

赵影,胡旭东,肖孟仁,等.新型水氡仪质量检测及台站比测实验研究[J].地震工程学报,2022,44(1):166-171.DOI:10.20000/j.1000-0844.20200729003

ZHAO Ying, HU Xudong, XIAO Mengren, et al. Quality detection and comparative experiment of a novel water radon detector [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2022, 44(1): 166-171. DOI: 10.20000/j.1000-0844.20200729003

新型水氡仪质量检测及台站比测实验研究

赵影^{1,2}, 胡旭东³, 肖孟仁^{1,2}, 鲍志诚¹, 宁洪涛², 王成楠⁴, 黄仁桂^{1,2}

- (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, 江西 南昌 330026; 3. 东华理工大学, 江西 南昌 330013;
4. 江西省地质环境调查研究院, 江西 南昌 330026)

摘要: 针对目前地震水氡模拟观测操作繁琐、干扰因素多等现状,引入新型水氡观测仪进行检测并与FD-125测氡仪开展对比试验研究。两款水氡观测仪在地震监测氡观测仪检测平台标准氡室校准,并依托九江地震台相同水样和环境下开展对比测量表明,在静置时间为1 h前提下,新型水氡观测仪重复性、相对误差、相对固有误差、固有本底符合技术要求,与FD-125测氡仪对比测量数据的一致性较好,但灵敏度指标有待提升。该仪器整体设计基本满足地震模拟水氡测量发展需求,可减少人工操作带来的测量误差,提升测量效率和数据质量。

关键词: BG2015D双通道测氡仪; FD-125测氡仪; 标准氡室; 对比测量

中图分类号: P315

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2022)01-0166-06

DOI:10.20000/j.1000-0844.20200729003

Quality detection and comparative experiment of a novel water radon detector

ZHAO Ying^{1,2}, HU Xudong³, XIAO Mengren^{1,2}, BAO Zhicheng¹,
NING Hongtao², WANG Chengnan⁴, HUANG Rengui^{1,2}

- (1. Observatory for Geodynamic of the East Yangtze Block in Jiujiang Province, Jiujiang 332006, Jiangxi, China;
2. Jiangxi Earthquake Agency, Nanchang 330026, Jiangxi, China;
3. East China University of Technology, Nanchang 330013, Jiangxi, China;
4. Jiangxi Province Geological and Environmental Research Institute, Nanchang 330026, Jiangxi, China)

Abstract: The simulated observation of water radon in China is cumbersome and has many interference factors. To overcome this drawback, a novel radon detector instrument was introduced in this paper, and a comparative experimental study was carried out with the FD-125 radon detector. The two water radon detectors were calibrated in the standard radon chamber of the emanometer measurement platform for earthquake monitoring, and a comparative measurement with the same water samples and environment was carried out at Jiujiang seismic station. The results show that the repeatability, relative error, relative inherent error, and inherent background of the novel ra-

收稿日期: 2020-07-29

基金项目: 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项目(OGYB202001);中国地震局监测、预测、科研三结合课题(3JH-202001053)

第一作者简介: 赵影,工程师,主要从事地震监测预测及地震计量等。E-mail:993085163@qq.com。

don detector can meet the technical requirements with a standing time of 1 h. The observation data has good consistency with those of FD-125 radon detector, but the sensitivity index needs to be improved. The overall design of the proposed instrument can basically meet the development needs of analog water radon observation and reduce the measurement error caused by manual operation, thus improving the measurement efficiency and data quality.

Keywords: BG2015D dual channel radon detector; FD-125 radon detector; standard radon chamber; comparative measurement

0 引言

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前兆与后效异常,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新技术得到快速发展^[1]。在中国地震监测台网中,水氡观测是开展最为广泛的前兆测项之一^[2]。连续观测地下水中氡含量的变化,有可能捕捉到地震的孕育与发生信息^[3-8]。目前,中国大陆地震系统水氡观测普遍使用上世纪 70 年代生产 FD-105K 静电计(已经停产)和 FD-125 测氡仪。FD-125 测氡仪作为水氡观测的主流仪器,在地震监测台网发挥了不可替代的作用。但近几年来,氡源运输的不便与放射性监管严格制约了 FD-125 测氡仪的校准工作^[9-13];日常观测中发现,FD-125 测氡仪负压采样、负压手动鼓泡、数据计算、抽本底等过程较为繁琐,工作效率低下,人工操作不当也在一定程度上影响到观测资料的内在质量。

目前,国内外较为认可的水氡测量仪器有 AlphaGUARD P2000 测氡仪和 RAD7 测氡仪,测量过程无需人工过多干预^[14]。但相比于国产水氡测量仪,以上两种仪器主机、耗材和相关配件采购成本昂贵,且返厂维修周期过长、费用过高,以致未能在地震水氡日常监测中推广开来。因此,探索使用国产新型水氡观测仪应用于水氡日常监测,减少人工参与测量过程,提升水氡观测效率和质量平显得尤为重要。本文利用中广核贝谷科技有限公司生产的 BG2015D 双通道测氡仪(以下简称“新型水氡观测仪”)(图 1),与 FD-125 测氡仪开展对比实验研究,分析了该款水氡仪操作便捷性、观测效率、稳定性以及与 FD-125 测氡仪观测数据的一致性。

1 新型水氡观测仪简介

新型水氡观测仪采用两套独立的气路和探测器,配有水样量取器、玻璃扩散瓶、冷凝球等配件,能够同时完成 2 组样品的测量,满足地震行业水氡主、

副样同时测量,输出水氡浓度及主副样偏差结果。在日常水氡测量时,该仪器将本底测量、鼓泡采样、静置、计数、计算等过程全程自动化处理,无需对水氡观测人员培训,准备工作完成后可远程查看测量结果。仪器采用可更换 ZnS 闪烁室,闪烁室内壁使用活化的 ZnS(Ag)涂层,防潮、防脱落、抗污染性能强(表 1)。

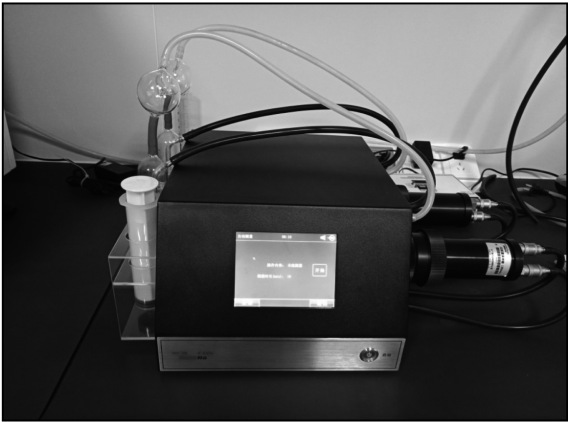


图 1 新型水氡观测仪

Fig.1 Novel water radon observation instrument

表 1 新型水氡观测仪主要技术指标

Table 1 Main technical specifications of novel radon observation instrument

技术指标	仪器型号 BG2015D
闪烁室类型	ZnS
闪烁室体积	256 mL
测量范围	10~(5×10 ⁷) Bq/m ³
灵敏度	约为 36 cpm/Bq/L(针对 ²²² Rn 测量)
泵运行模式	0.15、0.5、1.0、1.5 L/min 可选
数据存储	配置 8 GB 内存卡,可存储 4 年以上的数据
供电模式	AC220V、DC12V 和内置锂电池

2 校准结果分析

2.1 校准指标实验

校准实验使用地震监测氡观测仪器检测平台的标准氡室,标准氡室采用动态平衡的循环补氡方式,提供稳定可调、量值准确的氡浓度,可用于各种主动及被动式测氡仪器的检定和校准。校准实验引入了

重复性 V 、校准系数 K 、 K 值的相对误差 f 、 K 值的相对固有误差 E 和灵敏度 S 、本底等指标,由于此次实验只有一台新型水氡观测仪,无法开展一致性检测。

(1) 重复性:在稳定氡气体体积活度下进行重复测量,设置单次测量时间一般不少于 10 min,次数不低于 10 次。被检测的氡观测仪重复性按下式计算:

$$V = \frac{1}{\bar{N}} \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (N_j - \bar{N})^2}{j-1}} \tag{1}$$

式中: V 为重复性; N_j 为第 j 次的脉冲计数, $j=1,2,3,\dots,(\geq 10)$,单位:cpm; $\bar{N}$ 为 n 次测量的算术平均值。

(2) 校准系数 K :在 3 个标准氡气体体积活度下进行重复测量,至少测量 5 次,每次测量时间不少于 10 min,取 5 次测量的平均值作为测量值。取各目标浓度点校准系数 K_i 的平均值作为被测氡仪的校准系数 K 。

$$K_i = \frac{C_{\text{标准仪器}} \times V}{(N - N_0) \times 10^6} \tag{2}$$

式中: K_i 为待校准氡观测仪在第 i 个浓度点的校准系数,单位: Bq/cpm; $C_{\text{标准仪器}}$ 为 AlphaGUARD PQ2000 PRO 测氡仪测得的氡浓度,代表整个标准氡室内的氡体积活度,单位: Bq / m³; V 为待校准氡观测仪闪烁室体积,单位: mL; N 为待校准氡观测仪闪烁室的脉冲读数,单位: cpm; N_0 为闪烁室本底脉冲读,单位: cpm。

(3) 按下式计算被检测氡仪的 K 值的相对误差:

$$f = \frac{|\overline{R_b} - \overline{R_a}|}{\overline{R_a}} \times 100\% \tag{3}$$

式中: f 为 K 值的相对误; $\overline{R_a}$ 为测氡仪第一次检测的 K 值,单位: Bq / cpm; $\overline{R_b}$ 为测氡仪第二次检测的 K 值,单位: Bq / cpm。

(4) 校准系数 K 值的相对固有误差:由各体积活度点的校准系数 K_i ,经式(4)得出 K 值的相对固有误差:

$$E_i = \frac{K_i - K}{K} \times 100\% \tag{4}$$

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 K ,单位: Bq/cpm; K 为各浓度点测氡仪的校准系数 K_i 值的平均值,单位: Bq/cpm;

取各体积活度点中相对固有误差绝对值最大者

作为被检测氡仪的相对固有误差。

(5) 闪烁室灵敏度:

$$S = \frac{\bar{N} - N_b}{Q} \tag{5}$$

式中: S 为被检测氡仪灵敏度,单位: cpm/Bq · L⁻¹; Q 为已知的氡体积活度,单位: Bq · L⁻¹; $\bar{N}$ 为每分钟计数均值,单位: cpm; N_b 为每分钟本底计数,单位: cpm。

2.2 标准氡室校准实验

实验前,先用定标器测量 FD-125 测氡仪 3 个闪烁室(体积 500 mL)和新型水氡观测仪主、副闪烁室的本底(体积 256 mL),然后用气管将标准氡室、FD-125 测氡仪闪烁室、新型水氡观测仪闪烁室及气泵连接成一个闭合循环系统(图 2),设置标准氡室目标浓度为 4 000 Bq/m³,待标准氡室内氡浓度稳定后,再循环 30 min(气泵流量 1 L/min)。测试完成后,将闪烁室从环路取下密封静置 1 h,再测定其脉冲计数后测量,单次计数时间为 10 min,连续测量 5 次取平均值。以标准氡室内氡浓度作为 FD-125 测氡仪闪烁室和新型水氡观测仪闪烁室内氡的浓度,结合式(1)、式(2)、式(3)分别计算校准系数 K 、 K 值的相对固有误差和闪烁室灵敏度。计算完毕后,用真空泵对闪烁室抽气降本底。同理,分别在标准氡室目标浓度 6 000 Bq/m³ 和 9 000 Bq/m³ 下对 FD-125 测氡仪 3 个闪烁室和新型水氡观测仪主、副闪烁室进行校准实验。

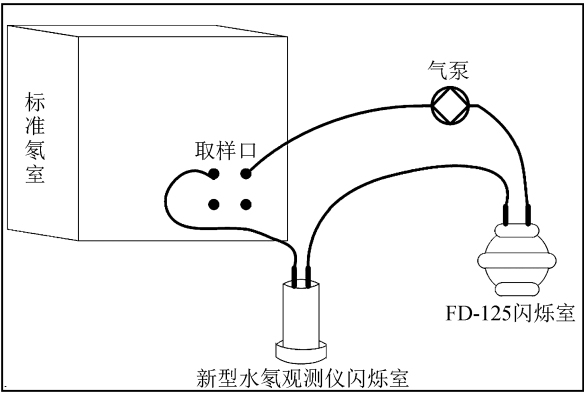


图 2 标准氡室闪烁室循环采样示意图

Fig.2 Schematic diagram of cyclic sampling in standard chamber

通过标准氡室校准,结果表明:

(1) 新型水氡仪本底 ≤ 10 cpm、重复性 ≤ 10%、 K 值的相对误差 ≤ 5%、 K 值的相对固有误差 ≤ 15%,均满足中国地震台网中心所发布《JS-LT201903 测氡仪定型技术要求》技术指标;

表 2 新型水氡观测仪校准结果

Table 2 Calibration results of the novel radon detector

闪烁室 编号	本底计数 N_0/cpm	脉冲计数 重复性/%	K 值的相对 误差/%	K 值的相对 固有误差/%	灵敏度 $/[\text{cpm} \cdot (\text{Bq} \cdot \text{L})^{-1}]$
主样	6	8.65	4.67	4.560	83.44
副样	5	8.01	4.62	7.692	78.94

(2) 灵敏度不满足《JSLT201903 测氡仪定型技术要求》中灵敏度不小于 $90 \text{ cpm}/\text{Bq} \cdot \text{L}^{-1}$ 的要求。实验过程参照地震水氡观测流程静置 1 h 后立即测量,此时闪烁室内部的氡气及其子体的衰变情况就是一个不稳定状态,在这个不稳定的状态下所获得的校准系数 K 、灵敏度等指标也是不稳定的。参考闪烁室测氡法相关经验,闪烁室内氡气及其子体 3 h 左右达到衰变平衡状态^[15]。前期,水氡测量以人工操作为主,考虑到整个过程繁琐、耗费时间长,将静置时间设置为 1 h。新型水氡观测仪是针对地震行业人工模拟水氡测量专门研发的一款双通道式水氡仪,只需在测量前人工把气路连接好,后续选择自动模式并输入开始测量时间后,点“开始”即可。全部过程自动化、无需人工参与鼓泡等、自动显示主、副样水氡浓度和相对偏差,且准备工作完成后无需守在现场,办公室远程可查看测量结果。因此,若实践中使用新型水氡观测仪开展地震水氡测量,完全可以将静置时间设置为 2.5~3 h,提高观测结果测稳定性,灵敏度校准结果也能反映衰变平衡状态下仪器真实灵敏度校准结果(表 2)。

通过标准氡室对两款测氡仪校准并计算校准系数 K 值的相对固有误差结果表明:

(1) 新型水氡观测仪主、副闪烁室校准系数 K 均明显小于 FD-125 测氡仪 1802[#]、1803[#]、1804[#] 闪烁室,显示新型水氡观测仪探测效率高于 FD-125 测氡仪;

(2) 新型水氡观测仪主、副闪烁室相对固有误差分别为 4.560%、7.692%,FD-125 测氡仪 1802[#]、1803[#]、1804[#] 闪烁室相对固有误差分别为 1.706%、6.464%、2.987%,新型水氡观测仪主、副闪烁室和 FD-125 测氡仪 1803[#] 闪烁室相对固有误差相对偏高,但整体相对固有误差水平新型水氡观测仪要高于 FD-125 测氡仪,显示新型水氡观测仪探测稳定性要低于 FD-125 测氡仪。采用相同氡气源条件下,FD125 测氡仪闪烁室体积大且其结构设计能够使氡及其子体均匀分布,而体积小的新型水氡观测仪闪烁室氡气含量就少,不稳定状态下由放射性衰变统计涨落就尤为明显,相应地获得的测量计数必

然会波动很大(表 3)。

3 对比测量实验

两款水氡观测仪在标准氡室校准后,启用新的校准系数,在九江地震台九江 2 井相同水样和测试环境下开展了 20 次水氡对比测量,比较操作实用性和测量数据趋势。

3.1 日常操作对比

水氡日常操作的主要技术流程为仪器预热、水样采集、测本底、鼓泡、测定读数及计算等。操作过程中,新型水氡观测仪与 FD-125 测氡仪同时段在九江 2 井采样、测本底、鼓泡、测数等。其中,新型水氡观测仪采用注射器常压采样;主、副闪烁室同时自动测本底;主、副样同时常压自动鼓泡;自动测量脉冲计数、计数水样氡浓度并评价测量结果;鼓泡环节采用安全瓶替代干燥剂;气路采用免更换抗氧化硬管和气动接头。相比 FD-125 测氡仪,新型水氡观测仪在满足水氡日常观测流程基础上,实现了测本底、鼓泡、计数和计算的自动化、同步化,使操作过程更为便捷、实用(表 4)。

3.2 观测数据对比分析

两套仪器对比测量过程选在台站实验条件相对完善的地震氡观测仪器检测平台实验室。操作过程严格按照定时、定点、定量、定人、同步进行,对两款仪器共开展 20 次对比观测实验。结果表明:通过标准氡室校准启用新校准系数后,两套仪器观测数据趋势变化具有一定的一致性,其中新型水氡观测仪测值普遍高于 FD-125 测氡仪测值(图 3);校准过后,新型水氡观测仪主、副闪烁室测量数据同样具有一定的趋势一致性,但主、副样数据相对偏差绝对值最大值 8.38%,超出了《地震水文地球化学观测技术规范》中水氡背景浓度不小于 111 Bq/L 时,平行样测值的相对偏差绝对值不大于 5%的要求^[16](图 4)。

4 结论与讨论

本文通过对新型水氡观测仪和 FD-125 测氡仪在地震监测氡观测仪检测平台标准氡室校准,依托

九江台相同水样和环境下开展对比测量表明:在静置时间为 1 h 前提下,新型水氡观测仪重复性、相对误差、相对固有误差符合技术要求,与 FD-125 测氡仪对比测量数据的一致性较好,整体设计和性能基本满足地震模拟水氡测量发展需求,并在一定程度

上减轻了台站模拟水氡测量实操人员工作量,降低了人工操作带来的测量误差,提升了测量效率和数据质量。但该新型水氡观测仪测量在静置 1 h 条件下,整体稳定性和灵敏度相对偏低,结合目前地震水氡观测流程和该仪器本身建议如下:

表 3 两款测氡仪闪烁室标准氡室校准相关指标对比

Table 3 Comparison of calibration indexes of standard radon chamber using two radon measuring instruments							
仪器型号	闪烁室编号	计量标准器测值 /[Bq·m ⁻³]	本底计数 /N ₀	脉冲计数 /cpm	各目标浓度校准系数 K _i /[Bq·cpm ⁻¹]	校准系数 K /[Bq·cpm ⁻¹]	K 值的相对固有误差/%
FD-125	1802 [#]	4 164	3	299	0.007 03	0.007 03	1.706
		6 124	2	445	0.006 91		
		9 142	3	642	0.007 15		
	1803 [#]	4 164	1	270	0.007 73	0.007 89	6.464
		6 124	3	409	0.007 54		
		9 142	2	546	0.008 40		
	1304 [#]	4 164	4	279	0.007 57	0.007 70	2.987
		6 124	4	406	0.007 61		
		9 142	7	583	0.007 93		
BG2015D	主样	4 164	4	336	0.003 21	0.003 07	4.560
		6 124	10	543	0.002 94		
		9 142	3	767	0.003 06		
	副样	4 164	1	324	0.003 30	0.003 25	7.692
		6 124	6	529	0.003 00		
		9 142	9	684	0.003 46		

表 4 新型水氡观测仪与 FD-125 测氡仪操作比较

Table 4 Operation comparison of two radon measuring instruments

操作配置	新型水氡观测仪	FD-125 测氡仪
取样	常压取样	负压取样
测本底	同时自动测本底	分时手动测本底
鼓泡	常压、同时自动鼓泡	负压、分时手动动鼓泡
计数	同时自动计数	分时手动计数
计算	自动计算水样	人工计算
气路	免更换抗氧化气管、气动接头	橡胶气管、需定期更换
除湿防水	免更换安全瓶	二氧化硅、需定期更换

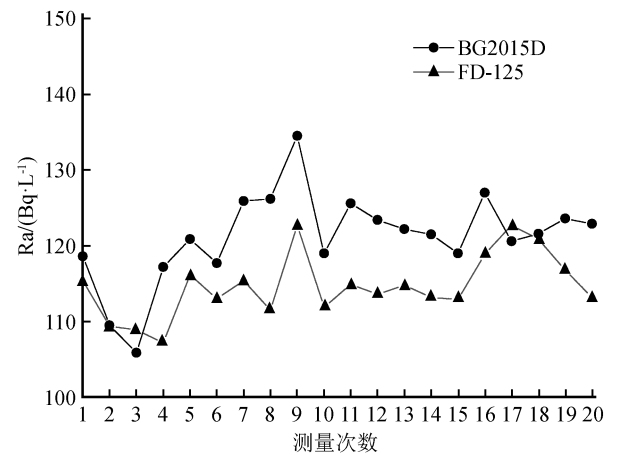


图 3 新型水氡观测仪与 FD-125 测氡仪测量数据对比
Fig.3 Comparison of measuring data by two radon measuring instruments

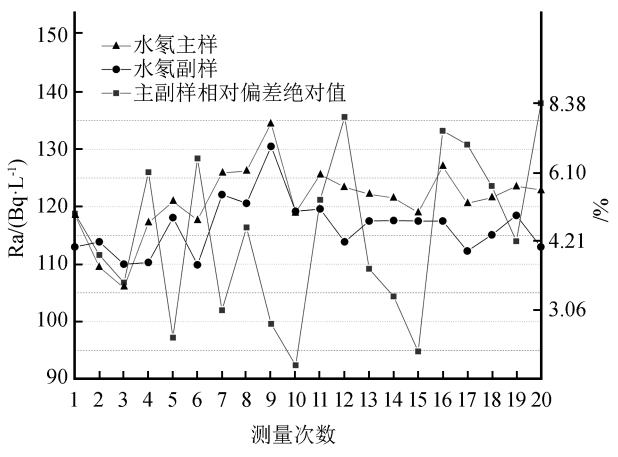


图 4 新型水氡观测仪主、副样测量数据对比
Fig.4 Comparison of primary and secondary sample data by the novel radon observation instrument

- (1) 结合氡衰变平衡规律,建议使用该仪器开展水氡观测过程中可将静置时间调整为 2.5~3 h,以更加真实反映测量结果;
- (2) 进一步提升闪烁室、光电倍增管、高压阈值等探测模块技术工艺,提高设备整体稳定性;
- (3) 继续优化仪器界面程序设计,减少人工设置输入内容、丰富数据信息显示量,提升用户体验便捷性、实用性;
- (4) 可结合不同取样条件设计自动量化取样配件,针对部分高浓度水氡观测背景台站匹配设计自动化抽本底配件。

参考文献(References)

[1] 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.

[2] 刘耀炜,任宏微,张磊,等.鲁甸 6.5 级地震地下流体典型异常与前兆机理分析[J].地震地质,2015,37(1):307-318.
LIU Yaowei,REN Hongwei,ZHANG Lei,et al.Underground fluid anomalies and the precursor mechanisms of the Ludian Ms6.5 earthquake[J].Seismology and Geology,2015,37(1): 307-318.

[3] 姚玉霞,王康,苗再鹏,等.RAD7 测氡仪应用于日常水氡观测的可行性研究[J].地球科学前沿,2018,8(8):1259-1266.
YAO Yuxia,WANG Kang,MIAO Zaipeng,et al.Feasibility study of the application of RAD7 radon meter in the routine observation of water radon [J].Advances in Geosciences,2018, 8(8):1259-1266.

[4] TOM K M C,FAN K,KUOCHEN H. et al.A mechanism for anomalous decline in radon precursory to an earthquake[J]. Ground Water,2006,44(5):642-647.

[5] EREES F S,AYTAS S,SAC M M,et al.Radon concentrations in thermal waters related to seismic events along faults in the Denizli basin, western Turkey [J]. Radiation Measurements, 2007,42(1):80-86.

[6] REN H W,LIU Y W,YANG D Y.A preliminary study of post-seismic effects of radon following the Ms8.0 Wenchuan earthquake[J].Radiation Measurements,2012,47(1):82-88.

[7] 任宏微,刘耀炜,孙小龙,等.单孔同位素稀释示踪法测定地下水渗流速度、流向的技术发展[J].国际地震动态,2013(2):5-15.
REN Hongwei,LIU Yaowei,SUN Xiaolong,et al.Advance of the technique to determine the velocity and direction of groundwater by single-hole isotope diluting and tracing method [J].Recent Developments in World Seismology,2013(2):5-15.

[8] 张磊,刘耀炜,任宏微,等.氡气稳定同位素在地下水异常核实中的应用[J].地震地质,2016,38(3):721-731.

ZHANG Lei,LIU Yaowei,REN Hongwei,et al.Application of stable oxygen and hydrogen isotopes to the verification of groundwater anomalies[J].Seismology and Geology,2016,38 (3):721-731.

[9] 黄仁桂,赵影,李雨泽,等.地震氡观测计量溯源初步探究[J].地震,2019,39(2):183-190.
HUANG Rengui,ZHAO Ying,LI Yuze,et al.Preliminary study on the traceability of the observation and measurement of radon for earthquake monitoring[J]. Earthquake,2019,39 (2):183-190.

[10] 盛云峰,万骏.用罐装氡气校准测氡仪的方法研究[J].辐射防护,2017,37(6):472-475.
SHENG Yunfeng,WAN Jun.Study on the method for calibration of radon detector with canned radon[J].Radiation Protection,2017,37(6):472-475.

[11] 黄仁桂,肖健,李雨泽,等.地震氡观测仪检测平台的设计初探 [J].地震工程学报,2018,40(增刊 1):163-169.
HUANG Rengui,XIAO Jian,LI Yuze,et al.A preliminary study of the design of emanometer measurement platform in earthquake monitoring [J].Chine Earthquake Engineering Journal,2018,40(Supl01):163-170.

[12] 黄仁桂,周红艳,任宏微,等.基于流体力学设计地震气氡观测 [J].深圳大学学报(理工版),2019,36(5):531-537.
HUANG Rengui,ZHOU Hongyan,REN Hongwei,et al.Design of seismic gas radon observation system based on hydro-mechanics[J].Journal of Shenzhen University (Science & Engineering),2019,36(5):531-537.

[13] 黄仁桂,赵影,李雨泽,等.地震氡观测计量溯源初步探究[J].地震,2019,39(2):183-190.
HUANG Rengui,ZHAO Ying,LI Yuze,et al.Preliminary study on the traceability of the observation and measurement of radon for earthquake monitoring[J]. Earthquake,2019,39 (2):183-190.

[14] 姚玉霞,任宏微,郭丽爽,等.AlphaGUARD 与 FD-125 测氡仪对比观测研究.震灾防御技术[J],2016,11(3):641-646.
YAO Yuxiao,REN Hongwei,GUO Lishuang,et al.Comparison between AlphaGUARD and FD-125 radon detectors [J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention,2016,11(3): 641-646.

[15] 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: 试用本[M].北京:地震出版社,2007.
Monitoring and Forecasting Department of China Earthquake Administration.Theoretical basis and observation technology of seismic underground fluid [M]. Beijing: Seismological Press,2007.

[16] 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 specification for seismic hydrogeochemical observation[M]. Beijing: Seismological Press,2014.