

张志相, 陈志, 李营, 等. 张家口渤海地震带 P2000 与 RAD7 型测氡仪野外观测对比实验[J]. 华南地震, 2023, 43(4): 17–25. [ZHANG Zhixiang, CHEN Zhi, LI Ying, et al. The Comparison Experiment of Field Observation Between P2000 and RAD7 Radon Measuring Instrument in the Zhangjiakou Bohai Seismic Zone [J]. South China journal of seismology, 2023, 43(4): 17–25]

## 张家口渤海地震带 P2000 与 RAD7 型 测氡仪野外观测对比实验

张志相<sup>1</sup>, 陈 志<sup>2</sup>, 李 营<sup>2</sup>, 赵建明<sup>1</sup>, 荣伟健<sup>1</sup>

(1. 唐山地震监测中心站, 河北 唐山 063000; 2. 中国地震局地震预测重点实验室, 北京 100036)

**摘要:** 针对 P2000 与 RAD7 型测氡仪相同测量条件下氡浓度测值存在差异的现象, 在张家口渤海地震带野外进行断层气体氡测量对比实验。实验结果表明, 钍射气是造成两台测氡仪观测值差异的主要原因。根据钍射气及其子体衰变期, 先使用气袋采集断层气体, 静置 5~10 min 后再进行测量, 较好的解决了氡浓度测值差异较大的现象。通过断层气体氡的野外测量方法, 为两种仪器观测值直接对比提供了可能, 也为地震监测技术方法改进提供参考。

**关键词:** 断层气体; 氡; 钍射气; P2000; RAD7

中图分类号: P315.72

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2023)04-0017-09

DOI: 10.13512/j.hndz.2023.04.03

## The Comparison Experiment of Field Observation Between P2000 and RAD7 Radon Measuring Instrument in the Zhangjiakou Bohai Seismic Zone

ZHANG Zhixiang<sup>1</sup>, CHEN Zhi<sup>2</sup>, LI Ying<sup>2</sup>, ZHAO Jianming<sup>1</sup>, RONG Weijian<sup>1</sup>

(1. Tangshan Earthquake Monitoring Center Station, Tangshan 063000, China; 2. Key Laboratory of Earthquake Prediction, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China)

**Abstract:** In view of the phenomenon of difference in radon concentration measured by P2000 and RAD7 radon detectors under the same measuring conditions, a comparative experiment of fault gas radon measurement was carried out in the field of Zhangjiakou Bohai seismic zone. The experimental results show that thorium emanation is the main reason for the difference between the two radon detectors. According to the decay period of thorium emanation and its daughters, this paper firstly collects fault gas with an air bag, and then measures it after standing for 5 to 10 min, which better solves the phenomenon of large difference in measured radon concentration. Through the field measurement method of fault gas radon, it is possible to directly compare the observed values of the two instruments, and also provides a reference for the improvement of seismic monitoring technology.

**Keywords:** Fault gas; Radon; Thorium emanation; P2000; RAD7

收稿日期: 2023-04-13

作者简介: 张志相(1991-), 男, 助理工程师, 主要从事地下流体监测研究。

E-mail: zhangzhixiang2022@163.com



2 对比实验及结果

2.1 观测仪器原理

2.1.1 P2000型测氡仪及观测原理

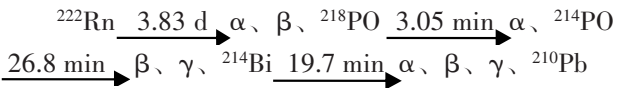
法国SAPHYMO GMBH公司生产的 AlphaGUARD 系列 P2000 测氡仪基于最优化脉冲电离室原理, 气泵将含 Rn 气体抽进电离室( $V=0.62\text{ L}$ ), Rn 释放的  $\alpha$  粒子使空气电离产生大量游离的正负粒子, 在电离室内壁与收集电极间的电场作用下, 正负粒子反向移动, 从而在收集电极上形成电脉冲, 由于正粒子质量大于电子, 运动速度慢, 收集电极主要是正离子产生的慢脉冲, 这些脉冲经电子学测量单元放大后由计数电路记录, 记录的脉冲数与  $\alpha$  粒子数成正比, 即与氡浓度成正比。该仪器具有高探测效率、快速浓度梯度反应以及长期免于维护等特点, 即使在极端大气湿度条件下, 也可以传输可靠的测量值并且不受震动冲击的影响; 具有自动扣除本底污染的功能: 在一个测量序列进行过程中, 自动本底修正不工作, 只有开始一个新的测量序列才工作; 量程:  $2\sim2\,000\,000\text{ Bq/m}^3$ , 采样周期: 可每  $1\text{ min}$  也可每  $10\text{ min}$ , 线性误差保证  $\pm 3\%$  以内, 可连续记录; 仪器操作范围温度:  $-10^{\circ}\text{C}\sim15^{\circ}\text{C}$ ; 气压:  $700\sim1100\text{ Mbar}$ ; 湿度: (没有凝结)  $0\%\sim95\%\text{ rH}$ , 灵敏度:  $100\text{ Bq/m}^3$

2.1.2 RAD7型测氡仪及观测原理

美国 Durrige 公司生产的 RAD7 型  $\alpha$  能谱测氡仪是应用半导体探测器原理, 其特殊之处是受湿度影响明显, 湿度控制在  $10\%$  以内, 经干燥处理的 Rn 气进入包含有  $2500\text{ V}$  电压的金硅面垒半导体探测器的探测室( $V=0.7\text{ L}$ ), Rn( $^{222}\text{Rn}$ ) 发生  $\alpha$  衰变产生的钋(Po)原子核和  $^{218}\text{Po}$  原子(离子)在静电场的作用力下聚集在半导体探测器表面,  $^{218}\text{Po}$  原子(离子)衰变时  $\alpha$  粒子的激发作用致使探测器产生电脉冲信号, 产生同  $\alpha$  粒子损失的能量成正比的输出脉冲信号, 从而可探测射线的强度。即入射粒子在灵敏区内损失的能量转变为与其能量成正比的脉冲信号, 经放大并由多道分析器测出幅度分布, 从而给出带电粒子的能谱。通过能谱分析确定  $^{222}\text{Rn}$  或  $^{220}\text{Rn}$  含量,  $^{222}\text{Rn}$  浓度主要通过  $^{218}\text{Po}$  信号确定,  $^{220}\text{Rn}$  含量由  $^{216}\text{Po}$  信号确定。量程:  $0.1\sim20\,000\text{ pCi/L}$  ( $3.7\sim740\,000\text{ Bq/m}^3$ ), 采样周期:  $5\text{ min}$ , 测量精度在  $\pm 5\%$  以内, 温度:  $3^{\circ}\text{C}\sim40^{\circ}\text{C}$ ,

湿度:  $1\%\sim100\%$  (不凝结), 嗅探模式灵敏度为:  $0.25\text{ pCi/L}$ 。

氡的衰变链:



2.2 野外实验观测点及结果

野外观测点分为固定观测点和流动观测点两种。固定点选取张家口渤海地震带内 10 个气体观测井, 观测井氡浓度范围分别为  $0\sim10\,000\text{ Bq/m}^3$ 、 $10\,000\sim20\,000\text{ Bq/m}^3$ 、 $20\,000\sim30\,000\text{ Bq/m}^3$ 、 $30\,000\sim40\,000\text{ Bq/m}^3$ 。流动观测点布设于唐山巍峰山—南坡断裂和丰南—王兰庄西支断裂。

2.2.1 野外固定点观测及结果

对断层气固定点进行氡浓度测量, 气泵将埋在地下  $5\text{ m}$  深处容积  $15\text{ L}$  的半球形腔体内的聚集气体通过气路管导至地表(见图 2), 将三叉导气管接测量井抽气管用胶皮管分别依次连接干燥管、灰尘过滤器、RAD7; 灰尘过滤器、抽气泵、P2000, 最后通过三叉导气管连接测量井进气管, 形成两个闭合的循环回路。P2000 为主动泵吸模式, 泵速  $1\text{ L/min}$ , 采样周期为  $1\text{ min}$ ; RAD7 为嗅探模式, 采样周期为  $5\text{ min}$ , 湿度低于  $10\%\text{ rH}$ 。各固定点实验的气路连接方式相同, 工作模式相同, 观测时段相近(上午  $9:00\sim11:00$ ), 工作温度、气压和湿度相当。

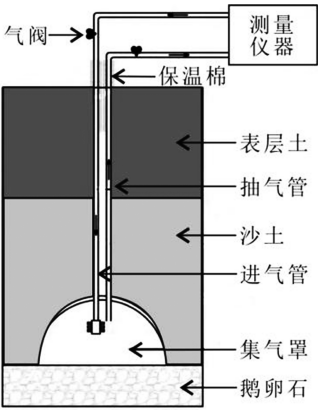


图2 测量井结构示意图

Fig.2 Structure diagram of measuring well

测量完毕后立即对井下气体采集, 检查气袋 ( $2\text{ L}$ ) 有无破损, 确认完好后使用 P2000 仪器的抽气泵将井下管路与气袋连接, 对气袋进行洗气  $2\sim3$  次, 过程中需反复轻轻的挤压气袋的四个角确保气袋内的气体都被洗掉。气路连接完毕, 打开气泵进行采集, 采集完毕时先拧紧气袋的气阀, 再



关闭气泵，记号笔标记采集完毕时间和测点编号后静置，静置 5 min、10 min、30 min、60 min、180 min 后在进行测量，测量时将气袋的两个气阀分别与仪器和气泵连接起来，行成闭合循环，测量设置同上，设置完毕后开始测量，连续记录十五个数据；测量完毕待本底值<1000 Bq/m3 后方可测量下

一个。P2000 采集的十五个数据，去除前三个不稳定值，采用SPASS软件K-S检验测值是否符合正态分布，剔除高值后的测值平均值作为该点最终测值。RAD7连续采集三个数据，选取第三个稳定值作为该点的最终测值(见表1)。

表 1 固定点断层气体氡、钍射气实测数据  
Table 1 Measured data of radon and thorium emanation at fixed point faults

地点	经纬度	RAD7		P2000					
		Th/(Bq·m <sup>-3</sup> )	Rn/(Bq·m <sup>-3</sup> )	Rn/(Bq·m <sup>-3</sup> )					
		直接测量	直接测量	直接测量	静置 5 min	静置 10 min	静置 30 min	静置 60 min	静置 180 min
陡河 J1	118°17′ 39°44′	853	17 900	23 628	11525	9280	10 225	8240	7093
孩儿屯 J2	118°20′ 39°41′	280	7930	10 560	7480	7480	5550	4095	3155
四王庄 J3	118°8′ 39°34′	280	10 600	17 483	10 912	8878	7944	8154	7886
上皇庄 J4	113°14′ 40°8′	288	15 000	19 925	14 325	11 500	11 450	10 393	7742
大同火山 J5	113°37′ 40°6′	0	9790	11 062	12 000	10 470	8915	9115	7837
羊窖沟 J6	114°23′ 40°43′	142	10 600	11 900	10 480	9357	9580	8740	5836
东疃村 J7	115°6′ 40°46′	161	40 900	41 100	38 350	35 600	34 740	32 180	28 740
檀峪村 J8	116°4′ 40°13′	0	12 800	13 725	12 850	11 869	9220	9424	8680
榆林口 J9	114°1′ 40°29′	1080	7220	8612	7675	7203	5794	5584	7972
华北理工 J10	118°9′ 39°36′	436	22 800	37 636	22 100	19 160	9600	7310	5600

2.2.2 野外流动观测点及结果

流动点测量采用不等间距布设测点，依据地形实际情况避开新填土和垃圾腐败物堆放地。通过前人物探资料确定断点位置后，以断点为中心对称依次间隔 5 m、10 m、20 m、20 m、40 m、40 m 布设 16 个测点，测线 L1(见图 3a)，巍峰山剖面因断点恰位于乡道中间未测；丰南剖面测线以断点为中心垂直于断裂走向依次间 0 m、5 m、10 m、20 m、20 m、40 m、40 m、40 m 对称布设

15 个测点测线 L2(见图 3b)。测量时首先用钢钎在土壤中打两个深度在 70 cm 间距为 10 cm 左右的导向孔，之后将空心探杆插入导向孔，然后插入取样器，用橡皮管将仪器与取样器连接，排除残余气体后开始测量，P2000 测氡仪设定为泵吸模式，测量周期为 1 min，1 L/min 抽气速率，连续测量十五个数据(见表 2)，每次观测下一点前要清洗管路和仪器。

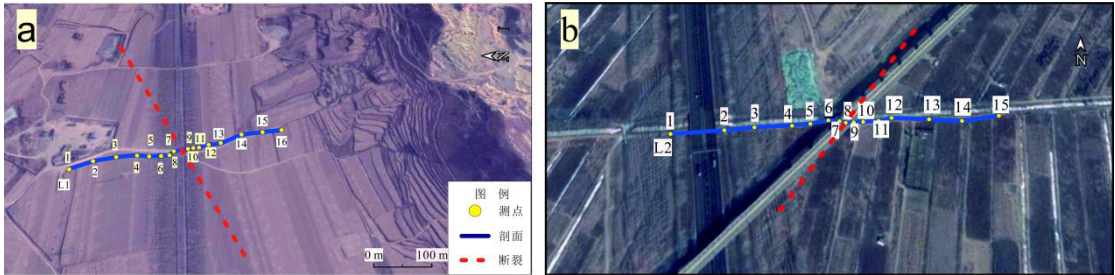


图 3 巍峰山、丰南 L1、L2 测线布设示意图

Fig.3 Lyout diagram of L1 and L2 survey lines in Weifeng Mountain and Fengnan

表2 测线L1、L2断层气体氡浓度

Table 2 Radon concentration of fault gas at measuring lines L1 and L2

巍峰山	经纬度	Rn/(Bq·m <sup>-3</sup> )			丰南	经纬度	Rn/(Bq·m <sup>-3</sup> )		
		RAD7	P2000	P2000			RAD7	P2000	P2000
		直接测量	直接测量	静置7min			直接测量	直接测量	静置5min
L1-1	118°31'32.59" 39°46'27.39"	17 200	32 000	14 500	L2-1	118°02'55.71" 39°31'38.89"	16 500	24 500	18 638
L1-2	118°31'33.33" 39°46'26.21"	19 500	27 000	20 363	L2-2	118°02'59.54" 39°31'39.24"	4150	6280	4380
L1-3	118°31'33.74" 39°46'24.94"	15 600	25 400	17 233	L2-3	118°03'00.88" 39°31'39.26"	4420	5940	4230
L1-4	118°31'33.98" 39°46'23.80"	23 700	33 000	22 183	L2-4	118°03'01.28" 39°31'39.36"	9700	19 600	8985
L1-5	118°31'33.94" 39°46'23.12"	9760	17 600	8403	L2-5	118°03'02.14" 39°31'39.44"	32 900	54 000	21 284
L1-6	118°31'34.03" 39°46'22.46"	6790	14 000	9489	L2-6	118°03'02.98" 39°31'39.61"	6900	88 830	7740
L1-7	118°31'34.10" 39°46'21.98"	19 500	18 500	11 353	L2-7	118°03'03.50" 39°31'39.51"	10 500	21 700	8296
L1-8	118°31'34.45" 39°46'21.79"	14 000	26 300	13 058	L2-8	118°03'03.77" 39°31'39.53"	21 800	45 600	28 846
L1-9	118°31'34.75" 39°46'20.97"	10 700	19 000	9195	L2-9	118°03'04.15" 39°31'39.55"	8240	17 600	9885
L1-10	118°31'34.83" 39°46'20.69"	8800	13 500	9117	L2-10	118°03'04.61" 39°31'39.58"	19 700	35 200	22 815
L1-11	118°31'34.88" 39°46'20.40"	12 700	20 500	13 950	L2-11	118°03'05.32" 39°31'39.64"	20 900	40 100	23 914
L1-12	118°31'35.16" 39°46'19.87"	10 600	17 300	9900	L2-12	118°03'05.94" 39°31'39.77"	11 900	38 400	15 307
L1-13	118°31'35.32" 39°46'19.18"	22 400	38 700	22 275	L2-13	118°03'07.70" 39°31'39.76"	6610	9580	7193
L1-14	118°31'36.18" 39°46'18.06"	25 100	33 700	24 600	L2-14	118°03'09.23" 39°31'39.71"	4540	10 200	4883
L1-15	118°31'36.45" 39°46'16.85"	3970	5100	4112	L2-15	118°03'11.00" 39°31'39.97"	18 000	28 400	19 253
L1-16	118°31'36.72" 39°46'15.74"	3800	5000	3200					

3 讨论

张家口渤海地震带断层气体固定观测点的测量时间均为6月，观测时段相近(9：00~11：00)，气象条件(气温、气压和湿度)相对稳定。固定点土壤类型主要以石灰性始成土为主，土壤结构为壤土，结构类型基本一致。由表1固定点观测结果

可知，氡浓度在张家口渤海地震带呈现东南高、西北低的分布特征，与图1中地震分布密集程度基本一致。因此，氡浓度的高低变化与地震活动密切相关。

Ishikawa最早发现P2000对<sup>220</sup>Rn有响应，事实上，流气模式下<sup>220</sup>Rn更容易进入。气体进入P2000探测腔体前经子体过滤，测量对象为纯Rn释放的α粒子产生的脉冲计数，不能分辨<sup>222</sup>Rn

和<sup>220</sup>Rn。当把离子植入硅探测器型测氡仪设为快速模式时，用α谱只测量<sup>218</sup>Po的计数，灵敏度为慢速模式的一半。使得P2000在保证低浓度测量准确性方面，以及以1 min为周期测量土壤气方面和以10 min为周期测量水氡方面占绝对优势。

表1可知，陡河、孩儿屯、四王庄、上皇庄、羊窖沟、东疃村、榆林口和华北理工8个固定点探测到了钍射气。由表1得知RAD7测量所得钍射气的浓度值与氡浓度值之和小于P2000直接观测值，氡仪器的标准在测量误差计算中有较大的权重，不同氡室标准的仪器刻度因子是观测差值产生的主要原因之一，两套仪器在同源测量前的刻度因子为厂家在同一国家标定产生，故排除不同氡室标准的仪器刻度因子产生的误差。分析认为由于钍射气进入仪器前经过地下5 m路径，产生采样延滞，致使部分钍射气在到达RAD7测氡仪之前衰变。其次，地下地表存在压力差，气泵流速设置

的1 L/min显著减少，经过测量，实际流速为0.5 ~ 0.8 L/min。且观测气路较长，高浓度氡衰变子体堵塞滤膜，易造成氡浓度测值小于实际值。因此，判定这是造成RAD7测量所得钍射气的浓度值与氡浓度值之和小于P2000直接观测值的主要原因。当路径的全部体积大于5 L，流速为0.5 L/min，样品延滞时间为10 min。钍射气半衰期为54.5 s，10 min后浓度大约为地下土壤中浓度的1/11。此外，RAD7测氡仪受湿度影响，湿度过大Rn及其子体溶于水，造成测值低，有研究表明RAD7测氡仪的大体积干燥剂测量钍射气(<sup>220</sup>Rn)时存在明显的测量延迟，导致测量结果偏低<sup>[25]</sup>。檀峪村和大同火山固定点钍射气测值为0，静置测量后对比浓度值变化不大(见图4)，两仪器的测值基本重合。综上所述，造成两种仪器氡浓度观测值差异的主要原因可能是钍射气。

表3 固定点误差  
Table 3 Error of fixed points

固定点	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J9	J10
误差/(%)	55.31	6.01	2.85	4.71	18.41	1.14	6.64	0.38	5.60	3.16

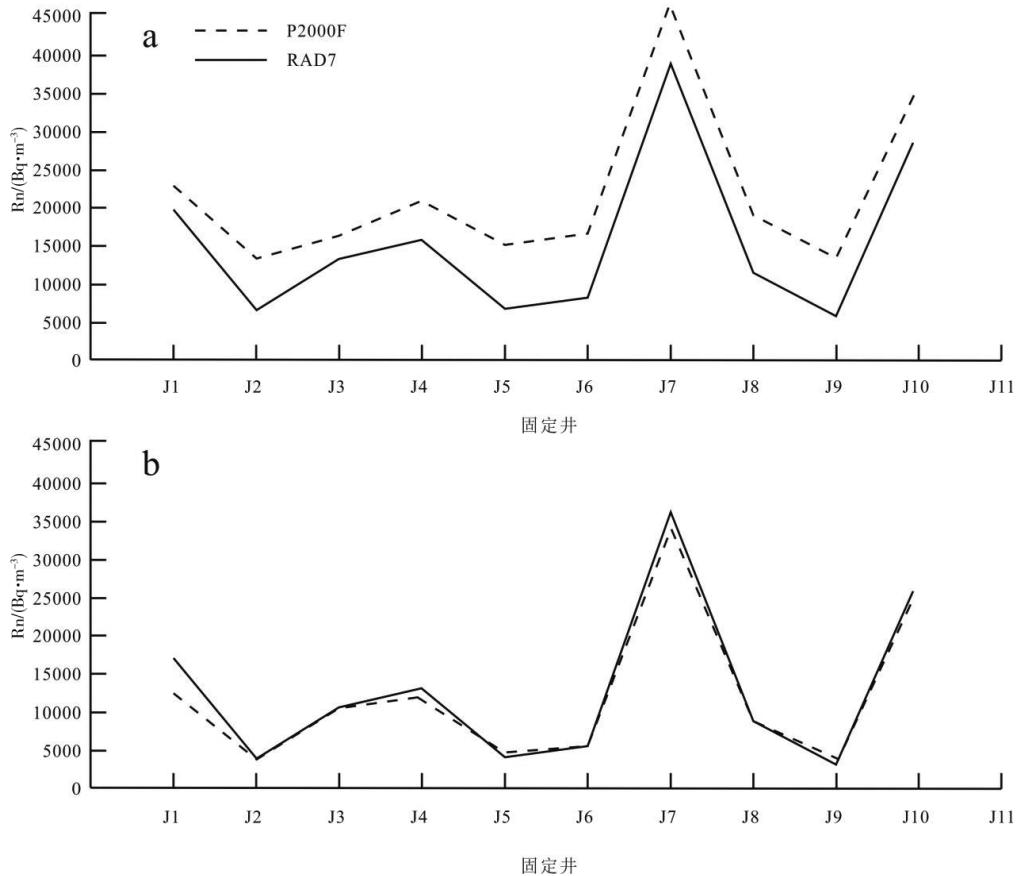


图4 固定点断层气a(静置0 min)、b(静置5 min)Rn浓度曲线

Fig.4 Rn concentration curves of fault gas at fixed point a(standing for 0 min) and b(standing for 5 min)

由图5可知,前5 min 浓度值快速下降,20 min 后期缓慢下降。依据Rn半衰期为3.8天,钍射气即<sup>220</sup>Rn半衰期为55.6 s,其子体<sup>216</sup>Po的半衰期为150 s,分析认为前5 min快速下降主要是钍射气的衰变造成。

表3中J2、J3、J4、J6、J7、J8、J9、J10误差在10 %以内,误差超过10 %的样品仅两个,其中J1误差达到55.31 %可能是因为气袋封闭不严漏气造成。

图6中巍峰山剖面a1、a2氡浓度测线断点附近为低谷,两侧具有明显双峰曲线特征,远处则趋于平缓。丰南剖面b1、b2氡浓度曲线则表现为多峰曲线特征。P2000与RAD7断层气体氡浓度曲线

变化趋势一致,结果显示低浓度时两仪器测值相差较小,浓度越高测值相差越大,静置5 min后探测曲线基本重合。分析认为浓度越高测值相差越大是因为钍射气占一定比例,浓度值越高钍射气含量越大。

表4中,L1测线50 %的观测点(8个)误差在10 %以内,L2测线40 %的观测点(6个)误差在10 %以内。分析认为流动点测量气体流经路径相比于固定点短,结合图6中a2、b2可知5 min静置时间不足,气体经过固定点地下5 m路径的时间约为3至5 min。因此流动点静置时间相较于固定点应延长至10 min。

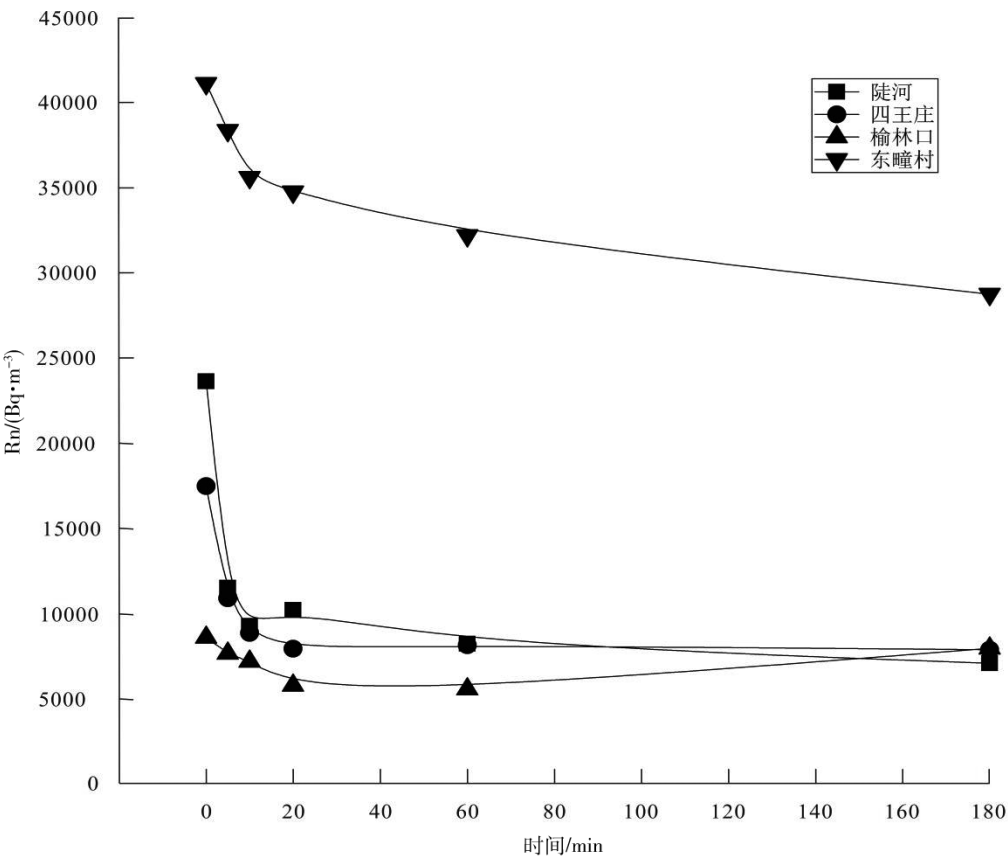


图5 不同氡浓度范围气袋静置衰减曲线

Fig.5 Static attenuation curves of air bags in different radon concentration ranges

表4 流动点误差

Table 4 Error of flow points

测点	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
L1/(%)	18.62	4.23	9.47	6.83	16.14	28.44	71.76	7.21	16.36	3.47	8.96	7.07	0.56	2.03	3.45	18.75
L2/(%)	11.47	5.25	4.49	7.95	54.57	10.85	26.56	24.42	16.64	13.65	12.60	22.25	8.10	7.02	6.50	

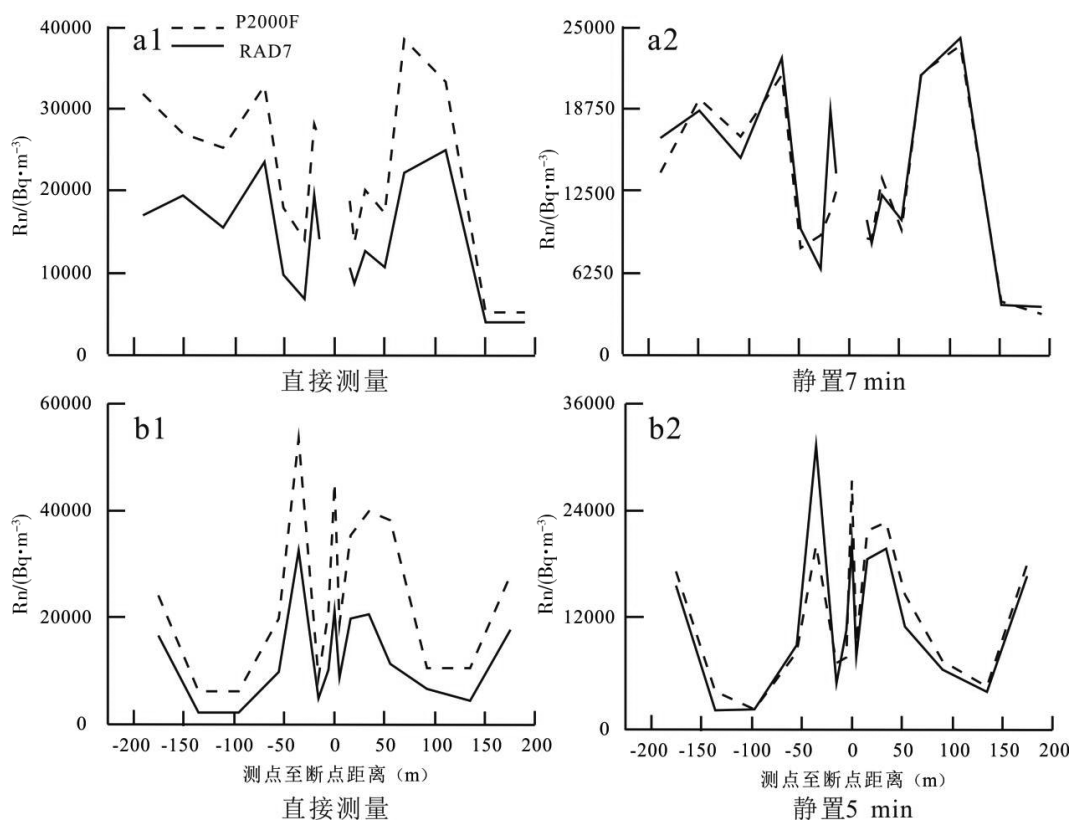


图6 流动点P2000与RAD7测量氡浓度对比曲线

Fig. 6 Comparison curve of radon concentration measured by P2000 and RAD7 at flow point

## 4 结语

张家口渤海地震带野外断层气体氡测量条件基本相同的情况下P2000与RAD7型测氡仪对比实验过程反映出P2000测氡仪具有自动本地补偿、无湿度效应等特点,但无法分辨 $^{222}\text{Rn}$ 、 $^{220}\text{Rn}$ 。RAD7测氡仪能够分辨 $^{222}\text{Rn}$ 、 $^{220}\text{Rn}$ ,但受湿度影响大,需对所测气体进行干燥以确保测量结果准确性。由固定点对比实验结果并结合图1中地震分布密集程度可知张家口渤海地震带断层气体氡浓度具有西北低,东南高的空间分布特征,这与地震带内东南唐山地区地震活动较活跃相对应。P2000与RAD7型测氡仪野外对比实验结果表明,不同的观测仪器原理是造成相同测量条件下氡浓度差异的主要原因。P2000型测氡仪在使用气袋采集气体样品并静置一段时间后,观测值与RAD7直接观测值相近。在 $<10\,000\text{ Bq/m}^3$ 、 $10\,000\sim 20\,000\text{ Bq/m}^3$ 、 $200\,000\sim 30\,000\text{ Bq/m}^3$ 、 $>30\,000\text{ Bq/m}^3$ 等不同氡浓度的对比实验后,本文认为P2000型测氡仪观测前气袋最佳静置时间为 $5\sim 10\text{ min}$ 。

## 参考文献

- [1] 杜建国,康春丽.地震地下流体发展概述[J].地震,2000,20(S1):107-113.
- [2] 刘耀炜,陈华静,车用太.我国地震地下流体观测研究40年发展与展望[J].国际地震动态,2006(7):3-12.
- [3] 李营,杜建国,王富宽,等.延怀盆地土壤气地球化学特征[J].地震学报,2009,31(1):82-91.
- [4] 陈志,杜建国,李营.北天山地区泥火山流体特征变化与地震活动的关系初探[J].科学技术与工程,2015,15(20):1-7.
- [5] 杜建国,康春丽.强地震前兆异常特征与深部流体作用探讨[J].地震,2000,20(3):95-101.
- [6] Planinic J, Radolic V, Lazaninz. Temporal variations of radon in soil related to earthquakes[J]. Apply Radiation and Isotopes, 2001(55):267-272.
- [7] Mazek B, Italiano F, Zivcic M, et al. Geochemical monitoring of thermal waters in Slovenia relationships to seismic activity[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2002(57):919-930.
- [8] Yang T F, Chou C Y, Chen C H, et al. Exhalation of radon and its carrier gases in SW Taiwan[J]. Radiation Measurements, 2003(36):425-429.
- [9] 晏锐,黄辅琼,顾瑾平.中国大陆7级强震前地下流体前兆时空特征[J].地震,2004,24(1):126-131.



- [10] 邵永新. 土壤 Rn 方法用于断层活动性研究的讨论[J]. 中国地震, 2012, 28(1): 51-60.
- [11] 赵建明, 李营, 陈志, 等. 蔚县—广灵断裂和口泉断裂气体排放和断裂活动性关系[J]. 地震地质, 2018, 40(6): 1402-1427.
- [12] 车用太, 张大维, 鱼金子, 等. 断层带土壤气的映震效能与地震短临预报[J]. 中国地震, 1995, 11(4): 374-380.
- [13] 杜建国, 宇文欣, 李圣强, 等. 八宝山断裂带逸出 Rn 的地球化学特征及其映震效能[J]. 地震, 1998, 1(2): 155-162.
- [14] 王博, 黄辅琼, 简春林. 嘉峪关断层带土壤气 Rn 的影响因素及映震效能分析[J]. 中国地震, 2010, 26(4): 407-417.
- [15] Yang T F, Walia V, Chyi L L, et al. Variation of soil radon and thoron concentrations in a fault zone and prospective earthquakes in SW Taiwan[J]. Radiation Measurements, 2005(40): 496-502.
- [16] 陈志, 杜建国, 周晓成, 等. 2012年6月30日新源  $M_s 6.6$  地震前后北天山泥火山及温泉的水化学变化[J]. 地震, 2014, 34(3): 97-107.
- [17] 王江, 李营, 陈志. 口泉断裂断层气地球化学变化特征及断层活动性[J]. 地震, 2017, 37(1): 39-51.
- [18] 王江, 陈志, 张帆, 等. 基于土壤气体地球化学的雄安新区活动断裂空间展布及活动性探讨[J]. 地震研究, 2022, 45(2): 264-274.
- [19] 马文涛, 徐锡伟, 于贵华, 等. 首都圈地区的地震活动性与断裂的关系[J]. 地震地质, 2004, 26(2): 293-304.
- [20] 周红艳, 任宏微, 余思. P2000与RAD7测 Rn 仪对比观测实验研究[J]. 华南地震, 2015, 35(3): 54-58.
- [21] 杨明太.  $\alpha$  粒子测量仪器现状与发展趋势[J]. 核电子学与探测技术, 2011, 31(11): 1198-1201.
- [22] 马若云, 张磊, 郭秋菊, 等. 基于 RAD7 测 Rn 仪的  $^{220}\text{Rn}$  气体准确测量的研究[J]. 原子能科学技术, 2012, 46(11): 1397-1401.
- [23] 马文荣, 赵桂芝, 邱寿康, 等. 浅析温湿度对静电收集法测 Rn 仪收集效率影响的作用机理[J]. 核电子学与探测技术, 2012, 32(4): 482-484.
- [24] 邱小平, 曹扬达, 于涛, 等. 利用静电收集  $^{218}\text{Po}$  实现无源连续测 Rn[J]. 核电子学与探测技术, 2000, 20(2): 120-123.
- [25] 邱国华. 钍射气 ( $^{220}\text{Rn}$ ) 及其子体的研究现状与展望[J]. 世界核地质科学, 2010, 27(2): 111-119.