过内照射对人体健康持续造成伤害。因此,退役铀矿山周边环境土壤中 $^{210}\text{Pb}$ 和 $^{210}\text{Po}$ 的监测,对辐射影响评价至关重要<sup>[6-8]</sup>。

本文选取某退役铀矿山为调查对象,采集了退役铀矿山周围环境土壤样品,通过恒温自沉积将 $^{210}\text{Po}$ 和 $^{210}\text{Pb}$ 子体 $^{210}\text{Bi}$ 镀于铜片上,用低本底 $\alpha$ 、 $\beta$ 测量仪测量总 $\alpha$ 和总 $\beta$ 计数,计算出土壤中 $^{210}\text{Pb}$ 和 $^{210}\text{Po}$ 的活度浓度<sup>[9-11]</sup>,并用地质累积指数法对测量结果进行了污染评价。

## 1 材料与方法

**1.1 样品采集** 本文选取的铀矿山是我国第一批开发建设的铀矿山之一,整个矿区面积约 300 km<sup>2</sup>。2013 年起该矿全面闭坑淹井,只保留废水处理设施,以便处理尾矿库及地表堆场渗滤水。矿山地处丘陵地带,年主导风向为秋冬季东北风,夏季东南风。周边地表水系发达,有一条河流流经生产区,河流最大流量为 2.1 m<sup>3</sup>/s,最小流量为 0.3 m<sup>3</sup>/s,平均流量为 0.6 m<sup>3</sup>/s。该河流为矿区外排水受纳水体。在退役铀矿山北部依次分布有 3 座废石堆、南部有工业矿区。

2021 年 5—11 月,根据退役铀矿山周边环境实际状况,采集以铀矿山为中心点向外延伸分别为 3、5、10 km 区域内的农田土壤样品,并在矿区上风向 10 km 外选取对照点土壤样品,均采集 15~30 cm 深度的土壤 2 kg,各个样品现场混合均匀后送实验室规范制样。加工好的样品装入磨口玻璃瓶中,使用前在 80℃±5℃烘箱里进行烘干,烘干后的样品放入干燥器中备用。

**1.2 试验设备和材料** 仪器设备: MPC9604 型流气式低本底 $\alpha$ 、 $\beta$ 测量仪、ME204E 型电子天平(精度为 0.0001 g)、SHA-C 型水浴恒温振荡器。其他辅助仪器设备包括可控温电炉、烘箱等。所有仪器已检定校准,并在检定有效期内。

试剂: 硝酸( $\rho$ 1.40 g/mL)、盐酸( $\rho$ 1.19 g/mL)、氢氟酸( $\rho$ 1.13 g/mL)、高氯酸( $\rho$ 1.68 g/mL)、抗坏血酸、硝酸溶液(2.0 mol/L)、无水乙醇、盐酸-氯化钠溶液(0.5 mol/L HCl + 3 mol/L NaCl)、 $^{210}\text{Pb}$ - $^{210}\text{Po}$ 平衡标准溶液。分析过程中所使用的试剂均为优级纯,用水为去离子水。

材料: 直径为 20 mm,厚度为 0.15 mm,铜含量大于 99.99% 的铜片,铜片一面均匀涂刷耐高温(100℃)的环氧涂料。软质聚氯乙烯棒焊制成直径为 19 mm

的圆环,浮圈的使用能使铜片浮在镀液中,和镀液充分接触,保障镀源效率。

**1.3 分析方法** 土壤中矿物质种类很多,化学组成复杂,它直接影响土壤的物理、化学性质。退役铀矿山由于风化雨淋、地表径流等外界作用,使放射性核素 $^{210}\text{Pb}$ 和 $^{210}\text{Po}$ 往周边土壤中扩散,破坏土壤中原先的 $^{210}\text{Pb}$ 和 $^{210}\text{Po}$ 平衡状态<sup>[12]</sup>。将样品制好镀液后在水浴恒温振荡器中进行自沉积镀片,用低本底 $\alpha$ 、 $\beta$ 测量仪对镀片进行总 $\alpha$ 、总 $\beta$ 测量,求得样品中 $^{210}\text{Po}$ 和 $^{210}\text{Pb}$ 的活度浓度。具体试验方法如下:

(1)用天平称取标准物质、土壤样品 0.1000~1.000 g,并称取 $^{210}\text{Pb}$ - $^{210}\text{Po}$ 平衡标准溶液作为仪器刻度试验,将称取的样品分别置于 100 mL 聚四氟乙烯坩埚中,并标记各坩埚编号。

(2)向聚四氟乙烯坩埚中加入浓硝酸 20 mL、氢氟酸 15 mL、高氯酸 3~5 mL,在可控温电炉上(150℃~200℃)加热溶解,重复此步骤至样品中硅质组分完全溶解,高氯酸冒白烟将尽后即取下。

(3)取下聚四氟乙烯坩埚稍冷,用 15.0 mL 盐酸-氯化钠溶液(0.5 mol/L HCl + 3 mol/L NaCl)分 2~3 次温热提取溶液,再用 10 mL 盐酸-氯化钠溶液(0.5 mol/L HCl + 3 mol/L NaCl)冲洗聚四氟乙烯坩埚 2~3 次,提取液以及冲洗液全部转入 100 mL 玻璃锥形瓶中,获得介质为盐酸-氯化钠溶液(0.5 mol/L HCl + 3 mol/L NaCl)的镀液 25 mL。

(4)向锥形瓶中加入 0.50 g 抗坏血酸,镀液黄色褪去后,摇动均匀,若镀液黄色未褪去,可继续加入适量的抗坏血酸,直至镀液呈清亮色。

(5)将铜片一面标记样品编号,另一面用砂纸打磨至表面光洁,在硝酸溶液(2.0 mol/L)中浸泡 10 min 后取出,用去离子水和无水乙醇冲洗干净,晾干;将浮圈套入铜片中间位置放入有样品镀液的锥形瓶中。

(6)将锥形瓶放入已恒温至 80℃ 的水浴恒温振荡器中,在振速为 120~130 r/min、振幅 20 mm 下,振荡制源 85 min,并记录制源中间时刻。取出铜片去掉浮圈,用去离子水和无水乙醇冲洗铜片两面。将镀好的铜片置于干燥器中放置 15~30 h,去除短寿命 $\alpha$ 、 $\beta$ 型放射性核素对测量产生的干扰。

(7)按照(1)~(6)步骤进行空白试验,空白试验所用试剂取自同一试剂瓶,加入同等的量。

(8)将空白镀片、样品镀片和刻度源镀片的活性面朝上,放在不锈钢样品盘中心,放入低本底 $\alpha$ 、 $\beta$ 测量仪进行总 $\alpha$ 和总 $\beta$ 测量,同时记录下测量中间时刻。

1.4 结果分析 先测量空白镀片和 $^{210}\text{Pb}$ - $^{210}\text{Po}$ 平衡标准溶液镀片以进行仪器刻度计算。刻度系数由式 1) 和 2) 计算得出:

$$K_{\text{Po}} = \frac{A_{\text{Po}}}{(N_{\text{Po}} - N_{\alpha})} \times e^{-\lambda_{\text{Po}} \cdot t_1} \quad 1)$$

$$K_{\text{Bi}} = \frac{A_{\text{Bi}}}{(N_{\text{Bi}} - N_{\beta})} \times e^{-\lambda_{\text{Bi}} \cdot t_1} \quad 2)$$

式 1)、2) 中,  $K_{\text{Po}}$  为仪器对 $^{210}\text{Po}$ 的刻度系数,  $\text{Bq} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $K_{\text{Bi}}$  为仪器对 $^{210}\text{Bi}$ 的刻度系数,  $\text{Bq} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $N_{\text{Po}}$  为通过刻度源获得的表征 $^{210}\text{Po}$ 活度的总  $\alpha$  计数率,  $\text{s}^{-1}$ ;  $N_{\alpha}$  为仪器测定空白镀片的总  $\alpha$  计数率,  $\text{s}^{-1}$ ;  $A_{\text{Po}}$  为刻度源中 $^{210}\text{Po}$ 的总活度,  $\text{Bq}$ ;  $N_{\text{Bi}}$  为通过刻度源获得的表征 $^{210}\text{Bi}$ 活度的总  $\beta$  计数率,  $\text{s}^{-1}$ ;  $N_{\beta}$  为仪器测定空白镀片的总  $\beta$  计数率,  $\text{s}^{-1}$ ;  $A_{\text{Bi}}$  为刻度源中 $^{210}\text{Bi}$ 的总活度,  $\text{Bq}$ ;  $\lambda_{\text{Po}}$  为 $^{210}\text{Po}$ 的衰变常数,  $\text{h}^{-1}$ ;  $\lambda_{\text{Bi}}$  为 $^{210}\text{Bi}$ 的衰变常数,  $\text{h}^{-1}$ ;  $t_1$  为刻度源制源中间时刻与测量中间时刻的时间间隔,  $\text{h}$ 。

样品中 $^{210}\text{Pb}$ 和 $^{210}\text{Po}$ 活度浓度由式 3) 和 4) 计算得出:

$$A_1 = 1000 \times \frac{(N_1 - N_{\alpha}) \times e^{\lambda_{\text{Po}} \cdot t_2} \times K_{\text{Po}}}{m} \quad 3)$$

$$A_2 = 1000 \times \frac{(N_2 - N_{\beta}) \times e^{\lambda_{\text{Bi}} \cdot t_2} \times K_{\text{Bi}}}{m} \quad 4)$$

式 3)、4) 中,  $A_1$  为样品中 $^{210}\text{Po}$ 的活度活度,  $\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  $A_2$  为样品中 $^{210}\text{Pb}$ 的活度活度,  $\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  $N_1$  为测得样品源 $^{210}\text{Po}$ 的总  $\alpha$  计数率,  $\text{s}^{-1}$ ;  $N_2$  为测得样品源 $^{210}\text{Bi}$ ( $^{210}\text{Pb}$ )的总  $\beta$  计数率,  $\text{s}^{-1}$ ;  $t_2$  为样品源制备中间时刻与样品源测量中间时刻的时间间隔,  $\text{h}$ ;  $m$  为样品称样重量,  $\text{g}$ ; 其他符号意义同式 1) 和 2)。

1.5 不确定度 扩展不确定度  $U$  由 A 类不确定度和 B 类不确定度组成。A 类不确定度主要由测量仪器统计计数引起的不确定度  $\mu$  贡献, B 类不确定度主要由所使用的标准源的不确定度贡献<sup>[13]</sup>。则样品中扩展不确定度  $U$  由式 5) 计算得出:

$$U = k \times \sqrt{\mu_A^2 + \mu_B^2} \quad 5)$$

式 5) 中,  $k$  为包含因子, 置信水平  $\rho=95\%$  时,  $k=2$ ;  $\mu_A$  为 A 类不确定度;  $\mu_B$  为 B 类不确定度, 标准源证书给定的不确定度。

1.6 探测下限 当样品的计数率与本底接近时, 样品 $^{210}\text{Pb}$ 和 $^{210}\text{Po}$ 探测下限按照式 6) 进行计算:

$$L_d = 4.65 \times \sqrt{\frac{N_0}{t_0}} \times \frac{e^{\lambda \cdot t_2} \times K}{m} \times 1000 \quad 6)$$

式 6) 中,  $L_d$  为 $^{210}\text{Pb}$ 或 $^{210}\text{Po}$ 测量探测下限,  $\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  $\lambda$  为 $^{210}\text{Bi}$ 或 $^{210}\text{Po}$ 的衰变常数,  $\text{h}^{-1}$ ;  $K$  为对应的仪器对 $^{210}\text{Pb}$ 或 $^{210}\text{Po}$ 的刻度系数,  $\text{Bq} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $N_0$  为空白样品仪器的测量本底总  $\alpha$  或总  $\beta$  计数率,  $\text{s}^{-1}$ ;  $t_0$  为空白样品的测量总时间,  $\text{s}$ 。其他符号意义同式 1)~4)。

## 2 结果

2.1 样品中 $^{210}\text{Pb}$ 和 $^{210}\text{Po}$ 活度浓度 设置空白样品镀片测量时间为 1000 min 时, 得到 $^{210}\text{Pb}$ 和 $^{210}\text{Po}$ 的最小可探测下限为  $2.5 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $1.2 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。联测分析得出退役铀矿山矿区土壤中 $^{210}\text{Pb}$ 活度浓度范围为  $873.7 \sim 2315.5 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $^{210}\text{Po}$ 活度浓度范围为  $956.0 \sim 2315.5 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ ; 农田土壤中 $^{210}\text{Pb}$ 活度浓度范围为  $54.2 \sim 257.8 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $^{210}\text{Po}$ 活度浓度范围为  $59.1 \sim 234.5 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 对照点土壤中 $^{210}\text{Pb}$ 和 $^{210}\text{Po}$ 活度浓度为  $57.2 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $53.2 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。具体测量结果见表 1。

表 1 土壤样品中 $^{210}\text{Pb}$ 和 $^{210}\text{Po}$ 测量结果

Table 1  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{210}\text{Po}$  activity concentrations in the soil samples

编号	取样区域	$^{210}\text{Po}$ 测量结果		$^{210}\text{Pb}$ 测量结果	
		测量值/ $\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$	扩展不确定度( $k=2$ )	测量值/ $\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$	扩展不确定度( $k=2$ )
1	废石堆	2315.5	5.2%	2487.2	5.6%
2	运矿道路	1086.9	5.4%	1185.1	5.1%
3	工业矿区	956.0	6.0%	873.7	6.2%
4	3 km处农田	234.5	7.1%	257.8	7.3%
5	5 km处农田	113.2	7.6%	105.4	8.2%
6	10 km处农田	59.1	10.5%	54.2	9.7%
7	对照点土壤	53.2	11.0%	57.2	11.7%
8	10 km处农田-平行	65.3	11.3%	51.9	10.6%
9	工业矿区-平行	906.5	6.2%	912.2	5.9%

同时,从表 1 数据可知,选取工业矿区和 10 km 处农田土壤 2 个样品进行平行样精密度分析, $^{210}\text{Pb}$  和  $^{210}\text{Po}$  平行样偏差  $<4\%$ 。选用国家一级标准物质 GBW04127 对试验进行准确度分析, $^{210}\text{Pb}$  和  $^{210}\text{Po}$  推荐值为  $9.41\text{ Bq/g}$ 、 $9.41\text{ Bq/g}$ ,测量值为  $9.21\text{ Bq/g}$ 、 $9.11\text{ Bq/g}$ ,偏差为  $-2.12\%$ 、 $-3.19\%$ 。因此,本试验中  $^{210}\text{Pb}$  和  $^{210}\text{Po}$  测量结果的精密度和准确度满足 EJ/T 751—2014《放射性矿产地质分析测试实验室质量保证规范》相关要求<sup>[14]</sup>。

文献 [15] 评价了铀矿山周边环境  $^{210}\text{Pb}$  和  $^{210}\text{Po}$  分布趋势,放射性核素随着水迁移,在周边农田中沉

积下来,通过食入农作物转移至人体,对人身造成辐射影响。从图 1 退役铀矿山周边土壤中  $^{210}\text{Pb}$  和  $^{210}\text{Po}$  分布趋势图可见,退役铀矿山的废石堆、运矿道路和工业矿区 15~30 cm 深度的土壤  $^{210}\text{Pb}$  和  $^{210}\text{Po}$  活度浓度普遍较高,这是由于  $^{210}\text{Pb}$  和  $^{210}\text{Po}$  作为铀系子体,与铀含量成正比关系,铀系放射性核素在土壤中移动的深度约是  $0\sim 50\text{ cm}$ <sup>[16]</sup>; 3 km 处农田土壤  $^{210}\text{Pb}$  和  $^{210}\text{Po}$  活度浓度均  $>200\text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,是对照点土壤的 4 倍左右; 5 km 和 10 km 处农田土壤  $^{210}\text{Pb}$  和  $^{210}\text{Po}$  活度浓度已接近本底值。

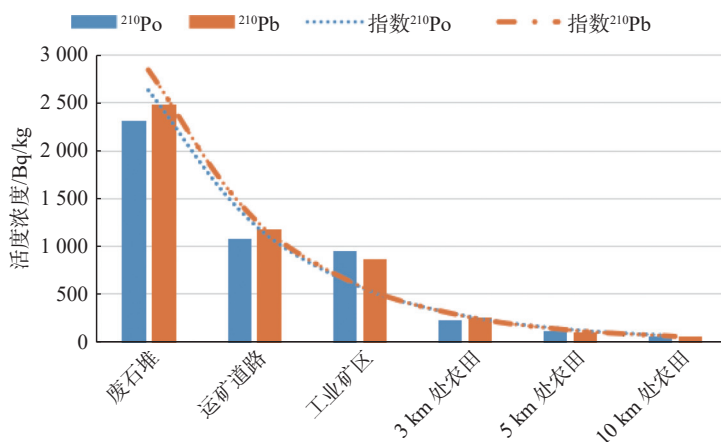


图 1  $^{210}\text{Pb}$  和  $^{210}\text{Po}$  分布趋势图

Figure 1 Distribution of  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{210}\text{Po}$

2.2 地质累积指数法污染评价 地质累积指数 ( $I_{\text{geo}}$ ) 亦称为 Muller 指数,该模型在考虑自然地质过程对背景值影响的同时,也充分考虑人为活动对放射性核素污染的影响。因此,该指数是区分人为活动影响的重要参数,广泛应用于人类生产活动对土壤的污染评价,可借用此模型进行放射性污染评价<sup>[17]</sup>。

$$I_{\text{geo}} = \log_2 \left( \frac{C_i}{1.5BE_i} \right) \quad (7)$$

式(7)中,  $I_{\text{geo}}$  为地质累积指数;  $C_i$  为放射性核素  $i$  的测量值;  $E_i$  为放射性核素  $i$  的背景值; 1.5 为背景修正值。

地质累积指数分为 7 个级别, 0~6 级表示污染程度由无到极强,最高一级的核素含量可能达到背景值的几百倍。分级标准具体见表 2。

退役铀矿山周边环境  $^{210}\text{Pb}$  和  $^{210}\text{Po}$  背景值取对照点土壤测量值。通过地质累积指数法对退役铀矿山周边土壤进行  $^{210}\text{Pb}$  和  $^{210}\text{Po}$  放射性污染评价,评价结果见表 3。从表 3 可知,退役铀矿山矿区土壤中放射性核素  $^{210}\text{Pb}$  和  $^{210}\text{Po}$  污染等级为 4~5、附近农田污

表 2 地质累积指数分级标准

Table 2 Classification of contamination based on geological accumulation index

$I_{\text{geo}}$	级别	污染程度
$<0$	0	无污染
$0\sim 1$	1	无污染到中度污染
$1\sim 2$	2	中度污染
$2\sim 3$	3	中度污染到强污染
$3\sim 4$	4	强污染
$4\sim 5$	5	强污染到极强污染
$>5$	6	极强污染

染等级为 0~2; 农田整体上处于无污染到中度污染之间, 10 km 外农田  $^{210}\text{Pb}$  和  $^{210}\text{Po}$  污染等级为无污染, 3 km 内农田  $^{210}\text{Pb}$  和  $^{210}\text{Po}$  污染等级为中度污染。

### 3 讨论

退役铀矿山周边土壤成分复杂,铀系放射性核素含量高,通过对某退役铀矿山周边土壤进行系统地取样、检测和评价。将样品制成镀液后,在水浴恒温振



表 3 地质累积指数评价结果

Table 3 Evaluation of radioactive contamination with geological accumulation index

编号	取样区域	<sup>210</sup> Po		<sup>210</sup> Pb	
		<i>I<sub>geo</sub></i> 值	污染等级	<i>I<sub>geo</sub></i> 值	污染等级
1	废石堆	4.86	5	4.86	5
2	运矿道路	3.77	4	3.79	4
3	工业矿区	3.58	4	3.35	4
4	3 km处农田	1.56	2	1.59	2
5	5 km处农田	0.50	1	0.30	1
6	10 km处农田	-0.43	0	-0.66	0

荡器中进行自沉积镀膜,用低本底  $\alpha$ 、 $\beta$  测量仪对镀膜片进行总  $\alpha$ 、总  $\beta$  计数测量,分析出了退役铀矿周边土壤中<sup>210</sup>Pb和<sup>210</sup>Po的活度浓度。同时,利用地质累积指数法对退役铀矿周边土壤中<sup>210</sup>Pb和<sup>210</sup>Po的放射性污染进行了评价。通过此次分析和评价,初步掌握了某退役铀矿周边土壤中<sup>210</sup>Pb和<sup>210</sup>Po的放射性污染现状。

本文主要采集退役铀矿周边 10 km 范围内土壤进行<sup>210</sup>Pb和<sup>210</sup>Po的结果分析与评价,样品性质单一,未来考虑采集周边地下水、农作物等样品进行<sup>210</sup>Pb和<sup>210</sup>Po的结果分析与评价,进一步调查退役铀矿对周围环境的辐射影响。铀矿作为我国核工业发展体系中不可或缺的环节之一,如今面临越来越多的铀矿退役,需关注其对周边土壤造成的放射性污染问题<sup>[18]</sup>。其中,极毒组核素<sup>210</sup>Pb和<sup>210</sup>Po作为铀系子体,在土壤中的转移、扩散和食入问题,亟待更多的人进行研究。

**利益冲突** 本研究由署名作者按以下贡献声明独立开展,排名无争议。文章不涉及任何利益冲突

**作者贡献声明** 钟春明负责设计研究思路、研究方案及实施试验过程;张鑫负责文献调研和论文审阅;黄宇琦负责数据录入和问卷调查

#### 参考文献

- [1] 朱伟寿,雷淑钦,李仲修,等.新疆某铀矿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. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2021.05.004.  
Zhu WS, Lei SQ, Li ZX, et al. Monitoring and analysis of food radionuclides around a uranium mine in Xinjiang[J]. Chin J Radiol Health, 2021, 30(5): 546-550. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2021.05.004.
- [2] 李娜娜.某退役铀矿放射性环境现状调查及评价[J].铀矿冶,

2023, 42(1): 80-90. DOI: 10.13426/j.cnki.yky.2022.08.01.

Li NN. Investigation and evaluation of environmental radioactivity for a decommissioned uranium mine[J]. Uranium Min Metall, 2023, 42(1): 80-90. DOI: 10.13426/j.cnki.yky.2022.08.01.

- [3] 刘庆云,高鹏,杜娟,等.居民主要食品中<sup>210</sup>Po含量及所致公众内照射剂量估算[J].中国辐射卫生,2021,30(1):28-33. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2021.01.007.

Liu QY, Gao P, Du J, et al. Study on the contents of <sup>210</sup>Po in food and estimation of the internal irradiation dose of residents[J]. Chin J Radiol Health, 2021, 30(1): 28-33. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2021.01.007.

- [4] 苏锴骏,王希龙,霍梦慧,等.环境样品中<sup>210</sup>Po和<sup>210</sup>Pb的测量方法进展[J].中国辐射卫生,2022,31(2):245-249,254. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2022.02.021.

Su KJ, Wang XL, Huo MH, et al. Research progress in measurement methods for <sup>210</sup>Po and <sup>210</sup>Pb in environmental samples[J]. Chin J Radiol Health, 2022, 31(2): 245-249,254. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2022.02.021.

- [5] 王玉学.岩石、土壤样品中<sup>210</sup>Po测定方法的研究[J].铀矿地质,2005,21(4):248-256. DOI: 10.3969/j.issn.1000-0658.2005.04.010.

Wang YX. Study on determination of polonium-210 in rock and soil samples[J]. Uranium Geol, 2005, 21(4): 248-256. DOI: 10.3969/j.issn.1000-0658.2005.04.010.

- [6] 许慧萍,赵洋.新疆某露天煤矿放射性水平调查及人员受照剂量评价[J].中国辐射卫生,2023,32(1):6-9,14. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2023.01.002.

Xu HP, Zhao Y. Investigation of radioactivity level in an open-pit coal mine in Xinjiang, China and evaluation of personnel exposure dose[J]. Chin J Radiol Health, 2023, 32(1): 6-9,14. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2023.01.002.

- [7] 张壮壮,文富平,徐旭涛,等.居民主要食入蔬菜中<sup>210</sup>Po含量及所致公众内照射剂量估算[J].中国辐射卫生,2020,29(3):263-267. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2020.03.016.

Zhang ZZ, Wen FP, Xu XT, et al. <sup>210</sup>Po content in vegetables eaten by residents and estimation of internal exposure dose[J]. Chin J Radiol Health, 2020, 29(3): 263-267. DOI: 10.13491/j.issn.

- 1004-714X.2020.03.016.
- [8] 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与分析[J]. 中国辐射卫生, 2015, 24 (3): 271-272, 276. DOI: 10.13491/j.cnki.issn.1004-714X.2015.03.036.
- Zhao QW, Wang GQ. Investigation and analysis of the radiation environmental impact of uranium mining and metallurgy retirement places of Yili Xinjiang[J]. Chin J Radiol Health, 2015, 24 (3): 271-272, 276. DOI: 10.13491/j.cnki.issn.1004-714X.2015.03.036.
- [9] 张燕齐, 潘竞舜, 潘自强, 等. 某钒厂石煤原矿样品中 $^{210}\text{Po}$ 的分析[J]. 中国辐射卫生, 2020, 29 (1): 61-64. DOI: 10.13491/j.cnki.issn.1004-714X.2020.01.014.
- Zhang YQ, Pan JS, Pan ZQ, et al. Analysis of  $^{210}\text{Po}$  in stone coal material from a vanadium extracting plant[J]. Chin J Radiol Health, 2020, 29 (1): 61-64. DOI: 10.13491/j.cnki.issn.1004-714X.2020.01.014.
- [10] 王玉学, 郭冬发, 王哲, 等. 铜箔恒温自沉积总 $\alpha$ 、总 $\beta$ 计数法快速联测岩石、土壤及沉积物样品中的 $^{210}\text{Pb}$ 、 $^{210}\text{Bi}$ 、 $^{210}\text{Po}$ [J]. 铀矿地质, 2013, 29 (3): 179-186, 192. DOI: 10.3969/j.issn.1000-0658.2013.03.009.
- Wang YX, Guo DF, Wang Z, et al. The conjoint and rapid determination of  $^{210}\text{Pb}$ 、 $^{210}\text{Bi}$ 、 $^{210}\text{Po}$  in rock and soil samples with gross  $\alpha$  and  $\beta$  counter spontaneously deposited on Cu foil under constant temperature[J]. Uranium Geol, 2013, 29 (3): 179-186, 192. DOI: 10.3969/j.issn.1000-0658.2013.03.009.
- [11] 廖运璇, 张露, 滕柯延, 等. 环境介质中 $^{210}\text{Po}$ 的分析测定[J]. 铀矿冶, 2013, 32 (4): 221-224. DOI: 10.13426/j.cnki.yky.2013.04.014.
- Liao YX, Zhang L, Teng KY, et al. Determination of  $^{210}\text{Po}$  in environmental materials[J]. Uranium Min Metall, 2013, 32 (4): 221-224. DOI: 10.13426/j.cnki.yky.2013.04.014.
- [12] 王长城, 高翔, 姚勇, 等. 湖南某铀矿山退役治理环境保护监测与分析[J]. 能源研究与管理, 2022 (1): 99-102. DOI: 10.16056/j.2096-7705.2022.01.016.
- Wang CC, Gao X, Yao Y, et al. Investigation and analysis of environmental radioactivity for a decommissioned uranium mine in Hunan province[J]. Energy Res Manag, 2022 (1): 99-102. DOI: 10.16056/j.2096-7705.2022.01.016.
- [13] 李鹏翔, 李周, 张静, 等. 气溶胶中 $^{210}\text{Po}$ 测定的不确定度评定[J]. 四川环境, 2019, 38 (6): 1-5. DOI: 10.14034/j.cnki.schj.2019.06.001.
- Li PX, Li Z, Zhang J, et al. Uncertainty evaluation for the determination of  $^{210}\text{Po}$  in aerosols[J]. Sichuan Environ, 2019, 38 (6): 1-5. DOI: 10.14034/j.cnki.schj.2019.06.001.
- [14] 中华人民共和国工业和信息化部. EJ/T 751—2014 放射性矿产地质分析测试实验室质量保证规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- Ministry of Industry and Information Technology. EJ/T 751—2014 Specification for testing quality assurance of radioactive geological laboratories[S]. Beijing: Standards Press of China, 2014.
- [15] 张扬. 某铀尾矿库周边环境 $^{210}\text{Po}$ 和 $^{210}\text{Pb}$ 的分布特征研究[D]. 南昌: 东华理工大学, 2017.
- Zhang Y. Study on distribution characteristics of  $^{210}\text{Po}$  and  $^{210}\text{Pb}$  in the surrounding environment of a uranium tailings[D]. Nanchang: East China University of Technology, 2017.
- [16] 颜家全, 聂辉兰, 刘红志. 湖南未耕种土壤中 $^{234}\text{U}$ 、 $^{238}\text{U}$ 、 $^{226}\text{Ra}$ 、 $^{210}\text{Po}$ 和 $^{210}\text{Pb}$ 的分布和移动规律的研究[J]. 中国环境监测, 1997, 13 (1): 45-47. DOI: 10.19316/j.issn.1002-6002.1997.01.018.
- Yan JQ, Nie HL, Liu HZ. The study of distributional  $^{234}\text{U}$ 、 $^{238}\text{U}$ 、 $^{226}\text{Ra}$ 、 $^{210}\text{Po}$ 、 $^{210}\text{Pb}$  in soil and the migration law[J]. Environ Monitor China, 1997, 13 (1): 45-47. DOI: 10.19316/j.issn.1002-6002.1997.01.018.
- [17] 马盼军, 王哲, 易发成, 等. 某铀尾矿库周边土壤中铀元素的空间分布与污染评价[J]. 原子能科学技术, 2017, 51 (5): 956-960. DOI: 10.7538/yzk.2017.51.0956.
- Ma PJ, Wang Z, Yi FC, et al. Spatial distribution and pollution assessment of Uranium in Soil around Uranium tailings[J]. Atom Energy Sci Technol, 2017, 51 (5): 956-960. DOI: 10.7538/yzk.2017.51.0956.
- [18] 张乾, 杨亚新, 张卫民, 等. 退役铀尾矿库周边环境的放射性水平调查与分析[J]. 科学技术与工程, 2020, 20 (10): 4166-4171. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2020.10.056.
- Zhang Q, Yang YX, Zhang WM, et al. Investigation and analysis on radioactivity around decommissioned uranium tailings pond[J]. Sci Technol Eng, 2020, 20 (10): 4166-4171. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2020.10.056.

(收稿日期: 2023-06-11)