

· 辐射防护监测 ·

# 基于土壤氡源的湿度可调控的氡室系统

茅钰才<sup>1</sup>, 王云祥<sup>1</sup>, 张 磊<sup>2</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. 军事科学院防化研究院核防护研究所, 北京 102205)

**摘要:**氡是构成天然辐射本底的主要成分,是辐射环境监测的重要内容之一。利用已知标准氡活度浓度的氡室对氡测量仪器进行刻度校正和性能检验,是氡测量中质量保证的重要环节。氡室通常由标准镭源以及氡活度浓度和湿度可以稳定调控的箱体构成,其中放射性镭源的获取及安全管理,常常给氡室的制造和推广使用带来困难。本研究依据地表深层土壤中氡活度浓度高且长时间稳定的特性,研制出了一种基于土壤氡源的湿度可调控的简易氡室系统。该系统利用不同比例的土壤气体和空气混合,调节氡活度浓度;利用电除湿,在一定范围内调节湿度。实验结果表明,该套氡室系统氡活度浓度能够在 826~5 852 Bq/m<sup>3</sup> 范围内稳定调节,相对湿度能够在 30.8%RH~70.6%RH 范围内调节,氡活度浓度和湿度的稳定时间都能超过 40 小时。该氡室系统摆脱了镭源的限制,简单且易于实现,能够应用于测氡仪标定或检验实验,服务于教学和科研,有望推广应用于测氡仪的比对和质量控制。

**关键词:**氡室;氡气体;土壤氡;湿度调控;氡活度浓度调控

中图分类号: X859

文献标识码: A

铀系衰变链中放射性惰性气体氡(<sup>222</sup>Rn)测量在辐射环境监测、地质勘探、地震预报、大气科学及地球物理学等领域有着广泛的应用<sup>[1-4]</sup>。为确保测量质量,在氡计量体系内,氡测量仪器需要在可溯源的氡室内进行刻度校准。目前国际上公认的 Alpha GUARD 测氡仪(PQ2000, Saphymo, 法国)因其良好的稳定性,其扩散模式测量可以用来传递氡活度浓度(以下简称“氡浓度”)基准(GB/T 13163《辐射防护仪器 氡及氡子体测量仪》)。

迄今为止,氡室的设计、建造、发展已经有 30 多年的历史。国际上有诸如美国的 EML、EPA,德国的 PTB、BfS,英国的 NRPB,澳大利亚的 ARL,日本的 NIRS,韩国的 KRISS 等相关科研机构 and 政府监管部门研发的氡室<sup>[5-10]</sup>。

我国自从 1988 年原核工业第六研究所(湖南衡阳,现南华大学)研制了国内的第一个氡室之后<sup>[11]</sup>,相继发展诞生了东华理工学院研制的 HD-3 型氡室,南华大学的 PWM 控制法调控换气量的氡室,国家建筑工程室内环境检测中心的 DSZ-3 型标准氡室,国家计量科学院的自动调控气溶胶

粒径和浓度的氡室<sup>[12-15]</sup>等等。这些氡室按照浓度调控原理,可以分为动态的循环式控制和静态的非连续走气调控两种类型。从氡源类型上有固体和液体镭源的不同形式<sup>[16-17]</sup>。

无论是国家级或行业内的大型标准氡室,还是体积相对较小的二级或三级氡室,通常调控系统复杂,成本昂贵。标准镭源无论活度大小,在购买和使用许可申请、放射源安全保存保管、镭源的科学校准等实际问题。在实际工作中,例如地震台站、辐射环境监测站或大多数实验室,日常工作及科研活动并不需要大型氡室的诸多优异性能,只要有一台在国家计量系统刻度认证过的 Alpha GUARD 测氡仪和能够对测氡仪器开展检验或刻度校准的简易箱体,即能满足绝大多数仪器检验或刻度的应用需求。

联合国原子辐射影响科学委员会(UNCSEAR)2000 年报告中指出,土壤气体中含有很高的氡<sup>[18]</sup>。国外研究者也有使用罐装式土壤氡气或是直接挖出土壤作为氡源的做法<sup>[19-21]</sup>。另外,在关于土壤氡气的研究中,发现在地质条件稳

收稿日期: 2019-05-06

作者简介: 茅钰才(1996—),男,2018 年 7 月毕业于北京大学元培学院物理学专业,博士研究生。E-mail: maoyuca@ pku. edu. cn

定区域,深层土壤氡气浓度能长时间的维持在一个较高的稳定水平<sup>[22]</sup>。鉴于土壤气体中氡气浓度较高、稳定性好这两个理想特性,我们研发了一套基于土壤氡源的湿度可控的简易氡室系统。

该氡室系统使用土壤气体作为氡源,选用有机塑料等可视材料作为箱体,设计了独特的湿度调控及氡浓度调控系统,搭建方便,成本低廉、调

控方式简单。本文将对此氡室系统基本构成、浓度和湿度调控操作方式以及相关的性能参数进行介绍,希冀为国内同行提供参考和借鉴。

## 1 材料和方法

氡室系统的装置示意图如图 1 所示。具体各模块组成、功能、使用方法叙述如下。

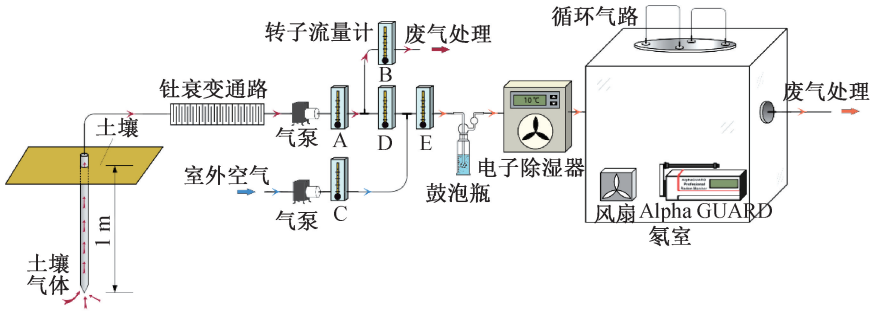


图 1 基于土壤氡源的湿度可控氡室系统实验装置示意图

Fig. 1 The diagram of humidity controllable radon chamber system based on soil radon

### 1.1 采气处理

为获取稳定的较高浓度的氡气,将不锈钢采气长管打入室外地表土壤深度大于 1 m 的位置,并长期固定。在露出地面的一端接气管和气泵并以恒定流速向外抽气。在采气管和气泵之间使用具有较长回路的衰变通路以避免<sup>220</sup>Rn 干扰,使得气体经过通路的时间大于 5 min,令<sup>220</sup>Rn 充分衰变。得益于土壤氡浓度的长期稳定性和稳定的取气流速,采用流气法采气,可以使得土壤氡取气管出口处的氡浓度能够较长时间保持稳定。

### 1.2 氡浓度调控设计

采用流气式方法对氡室内氡浓度进行调控。如图 1 所示,我们设计了由 5 个转子流量计(A~E)构成的浓度调节系统,通过调节 5 个转子流量计的限流来控制土壤氡气和室外大气气体的混合比,从而实现对注入氡室气体的氡浓度调节。具体描述如下:

a) 使用流量计 A 控制抽气流速,确保以恒定流速采集和获取氡气。北京大学氡室系统中使用的流速值  $v_A$  为 3 Lpm。

b) 引入转子流量计 B、C、D。其中转子流量计 B 控制土壤气流的分流流速,C 控制气泵从大气中抽取气体的流速,两者混合实现对土壤氡气稀释比的调控,从而实现调控氡浓度的目的。两

个流量计可调节范围为 0~5 Lpm。流量计 D 不限流,为了使得土壤氡气和大气气体可以充分混合,且确保不会出现回流的情况,同时也有观察分流流速,确定稀释比的效果,进而实现对浓度调节的预估。

c) 为了便于湿度稳定调控,需确保 E 处的流量稳定。在浓度调节的最后加入不限流的流量计 E,通过调节 B 和 C 处的流量,保证 E 处的流量稳定。经过氡浓度调节后的混合气体以恒定的流速,通过湿度调节系统,进入氡室系统。北京大学氡室系统中,进入氡室的恒定流速设定为 3 Lpm。

根据以上设计,得到的流量计 E 处的混合气体的氡浓度  $C_E$  满足以下方程:

$$C_E = \frac{v_D}{v_C + v_D} C_{\text{soil}} = \frac{v_A - v_B}{v_C + v_A - v_B} C_{\text{soil}} \quad (1)$$

在连续流气式调控的氡室系统中,在一段时间的稳定后, $C_E$  浓度即可代表氡室内的浓度,稳定所需时长将在下文中展示。上式中  $C_{\text{soil}}$  为土壤气中的氡浓度,可以通过调节空气气路流速使得  $v_C$  为零,即土壤气体完全不被混合的情况下由氡室内的标准仪器 AlphaGUARD 测量得到  $C_{\text{soil}}$  数值。在得知土壤气体氡浓度的前提下,就可以通过调节两路气体混合比,实现对进入氡室的气体的浓度调控。

### 1.3 湿度调节设计

为了实现对氡室内环境的湿度调节,以满足不同湿度条件下测氡仪器的刻度需求,氡浓度调节后的气体需要经过湿度调节模块进行二次处理。湿度调节模块由一个鼓泡瓶和电子除湿器(正源电热机械有限公司, DH-1, 中国)构成,气体以稳定流速经过鼓泡瓶,加湿至接近于饱和空气湿度,再通过电除湿器,除湿至设定的稳定湿度。电除湿器温度可以设定在 1 ℃ 至室温之间,进而稳定调控进入氡室内的气体湿度,实现氡室内的湿度调控。

### 1.4 氡浓度与湿度测量

北京大学氡室系统中,较高浓度氡气在完成浓度和湿度调节之后,将鼓入一个体积约 300 L 的方形腔室。该方形腔室内置入一台风扇确保氡气在腔室内均匀分布。放置 Alpha GUARD PQ2000 测氡仪在腔室内作为标准仪器,以其扩散模式测量腔室内的氡浓度和湿度。如图 1 所示,该氡室中,待测仪器可以通过上盖,直接放入腔室内测量。另外,氡室上方开有 4 个进出气口,合计两条循环气路,可供待测仪器测试标定使用。这两种不同的使用方式,可以为多种不同原理的测氡仪进行刻度校正或检验。

## 2 结果和讨论

为了检验氡室系统的性能,我们进行了两轮分别调控氡浓度和湿度的实验,以期检验该氡室系统的调节范围与稳定性。

### 2.1 湿度恒定的氡浓度调控实验

在氡浓度调控期间,固定电除湿的温度为 12.5 ℃ (室温 25 ℃ 左右),Alpha GUARD 的测量周期设置为 1 h,以扩散模式对氡室内的氡浓度和湿度进行测量记录,并对浓度调节模块的各个转子流量计进行调节。利用公式(1),可以根据流量计 B、C 的流速和实测的  $C_{soil}$ ,计算得到预估的氡室浓度  $C_{cal}$ ,并将其与 Alpha GUARD 测氡仪实测的氡室内浓度进行比对。三次调节的流量计流速参数设置以及得到的氡室内氡浓度如表 1 所示。

表 1 氡浓度调节参数及氡室内氡浓度实测值和预估值

Tab. 1 Parameters and radon concentrations during concentration adjustment

序号	B 处流速 $v_B$ (Lpm)	C 处流速 $v_C$ (Lpm)	氡室浓度 $C_E$ ( $Bq \cdot m^{-3}$ )	理论浓度 $C_{cal}$ ( $Bq \cdot m^{-3}$ )
1	0.0	0.0	5 852±111	—
2	2.6	2.6	826±65	780
3	1.6	1.6	3 357±77	3121

在 3 Lpm 取气流速情况下,北京大学氡室系统取气点位上,取气出口处的氡浓度约为 5 852  $Bq/m^3$ ,此时可认为  $C_E = C_{soil}$ ,理论浓度基于此可通过(1)式计算。不同的土壤气体和大气气体混合比情况下,可以实现氡室内氡浓度的调控,且实测的氡室内浓度值同理论预估值基本符合。实验表明,通过气体氡浓度调控系统,实现不同比例土壤气体的稀释,可以简单有效地调控氡室内的氡浓度。

氡浓度调控期间,氡室内氡浓度及相对湿度随时间的变化情况如图 2 所示。

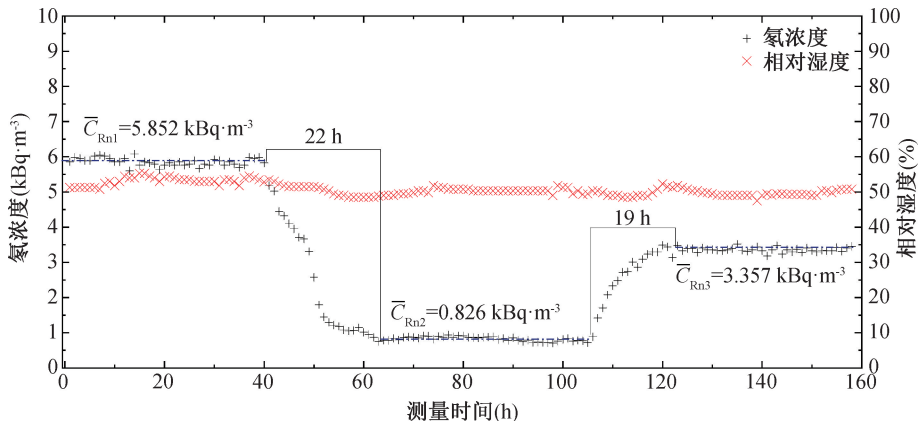


图 2 湿度恒定的氡浓度调控变化曲线

Fig. 2 Adjustment results of radon concentration at a stable level of humidity inside radon chamber

从图2中可以得知,在整个调控过程中,氡室内的相对湿度可以较好地稳定在 $(50.8 \pm 1.7)\%$  RH的水平。通过控制转子流量计流速来改变土壤气路和大气气路的流速混合比,可以实现在 $826 \sim 5\,852\text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ 范围内的氡浓度稳定调控,且每个浓度稳定平台能长达40小时。

同时还可以注意到,受限于腔室体积300 L、换气流量3 Lpm以及氡室潜在漏气影响,浓度降低过程需要时间约为22小时,浓度上升需要时间约为19小时。事实上,在实际操作过程中,可以通过氡室中其他气路快速补充氡和快速排空氡,或者依据实际的需求,提高换气率,降低腔室体积,有效缩短浓度调控的响应时间。

需要注意的是,土壤中氡浓度水平与采气点的地质环境、土壤镭含量和含水量等多种局地因素有关,也与连续采气的气体流速有关。故该实

验系统可调节范围内的最高浓度在不同区域使用时会存在差异,选择更低的采气流速,也可以提高氡浓度调控上限。而实验所需的低浓度下限,可以通过已知的最高浓度值和更大的稀释比获得。

## 2.2 氡浓度恒定的湿度调控实验

为了实现单一变量的实验条件,将控制稀释比例的转子流量计B、C完全关闭,即不进行氡浓度调节。在氡室内温度稳定的情况下,电除湿器调控的露点温度和相对湿度之间存在一一对应的关系。湿度调节完成后,记录氡室内连续测量的Alpha GUARD的湿度浓度数据,测量周期同样为1 h。当腔室内湿度和氡浓度稳定达到一定时长后,再进行另外一个平台的湿度调节。实验中分别设置电除湿的温度为 $5.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $18.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $12.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 三个档位,最终得到测量结果如图3所示。

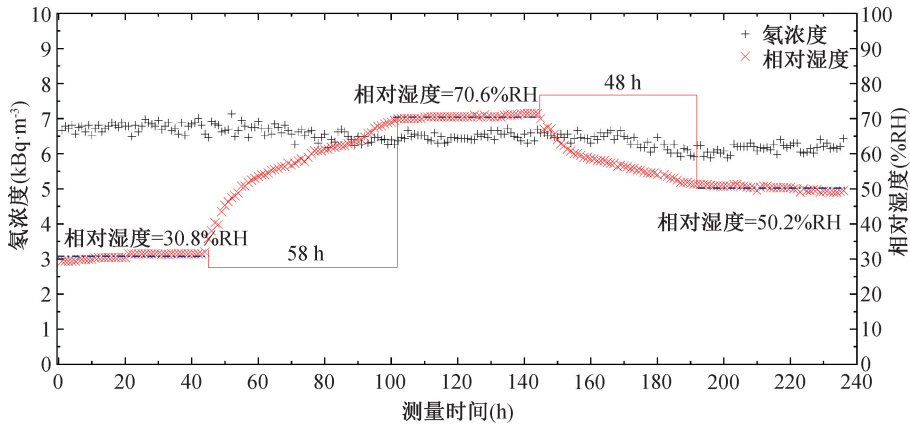


图3 氡浓度恒定时湿度调控变化曲线

Fig. 3 Adjustment results of relative humidity at a stable radon concentration inside radon chamber

由图3可见,氡室内氡浓度在整个湿度调节期间能够保持长时间稳定。通过调节电除湿的温度档位,得到的三个不同湿度分别可以稳定在 $(30.8 \pm 0.8)\%$  RH、 $(70.6 \pm 0.5)\%$  RH、 $(50.2 \pm 0.7)\%$  RH水平,且每个档位能够在长时间内维持湿度稳定。即可以通过上述的调控方式使得氡室在氡浓度稳定的情况下得到不同的湿度环境,通过调节电除湿的温度,可以实现湿度在 $(30.8 \sim 70.6)\%$  RH范围内的连续调节。另外湿度上升和下降过程中达到平衡时间分别约为58和48小时。相比于浓度调节过程,湿度调节则需要更长的平衡时间。

从图2和图3的结果中可以注意到,在氡浓度和湿度调节过程中,稳定平台之间的调控需要较长时间,需要时间的长短取决于氡室体积的大小和流速限值二方面因素。为缩短湿度平台之间的调控时间,实际操作中可以在图1装置图中氡室上方的循环气路中接入干燥剂或鼓泡瓶加快气体交换与湿度平衡。

## 3 结论

为满足氡测量仪器在实际使用中检验、刻度和校准需求,确保氡测量质控工作开展,本研究基于地表深层土壤中氡浓度高且长时间稳定的特

性,研发建立了一种简易的流气式氡室系统。通过对土壤气体和大气气体的混合比例控制以及电子除湿器的温度设定控制,分别实现了对氡室内氡浓度和相对湿度的长时间稳定调控。

北京大学氡室系统,腔体体积 300 L,在本研究实验条件下,可调控相对湿度范围为(30.8~70.6)%RH,可调控氡浓度范围为 826~5 852 Bq·m<sup>-3</sup>,且在此范围内均可以实现连续稳定调节。本氡室系统符合中华人民共和国国家计量检定规程

《测氡仪》(JJG 825—2013)<sup>[23]</sup>中关于检定的氡浓度和湿度条件,满足大多数工作场景中对测氡仪器的刻度校准需求。

本研究研制的简易氡室系统结构简单、易于制备、操作方便、成本低廉,性能方面具有可调范围大、稳定时间长的优点。同时还省去了标准镭源在购置及使用管理中的繁琐环节。有望推广应用用于测氡仪的比对和质量控制,为教学、科研和辐射环境监测服务。

## 参考文献:

- [1] Hofmann W, Arvela H S, Harley N H, et al. Measurement and reporting of radon exposures[R]. ICRU Report 88. 2012, 12(2): 25-28.
- [2] Durrani S A. Radon concentration values in the field: correlation with underlying geology[J]. Radiation Measurements, 1999, 31(1-6): 271-276.
- [3] Geller R J. Earthquake prediction: a critical review[J]. Geophysical Journal International, 1997, 131(3): 425-450.
- [4] Takeuchi Y, Okumura K, Kajita T, et al. Development of high sensitivity radon detectors[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 1999, 421(1-2): 334-341.
- [5] Fisenne I M. Radon gas and radon/thoron progeny facilities for testing and research[J]. EML Procedures Manual, 1999, 1: 1-11.
- [6] Paul A, Honig A, Röttger S, et al. Measurement of radon and radon progenies at the German radon reference chamber[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2000, 52(3): 369-375.
- [7] Howarth C B, Miles J C H. Results of the 2001 NRPB intercomparison of passive radon detectors[R]. National Radiological Protection Board (United Kingdom), 2002.
- [8] Solomon S B, Gan W, Peggie J R. OECD/NEA radon intercalibration and intercomparison programme pacific region intercomparison programme[R]. Australian Radiation Lab., 1985.
- [9] Ichitsubo H, Yamada Y, Shimo M, et al. Development of a radon-aerosol chamber at NIRS—General design and aerosol performance[J]. Journal of Aerosol Science, 2004, 35(2): 217-232.
- [10] Lee J M, Ahn K H, Chai H S, et al. Development of radon calibration chamber at KRISS[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2004, 61(2-3): 237-241.
- [11] 丘寿康,周剑良,肖更生,等. 中国第一个氡及氡子体刻度和试验装置[J]. 铀矿冶, 1991, 10(4):30-34.  
QIU Shoukang, ZHOU Jianliang, XIAO Gengsheng, et al. The first radon and radon progeny calibration and test facility in China[J]. Uranium mining and Metallurgy, 1991, 10(4):30-34.
- [12] 万骏,张锦由,万坤祥. HD-3型氡室结构与性能简介[J]. 辐射防护通讯, 2002, 22(4):38-40.  
WANG Jun, ZHANG Jingyou, WANG Kunxiang. Brief introduction to structure and performance of HD-3 intercalibration and intercomparison of radon, thoron and daughters measuring[J]. Radiation Protection Bulletin, 2002, 22(4):38-40.
- [13] 刘良军,周剑良,孟治成,等. 氡室氡浓度调控系统的研究[J]. 核技术, 2007, 30(6):79-82.  
LIU Liangjun, ZHOU Jianliang, MENG Yecheng. Radon concentration control system of radon chamber[J]. Nuclear Technique, 2007, 30(6):79-82.
- [14] 王倩雪,吴文保,王喜元. DSZ-3型标准氡室的研制及性能测试[J]. 辐射防护通讯, 2010, 30(6):32-35.  
WANG Jingxue, WU Wenbao, WANG Xiyuan. Development and test of Model DSZ-3 standard radon chamber[J]. Radiation Protection Bulletin, 2010, 30(6):32-35.
- [15] LIANG J C, ZHENG P H, YANG Z J, et al. Development of calibration facility for radon and its progenies at NIM (China)[J]. Radiation Protection Dosimetry, 2015, 167(1-3): 82-86.

- [16] 刘玉璋, 杨君豪. 液体镭标准源的制备[J]. 核技术, 1983 (4): 55-56.  
LIU Yuzhang, YANG Junhao. Preparation of radium standard solution[J]. Nuclear Technique, 1983 (4): 55-56.
- [17] 柯璟, 柯玉龙, 庄映辉, 等. 对几种固体氡源在标定测氡仪器中性能的探析[J]. 华南地震, 2015, 35(2): 43-49.  
KE Jing, KE Yulong, ZHUANG Yinghui, et al. The analysis of the performance in the calibration of radon measurement instrument by several kinds of solid standard source[J]. South China Journal of Seismology, 2015, 35(2): 43-49.
- [18] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and effects of ionizing radiation: sources [M]. United Nations Publications, 2000.
- [19] Al-Azmi D. The use of soil gas as radon source in radon chambers[J]. Radiation Measurements, 2009, 44(3): 306-310.
- [20] Abdalla A M, Al-Hajry A. Radon irradiation chamber and its applications [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2015, 786: 78-82.
- [21] Kumar A, Walia V, Yang T F, et al. Radon-thoron monitoring in Tatun volcanic areas of northern Taiwan using LR-115 alpha track detector technique: Pre-calibration and installation[J]. Acta Geophysica, 2013, 61(4): 958-976.
- [22] Winkler R, Ruckerbauer F, Bunzl K. Radon concentration in soil gas: a comparison of the variability resulting from different methods, spatial heterogeneity and seasonal fluctuations[J]. Science of the Total Environment, 2001, 272(1-3): 273-282.
- [23] 中国计量科学研究院, 上海市计量测试技术研究院. 测氡仪: JIG 825—2013[S]. 北京: 中国质检出版社, 2013.

## Study on a humidity controllable radon chamber system based on soil-radon

MAO Yucui<sup>1</sup>, WANG Yunxiang<sup>1</sup>, ZHANG Lei<sup>2</sup>, GUO Qiuju<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology, School of Physics, Peking University, Beijing 100871;

2. State Key Laboratory of NBC Protection for Civilian, Beijing 102205)

**Abstract:** Radon is the major components of the natural radiation background, and radon measurement is important for radiation environmental monitoring. Radon chamber, used for the calibration and performance check of radon monitors, plays an important role during the procedure of quality control for radon measurement. Conventional radon chamber generally consists of standard radium sources and volume for controlling radon concentration and humidity. While permission and safety management of standard radium source make conventional radon chambers difficult to develop and widely use. On the basis of the characteristics of soil gas which has high and stable radon concentration, a humidity controllable radon chamber system based on soil-radon is designed and constructed. This radon chamber system realizes the control of radon concentration by mixing air with soil gas in different fraction, and that of humidity by refrigeration type dryer. The research of radon chamber system made by Peking University shows the radon concentration and relative humidity can be controlled from 826-5 852 Bq/m<sup>3</sup>, and 30.8%-70.6%, respectively, and both of them can be stable for over 40 hours. This radon system gets rid of the limitation of radium sources, and is easy to be constructed and realized. It provides a possible way for in-situ calibration for radon monitors and can be widely used on quality control for radon measurement.

**Key words:** radon chamber; radon gas; radon in soil; humidity control; radon concentration control