

# 卢卡斯闪烁室法测量<sup>220</sup>Rn 浓度研究

吴 健<sup>1</sup>,张 磊<sup>1</sup>,郭秋菊<sup>1</sup>,卓维海<sup>2</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. 复旦大学放射医学研究所,上海 200032)

**摘要:**基于 AB - 5 型便携式测<sup>222</sup>Rn 仪,本研究开发了一种快速测量<sup>220</sup>Rn 浓度的新方法。采样前排空闪烁室内空气并测量其本底计数,采样后即刻测量 1 min,利用采样前后的每分钟计数和理论探测效率,进而计算出<sup>220</sup>Rn 浓度。理论计算结果表明,在纯<sup>220</sup>Rn 的环境条件,该方法的测量下限可达约 65 Bq m<sup>-3</sup> (置信度 70 %);比对实验结果表明,不论是在纯<sup>220</sup>Rn 或<sup>222</sup>Rn/<sup>220</sup>Rn 混合的环境中,该方法的测量结果与 RAD - 7 型电子测氡仪的测量值偏差均在 ±10 %之内。AB - 5 型便携式测氡仪也可用于<sup>220</sup>Rn 浓度的定量测量,该测量方法快速且操作简便,有一定的应用价值。

**关键词:**<sup>222</sup>Rn/<sup>220</sup>Rn 气体;卢卡斯闪烁室;测量

中图分类号:TL81

文献标识码:A

## 1 引言

<sup>222</sup>Rn 和<sup>220</sup>Rn (简称 Rn 和 Tn)是分别来源于天然存在的<sup>238</sup>U 系和<sup>232</sup>Th 系的惰性放射性气体,其衰变产生的短寿命子体吸入人体后可以产生呼吸系统内照射。UNSCEAR 2000 年报告指出,Rn/Tn 及其子体产生的年有效剂量占天然电离辐射源所致成人年有效剂量的 54.2 %,在某些国家或地区 Tn 及其子体照射所致公众的辐射剂量相对于 Rn 及其子体而言也不容忽视。

我国土壤中天然放射性核素<sup>232</sup>Th 的含量为世界平均值的 1.6 倍,部分地区如广东阳江高本底地区,<sup>232</sup>Th 含量远高于全球平均值<sup>[1]</sup>。另外,在我国农村,窑洞和裸露砖房大量存在,Tn 从墙体材料中的析出非常明显。对平凉地区室内 Tn 的初步调查结果看,距墙 15 cm 处 Tn

的浓度高达 156 ~ 1 500 Bq m<sup>-3</sup><sup>[2]</sup>。而广东阳江高本底地区的研究也表明 Tn 子体潜能浓度为 Rn 子体的 2.6 倍<sup>[3]</sup>。这些初步的研究结果表明我国部分环境中 Tn 浓度较高,Tn 及其子体所致公众的辐射照射不容忽略。

评价 Tn 及其子体所致公众的辐射剂量时,准确测量 Tn 浓度是关键。由于 Tn 的半衰期很短,现有的测量技术和刻度方法上还不够完善。在 Rn/Tn 混合情况下,Rn、Tn 之间相互干扰引起 Rn/Tn 测量误差的问题还没有完全解决。虽然市面上有一些商用测氡仪(如美国 Durrige 公司的 RAD - 7 和德国 SARAD 公司的 RIM2100 等)采用静电采集和能谱分辨技术,能实现 Rn、Tn 气体的甄别测量,但是大部分仪器测量结果要么受干燥剂状态影响,要么受外界环境湿度影响,很难用于 Tn 的准确测量。

卢卡斯闪烁室(Lucas scintillation cell)是一

收稿日期:2009 - 07 - 08

基金项目:国家自然科学基金资助(项目批准号:10775007);教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET - 07 - 0213);国家基础科学人才培养基金(北京大学核物理基地)资助(理科基地基金号:J0730316)。

作者简介:吴健(1986—),男,北京大学物理学院本科生。

通讯作者:张磊。E-mail:swofely@pku.edu.cn

款经典的闪烁体探测器,它基于闪烁体受激发光原理,通过记录氡及其子体放出的  $\alpha$  粒子可达到测量氡浓度的目的,可与 AB - 5 型便携式放射性检测仪配套使用,用于  $Rn$  浓度测量。由于该装置原理清晰、操作简单,适合用于环境中  $Rn$  浓度的测量。为了探讨其对  $Tn$  浓度测量的应用价值,自行开发了一套抓取式测量纯  $Tn$  气体和  $Rn/Tn$  混合气体浓度的方法,并详细地讨论了该方法的探测效率和探测下限,为  $Tn$  的准确测量奠定基础。

## 2 测量原理与方法

测量采用的仪器是 AB - 5 测氡仪。AB - 5 是加拿大 Pylon 公司早期推出的一款经典的便携式测氡仪,在世界范围内得到了广泛的应用。主要由测量部分 AB - 5 和探测器卢卡斯闪烁室 LSC 组成,前者是一台便携式监测器和数据采集设备,后者是内部涂有  $ZnS(Ag)$  闪烁体的圆筒状探头。放射性气体通过滤膜过滤子体后进入闪烁室,在腔内发生衰变,放出  $\alpha$  粒子。 $\alpha$  粒子打到闪烁体,受激发光。监测器记录下通过光电倍增管放大后的电信号来确定粒子数,从而达到测量浓度的目的。AB - 5 配套的闪烁室有两种型号:110A 和 300A,其体积分别为 151 mL 和 270 mL;有效探测面积分别为 18 800 mm<sup>2</sup> 和 27 700 mm<sup>2</sup>。采样方式分抓取式和流气式。本研究主要采用 300A 作抓取式采样,其结构示意图如图 1 所示。抓取采样时,

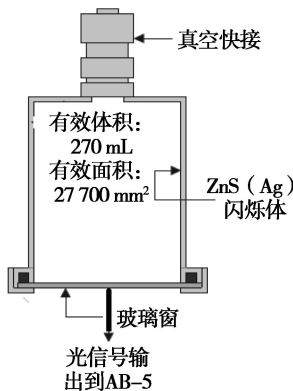


图 1 300A 型卢卡斯闪烁室结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of 300A LSC

先接上真空快接阀门,打开阀门,用真空泵将闪烁室内抽真空,关闭阀门。然后接上采样孔,打开阀门进行采气,采集完毕立即关闭阀门,开始测量。

### 2.1 纯<sup>220</sup>Rn 气体测量

在纯<sup>220</sup>Rn 环境下测量时,由于没有<sup>222</sup>Rn 的干扰,同时考虑到<sup>220</sup>Rn、<sup>216</sup>Po 和<sup>212</sup>Bi 的半衰期,闪烁室内  $\alpha$  粒子计数率变化简单地遵循<sup>220</sup>Rn 的衰变规律。假设闪烁室本底计数率为  $N_0$ , 抓取式采样后立即测量(测量时间通常为 1 min)的计数率为  $N_1$ ,则<sup>220</sup>Rn 浓度计算公式为:

$$C_{Tn} = \frac{N_1 - N_0}{S_{Tns}} k_{Tn} \quad (1)$$

式中,  $S_{Tns}$  为闪烁室中平衡态的<sup>220</sup>Rn、<sup>216</sup>Po 的刻度因子, cpm / (Bq · m<sup>-3</sup>);  $k_{Tn}$  为对测量时间段  $T$  上<sup>220</sup>Rn 衰变引起的修正因子,其表达式为:

$$k_{Tn} = \left[ \frac{1}{T} \int_0^T \exp(-\lambda_{Tn} \cdot t) dt \right]^{-1} \quad (2)$$

式中,  $\lambda_{Tn}$  为<sup>220</sup>Rn 的衰变常数, s<sup>-1</sup>。

### 2.2 <sup>222</sup>Rn/<sup>220</sup>Rn 混合气体测量

<sup>222</sup>Rn/<sup>220</sup>Rn 混合环境测量时,抓取得到的混合气体在闪烁室中发生衰变,其  $\alpha$  粒子的计数率随时间的变化与<sup>222</sup>Rn/<sup>220</sup>Rn 混合气体、子体的半衰期及混合比有关。如果需要同时测量得到<sup>222</sup>Rn、<sup>220</sup>Rn 气体浓度,需要至少测量两个时间段上的计数。为了测量<sup>220</sup>Rn 浓度,考虑到<sup>220</sup>Rn 和<sup>216</sup>Po 半衰期很短,第一个测量时间段选择在采样后很短的时间内(通常选 1 min)。为了测量<sup>222</sup>Rn 浓度,同时考虑<sup>222</sup>Rn 及其子体达到平衡所需的时间和<sup>220</sup>Rn 子体<sup>212</sup>Bi 的半衰期(60.55 min),第二个测量时间段通常选择在采样后 3 小时。为此进行如下优化时间选择的计算。

首先测量闪烁室的本底计数率  $N_1$ 。以抓取完成时刻作时间起点,采样后立即进行第一次测量,测量该时间段内(通常选 1 min)的计数率  $N_1$ 。等待  $Rn$  与其子体大致平衡后(约 3 小时)开始第二次测量,测得第二次测量期间的计数率  $N_2$ 。考虑到<sup>220</sup>Rn 及<sup>212</sup>Bi 之间半衰期巨大的差别,在通常环境水平<sup>222</sup>Rn/<sup>220</sup>Rn 子体比情况下,可以基本忽略第二次测量时间段上<sup>212</sup>Bi 衰变的影响。

因此,<sup>222</sup>Rn 的浓度  $C_{Rn}$  计算公式可以表示为:

$$C_{Rn} = \frac{N_2 - N_0}{S_{Rns}} \cdot \frac{k_{RnM}}{k_{RnW}} \quad (3)$$

式中, $S_{Rns}$ 为闪烁室内<sup>222</sup>Rn 及其平衡子体衰变的刻度因子,cpm/(Bq·m<sup>-3</sup>); $k_{RnM}$ 为对第二次测量时间  $T_M$  内<sup>222</sup>Rn 衰变引起的修正因子,其表达式为:

$$k_{RnM} = \left[ \frac{1}{T_M} \int_0^{T_M} \exp(-\lambda_{Rn} \cdot t) dt \right]^{-1} \quad (4)$$

式中, $\lambda_{Rn}$ 为<sup>222</sup>Rn 的衰变常数,min<sup>-1</sup>;  $k_{RnW}$ 为对等待时间  $T_W$  内<sup>222</sup>Rn 衰变引起的修正因子,其表达式为:

$$k_{RnW} = \exp(-\lambda_{Rn} \cdot T_W) \quad (5)$$

考虑到第一测量时间段上测量时,<sup>222</sup>Rn 及<sup>218</sup>Pb 衰变产生的计数的影响,<sup>220</sup>Rn 浓度  $C_{Tn}$  计算公式为:

$$C_{Tn} = \frac{N_2 - n_{Rn} - n_{Pb-218} - N_1}{S_{Tns}} \cdot k_{Tn} \quad (6)$$

式中, $n_{Rn}$ 、 $n_{Pb-218}$ 分别为该测量时间段( $T$ )上<sup>222</sup>Rn和<sup>218</sup>Pb 衰变产生的平均计数率,其表达式分别为:

$$n_{Rn} = S_{Rn} \cdot \frac{1}{T} \int_0^T C_{Rn} \cdot \exp(-\lambda_{Rn} \cdot t) dt \quad (7)$$

$$n_{Pb-218} = S_{Pb-218} \cdot \frac{1}{T} \int_0^T C_{Rn} \cdot \frac{\lambda_{Pb-218}}{\lambda_{Pb-218} - \lambda_{Rn}} \cdot [\exp(-\lambda_{Rn} \cdot t) - \exp(-\lambda_{Pb-218} \cdot t)] dt \quad (8)$$

式中, $S_{Rn}$ 和  $S_{Pb-218}$ 分别为闪烁室对纯<sup>222</sup>Rn 气体和纯<sup>218</sup>Pb 子体的刻度因子,cpm/(Bq·m<sup>-3</sup>)。

在对<sup>222</sup>Rn/<sup>220</sup>Rn 混合情况下开展测量时,若本底测量时间为 10 min,第一个测量时间段为 1

min;等待时间为 180 min,第二次测量时间为 20 min。此时,<sup>222</sup>Rn 浓度  $C_{Rn}$ 和<sup>220</sup>Rn 浓度  $C_{Tn}$  计算公式分别简化为:

$$C_{Rn} = 1.024 \times \frac{N_2/20 - N_0/10}{S_{Rns}} \quad (9)$$

$$C_{Tn} = 1.4214 \times \frac{N_1 - C_{Rn}(S_{Rn} + 0.1947 \cdot S_{Pb-218}) - N_0/10}{S_{Tns}} \quad (10)$$

式中, $N_0$ 、 $N_1$ 和  $N_2$ 分别为本底计数、第一测量时间段计数和第二测量时间段计数。

### 2.3 闪烁室的探测效率及刻度因子

闪烁室的刻度因子正比于探测效率。通常情况下对仪器刻度时,只对<sup>222</sup>Rn 气体进行刻度,对于<sup>220</sup>Rn 很少能进行直接刻度。为此,本文采用蒙特卡罗方法(MC)模拟计算了<sup>222</sup>Rn/<sup>220</sup>Rn及其子体的探测效率,通过探测效率的模拟和实验给出的<sup>222</sup>Rn 的刻度因子计算得到<sup>220</sup>Rn的刻度因子。

MC计算<sup>222</sup>Rn/<sup>220</sup>Rn 及其子体的探测效率时,基于如下假设:(1)<sup>222</sup>Rn 和<sup>220</sup>Rn 在闪烁室内均匀分布;(2)<sup>216</sup>Pb 由于半衰期非常短,随<sup>220</sup>Rn 一样在闪烁室空气中均匀分布;(3)<sup>218</sup>Pb 由于半衰期不长不短,其以一定概率均匀附壁;(4)<sup>214</sup>Pb 由于半衰期很长,全部均匀附壁。

基于上述假设,考虑到 ZnS(Ag) 闪烁体的激发发光能量阈值为 0.13 MeV<sup>[4]</sup>,MC 计算得到 110A 和 300A 型卢卡斯闪烁室中各核素的探测效率(目标粒子数选取 10 次 ×10<sup>5</sup> 个/次)。计算结果列于表 1。

表 1 110A 和 300A 型卢卡斯闪烁室中<sup>222</sup>Rn/<sup>220</sup>Rn 及其子体探测效率  
Tab. 1 Detection efficiency of <sup>222</sup>Rn/<sup>220</sup>Rn and their progeny in 110A and 300A

核素	核素状态	110A 型探测效率(%)	300A 型探测效率(%)
<sup>222</sup> Rn	腔体中均匀分布	69.17 ±0.18	68.37 ±0.16
<sup>218</sup> Pb	腔体中均匀分布	76.01 ±0.06	75.81 ±0.10
<sup>218</sup> Pb	均匀附壁	72.84 ±0.13	73.11 ±0.15
<sup>214</sup> Pb	均匀附壁	84.53 ±0.12	86.68 ±0.07
<sup>220</sup> Rn	腔体中均匀分布	79.22 ±0.12	79.42 ±0.18
<sup>216</sup> Pb	腔体中均匀分布	83.32 ±0.11	84.30 ±0.11

<sup>222</sup>Rn 测量中,测量<sup>222</sup>Rn、<sup>218</sup>Pb 和<sup>214</sup>Pb 放出的粒子产生的计数。300A 型卢卡斯闪烁室对<sup>222</sup>Rn 及其子体的平均探测效率  $E_{Rns}$  :

$$E_{Rns} = \frac{1}{3} ( E_{222Rn} + x \cdot E_{218Pb} + E_{218Pb} + E_{214Pb} )$$

$$\cong 0.7606 + 0.0099 \cdot x \quad x \in [0,1] \quad (11)$$

式中,  $x$  为<sup>218</sup>Pb 在腔体中均匀分布在空气中的比例, %。由于 300A 型闪烁室出厂时刻度实验给出的<sup>222</sup>Rn 及其子体的平均探测效率  $E_{Rns} = 0.760$ , 因此  $x = 0$ , 即<sup>218</sup>Pb 完全附壁。

同理, MC 计算出 300A 闪烁室对<sup>220</sup>Rn 和<sup>216</sup>Pb 的平均探测效率  $E_{Tns} = 0.819$ 。

刻度因子 [cpm / (Bq · m<sup>-3</sup>) ] 为连续式流气模式测量时, 计数率 (cpm) 和放射性活度浓度 (Bq/m<sup>3</sup>) 的比值, 其同探测效率之间是一个简单的乘法关系 (考虑到时间单位和放出粒子数目的修正)。因此, 基于上述 MC 模拟计算得到的探测效率和 300A 型卢卡斯闪烁室的体积, 计算得到 300A 型卢卡斯闪烁室对<sup>222</sup>Rn/<sup>220</sup>Rn 及其子体刻度因子列于表 2。

由表 2 并结合上述公式, 简化纯<sup>220</sup>Rn 环境和<sup>222</sup>Rn/<sup>220</sup>Rn 混合环境中<sup>220</sup>Rn 浓度的计算公式为:

纯<sup>220</sup>Rn 环境:

$$C_{Tn} = 53.585 \times (N_1 - N_0) \quad (12)$$

<sup>222</sup>Rn/<sup>220</sup>Rn 混合环境:

$$C_{Tn} = 53.585 \times (N_1 - 0.0135 C_{Rn} - N_0) \quad (13)$$

表 2 300A 型卢卡斯闪烁室对<sup>222</sup>Rn/<sup>220</sup>Rn 及其子体刻度因子

Tab. 2 Calibration factor of <sup>222</sup>Rn/<sup>220</sup>Rn and their progeny in 300A

刻度因子	计算结果 [cpm/(Bq · m <sup>-3</sup> ) ]	说明
$S_{Rns}$	0.037 0	平衡的 <sup>222</sup> Rn、 <sup>218</sup> Pb、 <sup>214</sup> Pb
$S_{Tns}$	0.026 5	平衡的 <sup>220</sup> Rn、 <sup>216</sup> Pb
$S_{Rn}$	0.011 1	纯 <sup>222</sup> Rn
$S_{Pb-218}$	0.012 3	纯 <sup>218</sup> Pb

### 2.4 探测下限

探测下限  $L_D$  为净计数的最小期望值。假定第一类误差的概率与第二类误差概率相同, 则  $L_D$  可表示为<sup>[5]</sup> :

$$L_D = K^2 + 2K \sqrt{2M_B} \quad (14)$$

式中,  $K$  为误差的概率,  $M_B$  为本底计数的期望值。对于纯<sup>220</sup>Rn 的环境测量,  $M_B$  为卢卡斯闪烁室的本底计数率 ( $BG = 0.4$  cpm); 对于<sup>222</sup>Rn/<sup>220</sup>Rn 混合的环境测量, <sup>220</sup>Rn 浓度的  $M_B$  应为闪烁室本底计数率与<sup>222</sup>Rn 及<sup>218</sup>Pb 造成的计数率之和, 即:  $M_B = 0.0135 C_{Rn} + BG$ 。

结合式 (12)、式 (13) 可以算出在不同置信区间, 所开发的<sup>220</sup>Rn 浓度测量方法在纯<sup>220</sup>Rn 环境中和在不同的<sup>222</sup>Rn/<sup>220</sup>Rn 混合环境中<sup>220</sup>Rn 气体浓度的探测下限, 结果列于表 3。

表 3 本测量方法测量<sup>220</sup>Rn 气体浓度的探测下限

Tab. 3 Lower detection limit of <sup>220</sup>Rn concentration based on this method

置信区间	探测下限 (Bq · m <sup>-3</sup> )			
	纯 <sup>220</sup> Rn 环境	<sup>222</sup> Rn/ <sup>220</sup> Rn 混合环境		
		<sup>222</sup> Rn 浓度为 50 Bq · m <sup>-3</sup>	<sup>222</sup> Rn 浓度为 200 Bq · m <sup>-3</sup>	<sup>222</sup> Rn 浓度为 1000 Bq · m <sup>-3</sup>
70 %	64.3	96.2	153	308
95 %	303	404	584	1 074

### 3 测量结果

采用上述测量方法, 我们在北京大学<sup>220</sup>Rn

室中进行了比对实验。北京大学<sup>220</sup>Rn 室示意图如图 2 所示。

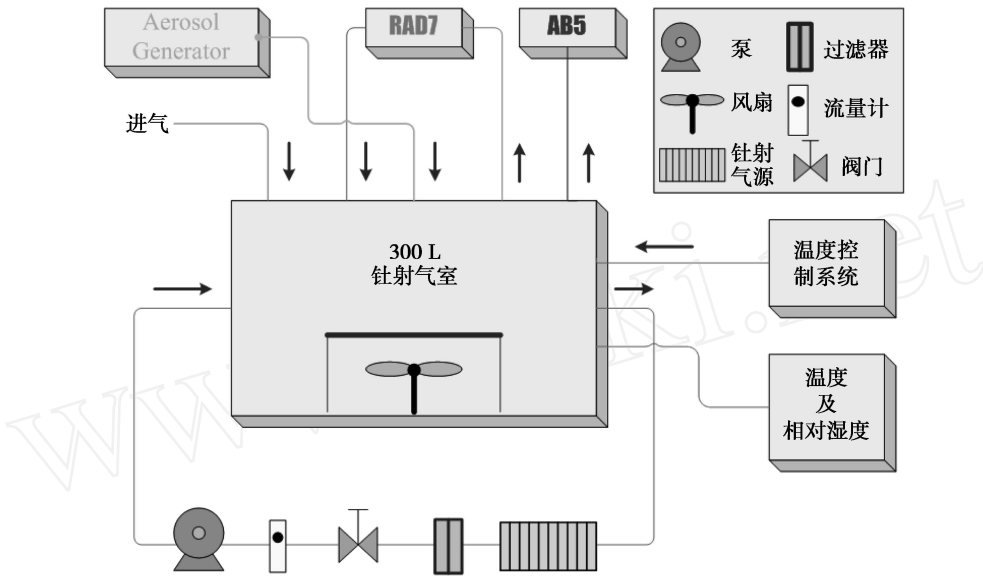


图 2 北京大学<sup>220</sup>Rn 室示意图

Fig. 2 Sketch map of the thoron chamber in Peking University

北京大学<sup>220</sup>Rn 室主腔体采用防静电有机玻璃构成,其内有效体积 300 L,内置风扇控制内部浓度分布均匀。<sup>232</sup>Th 源(由汽灯纱罩提供)外置,通过调节源回路气体流速和汽灯纱罩的数目来控制<sup>220</sup>Rn 室内<sup>220</sup>Rn 浓度。外界温湿度控制系统和测量系统保证腔体内温湿度稳定。实验中选用在衡阳<sup>220</sup>Rn 室进行刻度过的 RAD

- 7 作为参考基准,先后进行了纯<sup>220</sup>Rn 环境和<sup>222</sup>Rn/<sup>220</sup>Rn 混合环境比对实验。<sup>222</sup>Rn 气体直接从北京大学氡室鼓入。

### 3.1 纯 Th 环境下测量结果

在 5 个不同<sup>220</sup>Rn 浓度下进行了实验,纯<sup>220</sup>Rn 环境的实验结果列于表 4。

表 4 纯<sup>220</sup>Rn 环境下卢卡斯闪烁室法与 RAD - 7 测量结果比对

Tab. 4 Comparing results of LSC and RAD - 7 in pure <sup>220</sup>Rn environment

实验序号	AB - 5	RAD - 7		修正因子
	<sup>220</sup> Rn 浓度(Bq m <sup>-3</sup> )	<sup>220</sup> Rn 浓度(Bq m <sup>-3</sup> )	<sup>222</sup> Rn 浓度(Bq m <sup>-3</sup> )	
1	4 402 ±1301	4 410 ±993	52.3 ±66.1	1.00
2	7 346 ±929	6 539 ±1 193	154 ±67.4	1.12
3	18 837 ±1 032	19 370 ±1 139	390 ±117	0.97
4	23 372 ±1 541	21 320 ±1 196	529 ±131	1.10
5	36 029 ±4 950	32 890 ±2 561	606 ±295	1.10

从表 4 可以看出,在纯<sup>220</sup>Rn 环境中,本研究方法对<sup>220</sup>Rn 的测量值与 RAD - 7 测得结果基本相符,修正因子为 1.06 ±0.06,测量误差基本在 ±10% 以内。同时实验中发现 RAD - 7 在纯<sup>220</sup>Rn 环境下,也检测出<sup>222</sup>Rn,且<sup>222</sup>Rn 浓度值

随<sup>220</sup>Rn 浓度的增加而增加。推测其原因可能在于该仪器本身解谱存在不足。

### 3.2 Rn/Th 混合环境下测量结果

在 5 个不同<sup>222</sup>Rn/<sup>220</sup>Rn 混合浓度环境下进行比对实验的实验结果列于表 5。

表 5  $^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$  混合浓度环境下进行比对实验的实验结果  
 Tab. 5 Comparing results of LSC and RAD - 7 in  $^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$  environment

实验序号	AB - 5 ( $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ )		RAD - 7 ( $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ )	
	$^{220}\text{Rn}$ 浓度	$^{222}\text{Rn}$ 浓度	$^{220}\text{Rn}$ 浓度	$^{222}\text{Rn}$ 浓度
1	6 347 $\pm$ 728	1 560 $\pm$ 49	6 864 $\pm$ 688	1 540 $\pm$ 155
2	19 951 $\pm$ 1 377	1 780 $\pm$ 52	21 320 $\pm$ 1 200	2 080 $\pm$ 283
3	18 711 $\pm$ 996	1 650 $\pm$ 50	21 060 $\pm$ 1 196	1 800 $\pm$ 295
4	20 267 $\pm$ 1 041	1 385 $\pm$ 46	20 930 $\pm$ 1 192	1 780 $\pm$ 181
5	24 974 $\pm$ 1 558	1 374 $\pm$ 46	22 490 $\pm$ 1 242	1 680 $\pm$ 182

实验结果发现, AB - 5 测量得到的  $^{220}\text{Rn}$  浓度与 RAD - 7 测得结果比较吻合, 相对偏差均在  $\pm 10\%$  以内, 但其  $^{222}\text{Rn}$  浓度比 RAD - 7 测得结果普遍偏低, 且该差别随  $^{220}\text{Rn}$  浓度的增大, 两者之间的差别增大。分析其原因可能是在长时间连续测量  $^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$  混合时, 由于  $^{212}\text{Bi}$  在 RAD7 探头上不断累积, 而 RAD7 不能很好地分辨  $^{212}\text{Bi}$  放出的  $\alpha$  粒子与  $^{218}\text{Po}$  放出的  $\alpha$  粒子所致。直接导致在高  $^{220}\text{Rn}$  低  $^{222}\text{Rn}$  环境下, 造成 RAD - 7 测量给出  $^{222}\text{Rn}$  的明显偏高。

#### 4 结论

本研究开发了一种用 AB - 5 型便携式测氡仪来快速测量  $^{220}\text{Rn}$  浓度的新方法, 拓展了 AB - 5 型便携式测氡仪的用途。理论研究结果表明在纯  $^{220}\text{Rn}$  的环境中, 该方法的探测下限可达约  $65 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$  (置信度 70%) ; 在  $^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$  混合的环境中, 该测量方法的探测下限虽然因  $^{222}\text{Rn}$  浓度变化而异, 但仍可通过  $^{222}\text{Rn}$  浓度的精确测量来降低其探测下限并提高对  $^{220}\text{Rn}$  的测量精度。比对实验结果表明, 不论是在纯  $^{220}\text{Rn}$  或  $^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$  混合环境, 本研究方法对  $^{220}\text{Rn}$  浓

度的测量值均与 RAD - 7 型电子测氡仪的测量结果符合较好 (偏差  $\pm 10\%$  以内)。利用 AB - 5 型便携式测氡仪开展  $^{220}\text{Rn}$  浓度的定量测量, 具有方法可靠 (不存在能谱法的解谱不确定度问题)、操作简便快速等优点, 适用于作为  $^{220}\text{Rn}$  浓度测量的参考标准; 也可用于高  $^{220}\text{Rn}$  环境中  $^{220}\text{Rn}$  浓度的测量调查。

#### 参考文献:

- [1] UNSCEAR. Sources and effects of ionizing radiation [R]. Sweden: UNSCEAR, 1988.
- [2] Shang Bing, 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 [M]. Singapore: World Scientific. 1998: 379—384.
- [3] 魏履新, 查永如, 陶祖范, 等. 中国阳江高本底辐射研究 [M]. 北京: 原子能出版社, 1996.
- [4] <http://www.detectors.saint-gobain.com/Data/Element/Node/Category/Category-edit.asp?ele-ch-id=C00000000000001859>
- [5] 黄乃明. 低水平放射性测量中的探测限及其计算 [J]. 辐射防护通讯, 2004, 24(2): 25—32.

## The Measurement of Thoron Concentration Using Lucas Scintillation Cell

Wu Jian<sup>1</sup>, Zhang Lei<sup>1</sup>, Guo Qiuju<sup>1</sup>, Zhuo Weihai<sup>2</sup>

- (1. State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology, School of Physics, Peking University, Beijing 100871;
2. Institute of radiological medicine, Fudan University, Shanghai 200032)

(下转第 95 页, Continued on page 95)

- [5] Jiao Ling, Takada Jun, Endo Satoru, et al. Effects of sunlight exposure on the human tooth enamel ESR spectra used for dose reconstruction[J]. Journal of Radiation Research, 2007, 48(1):21—29.
- [6] 焦玲,张文艺,丁艳秋,等. 日射量的估算及其对牙釉质 ESR 剂量学的影响[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2009, 29(3):306—309.
- [7] Zdravkova M, Wieser A, El-Faramawy N, et al. An in vitro L-band electron paramagnetic resonance study of highly irradiated whole teeth[J]. Radiation Protection Dosimetry, 2002, 101(1—4):497—502.
- [8] Miyake M, Liu KJ, Walczak M, et al. In vivo EPR dosimetry of accidental exposures to radiation: experimental results indicating the feasibility of practical use in human subjects[J]. Applied Radiation and Isotope, 2000, 52(5):1 031—1 038.

## Time Stability of Tooth Enamel Electron Spin Resonance Signal Induced by Solar Radiation

Jiao Ling, Zhang Wenyi, Ding Yanqiu, Kou Mingying, Zhang Liang'an

(Institute of Radiation Medicine, Chinese Academy of Medical Sciences & Peking Union Medical College, Tianjin 300192)

**Abstract:** To study time stability of tooth enamel ESR signal caused by solar radiation. Measured intensities of ESR spectrum at different periods after the enamel samples were exposed to  $^{60}\text{Co}$  ray and sunlight respectively. The dosimetric peak ( $g = 2.0018$ ) produced by  $^{60}\text{Co}$  ray is very stable. The peak with same  $g$  factor caused by solar radiation decreased by about 20%, the peak closed to background decayed by about 30% after 900 days. This indicates that the solar radiation induced signals were stabilized basically. Account should be taken of their effects on dosimetric signal and background when tooth enamel is used to reconstruct radiation below several hundreds mGy.

**Key words:** Solar Radiation; Tooth Enamel; ESR; Dosimetry; Stability

(上接第 90 页, Continued from page 90)

**Abstract:** Based on the portable radon measurement device AB-5, we developed a new method for measuring the concentration of thoron. First pump out the air in Lucas scintillation cell, then measure the background count for 10 min, after that measure for 1 min immediately after sampling, using the counts before and after sampling and also the theoretical detection efficiency, thus calculate the thoron concentration. Theoretical calculation results show that in pure thoron condition, the lower detection limit of Thoron is about  $65 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$  (confidence level 70%); The comparison results show that both in a pure Thoron or Radon/Thoron mixed condition, the deviations between this measuring method results and the RAD-7s (a static-electronic measuring device) measurement results were less than  $\pm 10\%$ . AB-5 can also be used for quantitative measurement of Thoron concentration because of its fast and simple.

**Key words:**  $^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$ ; Lucas Scintillation Cell; Measurement