

DOI: 10.20189/j.cnki.CN/61-1527/E.202602007

室内氡的分布特征及测量方法对比

霍勇刚¹, 孙志强¹, 张铁军², 邵宇睿¹, 李炯垚¹

(1. 火箭军工程大学, 西安 710025;

2. 陆军某部军事代表室, 上海 200031)

摘要: 氡作为天然辐射的主要来源, 约占公众所受天然辐射总剂量的50%, 因此研究其在日常环境中的分布对人员的安全健康具有重要意义。针对室内氡浓度空间分布特征不明以及测量方法适用性还有待验证的问题, 利用RAD7氡测量仪, 采用控制变量法与加权平均数据处理方法, 对单个房间在通风、密闭环境下的氡浓度分布进行测量, 同时对比了不同楼层氡的垂直分布特征及不同测量方法的误差。结果表明: 单个房间内氡浓度在空间中呈不均匀分布, 在近地面及人员呼吸高度区域易出现氡积聚, 通风可显著缩小各点位的浓度差异; 建筑内氡浓度存在明显垂直梯度差异, 从低到高逐层递减, 一楼氡浓度显著高于二、三楼, 二、三楼氡浓度则较为接近; 选取15 min和30 min测量周期时测量结果的误差相对较大, 选取1 h和3 h测量周期时可较准确反映氡浓度变化水平; “三点法”经权重优化后测量准确性提升, 可有效解决空间异质问题, 适用于工程排查与应急响应; “分段法”数据连续性好、符合标准要求, 更适用于科学研究与合规性评估。

关键词: 氡气; 分布特征; 测量方法对比; 三点法; 分段法

中图分类号: X591

文献标志码: A

开放科学标识码(OSID):

文章编号: 2097-2741(2026)02-0075-09



听语音
聊科研
与作者互动

氡是主要的室内空气污染物之一, 主要由环境介质中的镭衰变而来, 并通过介质空隙透析到空气中^[1-2]。在室内密闭环境中, 氡浓度可近似视为不随时间变化^[3], 氡及其衰变子体在进入人体后会发生 α 衰变, 造成内照射损伤^[4-5], 是引发肺癌的主要诱因之一^[6-8]。此外, 有研究显示, 人体所受氡及其衰变子体辐射剂量约占天然辐射总剂量的50%^[9-11]。因此, 研究室内氡的分布特征对保障人身健康尤为重要。

国内外研究表明, 室内氡浓度受通风条件^[12-13]、建筑材料^[13-15]、楼层高度^[16]、人员活动^[17]等因素影响显著。因此, 各国通过执行高氡浓度区建筑改造、推广氡检测工具并安装通风系统、推动检测与建筑规范更新等政策来降低氡危害风险。

为探究室内氡的分布特征, 本文采用控制变量法对比了单个房间内和整栋建筑物在密闭环境

和通风环境下不同点位的氡浓度变化, 并结合“三点法”与“分段法”优化数据采集^[3], 对比了2种方法的适用性与可信性, 旨在揭示氡的空间分布规律。

1 实验原理

1.1 测量方法

采用RAD7氡测量仪作为检测设备, 该仪器基于 α 粒子能谱分析技术, 将过滤干燥后的待测空气(湿度控制在10%以内)通入收集室腔体, 氡($^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$)衰变会产生带正电的子体($^{218}\text{Po}/^{216}\text{Po}$), 在高压静电场作用下被吸附到 α 半导体探测器表面, 通过测量子体衰变产生的 α 粒子能谱, 实现对 ^{222}Rn 和 ^{220}Rn 的定量区分, 并完成浓度计算^[18-19]。

收稿日期: 2025-11-04

修回日期: 2025-12-24

录用日期: 2026-01-18

第一作者: 霍勇刚(1975—), 男, 副教授, 主要从事辐射防护与核安全研究。E-mail: huoyongang@163.com

引用格式: 霍勇刚, 孙志强, 张铁军, 等. 室内氡的分布特征及测量方法对比[J]. 火箭军工程大学学报, 2026, 40(2): 75-83. HUO Yonggang, SUN Zhiqiang, ZHANG Tiejun, et al. Comparison of distribution characteristics and measuring methods of radon in indoor environment[J]. Journal of Rocket Force University of Engineering, 2026, 40(2): 75-83.

1.2 实验条件设置

在静态且无干扰的室内环境中，氡因密度较高呈现显著不均匀分布，开放环境下气流自然扩散与氡源持续输入会进一步加剧其分布复杂性^[20]。本文选取某实验楼一楼 106 房间（房间 A）、二楼 206 房间（房间 B）、三楼 306 房间（房间 C）作为实验场所。其中，A 房间窗口周边气流状态稳定且通风条件易于调控，具备良好的实验代表性；1~3 层所选房间窗口朝向一致，窗户尺寸一致且窗口附近通风条件相近，可降低无关因素对测量结果的干扰。单个房间内氡分布实验与不同测量方法对比实验中，选取 A 房间为实验场所，房间共布设 3 个监测点位，分别为西南角距地面 0.2 m（测点 1，靠近门和地面）、中心处距地面 1.5 m（测点 2，与人员呼吸高度相近）、东北角距房顶 0.2 m（测点 3，靠近窗户及房顶）。整栋楼的氡垂直分布实验中，2~3 层各房间均布设 2 个监测点位，分别为西南角距地面 0.2 m（房间 B 和 C 的测点分别记为 4 和 6）与中心处距地面 1.5 m（房间 B 和 C 的测点依次记为 5 和 7），实验楼各房间及测点位置如图 1 所示。

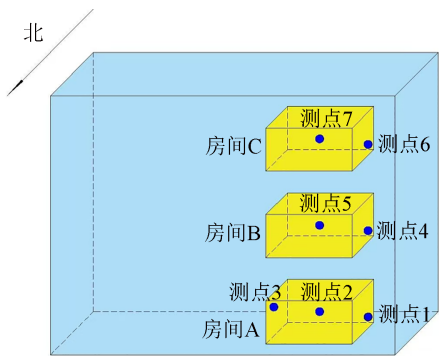


图 1 某实验楼房间及其测点分布简化示意
Fig. 1 Simplified schematic of rooms and measuring points distribution of a laboratory building

1.2.1 单个房间内的氡浓度分布实验

实验分别在密闭与通风环境下展开，其中密

闭环境要求房间提前密闭 12 h，测量期间维持密闭状态；通风环境要求房间提前通风 24 h，测量期间保持单侧通风，即打开两扇窗户并关闭房门。测量周期设置为 1 h，循环次数为 9 次，仪器采用 Normal 模式^[21]，通过分析不同点位的氡浓度数据来揭示单个房间内氡浓度的空间分布特征。

1.2.2 整栋楼的氡垂直分布实验

实验时房间全程保持密闭状态，测量周期设为 1 h，循环次数为 9 次，仪器采用 Normal 模式，通过对比不同楼层房间内对应点位的氡浓度数据，分析实验楼内氡浓度的垂直分布特征。

1.2.3 不同测量周期对比实验

实验时房间全程保持密闭状态，按照测量周期由短至长分为 4 组，依次为：1) 15 min 组，采用 Sniff 模式，循环 9 次；2) 30 min 组，采用 Sniff 模式，循环 9 次；3) 1 h 组，采用 Normal 模式，循环 9 次；4) 3 h 组，采用 Auto 模式，循环 3 次。以 24 h 连续测量作为对照组，测量周期设为 2 h，循环模式选择 00（无限循环），仪器采用 Normal 模式，该测量方式周期长、数据稳定可靠，用于评判实验组数据的可信度。

2 氡在室内环境中的分布特征

2.1 单个房间内的分布特征

房间 A 内不同点位的氡浓度测量数据如表 1 所示。

由表 1 可知，实测数据的测量误差较大，该偏差主要来源于短周期测量数据统计误差、仪器残留污染、室内氡分布不均、测量模式差异及环境干扰。为降低测量误差对实验结果的影响，对表 1 数据采用加权平均法计算得到最终估计值^[22]。该方法依据各数据点自身的误差分配权重，不确定度越小则权重越高，从而得出比算术平均值更优的最佳估计值及其合成不确定度，计算方法如下。

表 1 A 房间各工况数据记录
Table 1 Data record of room A under various operating conditions

		Bq/m ³								
测点	通风条件	采样序号								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	无通风	14.6±21.2	29.2±25.2	14.6±21.3	11.7±18.9	17.5±21.2	26.8±16.1	8.7±17.5	18.2±19.2	16.4±18.9
	有通风	6.4±7.6	8.0±8.3	8.5±7.5	7.6±8.7	9.9±8.3	7.0±10.3	7.8±8.5	6.8±9.1	6.5±7.5
2	无通风	63.5±22.0	59.3±21.3	59.3±21.3	60.7±21.8	66.3±22.6	49.4±19.8	105.0±41.3	55.4±31.9	70.0±35.0
	有通风	8.5±9.6	9.6±8.1	7.7±9.9	7.4±9.8	10.9±8.7	10.0±10.5	6.8±9.5	10.8±9.5	8.9±10.0
3	无通风	4.2±8.5	7.1±9.7	7.1±9.7	7.1±9.7	7.1±9.7	8.5±10.3	5.8±17.5	2.9±14.1	8.7±17.5
	有通风	9.5±9.6	7.6±9.1	7.7±9.9	7.4±8.9	9.9±8.9	10.0±10.5	10.8±9.5	8.8±9.5	6.5±9.6

1) 计算每个测量值的权重 W_i 为

$$W_i = \frac{1}{U_i^2} \tag{1}$$

2) 计算加权平均值 X_w 为

$$X_w = \frac{\sum_{i=1}^n (W_i X_i)}{\sum_{i=1}^n W_i} \tag{2}$$

式中： X_i 和 U_i 分别为单次测量的测量值和误差值； n 为同一工况下的测量次数。

3) 计算不确定度 U_w 为

$$U_w = \frac{1}{\sqrt{\sum_{i=1}^n W_i}} \tag{3}$$

4) 假设在 a、b 两点多次测量结果的加权平均数分别为 X_a 和 X_b ，则其相对偏差 e 为

$$e = \frac{|X_a - X_b|}{X_b} \tag{4}$$

综上所述，A 房间各工况氡浓度的加权平均数与不确定度计算结果如表 2 所示。

表 2 A 房间各工况氡浓度的加权平均数与不确定度计算结果

Table 2 Weighted average radon concentration and uncertainty calculation results under various operating conditions in room A Bq/m³

通风 条件	测点 1		测点 2		测点 3	
	加权 平均数	不确 定度	加权 平均数	不确 定度	加权 平均数	不确 定度
无通风	17.30	6.50	61.35	8.04	6.49	3.60
有通风	7.62	2.77	9.03	3.14	8.66	3.16

由表 2 可得，加权后不确定度较单次测量误差显著变小，这是由于该方法通过统计多次独立观

测数据，可有效抑制随机误差，从而得到一个更为精确的最佳估计值。分别对密闭与通风条件下 A 房间的氡浓度分布特征及差异进行分析可得，密闭条件下 A 房间测点 2 的氡浓度显著高于测点 1 与测点 3，测点 2 的氡浓度加权平均数较测点 1 高 44.05 Bq/m³、相对偏差为 254.62%，较测点 3 高 54.86 Bq/m³、相对偏差高达 845.30%，且测点 1 的氡浓度加权平均数略高于测点 3，二者差值为 10.81 Bq/m³、相对偏差为 166.56%。通风条件下，A 房间内测点 2 的氡浓度仍为最高，但各测点间的氡浓度差异显著减小，测点 2 与测点 1、测点 3 的相对偏差分别降至 18.50% 与 4.27%。上述结果表明，室内密闭条件下氡浓度的空间分布存在显著差异，通风可有效减小各点位氡浓度分布的不均匀性，其分布特征受室内热对流、气流扰动、氡来源及重力沉降等因素共同调控。通风条件下，在 A 房间内，人体与电脑设备散热产生的热空气上升会带动氡气向上混合，削弱氡的重力分层效应^[23]，测点 1 因靠近门口，测量期间存在人员进出引发气流扰动使氡气被快速稀释，进而导致其浓度低于测点 2。密闭条件下，测点 1 与测点 3 的建筑材料影响相近，但测点 1 更接近地表，土壤析出的氡气输入量更大，加之氡气密度为空气的 7~8 倍，在重力作用下易向低处聚集，使得测点 1 处氡浓度高于测点 3。通风状态下室内气体流动加剧，促进氡气扩散，并促使其均匀分布，从而大幅缩小各点位浓度差异^[24]。

2.2 整栋楼的垂直分布特征

整栋楼内不同楼层房间的氡浓度测量数据如表 3 所示。

对表 3 中每组数据的真实值和误差值进行加权平均计算，所得 3 个房间内各测量点氡浓度的加权平均数与不确定度如表 4 所示。

表 3 3 个房间测量点数据记录

Table 3 Data records of measuring points in three rooms

Bq/m³

房间	测点	采样序号								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
A	1	14.6±21.2	29.2±25.2	14.6±21.3	11.7±18.9	17.5±21.2	26.8±16.1	8.7±17.5	18.2±19.2	16.4±18.9
	2	63.5±22.0	59.3±21.3	59.3±21.3	60.7±21.8	66.3±22.6	49.4±19.8	105.0±41.3	55.4±31.9	70.0±35.0
B	4	14.6±20.1	6.2±24.3	7.1±9.7	8.7±17.5	9.9±10.8	5.8±17.5	2.9±14.1	9.9±14.1	7.9±15.5
	5	13.6±17.1	9.5±16.3	7.1±9.7	15.7±16.5	14.8±14.8	13.8±12.5	14.6±16.1	9.9±13.8	14.6±17.1
C	6	2.9±14.1	5.8±15.9	5.8±15.9	11.3±11.3	5.8±15.9	7.1±10.3	13.6±20.1	6.7±14.1	9.0±14.8
	7	11.6±15.1	8.5±15.3	9.1±10.7	13.1±16.1	11.1±18.8	12.8±14.3	14.4±14.4	9.9±13.8	11.3±18.1

表 4 3 个房间内各测量点氡浓度的加权平均数和
不确定度计算结果

Table 4 Weighted average radon concentration and
uncertainty calculation results of various measuring points
in three rooms Bq/m³

房间	测点	加权平均数	不确定度
A	1	17.30	6.50
	2	61.35	8.04
B	4	7.97	4.76
	5	11.77	4.72
C	6	7.51	4.65
	7	11.10	4.87

由表 4 可得, A 房间氡浓度最高, 其房间内测点 1 处的氡浓度加权平均数较 B 房间测点 4、C 房间测点 6 分别高 9.33 Bq/m³ (相对偏差 117.06%)、9.79 Bq/m³ (相对偏差 130.36%), 测点 2 氡浓度加权平均数较测点 5 和测点 7 分别高 49.58 Bq/m³ (相对偏差 421.24%)、50.25 Bq/m³ (相对偏差 452.70%); B 房间与 C 房间氡浓度相对偏差显著减小, 测点 4 氡浓度较测点 6 高 0.46 Bq/m³ (相对偏差 6.13%), 测点 5 氡浓度较测点 7 高 0.67 Bq/m³ (相对偏差 6.04%), 远小于 A 房间 1、2 点之间的相对偏差。究其原因: 一方面, 氡的来源存在差异, 一楼建筑直接与土壤接触, 土壤中的氡可通过建筑缝隙持续渗入室内, 为主要氡源, 而二、三楼远离土壤, 氡渗透路径延长且浓度发生衰减, 主要氡源为建筑材料释放, 致使二者氡浓度较为接近^[25]。

3 不同测量方法的探究和对比

对不同测量周期下 A 房间内各测点氡浓度真实值和误差值进行加权平均计算, 所得结果如表 5

所示。

3.1 不同实验周期的对比分析

基于表 5 中的数据, 将各实验组测量结果与 24 h 对照组测量结果进行对比分析, 所得结果表明: 15 min 组和 30 min 组中各测点的氡浓度加权平均数与对照组偏差较大, 最大相对偏差出现在 30 min 组中的测点 3, 约为 335.96%, 最小相对偏差在 30 min 组测点 1, 仅为 11.67%, 表明在该密闭室内环境中, 采用 15 min 或 30 min 测量周期的误差较大, 无法准确估测氡浓度; 1 h 组和 3 h 组中各测点氡浓度加权平均数与对照组差值普遍较小, 相对偏差范围为 9.06%~26.49%, 表明采用 1 h 或 3 h 测量周期时的误差相对较小, 能够较好地估测氡浓度。综合全部 12 组实验数据, 其中 10 组数据高于对照组, 仅 2 组低于对照组, 整体呈现测量结果偏大的特征, 结合实验操作流程分析, 推测该偏差主要由每次测量前仪器净化不充分所致, 仪器残留污染使得后续测量结果受到氡残留影响而偏高^[26]。

综合数据可靠性、时间成本、效费比、任务需求等情况, 对测量方案提出优化建议: 若对数据准确性要求较高且时间充裕, 可选择 3 h 为测量周期, 搭配 3 次循环; 若任务时间紧急, 建议选择 1 h 为测量周期, 搭配 5 次循环, 该方案既能缩短总测量时长, 又能通过增加 2 次循环减少随机误差。

3.2 “三点法”的计算分析

3.2.1 方法分析

“三点法”即空间分布法^[27], 通过选取房间内 3 个具有代表性的点位进行测量, 可有效消除单点测量带来的局部偏差, 保证检测结果的正确性, 本文第 2 节中的实验结果均采用该方法测得。分别选取测点 1~3 的 1 h 测量周期结果进行对比分析, 基于表 5 数据可知, “三点法”中各监测点位所测得的氡浓度一致性较弱, 数值差异较为显著。为

表 5 不同测量周期下 A 房间内各测点氡浓度的加权平均数与不确定度计算结果

Table 5 Weighted average radon concentration and uncertainty calculation results of various measuring points under
different measuring periods in room A Bq/m³

测点	测量周期									
	24 h		15 min		30 min		1 h		3 h	
	真实值	误差值	加权平均数	不确定度	加权平均数	不确定度	加权平均数	不确定度	加权平均数	不确定度
1	15.77	3.48	21.58	14.66	17.61	12.89	17.30	6.50	19.51	2.70
2	48.50	3.52	66.74	10.11	60.89	12.89	61.35	8.04	57.71	3.34
3	7.62	3.58	18.68	19.78	33.22	10.77	6.49	3.60	6.93	4.01

优化数据处理效果, 分别采用3种计算方法对1 h 组数据进行处理与验证: 1) 计算3个点位的氡浓度算术平均值为28.38 Bq/m³, 与参考值(48.50 Bq/m³)的相对偏差为41.48%, 因偏差过大无实际参考价值, 故舍弃该方法; 2) 由式(1)~(3)计算3个点位的加权平均值为15.99 Bq/m³, 不确定度为2.93 Bq/m³, 与参考值的相对偏差进一步增至67.03%, 更无实际参考意义, 因此同样予以舍弃; 3) 参考贝叶斯思想, 根据各点位的实用性赋予不同权重进行加权平均计算^[28], 其中测点2为人员主要活动区域, 实用性最强, 权重设为0.5, 测点1和测点3实用性较弱, 权重各设为0.25, 经计算, 该赋值加权方法下3个点位的加权平均值为36.62 Bq/m³, 与对照组的偏差减小至24.49%。综合对比3种方法, 赋值加权计算所得结果的偏差较前2种方法显著减小, 因此确定该方法为本次“三点法”氡浓度数据的更优处理方法。

3.2.2 特殊权重探究

为进一步优化权重, 设定测点2的权重为 a , 测点1和测点3的权重均为 $(1-a)/2$ 。以参考值进行反推, 当 $a=0.740\ 2$ 时, 计算得到的加权平均值为48.501 6 Bq/m³, 与参考值之间高度接近, 初步确定该权重分配为计算权重。

为验证 $a=0.740\ 2$ 的适用性, 另选取3个点位的30 min与3 h测量周期数据, 均采用相同的权重分配(测点2权重为0.740 2, 测点1、3权重各为0.129 9)对每组数据的真实值与误差值进行加权平均计算, 并与其算术平均数和加权平均数进行比较, 具体结果如表6所示。

基于表6数据分析可得, 测点2权重设为0.740 2时计算产生的偏差较小且在可接受范围之内, 与对照组数值贴合效果较好。

3.3 “分段法”的计算分析

“分段法”即时间分段测量法^[29], 是指在固定点位通过多段时间间隔对实验对象进行周期测量的方法, 其核心优势在于利用间隔时间规避突发因素的干扰, 通过“化整为零”将复杂动态过程

转化为可分析的离散数据。相比于长时间连续测量, “分段法”的优点有以下4点。

表 6 偏差计算

Table 6 Deviation calculation

Bq/m³

计算方法	周期	平均值	与标准值的偏差/%
加权平均计算	30 min	36.73	24.27
	3 h	28.65	40.93
算术平均计算	30 min	37.24	23.22
	3 h	28.05	42.17
特殊赋值的加权平均计算	30 min	51.67	6.54
	3 h	46.15	4.85

1) 动态捕捉浓度变化。氡浓度受环境因素和人类活动影响显著, 分段测量可识别浓度的高峰与低谷时段, 避免单次测量因时间点选取较短而产生的误差。

2) 提高数据代表性与准确性。相较于单次测量可能因时间选择不当(如通风后立即测量)导致测量值偏差较大, 分段法能够通过多时段数据综合计算, 减少瞬时波动或偶然事件的干扰。

3) 支持异常值分析与质量控制。可以通过分段数据快速定位某段数据突增等异常情况, 结合环境状态的变化记录排查干扰因素, 提高结果可靠性。

4) 成本效益高。分段法可通过间歇性采样降低硬件成本, 适合实验室和家庭等中小规模场所使用。

本实验选取A房间测点2, 设定第一段时间为上午10时至11时, 每段测量时间为1 h, 时间间隔为1 h。相关的测量数据汇总如表7所示。

基于表7的数据分析可知, 前4个时间段测量得到的数据波动性相对较小。第五段的测量值较大, 相比前一个时间段增大了72.98%。将分段测量数据的加权平均值65.64 Bq/m³与24 h连续测量结果相比, 两者偏差较大, 约为35.34%, 其原因主要是第五个时间段为18时至19时, A房间内的

表 7 利用分段法测得测点2的氡浓度变化

Table 7 Radon concentration variations at measuring point 2 using segmentation method

测点	取样时间段												总计	
	第一段		第二段		第三段		第四段		第五段		第六段		加权平均值	不确定度
	测量值	误差	测量值	误差	测量值	误差	测量值	误差	测量值	误差	测量值	误差		
2	63.5	22.0	59.3	22.0	66.3	22.6	60.7	21.8	105.0	41.3	70.0	35.0	65.64	10.21

人员活动打乱了原本分布不均的氡，导致中心处点位所测得的氡浓度值迅速陡升，引发数据波动。此外，测量时段大多在白天，受温度、气压和人类活动等因素干扰，白天室内氡浓度一般小于夜间，再加上每段测量时间仅为 1 h，因测量时间较短而难以规避瞬时干扰。

3.4 “三点法”与“分段法”对比分析

3.4.1 原理分析

“三点法”是基于氡在空间分布上的非均匀性，通过选择 3 个代表性点位进行同步或分时测量来综合评估整体氡浓度水平。氡可能通过地基裂缝、建材析出或管道渗透等途径进入室内，不同位置的氡浓度因距离氡源的远近、气流扰动等因素存在显著差异。在统计的代表性上，“三点法”通过多位置采样的均值或最大值能够降低单点测量的偶然误差，尤其适用于复杂建筑结构或存在局部氡源的环境。

“分段法”是通过长时间连续监测同一位置的氡浓度变化，捕捉其时间动态特征，从而评估其平均水平。在时间的依赖性上，氡浓度受气压、温湿度、通风率等环境因子影响显著。可以通过衰变平衡修正，连续监测并记录氡及其子体的实时数据，再利用时间积分消除瞬时波动误差。

对比来看，“三点法”的核心目标是进行空间异质性的分析，该方法的理论基础是氡源的分布与气流扩散模型，采取多点同步或者分时测量的数据采集方式。“分段法”的核心内容是捕捉其时间动态趋势，该方法的理论基础是环境因子与氡衰变动力学，采取单点连续监测的数据采集方式。

3.4.2 效费比对比

在设备与人力成本上，“三点法”实施过程中需至少 3 台 RAD7 氡测量仪或频繁移动单台 RAD7 氡测量仪至不同点位，若使用单台仪器分时测量，则总时间成本将增加 3 倍，因此经济成本相对更高。在人力投入上，多点布设需要有人协调，尤其在大型建筑中可能涉及复杂动线规划。“分段法”对设备的需求较小，在本次实验过程中仅需 1 台 RAD7 氡测量仪，总成本显著降低。同时设备部署后自动化运行，仅需定期数据导出与维护，人力成本可忽略，经济成本相对也较低。

在时间效率上，“三点法”效率更高，总时长为 24 h，若 3 台设备同步测量，可 8 h 内完成测量任务，而“分段法”则需连续监测 24 h，总耗时较长，但无需人工干预。

在场景适用性上，对于高空间异质环境，“三

点法”虽成本高，但可避免漏检高风险区域，整体效费比更优。对于均质环境长期评估，“分段法”以较低成本提供可靠长期数据，效费比显著占优。

综上所述，“三点法”优在时间成本相对较低，但多台测量的仪器工作会增加设备成本和人力成本，更适用于复杂空间和局部氡源的排查。“分段法”的优势在于可通过单台仪器实现自动化测量，设备成本和人力成本更低，但时间成本高于“三点法”，更适用于均质环境中氡的长期变化趋势分析。在实际操作中，要根据实际任务的具体要求，选择合适的方法。

3.4.3 可靠性对比

在数据准确性上，“三点法”通过空间采样降低单点偏差，尤其适用于氡浓度梯度变化明显的环境。但若选点不合理，会遗漏关键氡源点，导致整体评估偏差相对较大。“分段法”可以实现连续监测，可覆盖氡浓度昼夜周期，数据积分结果更接近真实浓度水平。但局限于单点测量无法反映空间差异，若监测点位于低浓度区域，会低估整体氡辐射风险。

在抗干扰能力上，“三点法”对短时开窗通风等瞬时环境波动不敏感，虽各点位受影响程度不同，但均值计算可抵消部分干扰。然而，该方法易受设备一致性影响，若多台仪器未校准，可能导致系统性误差。“分段法”对人员进出导致的气流变化等短期干扰敏感，同时依赖于仪器长期稳定性，需定期校准以避免漂移误差。

在标准符合性上，国际标准 EPA、ISO 11665-4 等标准更推荐使用“分段法”^[30]，尤其是类似 48 h 连续监测等，这是由于其所测得的数据完整性更高。而“三点法”多用于初步筛查或特殊场景补充，如建筑氡源定位等。

对比来看，“三点法”在多点覆盖时的空间代表性较高，但依赖点位选择的好坏，时间代表性低，一般是作为补充性的方法。“分段法”能够连续覆盖多个时间段，时间代表性高，但局限于单点，空间代表性低，相对较为依赖数据处理，是主流推荐的方法。

4 结论

本文基于对室内氡分布特征的研究，通过实验验证了室内氡分布存在显著的空间不均匀性和垂直梯度特征，针对不同需求对比分析了“三点

法”与“分段法”, 为实际应用提供了明确的技术支撑, 主要结论如下。

1) 空间分布不均性显著。在静态、无干扰的条件下, 氡因密度较大而易沉积于低处, 但实际环境中, 气流的自然扩散与氡源的持续输入导致其在呼吸高度区域浓度增加; 通风处理后, 各点位氡浓度大幅下降, 但中心处仍维持相对高位。

2) 垂直分布受楼层位置主导, 低层建筑氡污染的主要来源是土壤中氡的析出, 而高层建筑氡污染的主要来源是建材释放或空气交换。

3) 用于科学研究和判断房间是否合规等情况下, 优先采用“分段法”, 可以较好地满足数据连续性与标准要求。

4) 工程排查和应急响应等情况下, 优先选择“三点法”, 可以较快速地定位空间异质性风险。

5) 权衡效费比下, 预算有限且环境均质时, “分段法”成本效益更优, 复杂空间则需要接受“三点法”的高成本以规避漏检风险。

6) 可靠性强化方向, “三点法”需结合建筑结构分析优化选点, “分段法”则比较需要增强数据处理算法来抑制短期干扰。

参考文献

- [1] Lee D H. Is indoor air pollution the missing link between radon and lung cancer? Rethinking epidemiological support for the LNT model[J]. Dose-response, 2025, 23(4): 15593258251399780.
- [2] Ma Xionghui, Su Chunxiao, Zhu Ziyi, et al. Assessing indoor radon concentration: field study from a university campus in Shanghai[J]. Building and Environment, 2025, 278: 112998.
- [3] 寇珊珊, 侯长松, 宋延超, 等. 累积法与连续法在居室氡测量中的比较[J]. 中国辐射卫生, 2024, 33(6): 638-641.
Kou Shanshan, Hou Changsong, Song Yanchao, et al. Comparison of accumulation and continuation methods in indoor radon measurement[J]. Chinese Journal of Radiological Health, 2024, 33(6): 638-641.
- [4] 王抚抚, 周宁, 高晓连, 等. 长沙市某建筑住宅室内氡浓度水平调查研究[J]. 当代化工研究, 2025(10): 119-121.
Wang Fufu, Zhou Ning, Gao Xiaolian, et al. Investigation on indoor radon concentration in a building in Changsha city[J]. Modern Chemical Research, 2025(10): 119-121.
- [5] 许旻. 室内环境污染检测与控制研究[J]. 科技资讯, 2025, 23(8): 201-203.
- [6] 孟煜, 白莉. 室内氡气及其子体研究[J]. 中国资源综合利用, 2021, 39(4): 102-105.
Meng Yu, Bai Li. Study on indoor radon and its daughters[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2021, 39(4): 102-105.
- [7] 张佳, 李小亮, 阮健磊, 等. 环状 RNA 在氡致相关疾病中的作用机制与研究进展[J]. 中国辐射卫生, 2025, 34(2): 303-308.
Zhang Jia, Li Xiaoliang, Ruan Jianlei, et al. Mechanisms and research progress of circular RNAs in radon exposure-induced diseases[J]. Chinese Journal of Radiological Health, 2025, 34(2): 303-308.
- [8] Salonen H, Salthammer T, Alapieti T, et al. Indoor radon concentrations in European kindergartens and other educational facilities[J]. Environment International, 2025, 205: 109877.
- [9] 张涵宇, 王赞, 王芳, 等. 兰州市城关区室内氡浓度水平调查[J]. 核电子学与探测技术, 2025, 45(5): 732-737.
Zhang Hanyu, Wang Yun, Wang Fang, et al. Survey on indoor radon concentration levels in Chengguan district, Lanzhou city[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2025, 45(5): 732-737.
- [10] 谢思蕾, 高柏, 刘媛媛, 等. 氡泉对人体的作用机制、功效及剂量评价[J]. 辐射防护, 2025, 45(2): 119-132.
Xie Silei, Gao Bai, Liu Yuanyuan, et al. Mechanism of action and efficacy of radon springs on human body and dose evaluation[J]. Radiation Protection, 2025, 45(2): 119-132.
- [11] 冯佳璐, 何正忠, 王可欣, 等. 氡子体活度浓度测量系统的研究[J]. 核电子学与探测技术, 2025, 45(3): 334-342.
Feng Jialu, He Zhengzhong, Wang Kexin, et al. Research on radon daughters activity measurement system[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2025, 45(3): 334-342.
- [12] Rani S, Kansal S, Singla A K, et al. Investigation of indoor ^{222}Rn , ^{220}Rn and their progeny in Punjab, northwestern India[J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2023, 332(1): 1-13.
- [13] Wołoszczuk K, Pawłowska Z, Trzeciakiewicz T E D, et al. Indoor radon measurements and dose assessment for workers in kindergartens in southern Poland[J]. Building and Environment, 2025, 284: 113474.

- [14] Zhu Yiguang, Fox M A, Corrigan B, et al. Reducing lung cancer risk from radon exposure in Mannheim Township, PA: radon resistant new construction (RRNC) as a significant public health tool[J]. International Journal of Radiation Biology, 2026, 102(1): 38-48.
- [15] Rey J F, Berlusconi C, Pampuri L, et al. Swiss national radon database: impact of building and environmental factors[J]. Frontiers in Public Health, 2025, 13: 1625922.
- [16] 郑存德. 2021 年丹东市办公场所室内氡浓度及其影响因素分析[J]. 核电子学与探测技术, 2023, 43(4): 797-802.
- Zheng Cunde. Analysis of indoor radon concentration and its influencing factors in Dandong office space in 2021[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2023, 43(4): 797-802.
- [17] 彭文斌, 林晨, 贾力博, 等. 典型办公场所环境中氡的监测与所致剂量估算[J]. 大众科技, 2020, 22(6): 11-13, 31.
- Peng Wenbin, Lin Chen, Jia Libo, et al. Radon monitoring and dose estimation in typical office environment[J]. Popular Science & Technology, 2020, 22(6): 11-13, 31.
- [18] 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.
- [19] 张套, 彭文斌, 常青, 等. 三款测氡仪在环境氡浓度监测中的对比分析[J]. 绿色科技, 2025, 27(10): 176-180.
- Zhang Tao, Peng Wenbin, Chang Qing, et al. Comparative analysis of three radon detectors in environmental radon concentration monitoring[J]. Journal of Green Science and Technology, 2025, 27(10): 176-180.
- [20] 田兴宇, 苏建文, 李云洋, 等. HD-6 型氡室装置氡体积活度空间均匀性分析[J]. 江西化工, 2023, 39(3): 30-33.
- Tian Xingyu, Su Jianwen, Li Yunyang, et al. Spatial uniformity analysis of radon volume activity in HD-6 radon chamber device[J]. Jiangxi Chemical Industry, 2023, 39(3): 30-33.
- [21] 韩芹芹. 固体径迹探测器与 RAD-7 测氡仪测定民用建筑工程室内氡浓度的比较[J]. 环境科学与管理, 2012, 37(3): 122-126.
- Han Qinqin. Comparison of solid track detector and RAD-7 emanometer method in determining indoor radon concentration[J]. Environmental Science and Management, 2012, 37(3): 122-126.
- [22] 叶南军, 黄一辉, 郑伟峰, 等. 三坐标测量机精度比对研究[J]. 计量与测试技术, 2025, 51(7): 12-16, 22.
- Ye Nanjun, Huang Yihui, Zheng Weifeng, et al. Research on accuracy comparison of three coordinate measuring machines[J]. Metrology & Measurement Technique, 2025, 51(7): 12-16, 22.
- [23] 付宸. 大气氡对伽马能谱测量结果的影响[D]. 北京: 中国地质大学, 2010: 2-3.
- Fu Chen. Influence of ^{222}Rn in the air to the measurement of Gamma-ray spectrometry[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2010: 2-3.
- [24] Abed T K, Fayad M A, Al-Amiery A A, et al. Radon gas emission from home appliances: understanding sources, implications, and mitigation strategies[J]. Results in Engineering, 2024, 22: 102133.
- [25] Bulut H A, Şahin R. Radon, concrete, buildings and human health: a review study[J]. Buildings, 2024, 14(2): 510.
- [26] 沈权, 吴和喜, 杨波, 等. 多种测氡仪在氡浓度急剧变化测量中的性能研究[J]. 中国辐射卫生, 2015, 24(2): 172-175.
- Shen Quan, Wu Hexi, Yang Bo, et al. Performance study on a variety of radon measurement instruments in measurement of rapid changes of radon concentration[J]. Chinese Journal of Radiological Health, 2015, 24(2): 172-175.
- [27] 吴思远. 用于氡子体采集的级联丝网组优化设计研究[D]. 上海: 东华理工大学, 2016: 3-4.
- Wu Siyuan. The optimal design research of graded screen arrays used for sampling radon progeny[D]. Shanghai: East China University of Technology, 2016: 3-4.
- [28] 付佳琪, 巴金, 张伟. 基于贝叶斯最优最劣法-云模型的空间站科学与应用项目遴选评估方法[J]. 科技管理研究, 2025, 45(19): 195-202.
- Fu Jiaqi, Ba Jin, Zhang Wei. The selection and evaluation of space station science and application projects based on Bayesian best-worst method and cloud model[J]. Science and Technology Management Research, 2025, 45(19): 195-202.
- [29] 张哲, 吴桂惠, 吴峰. 氡子体多段测量法[J]. 辐射防护, 1986(1): 9-13.
- Zhang Zhe, Wu Guihui, Wu Feng. Multi-interval counting for measuring radon daughters[J]. Radiation Protection, 1986(1): 9-13.

- [30] 林启鉴, 张哲, 吴少林, 等. 食用植物油加工行业 VOCs 排放特征及健康风险评估[J]. 环境科学与技术, 2022, 45(11): 228-236.
- Lin Qijian, Zhang Zhe, Wu Shaolin, et al. VOCs

emission characteristics and health risk assessment of edible vegetable oil processing industry[J]. Environmental Science & Technology, 2022, 45(11): 228-236.

Comparison of Distribution Characteristics and Measuring Methods of Radon in Indoor Environment

HUO Yonggang¹, SUN Zhiqiang¹, ZHANG Tiejun²,
SHAO Yurui¹, LI Jiongyao¹

(1. Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China;

2. Military Representative Office of PLA Army, Shanghai 200031, China)

ABSTRACT: Radon is the primary source of natural radiation and accounts for approximately 50% of the natural radiation dose received by the public. Therefore, investigating its distribution in daily environments is important to human safety and health. To address the unclear spatial distribution characteristics of indoor radon concentration and verify the applicability of the measurement methods, a RAD7 radon meter was used to measure the radon concentration distribution in a single room under ventilated and closed environments by adopting the control variable and weighted average data processing methods. The vertical distribution characteristics of radon across different floors and error differences among the various measurement methods were compared. The results show that the radon concentration within a single room presents an uneven spatial distribution, with accumulation tendencies near the ground and at respiratory height, and that ventilation can significantly reduce the concentration differences at each measuring point. An obvious vertical gradient exists in the indoor radon concentration, which decreases progressively from lower to higher floors, with significantly higher concentrations on the first floor than on the second and third floors, while the concentrations on the second and third floors remain relatively similar. Measurement periods of 15 and 30 minutes exhibit substantial errors, whereas 1- and 3-hour periods provide more accurate radon concentration levels. The measurement accuracy of the three-point method is improved after weight optimization, enabling effective resolution of spatial heterogeneity problems and is suitable for engineering investigations and emergency responses. The segmentation method demonstrates good data continuity and compliance with standard requirements, making it applicable to scientific research and compliance assessments.

KEYWORDS: radon gas; distribution characteristic; comparison of measurement methods; three-point method; segmented method

(编辑: 刘建民)