

## 滇西某退役铀矿周边环境放射性水平调查

赵桢<sup>1</sup>, 牟胜<sup>2</sup>, 樊芳<sup>2</sup>, 张炳祥<sup>2</sup>, 杨子剑<sup>1</sup>, 武国亮<sup>2</sup>

1. 云南省临沧市疾病预防控制中心, 云南 临沧 677099; 2. 云南省疾病预防控制中心

**摘要:** **目的** 调查滇西某退役铀矿周边环境的放射性水平, 评估其对居民产生的健康风险; **方法** 通过对退役铀矿周边环境的土壤、农作物、水体样品的采集、制备和高纯锗  $\gamma$  能谱仪分析, 给出环境介质中的放射性核素含量; **结果** 土壤中  $^{238}\text{U}$ 、 $^{232}\text{Th}$ 、 $^{226}\text{Ra}$ 、 $^{40}\text{K}$  和  $^{137}\text{Cs}$  的比活度均值分别为 83.0、85.4、71.4、524 和 1.27 Bq/kg; 鲜茶叶中  $^{238}\text{U}$ 、 $^{232}\text{Th}$ 、 $^{226}\text{Ra}$ 、 $^{40}\text{K}$  和  $^{137}\text{Cs}$  的比活度均值分别为 0.061、0.652、0.650、92.5 和 0.061 Bq/kg; 玉米中  $^{238}\text{U}$ 、 $^{232}\text{Th}$ 、 $^{226}\text{Ra}$ 、 $^{40}\text{K}$  和  $^{137}\text{Cs}$  的比活度均值分别为 0.184、0.122、0.302、78.3 和 0.015 Bq/kg; 大白菜中  $^{238}\text{U}$ 、 $^{232}\text{Th}$ 、 $^{226}\text{Ra}$ 、 $^{40}\text{K}$  和  $^{137}\text{Cs}$  的比活度均值分别为 0.090、0.224、0.469、80.0 和 0.011 Bq/kg; 饮用水中  $^{232}\text{Th}$ 、 $^{226}\text{Ra}$  和  $^{40}\text{K}$  的比活度均值分别为 0.146、0.310 和 2.25 Bq/L,  $^{238}\text{U}$  和  $^{137}\text{Cs}$  的比活度低于探测下限。土壤中天然放射性核素所致居民人均外照射年有效剂量为 131  $\mu\text{Sv}/\text{年}$ ; **结论** 退役铀矿周边环境放射性水平在正常本底范围, 对居民造成的健康风险较低。

**关键词:** 退役铀矿; 环境介质; 放射性水平; 风险评估

中图分类号: X591 文献标识码: A 文章编号: 1004-714X(2019)01-0080-05

## Investigation of environmental radioactivity level around a decommissioned uranium mine in western Yunnan

ZHAO Zhen<sup>1</sup>, MU Sheng<sup>2</sup>, FAN Fang<sup>2</sup>, ZHANG Bingxiang<sup>2</sup>, YANG Zijian<sup>1</sup>, WU Guoliang<sup>2</sup>

1. Lincang City Center for Disease Control and Prevention, Lincang 677099 China;

2. Yunnan Center for Disease Control and Prevention

**Abstract:** **Objective** To investigate radioactivity level in the surrounding environment of a decommissioned uranium mine in western Yunnan, and evaluate health risks to residents. **Methods** The crops, soil and water samples were collected and analyzed using HPGe gamma ray spectrometer, to get the radionuclide contents in the environmental medium. **Results** In the samples, the mean specific activities of  $^{238}\text{U}$ 、 $^{232}\text{Th}$ 、 $^{226}\text{Ra}$ 、 $^{40}\text{K}$  and  $^{137}\text{Cs}$  in soil were 83.0, 85.4, 71.4, 524 and 1.27 Bq/kg, respectively; the mean specific activities of  $^{238}\text{U}$ 、 $^{232}\text{Th}$ 、 $^{226}\text{Ra}$ 、 $^{40}\text{K}$  and  $^{137}\text{Cs}$  in fresh tea leaves were 0.061, 0.652, 0.650, 92.5 and 0.061 Bq/kg, respectively; the mean specific activities of  $^{238}\text{U}$ 、 $^{232}\text{Th}$ 、 $^{226}\text{Ra}$ 、 $^{40}\text{K}$  and  $^{137}\text{Cs}$  in maize were 0.184, 0.122, 0.302, 78.3 and 0.015 Bq/kg, respectively; Radioactivity levels of  $^{238}\text{U}$ 、 $^{232}\text{Th}$ 、 $^{226}\text{Ra}$ 、 $^{40}\text{K}$  and  $^{137}\text{Cs}$  in cabbages were 0.090, 0.224, 0.469, 80.0 and 0.011 Bq/kg, respectively; the mean specific activities of  $^{232}\text{Th}$ 、 $^{226}\text{Ra}$  and  $^{40}\text{K}$  in drinking water were 0.146, 0.310 and 2.25 Bq/L, respectively, and the specific activities of the  $^{238}\text{U}$  and  $^{137}\text{Cs}$  in drinking water were lower than the detection lower limit respectively. The average annual effective dose of natural radionuclides in soil was 131  $\mu\text{Sv}$  per year. **Conclusion** The level of radioactivity in the environment around decommissioned uranium mines is within the normal background, which poses low health risks to the residents.

**Key words:** Decommissioned Uranium mine; Environment Mediator; Radioactivity Levels; Risk Assessment

**Corresponding author:** MU Sheng, E-mail: mousheng1966@163.com

人为活动可引起天然辐射源照射的增加, 例如铀矿在开采、利用过程中造成天然放射性核素释放到环境中, 会对周围的公众产生额外的天然辐射源照射<sup>[1-2]</sup>。为掌握滇西某退役铀矿周边环境的放射性水平, 合理估算当地居民的受照剂量, 评价退役铀矿释放

的放射性物质对矿区周围环境和公众健康的影响, 本研究于 2016—2017 年对滇西某退役铀矿周边环境的放射性水平进行了调查和分析。

### 1 材料与方法

1.1 样品采集 样品采集于滇西某退役铀矿周边的自然村。食品样品主要考虑当地居民饮食习惯、种植和养殖等特点,选择种植面积大,生长期长的农作物。在收获季节采集粮食类(玉米)、鲜茶叶和蔬菜类(大白菜),并采集相应地点的表层土壤(0~5 cm),水体选择居民饮用的自来水。

1.2 样品制备 土壤样品的处理,先剔除土壤中的杂草、碎石等异物,经 105℃ 烘干至恒重,粉碎、研磨、60 目过筛,称重后装入与刻度谱仪的体标准源相同形状和体积(直径 75 mm × 高 70 mm)的样品盒中,密封 3 周后测量。

食品样品的处理,取可食部分,称重,放入清洁不锈钢盘内置于 105℃ 干燥箱内烘干,移至电热板上炭化,无烟后转移到蒸发皿中,在 400℃ 马弗炉内灰化至样品变为疏松的灰白色,灰化好的样品在干燥器内冷却后称重,计算灰样(或灰鲜)比,装入与标准刻度源相同的样品盒(直径 75 mm × 高 35 mm),密封后备测。

水样的制备,5 L 洁净的聚乙烯桶内加入适量的硝酸,水样装满,摇匀。水样分次加入 2 000 ml 烧杯,使水样体积不超过烧杯容积的一半,在可调温电热板上加热,于微沸条件下蒸发浓缩,全部水样浓缩至约 240 ml 装入与标准刻度源相同的样品盒(直径 75 mm × 高 70 mm),密封后备测。

1.3 仪器与方法 采用 CANBERRA 公司生产的 BE3830 型高纯锗  $\gamma$  能谱仪,其对于 NaI (Tl) 晶体 7.62 cm × 7.62 cm (3 in × 3 in) 的相对探测效率为 30%,对  $^{60}\text{Co}$  1 332 keV  $\gamma$  射线的能量分辨率为 1.9 keV,积分本底为 155 cpm (50~2 000 keV)。样品测量方法参照国家标准<sup>[3-6]</sup>,样品测量时间为 86 400 s。

测量前,用刻度源对  $\gamma$  谱仪进行能量刻度,刻度范围为 40~2 000 keV,用  $^{238}\text{U}$ 、 $^{226}\text{Ra}$ 、 $^{232}\text{Th}$ 、 $^{40}\text{K}$  和  $^{137}\text{Cs}$  活度已知的体标准源进行全能峰效率刻度,所用标准源的基体材料、几何尺寸、密度与测量样品基本一致。采用全能峰相对比较法求解样品中放射性核素比活度,样品中  $^{238}\text{U}$ 、 $^{226}\text{Ra}$ 、 $^{232}\text{Th}$ 、 $^{40}\text{K}$ 、 $^{137}\text{Cs}$  的特征峰分别选取 63.3、352.0、609.4、583.1、911.1、1460.8、661.6 keV。

对于样品中核素活度低于仪器探测下限者,给出仪器的探测下限值。在置信概率为 95% 情况下根据文献<sup>[6]</sup>的计算方式而得,如公式(1)。

$$LLD = \frac{2.83K}{\varepsilon \cdot P} \sqrt{n_b/T_b} \quad (1)$$

式中, $\varepsilon$  为  $\gamma$  射线全吸收峰探测效率; $P$  为该核素所选特征  $\gamma$  射线的发射概率, $n_b$  为该核素所选特征  $\gamma$

射线全吸收峰能区内的本底计数率, $s^{-1}$ ;  $T_b$  为本底测量时间, $s$ 。

1.4 地表  $\gamma$  辐射所致年有效剂量估算 人类受到的天然外照射主要决定于土壤中的天然放射性核素  $^{238}\text{U}$ 、 $^{226}\text{Ra}$ 、 $^{232}\text{Th}$ 、 $^{40}\text{K}$  的比活度。由于  $^{238}\text{U}$  到  $^{226}\text{Ra}$  之间核素对  $\gamma$  辐射剂量的贡献仅占 U 系的 1.6%<sup>[7]</sup>,在计算空气吸收剂量率时仅考虑  $^{226}\text{Ra}$  及其子体的贡献,这里假设土壤中天然放射性物质分布均匀,且天然放射性衰变链基本达到平衡。另外人工放射性核素  $^{137}\text{Cs}$  在土壤样品中仅有部分微量检出,因此在估算由土壤中放射性核素所致地表 1 m 处空气吸收剂量率时,对  $^{137}\text{Cs}$  的贡献可忽略。剂量转换系数选用 UNSCEAR 2000 年报告中的参数<sup>[8]</sup>,其计算公式如下:

$$D = 0.0417C_k + 0.462C_{Ra} + 0.604C_{Th} \quad (2)$$

式中, $D$  为离地面 1 m 处空气吸收剂量率, nGy/h;  $C_k$ 、 $C_{Ra}$ 、 $C_{Th}$  分别为土壤中  $^{40}\text{K}$ 、 $^{226}\text{Ra}$ 、 $^{232}\text{Th}$  的比活度, Bq/kg。系数 0.0417、0.462、0.604 分别是  $^{40}\text{K}$ 、 $^{226}\text{Ra}$ 、 $^{232}\text{Th}$  的比活度到离地面 1 m 处空气吸收剂量率的转换系数 ( $\text{nGy} \cdot \text{h}^{-1}$ ) / ( $\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ )。

根据公式(2)计算的结果,采用公式(3)估算土壤中地表  $\gamma$  辐射所致人均年有效剂量<sup>[9]</sup>。

$$E_{out} = D \times 0.7 \times 0.2 \times 24 \times 365 \quad (3)$$

式中, $E_{out}$  为地表  $\gamma$  辐射所致人均年有效剂量, Sv;  $D$  为由公式(2)估算的室外离地面 1 m 处空气吸收剂量率, nGy/h; 0.7 为空气吸收剂量率到有效剂量的转换系数<sup>[8]</sup>, 成人为 0.7 Sv/Gy, 0.2 为室外停留因子, 24 × 365 为以小时为单位的一年时间。

1.5 质量保证 所用仪器经计量部门检定;参加由中国疾控中心辐射安全所组织的实验室间比对,结果合格;定期使用可溯源的标准物质对系统进行工作状态检查,确保仪器性能指标正常。

## 2 结果

2.1 土壤放射性水平 土壤中  $^{238}\text{U}$  的比活度为 50.4~183 Bq/kg, 均值为 83.0 Bq/kg;  $^{232}\text{Th}$  的比活度为 50.6~172 Bq/kg, 均值为 85.4 Bq/kg;  $^{226}\text{Ra}$  的比活度为 47.6~165 Bq/kg, 均值为 71.4 Bq/kg;  $^{40}\text{K}$  的比活度为 293~776 Bq/kg, 均值为 524 Bq/kg;  $^{137}\text{Cs}$  的比活度为  $\leq \text{LLD}$  ~2.45 Bq/kg, 均值为 1.27 Bq/kg。在调查的 3 个区域土壤样品中,玉米地土壤中  $^{238}\text{U}$ 、 $^{232}\text{Th}$ 、 $^{226}\text{Ra}$  和  $^{40}\text{K}$  的比活度高于茶叶地和蔬菜地,  $^{137}\text{Cs}$  在调查区域内土壤中均有微量检出。见表 1。

表 1 土壤样品中放射性核素比活度\* (Bq/kg, 比活度 ± 扩展不确定度)

调查区域	样品编号	<sup>238</sup> U	<sup>232</sup> Th	<sup>226</sup> Ra	<sup>40</sup> K	<sup>137</sup> Cs
茶叶地	1	56.9 ± 4.2	52.9 ± 4.2	70.3 ± 5.3	588 ± 43	< 0.44
	2	60.1 ± 4.4	93.7 ± 7.2	49.8 ± 3.9	293 ± 22	2.31 ± 0.17
	3	68.5 ± 5.0	72.1 ± 5.4	65.6 ± 5.0	471 ± 35	0.80 ± 0.06
	4	50.4 ± 3.7	82.2 ± 6.3	65.0 ± 4.9	586 ± 43	< 0.44
	5	54.3 ± 4.0	50.6 ± 3.9	63.7 ± 4.8	586 ± 43	2.38 ± 0.17
	均值	58.0	70.3	62.9	505	1.19 **
玉米地	1	62.0 ± 4.6	74.7 ± 5.9	47.6 ± 3.7	534 ± 39	< 0.51
	2	106.2 ± 7.8	95.0 ± 7.5	72.7 ± 5.6	475 ± 35	1.82 ± 0.13
	3	183 ± 14	172 ± 13	165 ± 13	693 ± 51	< 0.57
	4	153 ± 12	82.8 ± 6.1	95.4 ± 7.3	585 ± 43	1.13 ± 0.08
	5	110.3 ± 8.1	77.9 ± 6.1	72.8 ± 5.5	776 ± 57	< 0.48
	均值	122.9	100.5	90.7	613	0.75 **
蔬菜地	1	93.4 ± 6.8	86.6 ± 6.5	67.3 ± 4.9	525 ± 39	1.53 ± 0.11
	2	66.1 ± 4.8	87.4 ± 6.4	53.1 ± 4.0	366 ± 27	2.45 ± 0.18
	3	56.3 ± 4.1	81.1 ± 6.1	66.4 ± 4.9	443 ± 33	1.68 ± 0.12
	4	56.1 ± 4.1	93.0 ± 7.1	53.9 ± 4.0	492 ± 36	1.63 ± 0.12
	5	68.2 ± 5.0	79.3 ± 6.2	62.8 ± 4.8	446 ± 33	2.08 ± 0.15
	均值	68.0	85.5	60.7	454	1.87
均值		83.0	85.4	71.4	524	1.27

注: \* 比活度扩展不确定度的包含因子为  $k=2$ , < 探测下限 (LLD), \*\* 对于低于探测下限的样品, 取探测下限 1/2 参加均值计算<sup>[10]</sup>。

2.2 地表  $\gamma$  辐射所致外照射剂量 根据表 1 中数据, 采用公式 (2) 和 (3) 估算。由土壤中天然核素的比活度计算室外距地面 1 m 处的空气吸收剂量率为 64.8 ~ 212.5  $\mu\text{Gy/h}$ , 均值为 106.4  $\mu\text{Gy/h}$ 。天然  $\gamma$  辐射所致室外人均年有效剂量为 79.5 ~ 261  $\mu\text{Sv/a}$ , 均值为 131  $\mu\text{Sv/a}$ 。

2.3 鲜茶叶放射性水平 2016 年和 2017 年两次调

查, 由于未发现明显变化, 将其结果平均取均值。在部分鲜茶叶样品中检出微量的 <sup>238</sup>U, 其最高值为 0.244 Bq/kg; <sup>232</sup>Th 的比活度为 0.408 ~ 0.851 Bq/kg, 均值为 0.652 Bq/kg; <sup>226</sup>Ra 的比活度为 0.285 ~ 0.925 Bq/kg, 均值为 0.650 Bq/kg; <sup>40</sup>K 的比活度为 60.7 ~ 124.8 Bq/kg, 均值为 92.5 Bq/kg; <sup>137</sup>Cs 的比活度为 ≤ LLD ~ 0.152 Bq/kg, 均值为 0.061 Bq/kg。见表 2。

表 2 鲜茶叶样品中放射性核素比活度\* (Bq/kg 鲜重, 比活度 ± 扩展不确定度)

样品编号	<sup>238</sup> U	<sup>232</sup> Th	<sup>226</sup> Ra	<sup>40</sup> K	<sup>137</sup> Cs
2016-01	< 0.023	0.851 ± 0.063	0.723 ± 0.053	87.9 ± 6.4	< 0.028
2016-02	< 0.018	0.599 ± 0.046	0.510 ± 0.037	71.4 ± 5.2	0.083 ± 0.006
2016-03	0.119 ± 0.009	0.554 ± 0.043	0.925 ± 0.068	60.7 ± 4.4	0.152 ± 0.011
2016-04	< 0.024	0.599 ± 0.047	0.736 ± 0.054	85.9 ± 6.3	0.074 ± 0.005
2016-05	< 0.022	0.750 ± 0.058	0.501 ± 0.038	86.0 ± 6.3	0.060 ± 0.004
2017-01	< 0.026	0.463 ± 0.044	0.450 ± 0.034	106.5 ± 7.8	0.045 ± 0.003
2017-02	< 0.024	0.408 ± 0.035	0.285 ± 0.021	101.5 ± 7.4	< 0.029
2017-03	0.165 ± 0.012	0.848 ± 0.077	0.846 ± 0.062	101.9 ± 7.4	0.043 ± 0.003
2017-04	< 0.022	0.813 ± 0.065	0.686 ± 0.050	98.1 ± 7.2	0.054 ± 0.004
2017-05	0.244 ± 0.018	0.633 ± 0.068	0.837 ± 0.061	124.8 ± 9.1	0.064 ± 0.005
均值	0.061 **	0.652	0.650	92.5	0.061 **

注: \* 比活度扩展不确定度的包含因子为  $k=2$ , < 探测下限 (LLD), \*\* 对于低于探测下限的样品, 取探测下限 1/2 参加均值计算<sup>[10]</sup>。

2.4 玉米放射性水平 10 份玉米样品有 2 份检出 <sup>238</sup>U, 其最大值为 1.51 Bq/kg; 部分样品检出微量的 <sup>232</sup>Th, 其最大值为 0.582 Bq/kg; <sup>226</sup>Ra 的比活度为 0.057 ~ 1.02 Bq/kg, 均值为 0.302 Bq/kg; <sup>40</sup>K 的比活

度为 38.3 ~ 126.7 Bq/kg, 均值为 78.3 Bq/kg。10 份样品仅有 1 份检出 <sup>137</sup>Cs, 其值为 0.049 Bq/kg。见表 3。

2.5 大白菜放射性水平 矿区周边种植的大白菜的

监测结果见表 4。大白菜中<sup>238</sup>U 的比活度为 $\leq$ LLD ~ 0.198 Bq/kg,均值为 0.090 Bq/kg;<sup>232</sup>Th 的比活度为 0.104 ~ 0.318 Bq/kg,均值为 0.224 Bq/kg;<sup>226</sup>Ra 的比活

度为 0.204 ~ 0.885 Bq/kg,均值为 0.469 Bq/kg;<sup>40</sup>K 的比活度为 68.1 ~ 98.8 Bq/kg,均值为 80.0 Bq/kg。5 份样品仅有 1 份检出<sup>137</sup>Cs,其值为 0.022 Bq/kg。

表 3 玉米样品中放射性核素比活度\* (Bq/kg 干重,比活度 $\pm$ 扩展不确定度)

样品编号	<sup>238</sup> U	<sup>232</sup> Th	<sup>226</sup> Ra	<sup>40</sup> K	<sup>137</sup> Cs
2016-01	<0.024	<0.073	0.254 $\pm$ 0.019	50.0 $\pm$ 3.6	<0.023
2016-02	<0.028	0.108 $\pm$ 0.009	0.147 $\pm$ 0.011	56.1 $\pm$ 4.1	<0.022
2016-03	<0.038	<0.086	0.063 $\pm$ 0.005	38.3 $\pm$ 2.8	<0.026
2016-04	<0.040	<0.094	0.143 $\pm$ 0.011	50.1 $\pm$ 3.7	<0.027
2016-05	<0.039	<0.101	0.057 $\pm$ 0.005	65.3 $\pm$ 4.8	<0.027
2017-01	<0.026	<0.088	1.02 $\pm$ 0.008	99.7 $\pm$ 7.3	<0.018
2017-02	0.201 $\pm$ 0.014	<0.098	0.196 $\pm$ 0.016	101.0 $\pm$ 7.4	<0.022
2017-03	<0.031	0.155 $\pm$ 0.012	0.163 $\pm$ 0.013	126.7 $\pm$ 9.3	<0.021
2017-04	1.51 $\pm$ 0.11	0.582 $\pm$ 0.043	0.909 $\pm$ 0.066	87.9 $\pm$ 6.4	0.049 $\pm$ 0.004
2017-05	<0.029	0.106 $\pm$ 0.009	0.070 $\pm$ 0.006	108.0 $\pm$ 7.9	<0.020
均值	0.184**	0.122**	0.302	78.3	0.015**

注:\* 比活度扩展不确定度的包含因子为 $k=2$ , < 探测下限(LLD), \*\* 对于低于探测下限的样品,取探测下限 1/2 参加均值计算<sup>[10]</sup>。

表 4 大白菜样品中放射性核素比活度\* (Bq/kg 鲜重,比活度 $\pm$ 扩展不确定度)

样品编号	<sup>238</sup> U	<sup>232</sup> Th	<sup>226</sup> Ra	<sup>40</sup> K	<sup>137</sup> Cs
1	0.109 $\pm$ 0.008	0.104 $\pm$ 0.013	0.204 $\pm$ 0.017	74.1 $\pm$ 5.4	<0.017
2	<0.045	0.219 $\pm$ 0.029	0.388 $\pm$ 0.029	68.1 $\pm$ 5.0	0.022 $\pm$ 0.002
3	<0.044	0.172 $\pm$ 0.023	0.329 $\pm$ 0.025	77.9 $\pm$ 5.7	<0.015
4	0.198 $\pm$ 0.014	0.318 $\pm$ 0.037	0.537 $\pm$ 0.040	81.1 $\pm$ 6.0	<0.015
5	0.100 $\pm$ 0.007	0.306 $\pm$ 0.040	0.885 $\pm$ 0.065	98.8 $\pm$ 7.2	<0.016
均值	0.090**	0.224	0.469	80.0	0.011**

注:\* 比活度扩展不确定度的包含因子为 $k=2$ , < 探测下限(LLD), \*\* 对于低于探测下限的样品,取探测下限 1/2 参加均值计算<sup>[10]</sup>。

2.6 饮用水放射性水平 饮用水中<sup>238</sup>U 和<sup>137</sup>Cs 的活度均低于探测下限;<sup>232</sup>Th 的比活度为 0.114 ~ 0.180 Bq/L,均值为 0.146 Bq/L;<sup>226</sup>Ra 的比活度为 0.296 ~

0.329 Bq/L,均值为 0.310 Bq/L;<sup>40</sup>K 的比活度为 2.16 ~ 2.34 Bq/L,均值为 2.25 Bq/L。见表 5。

表 5 饮用水样品中放射性核素比活度\* (Bq/L,比活度 $\pm$ 扩展不确定度)

编号	采样体积(L)	<sup>238</sup> U	<sup>232</sup> Th	<sup>226</sup> Ra	<sup>40</sup> K	<sup>137</sup> Cs
01	5.00	<0.031	0.114 $\pm$ 0.018	0.305 $\pm$ 0.029	2.16 $\pm$ 0.16	<0.024
02	5.00	<0.031	0.145 $\pm$ 0.022	0.322 $\pm$ 0.028	2.22 $\pm$ 0.16	<0.024
03	5.00	<0.031	0.167 $\pm$ 0.020	0.329 $\pm$ 0.029	2.26 $\pm$ 0.16	<0.024
04	5.00	<0.031	0.125 $\pm$ 0.020	0.296 $\pm$ 0.029	2.26 $\pm$ 0.16	<0.024
05	5.00	<0.031	0.180 $\pm$ 0.024	0.296 $\pm$ 0.027	2.34 $\pm$ 0.17	<0.024
均值	5.00	<0.031	0.146	0.310	2.25	<0.024

注:\* 比活度扩展不确定度的包含因子为 $k=2$ , < 探测下限(LLD)。

### 3 讨论

铀矿在开采过程中释放出来的天然放射性核素污染范围可能局限在某一局部地区,对人体产生外照射和内照射,在靠近开采区附近的居民可能受到明显增加的外照射剂量<sup>[1,11]</sup>。因此,监测退役铀矿周边环境的放射性水平对评估当地居民的健康影响具有重要意义,同时也是了解和控制放射性污染情况的重要

依据。

矿区周边土壤中天然核素<sup>238</sup>U、<sup>232</sup>Th、<sup>226</sup>Ra、<sup>40</sup>K 和人工核素<sup>137</sup>Cs 的放射性水平与文献[12]报道一致,天然核素高于文献[9,13-14]而远低于文献[15]的报道。当地居民接受的来自土壤 $\gamma$ 辐射所致室外年有效剂量与文献[12]报道一致,高于文献[9,13-14]而低于文献[16]的报道。土壤中放射性核素含量和环境辐射处于正常本底范围。

矿区周边种植的农作物中 $^{238}\text{U}$ 、 $^{226}\text{Ra}$ 、 $^{232}\text{Th}$ 、 $^{40}\text{K}$ 和 $^{137}\text{Cs}$ 的放射性水平与文献[10,17-18]报道一致,天然核素与文献[19]相比结果互有高低。所监测的农作物中天然放射性核素和人工放射性核素的含量均低于 GB 14882-94《食品中放射性物质限制浓度标准》<sup>[20]</sup>中的限值。

检测的饮用水中 $^{226}\text{Ra}$ 、 $^{232}\text{Th}$ 和 $^{40}\text{K}$ 的放射性水平高于文献[7,10],分析原因,可能与水源为山泉水有关,有待进一步调查。饮用水中 $^{238}\text{U}$ 和 $^{137}\text{Cs}$ 的放射性水平与文献[7,10]报道一致。饮用水的放射性水平处于正常本底范围内,未见异常。

本调查结果表明,滇西某退役铀矿周边环境放射性水平属于正常本底水平,未发现明显的放射性污染,对当地居民造成的健康风险较低。

#### 参考文献

- [1] 姜德智. 放射卫生学[M]. 苏州: 苏州大学出版社, 2003.
- [2] 夏益华. 电离辐射防护基础与实践[M]. 北京: 原子能出版社, 2011.
- [3] 国家质量监督检验检疫总局. GB/T 11743-2013 土壤中放射性核素的 $\gamma$ 能谱分析方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [4] 中华人民共和国卫生部. GB/T 16145-1995 生物样品中放射性核素的 $\gamma$ 能谱分析方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1996.
- [5] 中华人民共和国卫生部. GB/T 16140-1995 水中放射性核素的 $\gamma$ 能谱分析方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1996.
- [6] 国家质量监督检验检疫总局. GB/T 11713-2015 高纯锗 $\gamma$ 能谱分析通用方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [7] 周强, 李文红, 张京, 等. 云南省部分地区环境放射性水平调查及居民所受外照射剂量估算[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2011, 31(5): 590-594.
- [8] UNSCEAR. Report 2000. 电离辐射源与效应[M]. 太原: 山西科学技术出版社, 2002.
- [9] 李文红, 周强, 张京, 等. 海南部分地区土壤样品中放射性水平调查[J]. 中国辐射卫生, 2016, 25(2): 136-139.
- [10] 刘玉兰, 徐宁, 胡爱英. 我国食品和水中的天然放射性核素水平的调查[J]. 中华放射医学与防护杂志, 1988, 8(S1): 1-14.
- [11] 潘自强. 电离辐射环境监测与评价[M]. 北京: 原子能出版社, 2007.
- [12] 张淑蓉, 潘京全, 李允兴, 等. 我国土壤中放射性核素水平及分布[J]. 中华放射医学与防护杂志, 1988, 8(S2): 1-15.
- [13] 彭帮保, 颜强, 李桃生, 等. 东北地区土壤中放射性核素含量的抽样测量与分析[J]. 中国辐射卫生, 2014, 23(1): 42-46.
- [14] 李紫丰, 哈日巴拉, 格日勒满达呼, 等. 呼和浩特市城区表层土壤和环境辐射水平调查[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2017, 37(6): 461-465.
- [15] 赵新春, 冯兰英, 马一龙, 等. 桂北某铀矿周围主要农产品放射性水平检测分析[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2016, 36(12): 925-928.
- [16] 王顺生, 喻亦林. 临翔城区环境 $\gamma$ 辐射剂量率[J]. 中国辐射卫生, 2013, 22(1): 70-72.
- [17] 唐丽, 武国亮, 徐文萍, 等. 云南某铀矿退役环境保护区周边食品放射性水平分析[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2018, 38(5): 364-367.
- [18] 冯兰英, 马一龙, 雷家杰, 等. 广西防城港核电站运行前周边地区食品放射性水平及所致居民剂量估算[J]. 中国辐射卫生, 2017, 26(5): 511-514.
- [19] 崔凡, 刘彦兵, 吴自香, 等. 珠三角地区食品中天然放射性核素 $^{238}\text{U}$ 、 $^{232}\text{Th}$ 、 $^{226}\text{Ra}$ 、 $^{40}\text{K}$ 所致居民内照射剂量估算[J]. 中国辐射卫生, 2017, 26(3): 282-283.
- [20] 中华人民共和国卫生部. GB 14882-94 食品中放射性物质限制浓度标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 1994.

收稿日期: 2018-10-15