

## $^{220}\text{Rn}$ 对 Radtrak 氡探测器的影响及其修正

尚 兵, 崔宏星, 夏 英, 王作元, 张淑蓉, 武云云

(中国疾病预防控制中心 辐射防护与核安全医学所, 北京 100088)

**摘要:**对甘肃调查使用的 Radtrak 探测器进行了研究和改进。由于 Radtrak 探测器采用了高渗透性的滤膜, 在暴露期间,  $^{220}\text{Rn}$  可随  $^{222}\text{Rn}$  进入探测器。传统土结构窑洞和房屋中高水平  $^{220}\text{Rn}$  的影响, 使得  $^{222}\text{Rn}$  的测量结果高出实际水平 2~3 倍。通过改变气体交换率, 对探测器进行了改进。改进后的探测器可有效分辨  $^{220}\text{Rn}$  和  $^{222}\text{Rn}$ 。根据探测器的灵敏度和房间内  $^{220}\text{Rn}$  的分布, 提出了对甘肃调查数据修正的可能性, 并与实际测量结果进行了比较。

**关键词:**甘肃高氡暴露地区;  $\alpha$  径迹探测器;  $^{220}\text{Rn}$  干扰; 数据修正

中图分类号: X34 文献标志码: A 文章编号: 1000-6931(2008)07-0637-04

## Influence and Correction of $^{220}\text{Rn}$ to Radon Measurement for Radtrak Detector

SHANG Bing, CUI Hong-xing, XIA Ying, WANG Zuo-yuan,  
ZHANG Shu-rong, WU Yun-yun

(National Institute for Radiological Protection, Chinese Center for Disease Control and Prevention,  
Beijing 100088, China)

**Abstract:** The Radtrak detector used in Gansu investigation was researched and developed. As a high permeable membrane filter for the detector,  $^{220}\text{Rn}$  enters detector with  $^{222}\text{Rn}$  during exposure period. Gansu cave and traditional dwellings constructed with loam bricks had a high level of  $^{220}\text{Rn}$ , and the measurement results of  $^{222}\text{Rn}$  were 2-3 times higher than the actual level due to the influence from  $^{220}\text{Rn}$ . The detector was improved by decreasing air exchange rate. Improved Radtrak-R-T detector can effectively distinguish  $^{222}\text{Rn}$  and  $^{220}\text{Rn}$ , and measure the both simultaneously. According to the sensitivities of the detector to  $^{222}\text{Rn}$  and  $^{220}\text{Rn}$  as well as the  $^{220}\text{Rn}$  concentration in the room, a correction way for the data of Gansu investigation was established, and the corrected data were compared with the actual measurement results in this area.

**Key words:** Gansu radon exposure area; alpha track detector;  $^{220}\text{Rn}$  affection; data correction

在 1993—2000 年间,中国疾病预防控制中心辐射防护与核安全医学所(原工业卫生实验所)与美国 NCI 在我国甘肃陇东地区开展了室内氡与肺癌关系流行病学合作研究。该研究涉及庆阳和平凉 2 个地区 15 个县,调查肺癌病例 881 例、对照 1 761 例,对 3 000 余间房屋进行了氡浓度测量,得到了一系列有价值的研究成果<sup>[1-2]</sup>。这是迄今为止在我国进行的最大规模的室内氡流行病学研究,该研究结果准备纳入全球氡流行病学研究的统合分析中。

近年来,发现陇东地区土结构房屋中存在高水平的<sup>220</sup>Rn<sup>[3-4]</sup>,由于 Radtrak 探测器采用了高渗透性的滤膜,暴露期间<sup>220</sup>Rn 可随<sup>222</sup>Rn 同时进入探测器,对测量结果造成干扰,致使过高地估计了<sup>222</sup>Rn 的暴露水平<sup>[5]</sup>。因此,有必要对调查中采用的探测器进行研究,探讨对已往研究数据进行修正的方法。

## 1 Radtrak 探测器

甘肃调查<sup>222</sup>Rn 暴露水平的测量采用 Radtrak 探测器,该探测器由美国 Landauer 公司提供,已通过美国 EPA 国家氡专业计划认可<sup>[6]</sup>,广泛用于氡流行病学调查氡暴露量估算和室内高氡房屋的筛选。

Radtrak 探测器的结构简单,由扩散杯、径迹片和滤膜 3 部分组成。扩散杯是一直径为 36 mm、高 25 mm 的圆柱形小盒,盒盖上有 9 个  $\phi 0.6$  cm 的空气交换孔,采用普通滤纸作为过滤膜,径迹片材料为 CR-39。

Radtrak 探测器的空气交换窗设在扩散杯的顶部。在暴露期间,氡气通过空气交换窗进入扩散杯,杯中<sup>222</sup>Rn 或<sup>220</sup>Rn 的交换率主要取决于滤膜的渗透性和空气交换窗的面积,可由下式<sup>[7]</sup>表示:

$$r = KA/\delta V \quad (1)$$

式中: $r$  为扩散杯的空气交换率, $\text{h}^{-1}$ ;  $K$  为<sup>222</sup>Rn 或<sup>220</sup>Rn 经过滤膜的扩散系数, $\text{cm}^2 \cdot \text{h}^{-1}$ ;  $A$  为空气交换窗的交换面积, $\text{cm}^2$ ;  $\delta$  为滤膜厚度, $\text{cm}$ ;  $V$  为扩散杯体积, $\text{cm}^3$ 。

Radtrak 探测器采用普通滤膜,滤膜的扩散系数  $D_f$  为  $2.73 \text{ cm}^2 \cdot \text{h}^{-1}$  ( $\delta$  为  $0.157 \text{ mm}$ ),扩散杯的  $A$  为  $2.54 \text{ cm}^2$ ,  $V$  为  $22 \text{ cm}^3$ 。将以上参数代入式(1),可计算出 Radtrak 探测器的  $r$

值(表 1)。

空气中的<sup>222</sup>Rn、<sup>220</sup>Rn 通过探测器的交换窗进入扩散杯,采用  $\alpha$  径迹探测器测量时,通常需放置 3 个月 ( $t \gg \lambda^{-1}$ ),当扩散杯中<sup>222</sup>Rn、<sup>220</sup>Rn 浓度( $C_{\text{in}}$ )与被测空气中的<sup>222</sup>Rn、<sup>220</sup>Rn 浓度( $C_{\text{out}}$ )达到平衡时,杯内外<sup>222</sup>Rn (或<sup>220</sup>Rn)浓度的比值  $R$  可用下式<sup>[8]</sup>表示:

$$R = C_{\text{in}}/C_{\text{out}} = r/(\lambda + r) \quad (2)$$

式中: $\lambda$  为<sup>222</sup>Rn 或<sup>220</sup>Rn 的衰变常量( $\text{h}^{-1}$ ), $\lambda^{222}_{\text{Rn}} = 0.007 55 \text{ h}^{-1}$ ,  $\lambda^{220}_{\text{Rn}} = 44.9 \text{ h}^{-1}$ 。

代入<sup>222</sup>Rn、<sup>220</sup>Rn 的衰变常量和已知的  $r$  值,可分别计算出达到平衡时<sup>222</sup>Rn 或<sup>220</sup>Rn 在 Radtrak 探测器内外的比值  $R$ (表 1)。

对  $\alpha$  径迹探测器, $R$  值的可接受范围为  $R^{222}_{\text{Rn}} > 0.90$ 、 $R^{220}_{\text{Rn}} < 0.01$ <sup>[9]</sup>。Radtrak 探测器对于<sup>220</sup>Rn 的  $R$  值为 0.309 4,远超出 0.01 的限值。

表 1 Radtrak 探测器的  $r$  和  $R$  值  
Table 1  $r$  and  $R$  of Radtrak detector

核素	$T_{1/2}$	$\lambda/\text{h}^{-1}$	$r/\text{h}^{-1}$	$R$
<sup>222</sup> Rn	3.824 d	0.007 55	20.1	0.999 6
<sup>220</sup> Rn	55.6 s	44.9	20.1	0.309 4

径迹探测器通过径迹密度得到氡浓度,径迹密度与探测器的灵敏度、暴露时间的关系<sup>[10]</sup>如下:

$$N^{222}_{\text{Rn}} = C^{222}_{\text{Rn}} \epsilon^{222}_{\text{Rn}} t \quad (3)$$

若探测器对<sup>222</sup>Rn 和<sup>220</sup>Rn 均灵敏,则探测器上的径迹密度  $N_{\text{tot}}$  不仅来自<sup>222</sup>Rn,也有<sup>220</sup>Rn 的贡献,有:

$$N_{\text{tot}} = N^{222}_{\text{Rn}} + N^{220}_{\text{Rn}} = C^{222}_{\text{Rn}} \epsilon^{222}_{\text{Rn}} t + C^{220}_{\text{Rn}} \epsilon^{220}_{\text{Rn}} t \quad (4)$$

扣除<sup>220</sup>Rn 贡献后,<sup>222</sup>Rn 浓度表达如下:

$$C^{222}_{\text{Rn}} = N_{\text{tot}}/(\epsilon^{222}_{\text{Rn}} t) - \epsilon^{220}_{\text{Rn}}/\epsilon^{222}_{\text{Rn}} \times C^{220}_{\text{Rn}} \quad (5)$$

式中: $N^{222}_{\text{Rn}}$ 、 $N^{220}_{\text{Rn}}$  分别为<sup>222</sup>Rn、<sup>220</sup>Rn 的径迹密度, $\text{cm}^{-2}$ ;  $\epsilon^{222}_{\text{Rn}}$ 、 $\epsilon^{220}_{\text{Rn}}$  分别为探测器对<sup>222</sup>Rn、<sup>220</sup>Rn 的灵敏度, $\text{cm}^{-2}$  ( $\text{kBq} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$ );  $C^{222}_{\text{Rn}}$ 、 $C^{220}_{\text{Rn}}$  分别为被测场所<sup>222</sup>Rn、<sup>220</sup>Rn 的浓度, $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $t$  为暴露时间, $\text{h}$ 。

## 2 对 Radtrak 探测器的改进

通过控制扩散杯内外的空气交换速率,对 Radtrak 探测器进行了改进。一只保持原样,用来测量  $^{222}\text{Rn}$  和  $^{220}\text{Rn}$ ,另一只用金属密封材料将盒盖上的空气交换孔密封,含  $^{222}\text{Rn}$  气体只能从盒盖的缝隙中进入,以延迟气体进入探测器的时间,将  $^{220}\text{Rn}$  阻挡在盒外。改进后,  $^{222}\text{Rn}$  的  $r$  值仅为  $0.08\text{ h}^{-1}$ ,  $R_{^{220}\text{Rn}}$  约为  $0.002$ ,可排除  $^{220}\text{Rn}$  的影响。

对改进后的探测器(简称 R-T 探测器)分别在南华大学标准  $^{222}\text{Rn}$  和  $^{220}\text{Rn}$  室进行了刻度。 $^{222}\text{Rn}$  室浓度范围为  $650\sim 7\,000\text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ ,  $^{220}\text{Rn}$  室浓度范围  $6\,000\sim 12\,000\text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ ,暴露时间  $27\sim 120\text{ h}$ 。 $^{222}\text{Rn}$  杯对于  $^{222}\text{Rn}$  的灵敏度为  $(3.15\pm 0.41)\text{ cm}^{-2}(\text{kBq}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h})^{-1}$ ,  $^{220}\text{Rn}$  杯对于  $^{222}\text{Rn}$  和  $^{220}\text{Rn}$  的灵敏度分别为  $(3.01\pm 0.43)$  和  $(2.15\pm 0.31)\text{ cm}^{-2}(\text{kBq}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h})^{-1}$ 。

为了解改进后的 Radtrak-R-T 探测器对  $^{222}\text{Rn}$ 、 $^{220}\text{Rn}$  的分辨能力,在高  $^{222}\text{Rn}$  和高  $^{220}\text{Rn}$  混合室对探测器进行了测定。 $^{220}\text{Rn}$ 、 $^{222}\text{Rn}$  浓度比选择为  $1\sim 2.5$ ,结果列于表 2。在高  $^{220}\text{Rn}$  和高  $^{222}\text{Rn}$  同时存在的条件下,  $^{222}\text{Rn}$ 、 $^{220}\text{Rn}$  的实

测值与参考值的相对偏差  $< 10\%$ 。改进后的 Radtrak-R-T 探测器可有效克服  $^{220}\text{Rn}$  的干扰,准确给出  $^{220}\text{Rn}$ 、 $^{222}\text{Rn}$  的浓度。

## 3 现场验证

采用改进后的 Radtrak-R-T 探测器对甘肃调查现场的部分房屋进行了测量。探测器按甘肃调查时的方式布放,考虑到测量位置对  $^{220}\text{Rn}$  的影响,探测器被固定在靠近墙面的位置,使得  $^{220}\text{Rn}$  杯空气交换孔到墙的距离保持  $2.5\text{ cm}$ 。探测器暴露时间为 6 个月。暴露结束后,送回实验室进行径迹分析。按在标准  $^{222}\text{Rn}$ 、 $^{220}\text{Rn}$  室得到的  $\epsilon^{222}\text{Rn}$ 、 $\epsilon^{220}\text{Rn}$  分别计算被测房间中  $^{222}\text{Rn}$ 、 $^{220}\text{Rn}$  和受到  $^{220}\text{Rn}$  影响的浓度。

表 3 为改进后的 Radtrak-R-T 探测器在 5 类不同类型房屋中的实测结果。从表 3 可看到,探测器改进前和改进后的  $C^{222}\text{Rn}$  有较大差异。在靠近墙面的位置,由于  $^{220}\text{Rn}$  的影响,  $C_0/C^{222}\text{Rn, 实测}$  平均值为 3.4,是实际  $^{222}\text{Rn}$  浓度的 2.4 倍。

将探测器灵敏度代入式(5),得到  $C^{222}\text{Rn} =$

表 2  $^{220}\text{Rn}$ 、 $^{222}\text{Rn}$  混合室中的测量结果

Table 2 Results in  $^{220}\text{Rn}$  and  $^{222}\text{Rn}$  mixed chamber

混合室参考浓度/( $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ )		$C^{220}\text{Rn, 参考}$ /	实测浓度/( $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ )		实测值与参考值的相对偏差/%	
$^{222}\text{Rn}$	$^{220}\text{Rn}$	$C^{222}\text{Rn, 参考}$	$^{222}\text{Rn}$	$^{220}\text{Rn}$	$^{222}\text{Rn}$	$^{220}\text{Rn}$
5 202	5 223	1.0	5 681	5 234	9.21	0.21
6 293	9 351	1.5	5 971	10 064	-5.12	7.62
4 850	11 980	2.5	4 833	12 446	-0.35	3.89

表 3 测量结果与计算结果的比较

Table 3 Comparison between measured and calculated data

房屋类型	房屋数	$C^{222}\text{Rn}/(\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3})$		$C^{222}\text{Rn, 计算}/C^{222}\text{Rn, 实测}$	$C^{220}\text{Rn}/(\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3})$		$C^{220}\text{Rn, 计算}/C^{220}\text{Rn, 实测}$	$C_0/(\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3})$	
		实测	计算		实测	计算		$C_0$	$C_0/C^{222}\text{Rn, 实测}$
地坑窑	10	157	130	0.83	553	515	0.93	525	3.3
半明半暗窑	9	192	164	0.86	582	543	0.93	580	3.0
明窑	8	140	115	0.82	533	498	0.94	496	3.5
箍窑	8	74.1	54.4	0.73	414	386	0.93	350	4.7
普通房	13	67.9	56.6	0.83	233	217	0.93	223	3.3

注:  $C_0$  为未对  $^{220}\text{Rn}$  的干扰进行修正的  $^{222}\text{Rn}$  浓度的计算结果,  $C_0 = N_{\text{tot}}/(\epsilon^{222}\text{Rn}t)$

$C_0 - 0.714C_{220\text{Rn}}$ 。根据这一关系,可对 Radtrak 探测器的结果进行修正。结果表明, $^{222}\text{Rn}$  和  $^{220}\text{Rn}$  浓度计算值与实测值相对偏差分别为  $14\% \sim 27\%$  和  $6\% \sim 7\%$ , 计算值与实测值基本相符。

甘肃调查时的绝大部分探测器布放在靠近墙壁的位置。该地区土结构房屋中的  $^{220}\text{Rn}$  浓度与探测器布放距离有固定关系。根据这一关系得到的  $^{220}\text{Rn}$  浓度和上述修正公式,可用以对以往  $^{222}\text{Rn}$  的调查数据进行修正。

#### 4 结论

通过控制扩散杯的空气交换率  $r$ , 对 Radtrak 探测器进行了改进。改进后, $^{222}\text{Rn}$  的  $r$  值为  $0.08\text{ h}^{-1}$ ,  $^{220}\text{Rn}$  的进入率控制在  $0.2\%$  水平,可有效排除  $^{220}\text{Rn}$  的干扰。

采用改进后的 Radtrak-R-T 探测器,高  $^{222}\text{Rn}$ 、 $^{220}\text{Rn}$  混合情况下的测量值与参考值的相对偏差  $< 10\%$ , 可满足同时测量  $^{222}\text{Rn}$ 、 $^{220}\text{Rn}$  的需要。

现场初步测量结果表明, $^{222}\text{Rn}$ 、 $^{220}\text{Rn}$  的理论值与实测值的相对偏差范围分别为  $14\% \sim 27\%$  和  $6\% \sim 7\%$ 。

在土结构房屋中, $^{220}\text{Rn}$  浓度与探测器与墙之间的距离有固定关系,根据这一关系得到的  $^{220}\text{Rn}$  浓度和探测器的修正公式可用于对以往  $^{222}\text{Rn}$  调查数据的修正。

#### 参考文献:

[1] WANG Z, LUBIN J H, WANG L, et al. Residential radon and lung cancer risk in a high-exposure area of Gansu province[J]. China Am J Epidemiol, 2002, 155: 554-564.

[2] LUBIN J H, WANG Z, BOICE J D, et al. Risk of lung-cancer and residential radon in China;

Pooled results of tow studies[J]. Int J Cancer, 2004, 109: 132-137.

- [3] SHANG B, IIDA T, IKEBE Y, et al. Influence of  $^{220}\text{Rn}$  on  $^{222}\text{Rn}$  measurement in Chinese cave dwellings[C]// KATASE A, SHIMO M. Radon and Thoron in the Human Environment. Singapore: World Scientific, 1997: 379-384.
- [4] WIEGAND J, FEIGE S, QUINGLING X, et al. Radon and thoron in cave dwellings (Yan'an, China)[J]. Health Phys, 2000, 78: 438-444.
- [5] YAMADA H, SUN Quanfu, TOKONAMI S, et al. Radon-thoron discriminative measurements in Gansu province, China and their implication for dose estimates[J]. Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A, 2006, 69: 723-734.
- [6] U. S. Environmental Protection Agency. Radon proficiency program handbook, residential measurement and mitigation proficiency[R]. Washington: U. S. Environmental Protection Agency Office of Radiation and Indoor Air, 1996.
- [7] IIDA T, IKEBE Y, HATTORI T, et al. An electrostatic integrating  $^{222}\text{Rn}$  monitor with cellulose nitrate film for environmental monitoring[J]. Health Phys, 1988, 54(2): 139-148.
- [8] GUO Qiuju, IIDA T, OKAMOTO K. Measurement of thoron concentration by passive cup method and its application to dose assessment[J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 1995, 32: 694-696.
- [9] WARD W J, FLEISCHER R L, MOGRO C A. Barrier technique separate measurement of radon isotopes[J]. Rev Sci Instrum, 1977, 48(11): 1 440-1 441.
- [10] NIKEZIC D, YU K N. LR115 detector response to  $^{222}\text{Rn}$  in the presence of  $^{220}\text{Rn}$  [J]. Health Phys, 2000, 78: 414-419.