

某矿山辐射环境现状的评估

覃国秀 刘庆成 徐海峰 陈宁

(东华理工大学核工程技术学院 抚州 344000)

摘要 为了弄清某矿山的辐射环境现状,在2005年5月至2007年5月期间,使用各种辐射监测仪器对该矿山的工作场所和生活区分别进行氡及其子体浓度、 γ 辐射水平、土壤和岩石中天然放射性核素含量的测量。结果表明,在所监测的工作场所中,大部分监测点的氡及其子体浓度和 γ 辐射水平低于核工业辐射环境质量评价中的管理限值;在居民区,扣除本底后所有监测点的个人剂量也都低于核工业辐射环境质量评价中的管理限值。

关键词 氡及其子体, γ 辐射水平, 天然放射性核素, 评估

中图分类号 TL75⁺1, TD167, TL72, TL75⁺2

现在,世界上许多国家都在开采铀矿。作为一种放射性矿物,铀矿的开采会给我们带来许多环境问题。而其对环境污染的最特别之处在于铀矿物本身具有放射性。我国从铀矿的开采初期就比较重视铀矿开采所带来的环境问题^[1]。但是,对于核设施所产生的中和高放废物的处理还不是很完善,需要加强研究力度。同时,低放废物的处理也存在问题,在废气处理中呈现通风效率不高,排放废水中的部分有害核素还未达标,废石处置技术有待完善^[2]。本文重点研究了铀矿山不同污染源的辐射剂量贡献。通过对实测数据分析处理,对铀矿山开采过程及退役治理后矿山污染源对环境的污染给出正确的评估,为降低铀矿山辐射危害防护及退役治理所需费用,为铀矿山周边环境提供依据。

1 矿山概况

该矿是一个国有大型铀矿采选和冶炼的联合企业,位于丘陵地带,区内地势陡峻,山涧星罗棋布,河溪纵横交错,区域地貌由于地壳运动多次复活,形成数量繁多的陡崖峭壁及其落差不一的大小瀑布的跌水。该矿区地层主要是前泥盆系的变质岩系,千枚岩、石英岩等为主组成褶皱基底,在其上部一些凹陷区形成盆地。矿区气候属季风型的中亚热带和南亚热带气候,气候温和潮湿,雨量充沛,无霜期长,具有山地气候特征。矿区地形复杂,山谷风明显,冬季主要为东北风或北风,夏季主要为西南

风或南风。该矿原来共有6个矿井,采用的主要采矿方法是水平分层干式充填法和保留矿法,目前仍在生产的尚有2个矿井,其余的4个矿井由于各种原因已退役,但是没有进行治理。尚在生产的矿井是1号和2号矿井。

2 测量方法与仪器

2.1 测量方法

在2005~2007年期间,使用各种辐射监测仪器对该矿山各工作场所(工业场地、尾矿坝)和生活区进行连续测量。监测的项目包括:环境空气中氡及其子体浓度、 γ 辐射水平、土壤和岩石中天然放射性核素的含量。此外将80km外的某城市测量作为对照点数据,并通过计算辐射剂量(氡及其子体吸入所致内照射剂量和 γ 外照射剂量)来评价该铀矿山周边辐射环境现状。为了体现调查的广泛性、代表性和准确性,本次调查采取全面质量保证措施。在测量 γ 辐射水平时,对仪器进行了刻度校准,并按实际情况将每个监测点划分成若干单元;在每个单元,探头向下距离地面1m,每10s读数1次,共读10次,其均值为该单元的测量值。土壤样品的测量则采取了外检等措施,这些措施对保证调查质量起到了良好的作用。

2.2 测量仪器

2.2.1 DHZM-I型氡及其子体监测仪 DHZM-I型

科技部国家社会公益项目(2005DIB21221)资助

第一作者:覃国秀,男,1981年12月出生,2005年7月毕业于成都理工大学应用核技术与自动化工程学院,核工程与核技术专业,现就职于东华理工大学核工程技术学院核技术应用专业

收稿日期:初稿 2008-03-10,修回 2008-08-13

氡及其子体监测仪采用的是硅探测器，是一种实用新型仪器，其测量量程范围为氡浓度 $3.0 \text{ Bq/m}^3 \sim 10 \text{ MBq/m}^3$ ，氡子体浓度 $1.0 \text{ Bq/m}^3 \sim 1 \text{ MBq/m}^3$ ；探测下限为 5.0 Bq/m^3 (氡浓度)， 1.5 Bq/m^3 (氡子体浓度)， $0.80 \times 10^{-8} \text{ J/m}^3$ (α 潜能)。

2.2.2 BH3013A 便携式 X- γ 剂量率仪 BH3013A 便携式 X- γ 剂量率仪用于 γ 辐射水平的测量，使用前已经过国家基准刻度和仪器本底的校准，仪器本底测定使用铅屏蔽法，其本底为 $3.3 \times 10^{-8} \text{ Gy/h}$ 。该仪器的能量响应范围为 $36 \text{ keV} \sim 3 \text{ MeV}$ ；对宇宙射线响应的限值为 $\pm 15\%$ (相对于 RS-111 高压电离室)；量程范围为 $0 \sim 10000 \times 10^{-8} \text{ Gy/h}$ ；剂量率指示的固有误差为约定值的 $\pm 10\%$ ；使用环境温度为 $-10^\circ\text{C} \sim +40^\circ\text{C}$ ，以及指示值变化的限值为 $\pm 30\%$ 。

2.2.3 HPGe 低本底 γ 能谱仪 对于土壤或岩石样

品中的放射性核素分析，本文使用美国 ORTEC 公司生产的 16000 道 HPGe 低本底 γ 能谱仪。该能谱仪的主要技术参数：相对效率为 40% ，能量分辨率为 1.9 keV (^{60}Co 1332 keV γ 射线)，探测下限分别为对 ^{238}U (20 Bq/kg)；对 ^{232}Th (8 Bq/kg)；对 ^{226}Ra (12 Bq/kg)。

3 结果分析

3.1 氡及其子体测量结果分析

该矿山各矿井工业场地和生活区环境空气中氡及其子体浓度和年有效剂量见表 1。该矿山对于氡及其子体的监测频率是每个季度一次，表 1 的监测数据是该矿山在 2005~2007 年连续监测结果的平均值。

Table 1 Concentrations of radon and its daughters and annual effective dose

Monitoring point	Radon / $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$	Radon daughters / $\text{J}\cdot\text{m}^{-3}$	Equilibrium factor	Annual effective dose / mSv
No.1 industrial site	201.1	2.68×10^{-7}	0.24	1.61
No.1 living area	27.2	8.53×10^{-8}	0.56	2.08
No.2 industrial site	264.4	3.48×10^{-7}	0.23	2.08
No.2 living area	27.7	8.43×10^{-8}	0.54	2.04
No.3 industrial site	172.4	5.04×10^{-8}	0.05	0.30
No.3 living area	26.0	7.64×10^{-8}	0.52	1.85
No.4 industrial site	102.7	1.36×10^{-7}	0.24	0.82
No.4 living area	23.3	6.88×10^{-8}	0.53	1.69
No.5 industrial site	193.5	9.16×10^{-8}	0.08	0.55
No.5 living area	22.4	8.22×10^{-8}	0.65	2.07
No.6 industrial site	148.5	8.56×10^{-8}	0.10	0.51
No.6 living area	19.8	5.65×10^{-8}	0.51	1.38
Tailing Dam	319.6	6.01×10^{-7}	0.34	3.61
Contrast point	17.4	8.16×10^{-8}	0.58	1.38

由表 1 氡及其子体的浓度数据可以看出，目前尚在生产的 1 号和 2 号矿井工业场地环境空气中氡的浓度全都低于《铀矿冶辐射防护规定》(EJ 993-96) 给出的矿山生产作业面的限值 1000 Bq/m^3 ，而氡子体浓度也全都低于规定的 $3 \mu\text{J/m}^3$ 。退役的几个矿井与在产矿井的区别不是很大，其中 5 号矿井工业场地环境空气中氡的浓度最高，4 号矿井的浓度最低。至于尾矿坝，其环境空气中氡及其子体浓度是最高的。尾矿坝是堆放尾矿的地方，尾矿中含有大量的

放射性核素，其中镭的含量很高，一般可以达到 $8500 \sim 55000 \text{ Bq/kg}$ ，氡气的析出率一般为 $1.85 \sim 16.53 \text{ Bq}/(\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1})$ ^[3]。但是，在坝顶测得的氡及其子体浓度之所以不是很高，是因为除了坝顶通风效果较好之外，尾矿坝中的尾矿还被水所覆盖，阻碍了氡的析出。此外，各矿井生活区环境空气中氡及其子体的浓度差别不大，其中氡浓度最高的是 2 号生活区，最低的是 6 号生活区。与对照点相比，各矿井生活区氡及其子体浓度并不算很高。应用核工业

辐射环境评价估算模式, 计算该矿山氡及其子体吸入所致个人内照射剂量, 结果显示, 对于工作场所, 所有监测点矿工的個人内照射剂量, 均在国家规定的辐射工作人员的剂量限值(20 mSv)^[4]范围内。尚在生产的矿井中, 2 号矿井氡及其子体所致矿工个人剂量最大, 两项相加达 2.08 mSv, 该矿山矿工对氡及其子体吸入所致的最大个人剂量出现在尾矿坝, 其值为 3.61 mSv, 远低于国家规定的限值。对于居民区, 在扣除了本底即对照点的个人剂量后, 矿山氡及其子体排放所致矿区居民最大个人剂量为 0.70mSv, 低于核工业辐射环境质量评价的管理限值 1 mSv。

3.2 γ 辐射水平结果分析

表 2 的数据表明, 该矿山各监测点的 γ 辐射水平对比中, 工作场所比生活区高。 γ 辐射水平最高

的是尾矿坝, 其辐射水平为 $256.2\sim 325.8\times 10^{-8}$ Gy/h。各生活区的 γ 辐射水平区别不大, 而且全在管理限值(比对照点高出 20×10^{-8} Gy/h 为限值)范围内。对于生活区, 采用 UNSCREAR1982 年报告书^[5]介绍的模式, 天然 γ 辐射产生的有效剂量率与空气吸收剂量率比值为 0.7 Sv/Gy, 室内、外居民居留因子分别取 0.8 和 0.2。对于工作场所, 其工作时间按国际标淮取 2000 h^[6], 由此估算该矿山由 γ 外照射所致居民和工作人员年有效剂量。计算结果表明, 室外贯穿辐射所致矿区居民年均最大有效剂量为 240.4 ± 28.2 μ Sv, 所致工作人员年均最大剂量为 4250.4 ± 228.2 μ Sv。从室外贯穿辐射所致居民和矿山工作人员年最大有效剂量数据可以看出, 矿山某些地区的 γ 外照射剂量比氡及其子体引起的内照射剂量高。

Table 2 γ radiation level of monitoring places and annual effective dose

Monitoring point	Range of γ radiation / 10^{-8} Gy $\cdot$ h ⁻¹	Mean-value of γ radiation / 10^{-8} Gy $\cdot$ h ⁻¹	Annual effective dose / μ Sv
No.1 industrial site	47.5~115.8	74.7 $\pm$ 19.6	1045.8 $\pm$ 274.4
No.1 living area	14.0~18.0	16.0 $\pm$ 1.8	196.2 $\pm$ 22.1
No.2 industrial site	35.8~129.5	81.3 $\pm$ 24.8	1138.2 $\pm$ 347.2
No.2 living area	10.7~16.4	13.2 $\pm$ 2.0	161.9 $\pm$ 24.5
No.3 industrial site	36.7~99.6	58.6 $\pm$ 19.2	820.4 $\pm$ 268.8
No.3 living area	16.9~22.4	19.6 $\pm$ 2.3	240.4 $\pm$ 28.2
No.4 industrial site	36.5~83.3	53.0 $\pm$ 15.8	742.0 $\pm$ 221.2
No.4 living area	14.1~21.3	16.7 $\pm$ 2.2	204.8 $\pm$ 27.0
No.5 industrial site	30.9~89.2	58.8 $\pm$ 17.0	823.2 $\pm$ 238.0
No.5 living area	14.0~21.2	17.1 $\pm$ 1.5	209.7 $\pm$ 18.4
No.6 industrial site	31.6~104.6	66.4 $\pm$ 20.3	929.6 $\pm$ 284.2
No.6 living area	12.4~18.9	15.5 $\pm$ 1.6	190.1 $\pm$ 19.6
Tailing Dam	256.2~325.8	303.6 $\pm$ 16.3	4250.4 $\pm$ 228.2
Contrast point	11.5~14.7	13.3 $\pm$ 1.2	163.1 $\pm$ 14.7

3.3 天然放射性核素含量结果分析

矿山放射性核素的污染因素比较多, 除了矿石运输的掉落、废水的排放和化学肥料的使用外, 还包括气态放射性核素的沉积、雨水的输运等因素。由表 3 所示工作场所天然放射性核素的含量可以看出, 各个采样点放射性核素 ^{226}Ra 含量的区别比较大。其中放射性核素 ^{226}Ra 含量最大的是尾矿坝的尾矿, 尾矿是铀矿石水冶后剩余的废渣, 其 ^{238}U 含

量已经降到原矿石的 10%以内, 但是 ^{226}Ra 含量没有变化。在产的 2 个矿井工业场地土样中, 2 号的比 1 号的高出许多, 这是由于 2 号矿井工业场地散落的矿石和废石比较多。至于退役的矿井, 由于没有进行治理, 其工业场地天然放射性核素含量与尚在生产的矿井区别不大。对比其它核素, 发现 ^{40}K 的含量与该省的均值^[7](617.3 Bq/kg)相近。而 ^{232}Th 的含量则大多高过该省的均值(66.7 Bq/kg), 但是除了尾矿坝外, 其它各工作场所 ^{232}Th 的含量高出的

并不是很多。从表 3 矿区生活区天然放射性核素的含量可以看出, 生活区大部分地区的放射性核素 ^{226}Ra 和 ^{232}Th 的含量还是稍微高出对照点, 这可能是由空气中粉尘放射性核素沉积造成的。对比各生

活区, 发现 5 号生活区的土样天然放射性核素含量最高。由 Beck 公式^[8]计算各监测点的空气吸收剂量率发现, 其值与各监测点的 γ 辐射平均值差别不大。

Tabel 3 Natural radionuclide content of monitoring places in samples

Sampling points	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K	Air absorbed dose rate /nGy·h ⁻¹
No.1 industrial site	1215.3	95.6	656	610.4
No.1 living area	132.2	76.1	1127	155.3
No.2 industrial site	1473.2	100.8	580	720.7
No.2 living area	112.4	64.4	1020	134.5
No.3 industrial site	962.3	102.5	640	506.3
No.3 living area	150.6	77.8	872	153.3
No.4 industrial site	845.9	104.2	605	456.2
No.4 living area	128.5	71.5	1016	145.9
No.5 industrial site	922.7	111.0	375	483.6
No.5 living area	130.6	86.6	1028	157.3
No.6 industrial site	1035.5	93.5	412	521.8
No.6 living area	125.2	77.9	824	140.5
Tailings of tailing dam	5907.2	312.3	328	2743.2
Contrast point	108.8	62.6	725	119.1

4 讨论

(1) 必须关注同时受到内照射和外照射问题。矿山辐射环境是复杂多变的。矿山的工人和居民受到由氡及其子体的内照射, 同时还受到 γ 射线的外照射, 在确定控制措施时必须考虑所有照射。以本次调查来看, 该矿山工作场所由内照射和外照射叠加所致的矿工年最大个人剂量是 6.28mSv, 低于国家限值; 生活区在扣除本底后, 由内、外照射所致矿区居民的年最大个人剂量是 0.52mSv, 也没有超过管理限值。

(2) 剂量估算问题。本调查对矿工的工作时间按国际标准来处理, 对矿区居民所取居留因子为室内 0.8, 室外 0.2, 由于本论文列举的数据是室外环境数据, 所以只计算了室外结果。由于某些工作场所氡浓度很高, 在对氡及其子体所致内照射剂量计算时, 把氡和氡子体所致剂量进行分开计算。

(3) 平衡因子的问题。矿区工作场所平衡因子变化范围很大, 在平衡因子小于 0.1 的时候, 空气中氡浓度所致的个人内照射剂量不能忽略。总体上矿山工作场所的平衡因子变化较大, 生活区的平衡

因子变化不大。

(4) 生活区 γ 辐射水平比国家室外本底规定 ($8.03 \times 10^{-8} \text{Gy/h}$)^[9]稍高的问题。对比矿区水泥地面和普通地面, 发现水泥地面的 γ 辐射水平比普通地面低, 由此可推测这主要是由放射性粉尘沉降造成的, 所以目前该矿山的生活区基本都铺上了水泥。

(5) 天然放射性核素辐射吸收剂量率的估算问题。根据测量的土壤 ^{226}Ra 、 ^{232}Th 和 ^{40}K 的放射比活度, 由 Beck 公式计算离地表 1m 高处空气中的 γ 辐射吸收剂量率。从表 3 所示空气吸收剂量率数据看出, 工作场所的空气吸收剂量率大多高于生活区, 发现对矿工危害最大的工作场所是尾矿坝。至于生活区, 对比国家均值^[10](72nGy/h), 该矿生活区的空气吸收剂量率还是偏高。

参考文献

- 1 国家环境保护局. 铀矿冶污染治理. 北京: 原子能出版社, 1993: 1-24
State Bureau for Environmental Protection. Uranium mining and milling pollution control. Beijing: Atomic Energy Press, 1993: 1-24

- 2 张新华, 刘永. 矿业安全与环保, 2003, **30**(3): 30-32
ZHANG Xinhua, LIU Yong. Safety environ prot min, 2003, **30**(3): 30-32
- 3 黄建兵. 环境监测管理与技术, 2001, **13**(2): 27-30
HUANG Jianbing. Adm Ttech environ monit, 2001, **13**(2): 27-30
- 4 周剑良, 李先杰, 凌球, 等. 矿工个人辐射剂量监测. 北京: 原子能出版社, 2002: 119-129
ZHOU Jianliang, LI Xianjie, Ling Qiu, *et al.* Personal dose monitoring of miners. Beijing: Atomic Energy Press, 2002: 119-129
- 5 王其亮. 中华放射性医学与防护杂志, 2000, **20**(5): 358-363
WANG Qiliang. Chin J Rad Med Prot, 2000, **20**(5): 358-363
- 6 李先杰, 邓文辉, 薛建新, 等. 辐射防护, 2008, **28**(1): 13-17
LI Xianjie, DENG Wenhui, XUE Jianxin, *et al.* Radiat Prot, 2008, **28**(1): 13-17
- 7 宋妙发, 强亦忠, 陈式, 等. 核环境学基础. 北京: 原子能出版社, 1999: 12-20
SONG Miaofa, QIANG Yizhong, CHEN Shi, *et al.* Basis of nuclear environmentology. Beijing: Atomic Energy Press, 1999: 12-20
- 8 成智威, 苏川英, 马怀成, 等. 辐射防护, 2005, **25**(1): 40-45
CHENG Zhiwei, SU Chuanying, MA Huaicheng, *et al.* Radiat Prot, 2005, **25**(1): 40-45
- 9 王其亮, 何苗挺, 崔广志, 等. 中华放射性医学与防护杂志, 1987, **7**(2): 78-83
WANG Qiliang, HE Miaoting, CUI Guangzhi, *et al.* Chin J Radiolog Med Prot, 1987, **7**(2): 78-83
- 10 俞誉福. 环境放射性概论. 上海: 复旦大学出版社, 1993: 39-65
YU Yufu. Environmental radiation generality. Shanghai: Fudan University Press, 1993: 39-65

Evaluation for current radiation environment situation in a mine

QIN Guoxiu LIU Qincheng XU Haifeng CHEN Ning

(East China Institute of Technology, Fuzhou 344000, China)

ABSTRACT In order to investigated the current radiation environment situation of a mine from 2005 to 2007, various of radiation monitoring instruments have been used to measure the concentration of radon and its daughters, γ radiation level and natural radionuclide content in a mine including industrial site and living area respectively. The obtained data show that radon and its daughters concentration and γ radiation level in most of the monitoring industrial site is lower than the national management limits for the quality evaluation of radiation environment in nuclear industry. And in the living area, individual dose equivalent calculated after deducting the background at all monitoring point is also lower than the national management limits for the quality evaluation of radiation environment.

KEYWORDS Radon and its daughters, γ radiation level, Natural radionuclide, Evaluation

CLC TL75⁺1, TD167, TL72, TL75⁺2