

赵影, 黄仁桂, 鲍志诚, 等, 2021. 地震测氦仪野外校准的新方法. 中国地震, 37(1):140~147.

地震测氦仪野外校准的新方法

赵影^{1,2)} 黄仁桂^{1,2)} 鲍志诚²⁾ 查小惠²⁾
肖孟仁^{1,2)} 胡旭东³⁾ 王成楠⁴⁾

1) 江西九江扬子块体东部地球动力学野外科学观测研究站, 江西九江 332006

2) 江西省地震局, 南昌 330000

3) 东华理工大学, 南昌 330000

4) 江西省地质环境调查研究院, 南昌 330000

摘要 为克服地震测氦仪野外校准氦气固体源监管严格等工作环境问题, 引进东华理工大学新研制的豁免级微型氦室开展地震测氦仪野外校准实验, 分析该微型氦室应用于地震测氦仪定期校准的可行性。根据《JJG 825-2013 测氦仪检定规程》, 分别使用微型氦室和标准氦室对 2 款在网观测测氦仪开展对比校准实验, 分析认为采用微型氦室的校准方法基本可行。该微型氦室采用豁免级氦气源及自动化氦浓度控制系统, 具备操作便捷、运输方便等特点, 适用于地震台站测氦仪的现场定期校准。

关键词: 测氦仪 微型氦室 标准氦室 校准

[文章编号] 1001-4683(2021)01-0140-08 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

氦作为地下流体映震敏感组分, 是地震科学研究中观测时间最长、研究最广泛的地下流体测项之一(刘耀炜等, 2009)。1944 年日本东海岸发生 8.0 级地震, 震前观察到氦的浓度异常(Sugisaki et al, 1996), 相关学者由此对氦与地震之间的关系开展了研究。此后, 苏联、美国、欧洲等国家和地区开展了利用氦观测进行地震预测以及构造活动的研究, 研究表明氦等流体地球化学组分存在显著的震前异常变化(张炜等, 1978; 杉崎隆一, 1979; 瓦尔抄尔, 1989; 李宣瑚, 1981; 刘耀炜等, 2000; Du et al, 2008; Wang et al, 2014; 杜建国等, 2018)。我国在 1966 年 3 月邢台 7.2 级地震之后, 开始利用氦监测地震(谢鸿森, 1973; 杜建国等, 2018), 经过半个多世纪的发展, 初步建成了以井口和温泉的逸出气氦、溶解气氦, 以及断裂带土壤气氦为主要观测对象的 200 多个固定观测台(点)和一定数量的流动观测网, 在地震趋势分析与短临震情研判中发挥了重要作用(柯云龙等, 2018)。

在日常监测运行过程中, 需要对地震测氦仪定期进行校准。校准是保证观测数据的可

[收稿日期] 2020-04-26 [修定日期] 2020-07-15

[项目类别] 中国地震局“监测、预测、科研三结合”课题(3JH-202001053)、江西九江扬子块体东部地球动力学野外科学观测研究站开放基金资助项目(OGYB202007)共同资助

[作者简介] 赵影, 男, 1990 年生, 工程师, 主要从事地震监测预测及地震计量等工作。E-mail: 993085163@qq.com
鲍志诚, 通讯作者, 男, 1985 年生, 工程师, 主要从事地震监测预测等工作。E-mail: 56799409@qq.com

靠性与准确性的最重要、最关键的技术环节,对利用氡进行地震监测预测的效果具有至关重要的作用(任宏微等,2016;黄仁桂等,2019)。前期,对地震系统测氡仪主要采用氡气固体源进行校准,但由于高体积活度氡气固体源的购买审批手续复杂,购买后不但要长期接受放射性监管,而且由于国家放射性物质运输管理制度严格,给氡源的定期质检带来极大困难,造成测氡仪校准无法在地震系统量值方面实现统一,使氡观测资料质量受到严重影响(黄仁桂等,2018)。为解决地震系统测氡仪量值传递准确性问题,实现地震系统氡观测量值统一,江西省地震局依托地震监测氡观测仪器检测平台建设,建成了地震系统首个标准氡室,作为地震系统氡观测量值传递标准;此外,开展了“标准仪器校准”(无源校准)的研究(任宏微等,2017;黄仁桂等,2019),其实验结果可达到地震监测氡观测技术要求(中国地震局,2014)。

为进一步探寻地震测氡仪现场校准新方法,逐步替代原有氡气固体源校准方式,地震监测氡观测仪器检测平台引进了由东华理工大学研发的便携式 HD-6mini 型测氡仪校准器(以下简称“微型氡室”)。该微型氡室采用豁免级氡源、自动化氡浓度控制系统,具备稳定性好、可靠性高、运输方便等特点。本文通过便携式微型氡室与标准氡室对地震测氡仪的校准结果进行对比,分析便携式微型氡室应用于现场校准的可行性。

1 微型氡室校准简介

1.1 微型氡室氡浓度控制功能

根据国家氡计量标准《JJG825-2013 测氡仪检定规程》(国家质量监督检验检疫总局,2014)要求,设定微型氡室 3 个氡校准浓度(分别为 $800\text{Bq}/\text{m}^3$ 、 $1500\text{Bq}/\text{m}^3$ 、 $3000\text{Bq}/\text{m}^3$),通过内置氡浓度调控系统调节氡箱内(体积 60L)的氡浓度。该装置体积小、结构稳定、方便携带,可用于测氡仪的现场校准(图 1)。



图 1 微型氡室

通过自动调节系统将微型氡室氡箱内氡浓度控制在一定误差范围内,并在较长时间内保持动态稳定。氡箱内²²²Rn由AlphaGUARD PQ2000 PRO测氡仪进行监测,并通过可控装置进行调节控制,使氡箱在校准工作期间保持相对稳定的标准浓度值。其中,AlphaGUARD

PQ2000 PRO 测氡仪由中国计量科学研究院标准氡室定期校准。微型氡室的氡浓度控制采用间歇补充氡气和常量补充氡气的方式,以获得检定所需的不同氡浓度和恒定的氡浓度。通过精准调控,理论上氡箱内氡浓度的变化幅度误差可以控制在 1% 以内。

微型氡室自带 2 套氡浓度快速调节系统:快速调节系统 1 和快速调节系统 2。其中,快速调节系统 1 主要用于快速将氡箱内氡浓度提升为目标浓度,快速调节系统 2 主要用于快速将氡箱内氡浓度降低为原浓度,提升和降低的数量在设备出厂时设定并固化在微型控制系统中。氡浓度控制系统是整个微型氡室控制操作的核心,根据氡检测工作原理以及氡浓度的测量与控制方法开发而成。该系统以微控制器为核心,可连续自动进行氡浓度稳定性控制,控制过程具有无需人员值守、无需人为干预、性能稳定等特点。该系统控制接口可以使用外接 PC 对氡室氡浓度进行精准控制。

1.2 校准系数

取各目标浓度点校准系数 K_i 的平均值作为被测测氡仪的校准系数 K

$$K_i = \frac{C_{\text{标准仪器}} \times V}{(N - N_0) \times 10^6} \quad (1)$$

式中, K_i 为待校准氡观测仪在第 i 个浓度点的校准系数 (Bq/cpm); $C_{\text{标准仪器}}$ 为 AlphaGUARD PQ2000 PRO 测氡仪测得的氡浓度,代表整个闭合循环系统内(包括闪烁室)的氡浓度 (Bq/m³); V 为待校准测氡仪闪烁室体积 (mL); N 为待校准测氡仪闪烁室每分钟脉冲读数 (cpm); N_0 为 FD-125 测氡仪闪烁室每分钟本底脉冲读数 (cpm)。

1.3 相对固有误差

由各目标浓度点校准系数 K_i 得出校准系数 K 的相对固有误差

$$E_i = \frac{K_i - K}{K} \times 100\% \quad (2)$$

式中, E_i 为第 i 个浓度点测氡仪的相对固有误差; K_i 为第 i 个浓度点测氡仪的校准系数,单位为 Bq/cpm; K 为各浓度点测氡仪的校准系数 K_i 的平均值,单位为 Bq/cpm。取各目标浓度点相对固有误差绝对值最大者作为被测测氡仪的相对固有误差。

2 微型氡室校准实验

用微型氡室对 FD-125 测氡仪、BL2015 测氡仪进行校准前,依据《JJG825-2013 测氡仪检定规程》要求,对微型氡室标称的 3 个目标氡浓度:800Bq/m³、1500Bq/m³ 和 3000Bq/m³ 进行了稳定性实验,将 AlphaGUARD PQ2000 PRO 测氡仪作为稳定性实验参考仪器。稳定性测试结果表明,微型氡室氡浓度稳定时间远大于 8h,稳定性均小于 4%,满足《JJG825-2013 测氡仪检定规程》中对氡室计量装置的要求(黄仁桂等,2020)。

2.1 FD-125 测氡仪微型氡室校准实验

实验前,先使用定标器测量 FD-125 测氡仪的 3 个闪烁室(体积 500mL)本底,再使用气管将 AlphaGUARD PQ2000 PRO 测氡仪、微型氡室、FD-125 测氡仪闪烁室及气泵连接成一个闭合循环系统(图 2),设置微型氡室目标浓度为 800Bq/m³,待环路内氡浓度稳定后,再循环 30min(气泵流量 1L/min),其间采用 AlphaGUARD PQ2000 PRO 测氡仪测量并记录整个环路内的氡浓度。测试完成后,将闪烁室从环路取下密封静置 1h,然后再使用定标器测定其脉冲

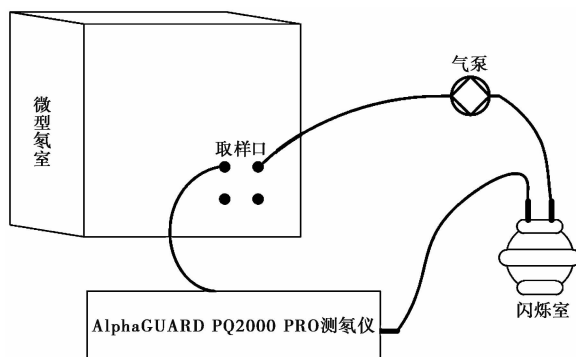


图 2 微型氦室校准 FD-125 闪烁室循环采样示意图

计数, 单次计数时间为 10min, 连续测量 3 次取平均值。利用 AlphaGUARD PQ2000 PRO 测氦仪所测的环路氦浓度作为 FD-125 测氦仪闪烁室内氦的浓度, 再根据定标器所测的脉冲计数, 最终计算出闪烁室在目标浓度 $800\text{Bq}/\text{m}^3$ 的校准系数(表 1)。计算完毕后, 用真空泵对闪烁室抽气降本底。同理, 分别在微型氦室目标浓度 $1500\text{Bq}/\text{m}^3$ 和 $3000\text{Bq}/\text{m}^3$ 下对 FD-125 测氦仪的 3 个闪烁室进行校准实验。

表 1 FD-125 测氦仪闪烁室微型氦室校准数据

闪烁室 编号	计量标准器 测值 C $\text{/(Bq} \cdot \text{m}^{-3}\text{)}$	本底 计数 N_0	FD-125 脉冲计数 N /cpm			各目标浓度 校准系数 K_i $\text{/(Bq} \cdot \text{cpm}^{-1}\text{)}$	校准系数 K $\text{/(Bq} \cdot \text{cpm}^{-1}\text{)}$	K 的相对 固有误差 $\text{/}\%$
1802 [#]	814.68	1.0	57.7	58.9	59.7	0.00705	0.00669	5.38
	1402.67	1.9	110.2	102.5	108.0	0.00668		
	2736.00	4.6	217.1	219.5	225.5	0.00633		
1803 [#]	804.00	5.0	54.9	55.1	56.3	0.00797	0.00759	5.01
	1460.00	7.0	105.6	103.9	104.0	0.00749		
	2800.00	8.0	189.9	201.5	207.8	0.00730		
1804 [#]	796.16	1.2	57.7	53.8	54.6	0.00763	0.00706	9.07
	1376.00	4.1	102.8	98.0	101.1	0.00713		
	2864.89	4.5	234.9	225.3	222.3	0.00642		

2.2 BL2015 测氦仪微型氦室校准实验

实验前, 用气管将 AlphaGUARD PQ2000 PRO 测氦仪、微型氦室、BL2015 测氦仪(闪烁室体积 272mL) 及气泵连接成一个闭合循环系统(气泵流量 1L/min)。在 BL2015 测氦仪自动测量模式下, 设置微型氦室目标浓度为 $800\text{Bq}/\text{m}^3$, 待环路内氦浓度稳定后, 选取 6 组 BL2015 测氦仪连续测量脉冲计数的平均值作为校准数据。利用 AlphaGUARD PQ2000 PRO 测氦仪所测的环路氦浓度作为 BL2015 测氦仪闪烁室内氦的浓度, 根据 BL2015 测氦仪 6 个测量周期的脉冲计数, 计算出 BL2015 测氦仪在目标浓度 $800\text{Bq}/\text{m}^3$ 的校准系数。同理, 分别在微型氦室目标浓度 $1500\text{Bq}/\text{m}^3$ 和 $3000\text{Bq}/\text{m}^3$ 下对 BL2015 测氦仪进行校准实验(表 2)。

表 2 测氦仪 BL2015 微型氦室校准数据

计量标准器 测值 C $/(Bq \cdot m^{-3})$	BL 2015 脉冲计数 N/cpm							各目标浓度 校准系数 K_i $/(Bq \cdot cpm^{-1})$	校准系数 K $/(Bq \cdot cpm^{-1})$	K 的相对 固有误差 /%
	1	2	3	4	5	6	均值			
886.5	25.7	22.0	16.4	21.4	21.5	16.9	20.7	0.01164		
1398.9	31.9	32.6	32.0	30.4	33.0	32.7	32.1	0.01186	0.01202	4.58
2756.3	61.0	61.2	53.4	61.4	57.2	64.3	59.7	0.01257		

3 实验结果与讨论

本次标准氦室校准使用地震监测氦观测仪器检测平台的标准氦室,该标准氦室采用动态平衡的循环补氦方式,提供稳定可调、量值准确的氦浓度,可用于各种主动及被动式测氦仪器的检定和校准。同时,该标准氦室量值溯源至中国计量科学研究院标准氦室,并开展过多批次地震测氦仪入网定型检测、在网检定校准。

3.1 FD-125 测氦仪标准氦室校准

校准前,使用定标器测量 FD-125 测氦仪的 3 个闪烁室(体积 500mL)本底,然后用气管将标准氦室、FD-125 测氦仪闪烁室及气泵连接成一个闭合循环系统,设置标准氦室的目标浓度为 $800Bq/m^3$,待环路内氦浓度稳定后,再循环 30min(气泵流量 1L/min),测试完成后,将闪烁室从环路取下密封静置 1h,然后再用定标器测定其脉冲计数,单次计数时间为 10min,连续测量 3 次取平均值。以标准氦室内氦浓度作为 FD-125 测氦仪闪烁室内氦的浓度,再根据定标器所测的脉冲计数,最终计算出闪烁室在目标浓度 $800Bq/m^3$ 的校准系数。计算完毕后,使用真空泵对闪烁室抽气降本底。同理,分别在标准氦室目标浓度 $1500Bq/m^3$ 和 $3000Bq/m^3$ 下对 FD-125 测氦仪的 3 个闪烁室进行校准实验(表 3)。

表 3 FD-125 测氦仪标准氦室校准数据

闪烁室 编号	计量标准器 测值 C $/(Bq \cdot m^{-3})$	本底 计数 N_0 /cpm	FD-125 脉冲计数 N /cpm			各目标浓度 校准系数 K_i $/(Bq \cdot cpm^{-1})$	校准系数 K $/(Bq \cdot cpm^{-1})$	K 的相对 固有误差 /%
1802 [#]	782.29	1.7	59.3	65.7	58.8	0.00657		
	1570.29	2.0	128.6	129.6	126.2	0.00622	0.00646	3.72
	3028.57	2.3	235.8	226.3	232.6	0.00660		
1803 [#]	753.71	2.3	50.9	51.6	53.0	0.00761		
	1609.14	1.9	108.5	109.0	109.0	0.00752	0.00750	1.86
	3069.71	3.0	210.9	210.2	213.1	0.00736		
1804 [#]	773.14	1.9	58.0	54.5	54.9	0.00717		
	1644.57	3.0	117.4	113.8	109.7	0.00743	0.00747	4.42
	3033.14	5.4	194.3	210.7	194.5	0.00780		

3.2 BL2015 测氦仪标准氦室校准

同理,分别在标准氦室目标浓度 $800Bq/m^3$ 、 $1500Bq/m^3$ 和 $3000Bq/m^3$ 下对 BL2015 测氦仪进行校准实验,并计算得出校准系数(表 4)。

表 4 测氡仪 BL2015 标准氡室校准数据

计量标准器 测值 C $/(Bq \cdot m^{-3})$	BL2015 脉冲计数 N/cpm							各目标浓度 校准系数 K_i $/(Bq \cdot cpm^{-1})$	校准系数 K $/(Bq \cdot cpm^{-1})$	K 的相对 固有误差 /%
	1	2	3	4	5	6	均值			
747.6	17.3	17.9	18.8	16.2	16.1	19.8	17.7	0.01151		
1607.5	37.5	35.7	37.1	36.4	32.7	37.8	36.2	0.01208	0.01178	2.55
2946.1	63.1	73.0	70.0	69.2	64.5	69.5	68.2	0.01175		

3.3 微型氡室与标准氡室校准结果对比分析

分别对微型氡室、标准氡室的校准数据进行对比分析,可知:

(1)对 2 款测氡仪(4 个闪烁室)采用微型氡室和标准氡室进行校准,所得校准系数较为一致,均为 BL2015 校准系数最大,1802[#]校准系数最小。结果显示 4 个闪烁室探测效能由大到小分别为 1802[#]、1804[#]、1803[#]、BL2015,也表明微型氡室与标准氡室校准具有较好的一致性。

(2)对微型氡室与标准氡室的校准系数 K 的相对固有误差进行比较,发现标准氡室校准所得校准系数相对固有误差均小于微型氡室,表明标准氡室校准稳定性要优于微型氡室。标准氡室氡箱体积大,计量标准器 AlphaGUARD PQ2000 PRO 测氡仪采用内置扩散采样,且被校准闪烁室循环气路体积相对于氡箱体积几乎可忽略不计,因此 AlphaGUARD PQ2000 PRO 测氡仪所测气样基本较为稳定。相比之下,微型氡室采用了 60L 的氡箱,且计量标准器 AlphaGUARD PQ2000 PRO 测氡仪仅能与被测闪烁室外置串联采用循环式采集氡气样,循环采样方式和循环气路体积会对 AlphaGUARD PQ2000 PRO 测氡仪所测气样的稳定性产生一定影响。

(3)除 1804[#]闪烁室外,其他闪烁室均表现为标准氡室校准所得校准系数小于微型氡室,且 1804[#]闪烁室的校准系数相对固有误差均接近或大于其他 3 个闪烁室中相对固有误差最小值的 2 倍,表明 1804[#]闪烁室探测稳定性与其他 3 个闪烁室相比较差。FD-125 测氡仪为九江地震台在网观测仪器,1802[#]、1803[#]、1804[#]均已开展过一段时间的水氡日常观测,且 1804[#]闪烁室相较 1802[#]和 1803[#]闪烁室的日常观测使用时间更长,被污染的可能性更大。因此,上述因素可能导致 1804[#]闪烁室探测效率和探测稳定性的异常。

根据式(2),得到 FD-125 测氡仪 3 个闪烁室和 BL2015 测氡仪校准系数 K 相对标准氡室校准的相对误差分别为 3.56%、1.20%、-5.49%及 2.04%(表 5)。相对误差满足目前地震监测氡观测技术要求,据此认为微型氡室可作为地震台站测氡仪现场定期校准装置。

表 5 微型氡室与标准氡室校准结果对比

校准系数 K $/(Bq \cdot cpm^{-1})$	设备型号(闪烁室编号)			
	1802 [#]	1803 [#]	1804 [#]	BL2015
微型氡室校准	0.00669	0.00759	0.00706	0.01202
标准氡室校准	0.00646	0.00750	0.00747	0.01178
相对误差/%	3.56	1.20	-5.49	2.04

4 结论

本文利用微型氦室分别对 FD-125 测氦仪 3 个闪烁室(1802[#]、1803[#]和 1804[#])和 BL2015 测氦仪进行校准,并与标准氦室校准结果进行对比分析,发现使用水中溶解氦校准 FD-125 测氦仪 3 个闪烁室和 BL2015 测氦仪的 K 值相对标准氦室校准的相对误差分别为 3.56%、1.20%、-5.49%及 2.04%,满足目前地震监测氦观测技术要求,认为微型氦室校准方式可行。相对于地震系统氦观测背景值,微型氦室目前所设定的 3 个标称氦浓度均偏低。若该装置能在确保性能稳定性的条件下,拓宽标称氦浓度范围,将可配合标准氦室开展测氦仪辅助校准,拓展地震测氦仪校准方法,提升地震测氦仪器检测平台服务能力,推动地震系统测氦仪器量值统一。

参考文献

- 杜建国,李营,崔月菊,等,2018. 地震流体地球化学. 北京:地震出版社,272.
- 国家质量监督检验检疫总局,2014. JJG 825-2013 测氦仪检定规程. 北京:中国质检出版社.
- 黄仁桂,肖健,李雨泽,等,2018. 地震氦观测仪检测平台的设计初探. 地震工程学报,40(增刊 I):163~169.
- 黄仁桂,赵影,李雨泽,等,2019. 地震氦观测计量溯源初步探究. 地震,39(2):183~190.
- 黄仁桂,罗齐彬,姚玉霞,等,2020. 微型氦室应用于地震测氦仪校准实验. 大地测量与地球动力学,40(8):865~869.
- 柯云龙,刘耀炜,张磊,等,2018. 川滇地震预报实验场高精度氦观测台阵建设分析. 地震,38(3):35~48.
- 李宣瑚,1981. 水氦异常的扩散收缩现象. 地震,1(5):41~43.
- 刘耀炜,施锦,2000. 强震地下流体前兆信息特征. 地震学报,22(1):102~109.
- 刘耀炜,任宏微,2009. 汶川 8.0 级地震氦观测值震后效应特征初步分析. 地震,29(1):121~131.
- 任宏微,姚玉霞,黄仁桂,等,2016. 地震监测氦观测仪器校准新方法研究. 地震,36(3):46~54.
- 任宏微,姚玉霞,周红艳,等,2017. 测氦仪标准仪器校准法的条件研究. 地震,37(3):148~156.
- 黄仁桂,陈俊松,周红艳,等,2019. 地震氦观测仪计量检定系统与实验分析. 中国地震,35(4):666~675.
- 杉崎隆一,1979. 地球化学方面的地震预报问题——日本地震预报的态势. 田公兴,译. 国外地震,(5):1~8.
- 瓦尔抄尔,1989. 地震水文地球化学前兆. 张炜,李正蒙,王吉易,译. 北京:地震出版社.
- 谢鸿森,1973. 从地球化学看地震成因. 地震战线,(3):19~20.
- 张炜,林颐乐,1978. 地震前兆水化特征及讨论. 地震战线,(6):24~31.
- 中国地震局,2014. 地震水文地球化学观测技术规范. 北京:地震出版社.
- Du J G, Si X Y, Chen Y X, et al, 2008. Geochemical anomalies connected with great earthquakes in China. In: Stefánsson Ó. Geochemistry Research Advances. New York: Nova Science Publishers, Inc, 57~92.
- Sugisaki R, Ito T, Nagamine K, et al, 1996. Gas geochemical changes at mineral springs associated with the 1995 southern Hyogo earthquake (M = 7.2) Japan. Earth Planet Sci Lett, 139(1~2):239~249.
- Wang X, Li Y, Du J G, et al, 2014. Correlations between radon in soil gas and the activity of seismogenic faults in the Tangshan area, North China. Radiat Meas, 60:8~14.

New Method for Calibrating Emanometers with a Miniature Radon Chamber in the Field

Zhao Ying^{1,2)} Huang Rengui^{1,2)} Bao Zhicheng²⁾ Zha Xiaohui²⁾ Xiao Mengren^{1,2)}
Hu Xudong³⁾ Wang Chengnan⁴⁾

1) Observatory for Geodynamic of the East Yangtze Block in Jiujiang, Jiujiang 332006, Jiangxi, China

2) Jiangxi Earthquake Agency, Nanchang 330000, China

3) East China Institute of Technology, Nanchang 330000, China

4) Geological Survey of Jiangxi Province, Nanchang 330000, China

Abstract In order to overcome the difficulties from strict supervision and other issues of radon standard source in the field calibration of the emanometers, we conducted field calibration experiments of the seismic emanometers with the exempt miniature radon chamber, which is developed by East China University of Science and Technology, and analyzed the feasibility in periodic calibration. In this work, comparative calibration experiments of two emanometers in the network with miniature radon chamber and standard radon chamber were carried out in accordance to JJ825-2013 verification regulation of radon measuring instrument. The results showed that our new method for calibrating the seismic emanometers was basically feasible. The miniature radon chamber adopts exempt radon source and automatic radon concentration control system, and has the characters of convenient operation and transportation that can be used as a regular calibration device in seismic stations to promote the unification of radon observation values of seismic systems.

Keywords: Emanometer; Miniature radon chamber; Standard radon chamber; Calibration