

# 放射性气体 $^{220}\text{Rn}$ 的准确测量研究

张磊<sup>1</sup> 梁珺成<sup>2</sup> 吴建<sup>1</sup> 郭秋菊<sup>1</sup>

1 (北京大学物理学院核物理与核技术国家重点实验室 北京 100871)

2 (中国计量科学研究院电离辐射与医学所 北京 100013)

**摘要**  $^{220}\text{Rn}$  的准确测量是天然辐射照射剂量评价体系中的重要研究内容之一。基于常用的几种测氡仪, 我们开发了它们的  $^{220}\text{Rn}$  测量功能, 并比较了它们的  $^{220}\text{Rn}$  测量结果。结果表明, AB5 抓取式测量方法其原理简单, 测量结果稳定, 可以作为  $^{220}\text{Rn}$  测量的参考方法, 但其探测下限较高; RAD7 的  $^{220}\text{Rn}$  测量结果受干燥剂状态的影响, 需要适时刻度; AlphaGuard 流气式测量虽然具有探测下限低的优点, 但结果易受采样流速和前端采样管路状况的影响, 只能作一般性参考。

**关键词**  $^{220}\text{Rn}$ , 准确测量, 比对实验, 参考标准

**中图分类号** TL72

高浓度氡及其子体的辐射是诱发肺癌的主要因素之一,  $^{222}\text{Rn}$  及其子体所致的呼吸道内照射剂量约占人类受到的天然辐射总量的一半<sup>[1]</sup>。 $^{220}\text{Rn}$  是  $^{222}\text{Rn}$  的重要同位素, 来源于  $^{232}\text{Th}$  天然放射系。 $^{220}\text{Rn}$  半衰期为 55.6 s, 环境中浓度较低, 往往认为  $^{220}\text{Rn}$  及子体所致剂量可忽略, 很少开展环境  $^{220}\text{Rn}$  的研究。十多年前, Doi M 等<sup>[2]</sup>发现住宅中有较高浓度的  $^{220}\text{Rn}$ , 居住环境中的  $^{220}\text{Rn}$  开始引起关注。

我国土壤中天然放射性核素  $^{232}\text{Th}$  的含量为世界平均值的 1.6 倍, 部分地区的  $^{232}\text{Th}$  含量远高于全球平均值<sup>[3]</sup>。农村窑洞和裸露砖房的大量存在, 极大地增加了  $^{220}\text{Rn}$  的析出。对平凉地区室内  $^{220}\text{Rn}$  的初步测量结果表明, 距墙 15 cm 处的  $^{220}\text{Rn}$  浓度达 156–1500 Bq/m<sup>3</sup><sup>[4]</sup>。广东阳江高本底地区的研究表明,  $^{220}\text{Rn}$  子体潜能浓度为  $^{222}\text{Rn}$  子体的 2.6 倍<sup>[5]</sup>。这些初步研究结果表明, 我国部分环境中  $^{220}\text{Rn}$  浓度较高, 健康危害不容忽视。

$^{220}\text{Rn}$  和  $^{222}\text{Rn}$  虽然是同位素, 但有很多不同性质。 $^{220}\text{Rn}$  在室内空间分布不均匀, 其半衰期远短于  $^{222}\text{Rn}$  (3.8 d);  $^{222}\text{Rn}$  子体的半衰期在分钟量级, 而  $^{220}\text{Rn}$  子体大部分半衰期在小时量级。因此, 单位暴露  $^{220}\text{Rn}$  所产生的辐射剂量甚高于  $^{222}\text{Rn}$ , 据联合国原子辐射效应科学委员会(UNSCEAR)2000 年报告<sup>[1]</sup>,  $^{220}\text{Rn}$  和  $^{222}\text{Rn}$  子体有效剂量转换系数分别为 40 和 9 nSv·(Bq·h·m<sup>-3</sup>)<sup>-1</sup>。由于居室环境  $^{220}\text{Rn}$  行为特征研究和数据的不足, 在估计  $^{220}\text{Rn}$  子体有效剂量转

换系数中很多参数, 如子体气溶胶粒径分布、吸入血速度等, 都采用与  $^{222}\text{Rn}$  子体一样的数值。另外, 生物动力学模型对上述  $^{220}\text{Rn}$  子体有效剂量转换系数的计算也有影响, 最近的研究表明,  $^{220}\text{Rn}$  子体有效剂量转换系数要比 UNSCEAR 2000 年报告公布的高<sup>[6,7]</sup>。

为了准确评价  $^{220}\text{Rn}$  所致危害, 准确测量  $^{220}\text{Rn}$  气体浓度是关键。由于  $^{220}\text{Rn}$  的半衰期短, 测量技术和刻度方法上还存在一些问题, 特别是在  $^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$  混合情况下,  $^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$  之间相互干扰的问题尚未完全解决。

本文利用目前几种常见的测氡仪开发它们的  $^{220}\text{Rn}$  测量功能, 并对这些仪器在纯  $^{220}\text{Rn}$  环境下的测量进行了比对, 讨论了各自的优缺点, 希冀为现场测量提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 $^{220}\text{Rn}$ 室

比对实验在自制小型  $^{220}\text{Rn}$  室中进行。 $^{220}\text{Rn}$  室腔体呈圆筒状, 有效体积 220 L, 材料为不锈钢。 $^{232}\text{Th}$  源外置, 通过流速约 8 L/min 的微型真空泵腔体连接, 循环供气。 $^{220}\text{Rn}$  室内置涡流风扇保证  $^{220}\text{Rn}$  气体浓度分布均匀, 内部放置干燥剂保证腔体内部湿度稳定, 外部包裹加热材料, 保证腔体内部温度恒定。

国家自然科学基金(10475006)资助

第一作者: 张磊, 男, 1983 年出生, 最高学历, 北京大学物理学院在读硕士生研究生, 防化研究院第二研究所实习研究员, 从事辐射防护与环境保护方面研究

通讯作者: 梁郡成

收稿日期: 2009-12-16

## 1.2 测氡仪

本工作使用三种测氡仪，分别介绍如下。

### 1.2.1 AB5 便携式测氡仪(加拿大 PYLON 公司)

其主要由 AB5 和卢卡斯闪烁室(Lucas scintillation cell, LSC)组成，前者为便携式监测器和数据采集设备，后者是圆筒状探头，内涂 ZnS(Ag) 闪烁体。放射性气体经滤膜过滤子体后进入闪烁室，由闪烁体+光电倍增管探测衰变放出的  $\alpha$  粒子数，由此测量  $^{220}\text{Rn}$  浓度。LSC 可测量  $^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$  混合气体<sup>[8]</sup>。虽因其  $^{220}\text{Rn}$  探测下限高而在环境应用中受到限制，但实验室中用抓取式采样，其可以 10 s 为周期计数，由计数率变化得到  $^{220}\text{Rn}$  浓度。

### 1.2.2 RAD7 便携式测氡仪(美国 DURRIDGE 公司)

其可连续取样测量的仪器，且克服了空气湿度对检测结果的影响，应用广泛，是我国使用最多的测氡仪。静电采样，经干燥和子体过滤的氡气进入半球形腔体(体积 0.7 L)，由半导体探测器收集衰变产生的  $\alpha$  粒子。该探测器能甄别  $\alpha$  谱形而测定  $^{222}\text{Rn}$  和  $^{220}\text{Rn}$  浓度，测量精度分别为  $\pm 5\%$  和  $\pm 25\%$ 。

### 1.2.3 AlphaGUARD 氡探测器(德国 Genitron Instruments GmbH 公司)

系基于最优化设计电离腔的氡探测器，能连续测定氡浓度、气候参数及  $\gamma$  计数率。在低氡浓度下，其是一个脉冲电离室；高浓度下，可作为电流电离室起作用。这种优化设计有效降低了探测下限，提高了氡浓度的探测范围。其工作模式为扩散式或流气式。扩散模式的测量精度高、误差小，是公认的测氡标准仪器。

Ishikawa<sup>[9]</sup>最早发现 AlphaGUARD 对  $^{220}\text{Rn}$  有响应，并测量了扩散模式下的  $^{220}\text{Rn}$  响应因子。而事实上，流气模式下， $^{220}\text{Rn}$  更易进入，但其脉冲电离室的特点决定了其不能区分开  $^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$ 。且  $^{220}\text{Rn}$  半衰期之短，足以使其在管路输送过程有所损失，故流气模式采样时腔体中  $^{220}\text{Rn}$  浓度受流速的影响。下文忽略采样管体积对电离室腔体体积的贡献，给出采样流速的修正因子。

流气式采样中，电离腔中  $^{220}\text{Rn}$  气体的活度浓度可用式(1)表达：

$$\frac{dA(t)}{dt} = -\lambda A(t) - A(t) \frac{q}{V} + A_0 \frac{q}{V} \quad (1)$$

其中， $A(t)$  是气体活度浓度， $\lambda$  是衰变常数， $q$  是采样流量， $V$  是腔体体积， $A_0$  是腔体外气体的活度浓度。设初始条件  $A(0)=0$ ，则由式(1)可得：

$$\frac{A(t)}{A_0} = \frac{q}{q + \lambda V} (1 - e^{-(\lambda + \frac{q}{V})t}) \quad (2)$$

$t \rightarrow \infty$  时， $A(t)/A_0 = q / (q + \lambda V)$ ，即腔体内外浓度成常数。AlphaGUARD 电离腔体积为 0.56 L，采样流速为 1 L/min，因此，流速修正因子理论值为 0.7048。若管长不能忽略，或采样近气口有滤膜影响，则流速修正因子可能小于理论值。

## 2 结果和讨论

控制  $^{220}\text{Rn}$  室内浓度稳定在一定浓度，温度保持在 20℃，湿度 30%–35% RH。将  $^{220}\text{Rn}$  通入 RAD7 和 AlphaGUARD。进行周期为 10 min、共约 6 h 的连续测量。同时，在每隔 1 h 用 AB5 进行抓取式采样测量。测量结果如图 1 所示。

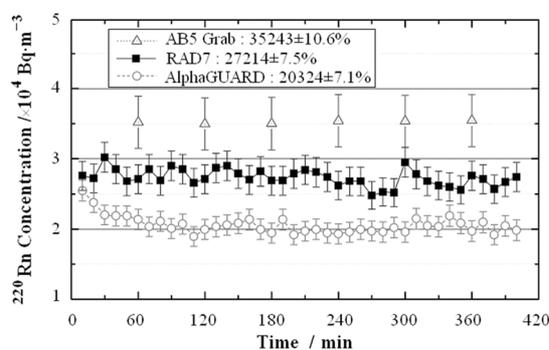


图 1 稳定  $^{220}\text{Rn}$  浓度环境下的三台仪器比对结果  
Fig.1 Comparing results of three devices under stable  $^{220}\text{Rn}$  concentration.

由图 1，实验开始 0.5 h 后浓度保持稳定状态。AB5 抓取式的测量结果最为稳定。RAD7 波动最大，并且随着干燥管使用时间增加，测量结果会略微变小。AlphaGUARD 测量结果误差最小，测量结果最稳定，但是其受流速的影响和管道长度的影响。

改变  $^{220}\text{Rn}$  室腔体内  $^{220}\text{Rn}$  浓度，进行多次比较实验，不同浓度下的实验结果列于表 1。

从表 1 可以看出，不同 RAD7 干燥管的刻度因子有很大的不同，其受干燥剂状态(颗粒物状态、干燥程度及装填状态)的影响非常明显。新干燥管，其刻度因子为 1.3，符合情况较好。AlphaGUARD 大部分流速修正因子比理论计算的 0.7048 要低，分析其原因，是由于采样时，前端延伸的管路和进气口处的滤膜延长了  $^{220}\text{Rn}$  进入电离腔的时间。第四组结果中，由于 AlphaGUARD 连续使用，本底未降下去，就开始新的测量，导致测量结果偏高。综合考虑，当前采样状态下，AlphaGUARD 的流速修正因子为 0.58。

表 1 不同  $^{220}\text{Rn}$  浓度 ( $\text{Bq}/\text{m}^3$ ) 下多次实验比对结果 ( $\text{Bq}/\text{m}^3$ )  
Table 1 Comparison of the measurement results under different thoron concentrations (in  $\text{Bq}/\text{m}^3$ ).

测量组别 Groups of measurements	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4
测氡仪 AB5	35243±10.6%	18437±17.0%	7346±12.6%	4402±29.6%
Radon monitoring devices	RAD7*	27214±7.5%	16467±9.7%	5030±18.3%
	AlphaGuard	20324±7.1%	8363±11.8%	4229±10.9%
RAD7 刻度因子 Calibrated coefficient	1.30	1.12	1.46	1.30
AlphaGuard 流速修正因子 Flow rate correction	0.58	0.45	0.58	0.74
测量次数 Measurement times	4	8	3	8

\*RAD7 第一组和第四组采用全新干燥管, 第三组采用旧干燥管, 第二组采用未压实填充干燥管。

Gas-drying tubes for the RAD7 measurements: Groups 1 and 4, new tube; Group 3, used tube; Group 2, an incompletely-filled tube.

### 3 结论

通过三台仪器多次比对测量, 我们发现:

(1) AB5 抓取式测量方法原理简单, 测量结果稳定, 可作为  $^{220}\text{Rn}$  测量的实验室参考方法, 但是其探测下限较高, 限制了其现场使用的可能性;

(2) RAD7 的  $^{220}\text{Rn}$  测量结果受干燥剂状态的影响比较大, 因此在进行现场检定测量前需要刻度。全新小干燥管刻度因子为 1.3;

(3) AlphaGUARD 流气式测量结果受采样流速和前端采样管路状况的影响, 只能作一般性参考。但是该测量仪器具有探测下限低、测量结果稳定的优点。因此, 可以对采样流速和前端管路进行改进后, 固定在  $^{220}\text{Rn}$  室上作为标准进行适时监测。

**致谢** 感谢复旦大学放射医学研究所卓维海教授对本工作的支持和悉心指导。

### 参考文献

- 1 UNSCEAR. Sources and effects of ionizing radiation. Sweden: UNSCEAR, 2000
- 2 Doi M, Fujimoto K, Kobayashi S, *et al.* Health Phys, 1994, **66**(1): 43–49
- 3 UNSCEAR. Sources and effects of ionizing radiation. Sweden: UNSCEAR, 1988
- 4 Bing Shang, Takao Iida, Yukimasa Ikebe. Influence of  $^{220}\text{Rn}$  on  $^{222}\text{Rn}$  measurement in Chinese cave dwellings. Radon and thoron in the human Environment. Singapore: World Scientific, 1998. 379–384
- 5 魏履新, 查永如, 陶祖范, 等. 中国阳江高本底辐射研究. 北京: 原子能出版社, 1996. 111–118  
WEI Lvxin, ZHA Yongru, TAO Zufan, *et al.* High background radiation research in Yangjiang China. Peking: Atomic Energy Press, 1996. 111–118
- 6 Ishikawa T, Tokonami S, Nemeth C. J Radio Prot, 2007, **27**: 447–456
- 7 Tschiersch J, Li W B, Meisenberg O. Radia Pro Dosim, 2007, **127**: 73–78
- 8 Eappen K P, Nair R N, Mayya Y S. Radiat Meas, 2008, **43**: 91–97
- 9 Ishikawa T. Radia Pro Dosim, 2004, **108**: 327–330

## Comparative study of the measurement of thoron gas

ZHANG Lei<sup>1</sup> LIANG Juncheng<sup>2</sup> WU Jian<sup>1</sup> GUO Qiuju<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ( State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China )

<sup>2</sup> ( Ionizing Radiation and Medical Science, National Institute of Metrology, Beijing 100013, China )

**Abstract** The accurate measurement of  $^{220}\text{Rn}$  is important for dosimetry evaluation of natural radiation exposure. In this work, based on three commonly used radon measuring devices, i.e. AB5, RAD7 and, AlphaGuard, we developed their use for  $^{220}\text{Rn}$  measurement, and their experimental results were compared. The AB5 grab measurement method is simple in principle with stable measurement results, and can be used as a reference method of measuring  $^{220}\text{Rn}$ , through its lower detection limit is a little higher. The  $^{220}\text{Rn}$  measurement result given by RAD7 is influenced by the status of desiccant and need a timely calibration. AlphaGuard flow mode has the advantage of low detection limit, but can only be a general reference, because of its sampling flow rate and the status of front-end sampling pipe.

**Key words**  $^{220}\text{Rn}$ , Accurate measurement, Comparative experiment, Reference method  
CLC TL72