

起卫罗,曹舸斌,方伟.基于 AlphaGUARD P2000F 测氡仪利用水中溶解氡对 DDL-1 型气氡仪校准的实验研究[J].地震工程学报,2019,41(6):1560-1567.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.06.1560

QI Weiluo, CAO Gebin, FANG Wei. Experimental Study of the Calibration of a DDL-1 Gas Radon Meter Based on the AlphaGUARD P2000F Emanometer and Dissolved Radon[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(6): 1560-1567. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.06.1560

# 基于 AlphaGUARD P2000F 测氡仪利用水中溶解氡对 DDL-1 型气氡仪校准的实验研究

起卫罗, 曹舸斌, 方 伟

(云南省地震局, 云南 昆明 650224)

**摘要:** 对测氡仪器进行定期校准是保证测量结果准确性和可靠性的关键。基于用国际公认的计量传递仪器 AlphaGUARD P2000F 作为氡气溯源仪器及其自带水氡测量组件对三套 DDL-1 型电离法测氡仪使用水中溶解氡进行校准实验。实验结果和用固体氡源校准三套仪器的结果与仪器出厂校准结果进行对比,两种校准方法的  $K$  值相对误差均小于 5%, 达到目前地震监测氡观测技术要求。实验结果表明,水中溶解氡代替固体氡气源校准,可以解决目前固体氡源校准中存在的运输困难、维修技术要求高、国家环保部门监管严格等问题,为地震氡观测仪器校准技术找到了一种新的途径

**关键词:** 水中溶解氡校准; 固体氡源校准; DDL-1 型测氡仪; AlphaGUARD P2000F 测氡仪

**中图分类号:** P315.72

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-0844(2019)06-1560-08

**DOI:** 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.06.1560

## Experimental Study of the Calibration of a DDL-1 Gas Radon Meter Based on the AlphaGUARD P2000F Emanometer and Dissolved Radon

QI Weiluo, CAO Gebin, FANG Wei

(Earthquake Agency of Yunnan Province, Kunming 650224, Yunnan, China)

**Abstract:** Regular calibration of radon-measuring instruments is key to ensuring the accuracy and reliability of measurement results. Based on the internationally recognized measuring instrument AlphaGUARD P2000F and its own water raft measurement components, calibration experiments were carried out on three sets of DDL-1 ionization detectors using dissolved radon in water. The experimental and calibration results with the solid radon source were compared with those of the out-of-factory results. It was found that the relative errors of the  $K$  values of the two calibration methods were less than 5%, which meets the requirement of current seismic monitoring techniques. These results showed that the solution of dissolved radon in water, compared with the

solid radon source, solved the problems of transportation difficulties, high technical maintenance requirements, strict supervision of national environmental protection departments, etc., and defined a new approach to the calibration of seismic radon observation instruments.

**Keywords:** dissolved radon calibration; solid radon source calibration; DDL-1 emanometer; AlphaGUARD P2000F emanometer

## 0 引言

氡(Rn)是一种放射性惰性气体,由铀、钍(U, Th)经过系列衰变产生。自然界中有三种放射性氡同位素: $^{219}\text{Rn}$ 、 $^{220}\text{Rn}$ 和 $^{222}\text{Rn}$ 。其中, $^{222}\text{Rn}$ 半衰期最长,为3.825天,地震监测中主要是以 $^{222}\text{Rn}$ 为观测对象。氡能溶于水和有机质,在地质环境中除以气态方式迁移外,还以溶解态伴随地下水和土壤水迁移。氡是国际上公认的对地壳应力应变响应灵敏的地震前兆观测手段之一,在许多大震前后都表现一定的震前与震后异常<sup>[1-10]</sup>,近年来在国内外地震监测与预测领域备受重视。用于测量氡浓度的测氡仪在地震监测预报中得到越来越广泛的应用。作为相对测量仪器,测氡仪在出厂前必须经过量值刻度(校准),通过校准预置刻度系数使其读数值接近被测真值。由于探测器性能和电子元器件参数的变化,刻度系数(校准因子)也会因时间和环境等因素发生改变,所以必须对测氡仪进行定期校准,确保量值的统一和测量结果的准确可靠。校准是保证观测数据的可靠性与准确性的最重要、最关键技术环节,对利用氡进行地震监测预报的效果具有至关重要的作用。

目前,我国地震氡观测网有300多个氡测点,测氡仪数百台,这些仪器主要采用氡气固体源进行校准。我国用于地震观测仪器校准的固体氡气源有加拿大Pylon公司生产的RN-150型固体氡气源和八十年代末国产FD-3024型氡气固体源。固体氡气源校准操作简便,周期短、效率高,不受人为和环境条件变化的影响,校准精度高,准确可靠。但这些固体氡气源由于长时间使用,使得部分固体氡气源上的阀门损坏,有的内部管道渗漏等问题无法使用,造成部分装置已报废停止使用。由于高体积活度氡气固体源购买审批手续复杂,购买难度大。根据《中华人民共和国放射性污染防治法》和《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》等法律法规的规定,一旦购买后要长期接受环保管理部门的放射性监管。由于国家放射性物质运输管理制度严格,给氡源的定期质检也带来极大困难。为解决固体氡源的短缺问题,保障测氡仪器的正常运行,2011—2012年中国地震台网中心孔令昌等专家联合南华大学,将目前

报废的加拿大RN-150型与FD-3024型氡气固体源改造成RN-FD型循环式氡气固体源<sup>[11]</sup>,但该氡源只提供理论氡活度,在使用期间需要用计量传递测氡仪(AlphaGUARD P2000F)重新刻度,使用很不方便,故该校准装置没有得到很好的推广应用。基于上述问题,目前许多地震监测台站的氡观测仪器校准工作受到影响,有的台站甚至停止对仪器校准,已经影响氡观测资料的准确性。

根据氡观测技术规范要求<sup>[12]</sup>,无论是安装仪器、更换仪器主要部件,还是使用过程中的定期检查,都需要对使用仪器进行校准。中国地震氡观测仪器主流型号主要有人工水氡观测的FD-125型室内氡钍分析仪、FD-105K静电计和SD-3B型测氡仪及自动观测的SD-3A型气氡仪、DDL-1型电离法气氡仪<sup>[13]</sup>和BG2015R型气氡仪。无论模拟观测(人工观测)还是数字化自动连续观测,对仪器的校准都是必须的环节,这么多型号的仪器都送到国家指定的标准氡室进行统一校准必然会严重影响观测资料的连续率。

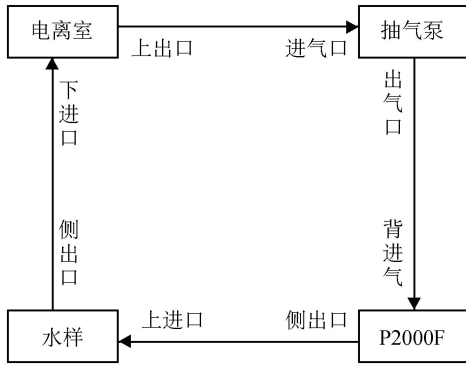
本文基于前人利用水中溶解氡对闪烁法测氡仪器进行校准的可行性成果基础上<sup>[14]</sup>,使用AlphaGUARD P2000F测氡仪,利用水中溶解氡对DDL-1型电离法气氡仪进行仪器校准实验(该型号仪器于2017年中标中国地震局台网中心仪器更新改造项目,在云南省地震局有一定的保有量),该实验结果和使用固体氡气源校准的结果与仪器出厂校准结果进行对比分析,探索利用水中溶解氡开展电离法氡观测仪器校准的可行方法,解决目前地震系统氡观测仪器校准工作存在的困难,为地震氡观测台网的可持续发展提供技术支撑。

## 1 实验装置及原理

### 1.1 水中溶解氡实验测量原理

根据《测氡仪:JJG825-2013》<sup>[15]</sup>,基于AlphaGUARD测氡仪可作为传递标准的功能,利用已通过标准氡室<sup>[16-17]</sup>检定的AlphaGUARD测氡仪作为标准仪器,水中溶解的氡气为介质,对氡观测仪器进行校准。将AlphaGUARD测氡仪、DDL-1型测氡

仪电离室、装有水样的鼓气瓶、Alpha 抽气泵及子体过滤器等串联,形成闭合循环系统(图 1)。打开抽气泵,循环鼓泡 10 min,鼓气瓶水中溶解的氡气被脱出,关闭采样泵,AlphaGUARD 测氡仪测得整个闭合系统的氡体积活度,该氡体积活度经温度、气压校正后,作为 DDL-1 型测氡仪电离室的体积活度。DDL-1 型测氡仪电离室的体积已知(0.7 L),测量电离室的电压值,经式(1)即可求的电离室的  $K$  值。



(a) 系统连接框图



(b) 系统实物连接图

图 1 水中溶解氡校准闭合循环系统连接图

Fig.1 Connection of closed recirculating system for the dissolved radon calibration

实验表明,无论是闪烁法还是电离法测氡,都会受温度和气压的影响<sup>[18-20]</sup>,因此需要对每一个测试结果都进行气压与温度校正。该校正主要是探测效率进行校正,探测效率校正的公式如下:

$$\epsilon = ae^{b(d_0-d)} \quad (2)$$

式中: $\epsilon$  为探测效率; $d_0$  为空气在标准状态下的密度,为 1.20 g/L; $d$  为任意状态的空气密度; $a$ 、 $b$  均为常数,分别为 1.00 5、0.173 3 L/g。

一定温度和气压条件下,空气的密度为:

$$d = 1.293 \times \frac{273}{273+T} \times \frac{P}{0.1013} \quad (3)$$

式中: $T$  为测试时空气温度; $P$  为测试时空气气压。

脉冲电离室测氡仪(AlphaGUARD P2000F)的气压与温度校正是仪器厂家直接提供的计算程序,具体计算公式如下:

$$C_{\text{校}} = C_{\text{测}} \times \left[ 1 + \frac{-0.18 \times (P-1013)}{1013} \times \frac{P}{P-620} \right] \times \left[ 1 + \frac{0.97 \times (T-20)}{293} \times \frac{130}{130-T} \right] \quad (4)$$

$$C_{\text{校}} = C_{\text{测}} \times \left[ 1 + \frac{-0.31 \times (P-1013)}{1013} \times \frac{P}{P-620} \right] \times \left[ 1 + \frac{0.46 \times (T-20)}{293} \times \frac{130}{130-T} \right] \quad (5)$$

$$K = \frac{C_{\text{校}} \times V_{\text{DDL-1}}}{N - N_0} \quad (1)$$

式中: $C_{\text{校}}$  为 AlphaGUARD P2000F 测氡仪扣除系统本底后并经温度和气压校正后的氡体积活度(Bq/L); $V_{\text{DDL-1}}$  为 DDL-1 型测氡仪电离室体积(L); $K$  为 DDL-1 型测氡仪电离室的  $K$  值(Bq/mV); $N$  为 DDL-1 型测氡仪的校准读数(mV); $N_0$  为 DDL-1 型测氡仪电离室本底脉冲读数(mV)。

式中: $C_{\text{校}}$  为气温、气压校正后的氡值; $C_{\text{测}}$  为 AlphaGUARD P2000F 在闭合系统中的仪器显示测值; $P$  为测量时的环境气压; $T$  为测量时环境温度。其中式(4)适合低量程校正,修正范围 2~30 000 Bq/m<sup>3</sup>,式(5)适合高量程校正,修正范围 30 000~2 000 000 Bq/m<sup>3</sup>。

## 1.2 水中溶解氡校准实验方法

实验设备及材料:AlphaGUARD P2000F 测氡仪 1 台,DDL-1 型测氡仪 3 台(每台配套电离室各 1 个),AquaKIT 鼓气瓶 500 mL,水样,Alpha 抽气泵,无油真空泵,子体过滤器,AquaKIT 自带硅胶管,止血钳。

实验地点:(1)云南省地震局西南(云南)维修中心,水样取自云南省元谋水化站;(2)云南省元谋水化站;该观测站水氡浓度在负压取样模式下测值为 200 Bq/L 左右,本次实验水样取样模式为常压取样。

实验过程:测试 DDL-1 型测氡仪电离室的本底,记作  $N_0$ ;将 AlphaGUARD P2000F 测氡仪(工作模式设置为主动模式,测量周期设置为 10 min)、DDL-1 型测氡仪电离室、Alpha 抽气泵及子体过滤器等连接形成一个循环闭合系统(图 1),测试系统

内氡值本底,记作  $C_0$ ;将装有水样的 AquaKIT 鼓气瓶加入上述闭合系统,准备开泵测试;将采样泵的流量设置为 1 L/min,打开抽气泵,以该流量循环鼓泡 10 min 后关闭采样泵;将电离室进出口端管子用止血钳夹住后静置,AlphaGUARD P2000F 测氡仪则保持测试,每 10 min 记录一个值,共测试 4 个值后停止测试,舍去第 1 个测值,取后 3 个值的平均值,记作  $C_1$ ;测试完成后,将电离室取出(保持密封),使系统连通空气,降本底;电离室静置 2 h 后,开始测量其电压值,记作  $N$ ,电离室测试完成后,用真空泵对电离室抽气降本底。

### 1.3 DDL-1 型测氡仪的固体氡气源校准方法

将电离室按图 2 连接,使用 RN-150 型固体氡气源,利用真空法进行采样,对 DDL-1 型电离室进行固体氡气源校准。先将电离室抽成真空,即启动真空泵,松开夹子 A、B,至压力表显示为 -810 hPa (高海拔地区);闭合夹子 A,关闭真空泵,打开固体氡气源和夹子 C,让标准氡气进入电离室,待压力表显示为 0 时,闭合夹子 B、C,完成整个采样过程。将电离室密封静置 2 h 后,测定其电压值  $N$ ,利用式(6)计算出电离室的  $K$  值。

$$K = \frac{A_{RN-150} \times V_{DDL-1}}{N - N_0} \quad (6)$$

表 1 DDL-1 型测氡仪各电离室水中溶解氡校准的  $K$  值在云南省地震局西南(云南)维修中心测试结果

Table 1  $K$  value test results of dissolved radon calibration in each ionization chamber of DDL-1 emanometer at the southwest (Yunnan) maintenance center of the Earthquake Agency of Yunnan Province

仪器编号及测试次数		1#			2#			3#		
		第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 1 次	第 2 次	第 3 次
观测室环境	温度/°C	16	23	18	21	16	20	24	22	24
	湿度/%	39	28	41	32	43	39	32	40	30
	气压/hPa	803	801	803	802	803	802	802	802	802
	闭合系统本底 $C_0/(Bq \cdot m^{-3})$	22	63	46	24	31	103	25	24	112
闭合系统氡体积活度	AlphaGUARD P2000F 测氡仪显示值 $C_1/(Bq \cdot m^{-3})$	14 400	10 700	6 320	4 190	8 130	9 360	8 990	4 630	8 750
	舍去第 1 个值,后 3 个值求平均	19 800	16 800	10 000	9 480	11 100	13 900	14 200	6 570	14 300
	$C_1 - C_0$ ,再经过气压、温度校正	19 500	16 300	10 200	9 590	11 600	14 300	13 300	6 840	14 000
	电离室本底 $N_0/mV$	1.690 7	3.099 9	1.124 6	7.058 8	1.666 6	1.725 6	0.569 3	1.543 2	2.675 4
	电离室电压/mV	32.255 9	27.700 3	17.237 68	161.145 7	193.329 2	240.844 7	27.070 2	12.617 2	27.792 6
各次校准 $K$ 值		0.491 950	0.486 507	0.473 010	0.048 391	0.046 766	0.047 968	0.428 918	0.428 027	0.421 144
水中溶解氡校准新 $K$ 值		0.483 822			0.047 708			0.426 03		
各次校准 $K$ 值相对误差/%		1.68	0.55	-2.23	1.43	-1.97	0.54	0.68	0.47	-1.15
仪器出厂原 $K$ 值		0.470 800			0.048 226			0.424 430		
水中溶解氡校准新 $K$ 值与出厂原 $K$ 值相对误差/%		2.77			-1.07			0.38		

表 1 测试数据为云南省地震局西南(云南)维修中心实验结果。由于测试用水从元谋通过快递公司

式中:  $A_{RN-150}$  为标准氡气固体源的分配活度值(Bq);  $V_{DDL-1}$  为 DDL-1 型测氡仪电离室的体积(L);  $N$  为 DDL-1 型测氡仪测定电压值(mV);  $N_0$  为本底值(mV)。查阅 DDL-1 型测氡仪使用手册,仪器校准测定电压值已经扣除本底(即仪器校准时仪器显示值已扣除本底)。

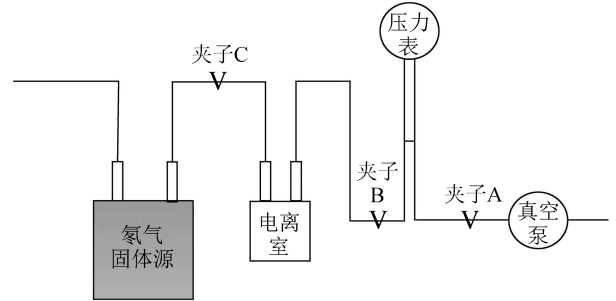


图 2 固体氡气源校准连接示意图

Fig.2 Schematic diagram of the connection for solid radon source calibration

## 2 校准结果对比分析

### 2.1 水中溶解氡校准实验结果

将 DDL-1 型测氡仪的电离室(1 号、2 号、3 号)分别进行至少 3 次  $K$  值测试。每个电离室  $K$  值测试过程与结果列于表 1 和表 2。

隔天送达昆明,每测试一个  $K$  值后,需要抽真空降本底,耗时较长,三套仪器交叉进行测试,因此造成

同一台仪器(电离室)的测试在不同日期下完成,使得 AlphaGUARD P2000F 测氦仪器显示的氦体积活度与测试条件如温度、湿度及气压等均存在差异。对每台仪器(电离室)进行 3 次水中溶解氦校准,将 3 次  $K$  值求平均,得到 1 号、2 号、3 号仪器(电离室)的  $K$  值分别为 0.483 822 Bq/mV、0.047 708 Bq/mV、0.426 030 Bq/mV;表 2 为云南省元谋水化站现场实验结果。每测试一个  $K$  值后,需要抽真空降本底,耗

时较长,三套仪器交叉进行测试,因此造成同一台仪器(电离室)的测试在不同日期下完成,AlphaGUARD P2000F 测氦仪器显示的氦体积活度与测试条件如温度、湿度及气压等均存在差异。对每台仪器(电离室)进行 3 次水中溶解氦校准,将 3 次  $K$  值求平均,得到 1 号、2 号、3 号仪器(电离室)的  $K$  值分别为 0.465 843 Bq/mV、0.047 871 Bq/mV、0.423 055 Bq/mV。

根据氦的衰变理论,水样中溶解氦含量会随着

表 2 DDL-1 型测氦仪各电离室水中溶解氦校准的  $K$  值在云南省元谋水化站现场测试结果

Table 2 The  $K$  value of the dissolved radon calibration in each ionization chamber of the DDL-1 type measuring instrument in the field test of Yuanmou hydration station in Yunnan Province

仪器编号及测试次数		1#			2#			3#		
		第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 1 次	第 2 次	第 3 次
观测 室环 境	温度/°C	25	26	27	26	24	25	26	26	25
	湿度/%	39	35	32	35	42	39	37	38	42
	气压/hPa	889	891	887	891	893	890	890	890	893
闭合系统本底 $C_0$ /(Bq·m <sup>-3</sup> )		49	53	102	65	60	49	55	104	73
闭 合 系 统 氦 体 积 活 度	AlphaGUARD P2000F	21 100	20 400	19 740	21 300	19 600	22 600	20 900	21 300	19 800
	测氦仪显示值 $C_1$	32 300	30 500	28 650	30 300	28 100	32 400	30 600	32 400	29 600
	/(Bq·m <sup>-3</sup> )	33 100	31 200	29 600	31 400	28 400	32 900	31 100	33 200	30 300
		31 900	31 400	30 500	32 100	29 300	33 000	32 300	32 800	31 100
	舍去第 1 个值,后 3 个值求平均	324 33	31 033	29 583	31 267	28 600	32 767	31 333	32 800	303 33
$C_1 - C_0$ ,再经过气压、温度校正		36 799	35 192	32 600	35 445	31 026	37 135	35 583	37 186	34 224
电 离 室 电 压 值	电离室本底 $N_0$ /mV	2.131 6	1.892 3	3.134 5	2.043 6	1.756 6	1.257 5	1.393 4	3.253 7	1.574 3
	电离室电压/mV	54.576 9	53.017 3	49.512 0	520.4156	453.123 2	541.484 2	59.012 2	60.978 3	57.012 2
	各次校准 $K$ 值	0.471 982	0.464 648	0.460 898	0.047 676	0.047 930	0.048 006	0.422 084	0.426 876	0.420 205
	水中溶解氦校准新 $K$ 值		0.465 843			0.047 871			0.423 055	
	各次校准 $K$ 值相对误差/%	1.32	-0.26	-1.06	-0.41	0.12	0.28	-0.23	0.90	-0.67
	仪器出厂原 $K$ 值		0.470 800			0.048 226			0.424 430	
	水中溶解氦校准新 $K$ 值与 出厂原 $K$ 值相对误差/%		-1.05			-0.74			-0.32	

样品存储时间的长短而产生衰减,测值会有不同程度的减小。另外,氦在水中的溶解度与温度关系密切,溶解度系数  $\alpha$  与温度  $t$  的关系式为  $\alpha = 0.1057 + 0.405e^{(-0.0502t)}$ ,地下水中氦的溶解度系数随着水温的升高而变小<sup>[21]</sup>。水温上升,氦的溶解度下降,逸出气体增加;水温下降,氦的溶解度上升,逸出气体减小<sup>[22]</sup>。为了验证水样中溶解氦含量随着样品存储时间的长短而产生衰减对  $K$  值校准的影响程度,故本次实验选取异地——云南省地震局西南(云南)维修中心,现场——云南省元谋水化站两个实验场地进行。样品取自水温为 37.8 °C 的温泉井,从该温泉多年的观测数据看,水温变化不大,故该温泉井氦的溶解度受水温变化的影响很小。从实验测量结果看,影响样品中氦含量的主要因素是样品存储时间和实验环境的温度、气压,这些影响要素,可通过缩短样品存储时间及测试结果进行观测环境温度、气压校正,即可最大限度的保证实验结果的准确性。

现场和异地实验结果表明,只要样品存储时间不要过长,保留水样中氦一定活度(5 000 Bq/m<sup>3</sup> 以上),不影响仪器校准结果的准确性。

## 2.2 固体氦气源校准实验结果

应用固体氦气源在云南省地震局西南(云南)维修中心对每台仪器(电离室)进行固体氦气源校准,将 3 次  $K$  值求平均,得到 1 号、2 号、3 号仪器(电离室)的  $K$  值分别为 0.461 706 Bq/mV、0.046 600 Bq/mV、0.423 671 Bq/mV。DDL-1 型测氦仪各电离室的  $K$  值结果列于表 3。

## 2.3 相对固有误差分析

该仪器出厂前严格按照国家颁布的 JJG825-2013《测氦仪》<sup>[15]</sup> 在氦室进行校准,得到仪器的出厂  $K$  值,故以该数据为基准讨论水中溶解氦校准的  $K$  值、固体氦气源校准的  $K$  值,得到 1 号、2 号、3 号电离室  $K$  值的相对误差(表 4),各相对误差均满足国家氦计量辐射技术要求<sup>[15,23-26]</sup> 和目前地震监测氦观

表 3 DDL-1 型测氡仪各电离室固体氡气源校准的 K 值测试结果

Table 3 K value test results of solid radon calibration of DDL-1 emanometer

仪器编号及测试日期		1#			2#			3#		
		2月26日	2月27日	2月27日	2月25日	2月26日	2月26日	2月28日	2月28日	2月29日
观测 室环 境	室温/℃	18	16	220	19	18	22	18	20	16
	湿度/%	35	35	29	38	35	26	35	29	35
	气压/hPa	802	803	801	802	802	801	802	801	803
仪器 状态	电离室体积/L	0.7			0.7			0.7		
	系统真空度/hPa	810			810			810		
	底数 $V_0$ /mV	3.780 8	2.010 7	4.974 7	3.259 8	1.871 5	0.870 2	2.862 2	3.493 2	2.781 6
氡气标准源浓度 (Bq/L)		27.49			27.49			27.49		
用氡 气固 体源 校准	校准次数	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 1 次	第 2 次	第 3 次
	进源时间	09 时 55 分	09 时 44 分	15 时 27 分	11 时 10 分	09 时 58 分	14 时 50 分	09 时 36 分	16 时 41 分	09 时 15 分
	读数开始时间	11 时 55 分	11 时 44 分	17 时 27 分	13 时 10 分	11 时 58 分	16 时 50 分	11 时 20 分	18 时 41 分	11 时 15 分
	1	41.253 8	41.278 9	41.810 8	420.027 0	419.260 0	400.083 0	44.720 6	45.835 8	47.029 1
	2	40.529 0	42.003 8	42.216 4	420.047 0	418.859 0	400.970 0	45.281 1	45.710 8	45.752 4
	3	40.906 0	41.651 1	42.580 3	419.799 0	418.655 0	401.978 0	45.125 6	45.075 8	46.479 9
	4	42.201 5	42.296 8	41.928 1	419.238 0	418.341 0	400.414 0	44.490 1	44.814 8	45.858 7
	5	41.532 0	41.728 1	41.284 6	419.943 0	418.686 0	400.598 0	44.998 3	44.880 6	45.319 6
	均值	41.2844 6	41.791 74	41.964 04	419.810 8	418.760 2	400.808 6	44.923 14	45.263 56	46.087 94
	各次校准 K 值/(Bq·mV <sup>-1</sup> )	0.466 108	0.460 450	0.458 559	0.045 837	0.045 952	0.048 010	0.428 354	0.425 132	0.417 528
仪器新 K 值/(Bq·mV <sup>-1</sup> )	0.461 706			0.046 600			0.423 671			
各次校准(检查)相对偏差/%	0.95	-0.27	-0.68	-1.64	-1.39	3.03	1.11	0.34	-1.45	
仪器原 K 值/(Bq·mV <sup>-1</sup> )	0.470 800			0.048 226			0.424 430			
新-原 K 值相对偏差/%	-1.93			-3.37			-0.18			
校准结果及结论性说明	1、用 RN-150 型固体氡气源[其标准源浓度值=标准氡源活度(19.24 Bq)/电离室体积(0.7 L)=27.49 Bq/L];2、3 次校准相对误差均小于±5%,仪器启用新校准 K 值;3、仪器读数为已经扣除底数的值。									

表 4 水中溶解氡校准、固体氡气源校准与仪器出厂校准值结果对比分析

Table 4 Comparison between the calibration results of dissolved radon, solid radon source, and instrument factory

电离室 编号	校准方法	K 值 (Bq·mV <sup>-1</sup> )	各校准 K 值与 出厂校准值 相对误差/%
1#	水中溶解氡 1	0.483 822	2.77
	水中溶解氡 2	0.465 843	-1.05
	固体氡气源	0.461 706	-1.93
	出厂校准值	0.470 800	-
2#	水中溶解氡 1	0.047 708	-1.07
	水中溶解氡 2	0.047 871	-0.74
	固体氡气源	0.046 600	-3.37
	出厂校准值	0.048 226	-
3#	水中溶解氡 1	0.426 030	0.38
	水中溶解氡 2	0.423 055	-0.32
	固体氡气源	0.423 671	-0.18
	出厂校准值	0.424 430	-

测技术要求<sup>[12]</sup>。

### 3 结论与讨论

本文利用经中国计量院标准氡室检定的 AlphaGUARD P2000F 测氡仪,对 3 套 DDL-1 型电

离法测氡仪(1 号、2 号、3 号)分别在云南省地震局西南(云南)维修中心和云南省元谋水化站进行水中溶解氡校准,以及经 AlphaGUARD P2000F 测氡仪重新定值的固体氡气源进行校准,两种校准结果与仪器出厂校准结果进行相对误差对比;1 号、2 号、3 号电离室水中溶解氡校准 K 值与仪器出厂校准 K 值的相对误差分别为 2.77%(-1.05%)、-1.07%(-0.74%)、0.38%(-0.32%);1 号、2 号、3 号电离室固体氡气源校准 K 值与仪器出厂校准 K 值的相对误差分别为 -1.93%、-3.37%、-0.18%,各相对误差均小于 5%,均满足目前地震监测氡观测技术要求,水中溶解氡校准方法可行,可以代替目前固体氡气源校准。通过水中溶解氡校准实验,得到以下几点认识:

(1) 对于一个未知的氡气体积活度环境,当氡测量仪体积活度响应因子的不确定度相当时,AlphaGUARD P2000F 测氡仪采用主动模式可以得到一个相对较准确的测量结果。因此,只要将 AlphaGUARD P2000F 测氡仪、DDL-1 型测氡仪电离室、装有水样的脱气瓶(最好选用 500 ml)、抽气泵及子体过滤器等串联,形成闭合循环系统,AlphaGUARD P2000F 测氡仪显示的氡体积活度大于

5 000 Bq/m<sup>3</sup>,即可进行水中溶解氡校准实验。且氡体积活度越大,实验效果越理想。

(2)前人的实验表明,无论闪烁法还是电离法测氡,都会受温度和气压的影响。因此,在进行水中溶解氡与固体氡气源校准对比实验时,须将测试结果进行气压与温度修正,保证校准结果的真实准确性。

(3)从实验测量结果看,影响实验样品中氡含量的主要因素是样品存储时间和实验环境的温度、气压,这些影响要素可通过缩短样品存储时间(对样品及时进行测试)及测试结果进行观测环境温度、气压校正,即可最大限度的保证实验结果的准确性。现场和异地实验结果表明,只要样品存储时间不要过长,保留水样中氡一定活度(5 000 Bq/m<sup>3</sup>以上),不影响仪器校准结果的准确性。

(4)水中溶解氡校准方法校准闪烁法测氡仪的实践工作在云南省地震局已经开展近3年的时间,取得不错的效果。本次将该方法应用于电离室法测氡仪,从实验的结果看可行。建议有条件的台站用类似的方法积极开展水中溶解氡校准实验研究,共同研究并确定最佳实验条件、实验参数及误差上限要求等,最终形成该方法的技术方案(或规范),推广应用水中溶解氡校准方法。

(5)利用AlphaGUARD P2000F测氡仪及水氡测量组件进行水中溶解氡校准实验结果表明,该方法可以代替目前固体氡气源校准,可以解决目前固体氡源校准中存在的氡源紧缺、装置老化严重、故障频发、运输困难、维修技术要求高、国家环保部门监管严格等问题,为地震氡观测仪器校准技术找到了一种新的途径。

(6)基于AlphaGUARD系列测氡仪具有极高的稳定性和可靠性,以及国际公认的标准计量传递仪器,是否可以将该方法定义为标准仪器校准法?

致谢:感谢中国地震局滇西地震预报实验场李朝明高级工程师、云南省地震局弥渡地震台褚金学高级工程师、云南省地震局元谋地震台同仁对本次实验的技术指导和支持。

## 参考文献(References)

[1] 张昱,刘小凤,常千军,等.大震前水氡同步异常变化及其预测意义探讨[J].地震研究,2010,33(3):253-258.  
ZHANG Yu, LIU Xiaofeng, CHANG Qianjun, et al. Analysis of Pre-and Post-Earthquake Water-Radon Anomaly[J]. Journal of Seismological Research, 2010, 33(3): 253-258.

[2] 刘菁华,王祝文,田钢,等.均匀覆盖层中氡迁移的数值模拟[J].地球物理学报,2007,50(3):921-925.  
LIU Jinghua, WANG Zhuwen, TIAN Gang, et al. Numerical Simulation for Radon Migration in the Homogeneous Overburden[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2007, 50(3): 921-925.

[3] 陈永花,李延京,张超美,等.水氡观测中K值标定探讨[J].地震研究,2014,37(增刊1):72-75.  
CHEN Yonghua, LI Yanjing, ZHANG Chaomei, et al. Discussion on K-Value Calibration in Water Radon Observation[J]. Journal of Seismological Research, 2014, 37(Suppl): 72-75.

[4] 李彤起,李正蒙,陈兰庆,等.测氡仪器固体氡气源标定新技术推广应用进展与效益[J].西北地震学报,1997(4):71-77.  
LI Tongqi, LI Zhengmeng, CHEN Lanqing, et al. Progress and Benefits on Popularization and Application of the New Method for Demarcating Radonscopes by Using Solid Radon Gas Source[J]. Northwestern Seismological Journal, 1997(4): 71-77.

[5] 吴永信,钟心,陈兰庆.氡气固体源的准确度、稳定性和重复性及其影响因素研究[J].西北地震学报,2006,28(2):184-188.  
WU Yongxin, ZHONG Xin, CHEN Lanqing. Study on the Accuracy, Stability and Repeatability of Radon Standard Source and Influence Factors[J]. Northwestern Seismological Journal, 2006, 28(2): 184-188.

[6] 唐方东,何林锋,王振基,等.氡体积活度模型与验证[J].核电子学与探测技术,2009,29(2):285-287,343.  
TANG Fangdong, HE Linfeng, WANG Zhenji, et al. Model of Radon Volume Radioactivity and Verification[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2009, 29(2): 285-287, 343.

[7] 崔勇,许秋龙,张学敏,等.CD-L1型流气式固体氡源替换RN-150型氡源的研究[J].地震地磁观测与研究,2008,29(2):80-85.  
CUI Yong, XU Qiulong, ZHANG Xuemin, et al. Study on Replacement of RN-15 Radon Seed with CD-L1 Flow-Type Solid Radon Seed[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2008, 29(2): 80-85.

[8] 李朝明,杨志坚,朱培耀,等.KJD-2000R测氡仪(α谱仪)观测结果分析[J].地震研究,2012,35(3):399-405.  
LI Chaoming, YANG Zhijian, ZHU Peiyao, et al. Research on Observatory Result of Water Radon Recorded by KJD-2000R Emanometer[J]. Journal of Seismological Research, 2012, 35(3): 399-405.

[9] 刘耀炜,任宏微.汶川8.0级地震氡观测值震后效应特征初步分析[J].地震,2009,29(1):121-131.  
LIU Yaowei, REN Hongwei. Preliminary Analysis of the Characteristics of Post-Seismic Effect of Radon after the Wenchuan 8.0 Earthquake[J]. Earthquake, 2009, 29(1): 121-131.

[10] 李朝明,杨志坚,褚金学,等.RN-FD型固体氡气源的稳定性及应用分析[J].震灾防御技术,2018,13(1):114-124.  
LI Zhaoming, YANG Zhijian, CHU Jinxue, et al. Stability and Practicability Analysis of RN-FD Type Solid Radon Source[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2018, 13

- (1):114-124.
- [11] 张清秀,孔令昌,江劲军,等.新型流气式固体氡源用于氡仪器标定的实验研究[J].华南地震,2012,32(3):60-67.  
ZHANG Qingxiu,KONG Lingchang,JIANG Jinjun, et al.An Experimental Study on the Application of New Gas Flow Solid Radon Source in Radon Instrument Calibration[J].South China Journal of Seismology,2012,32(3):60-67.
- [12] 中国地震局.地震水文地球化学观测技术规范[M].北京:地震出版社,2014.  
China Earthquake Administration.Technical Code for Seismic Hydrogeochemical Observation[M].Beijing:Seismological Press,2014.
- [13] 起卫罗,余庆昆,王杰,等.SD-3A 型智能数字测氡仪与 DDL-1 型智能数字测氡仪同步观测对比分析[J].华南地震,2017,37(增刊1):88-93.  
QI Weiluo,YU Qingkun,Wang Jie, et al.Comparative Analysis of SD-3A Intelligent Digital Measuring Instrument and DDL-1 Intelligent Digital Measuring Instrument [J]. South China Journal of Seismology,2017,37(Supp1):88-93.
- [14] 任宏微,姚玉霞,黄仁桂,等.地震监测氡观测仪器校准新方法研究[J].地震,2016,36(3):46-54.  
REN Hongwei,YAO Yuxia,HUANG Rengui, et al.A New Calibration Method of Emanometer in Earthquake Monitoring [J].Earthquake,2016,36(3):46-54.
- [15] 国家质量监督检验检疫总局.测氡仪检定规程:JJG825-2013[S].北京:中国标准出版社,2013.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Verification Regulation of the Radon Measuring Instruments: JJG825-2013[S].Beijing:China Standard Press,2013.
- [16] 唐方东,何林峰.标准室校准测氡仪的原理及方法[J].上海计量测试,2008,35(3):26-27  
TANG Fangdong,HE Linfeng.Principle and Method for Calibration of Radon Monitor Using Standard Radon Chamber [J].Measurement and Testing,2008,35(3):26-27.
- [17] 徐一鹤,何林峰,唐方东.测氡仪的检定/校准与结果分析[J].核电子学与探测技术,2011,31(3):324-326.  
XU Yihe,HE Linfeng,TANG Fangdong.Calibration of the Radon Monitor and Result Analysis[J].Nuclear Electronics & Detection Technology,2011,31(3):324-326.
- [18] 孟治成,周剑良,潘佳林,等.闪烁室和电离室法测氡的气压效应[J].现代电子技术,2007,30(8):181-183,185.  
MENG Yecheng,ZHOU Jianliang,PAN Jialin, et al.Air Pressure Effect of a Scintillation Chamber or an Ionization Chamber as Measuring Radon [J].Modern Electronic Technique, 2007,30(8):181-183,185.
- [19] WOJCIK M.Procedure for the Measurement of the Radon Concentration in Natural Gas[M].Brunswick,1983.
- [20] 王康,姚玉霞,李松林,等.气温气压与氡浓度短期变化的相关性分析[J].华南地震,2018,38(3):91-98.  
WANG Kang,YAO Yuxia,LI Songlin, et al.Correlativity between Short-term Change of Radon Concentration and Air Temperature & Air Pressure [J].South China Journal of Seismology,2018,38(3):91-98.
- [21] 中国地震局监测预报司.地震地下流体理论基础与观测技术[M].北京:地震出版社,2007.  
China Earthquake Administration Monitoring and Forecasting Division.Theoretical Basis and Observation Technology of Seismic Underground Fluids [M]. Beijing: Seismological Press,2007.
- [22] 王雪莹,陶月潮,张朝明,等.庐江台人工测氡与数字化自动测氡对比分析研究[J].地震地磁观测与研究,2002,23(3):26-32.  
WANG Xueying,TAO Yuechao,ZHANG Chaoming, et al. Comparative Analysis of Artificial Enthalpy and Digital Automatic Enthalpy Measurement in Minjiang Station [J].Seismological and Geomagnetic Observation and Research,2002,23(3):26-32.
- [23] 中国地震局.氡气固体源检定规程:DB/T 6-2003[S].北京:地震出版社,2003.  
China Earthquake Administration.Calibration Code of Radon Gas Solid Source: DB/T 6-2003 [S]. Beijing: Seismological Press,2003.
- [24] 国家质量监督检验检疫总局.辐射防护仪器氡及氡子体测量仪第 4 部分:含氡同位素及其子体参考大气的产生设备(氡环境试验系统):GB/T 13163.4-2014[S].北京:中国标准出版社,2014.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China.Radiation Protection Instrumentation-Radon and Radon Decay Product Measuring Instruments -Part 4: Equipment for the Production of Reference Atmospheres Containing Radon Isotopes and Their Decay Products (STAR):GB/T 13163.4-2014[S].Beijing:China Standard Press,2014.
- [25] 国家质量监督检验检疫总局.辐射防护用氡及氡子体测量仪第 2 部分:氡测量仪的特殊要求:GB/T 13163.2-2005/IEC 61577-2:2000[S].北京:中国标准出版社,2005.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China.Radiation Protection Instrumentation—Radon and Radon Decay Product Measuring Instruments—Part 2: Specific Requirements for Radon Measuring Instruments: GB/T 13163.2-2005/IEC 61577-2:2000[S].Beijing ;China Standard Press,2005.
- [26] 国家质量监督检验检疫总局.国家计量校准规范编写规则:JJF 1071-2010[S].北京:中国标准出版社,2011.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China.The Rules for Drafting National Calibration Specification: JJF 1071-2010 [S].Beijing ;China Standard Press,2011.