· 疾病控制 ·

无锡市住宅室内氡浓度调查

冯越，陈茸，沈小磊，曾亚楠，李清华

无锡市疾病预防控制中心（南京医科大学附属无锡疾病预防控制中心），江苏 无锡 214023

摘要：目的 了解江苏省无锡市住宅室内氡浓度及其分布特征，为室内氡风险评估与健康防护提供依据。**方法** 于2023年4—9月，采用分层随机抽样方法抽取无锡市6个区（市）的120户居民住宅为测量点，监测3个月；选择27户住宅分别在春季和夏季同一位置监测。采用Rn-2012型被动累积式氡杯进行采样，蚀刻后采用TASLimage固体核径迹蚀刻测量分析系统测定氡浓度；分析不同地区、楼层、季节和建筑年代的室内氡浓度，并估算室内氡所致的年有效剂量。**结果** 无锡市室内氡浓度为（62.43±40.41）Bq/m³，>100 Bq/m³的测量点12个，占10.00%；室内氡所致公众年均有效剂量为2.04 mSv。滨湖区、梁溪区、新吴区、惠山区、锡山区和宜兴市室内氡浓度分别为（68.13±41.13）（42.63±24.86）（70.00±40.37）（41.97±24.52）（65.50±48.44）（56.04±27.49）Bq/m³，差异无统计学意义（P>0.05）。1~5层、6~9层、10~20层和>20层室内氡浓度M（Q_R）分别为49.20（29.68）、67.60（62.00）、76.09（49.65）和48.26（17.27）Bq/m³，差异无统计学意义（P>0.05）。27个测量点夏季室内氡浓度为（96.86±13.01）Bq/m³，高于春季的（59.00±10.20）Bq/m³（P<0.05）。1990—2009年住宅氡浓度M（Q_R）为48.00（33.92）Bq/m³，2010—2023年氡浓度M（Q_R）为53.80（41.25）Bq/m³，差异无统计学意义（P>0.05）。**结论** 无锡市住宅室内氡浓度均值低于我国规定的年均氡浓度目标水平，但室内氡所致公众年均有效剂量较高，需关注建材类型、季节变化和通风状况对氡浓度的影响。

关键词：氡浓度；固体核径迹；年有效剂量；室内

中图分类号：R144 **文献标识码：**A **文章编号：**2096-5087（2026）04-0415-04

Indoor radon concentration in residential buildings in Wuxi City

FENG Yue, CHEN Rong, SHEN Xiaolei, ZENG Yanan, LI Qinghua

The Affiliated Wuxi Center for Disease Control and Prevention of Nanjing Medical University, Wuxi Center for Disease Control and Prevention, Wuxi, Jiangsu 214023, China

Abstract: Objective To investigate the indoor radon concentration and its distribution characteristics in residential buildings in Wuxi City, Jiangsu Province, so as to provide the evidence for indoor radon risk assessment and health protection. **Methods** From April to September 2023, a stratified random sampling method was used to select 120 residential units from 6 districts (cities) in Wuxi City as measurement points, with monitoring conducted over a period of 3 months. Additionally, 27 residential units were selected for monitoring at the same location in both spring and summer. Sampling was performed using Rn-2012 passive cumulative radon cups, and radon concentration was measured using the TASLimage solid state nuclear track detector etching measurement and analysis system after etching. Indoor radon concentrations were analyzed by region, floor level, season, and building age, and the annual effective dose attributable to indoor radon was estimated. **Results** The mean indoor radon concentration in Wuxi City was (62.43±40.41) Bq/m³. Twelve measurement points (10.00%) had radon concentrations >100 Bq/m³. The average annual effective dose to the public from indoor radon was 2.04 mSv. The mean indoor radon concentrations in Binhu District, Liangxi District, Xinwu District, Huishan District, Xishan District, and Yixing City were (68.13±41.13), (42.63±24.86), (70.00±40.37), (41.97±24.52), (65.50±48.44), and (56.04±27.49) Bq/m³, respectively, with no statistically significant difference (P>0.05). The median indoor radon concentrations for floors 1-5, 6-9, 10-20, and >20 were 49.20 (interquartile range, 29.68), 67.60 (interquartile range, 62.00), 76.09 (interquartile range, 49.65), and 48.26 (interquartile range, 17.27) Bq/m³, respectively,

DOI：10.19485/j.cnki.issn2096-5087.2026.04.020

作者简介：冯越，本科，主治医师，主要从事放射卫生工作

通信作者：李清华，E-mail：799643491@qq.com

with no statistically significant difference (P>0.05). Among the 27 measurement points, the mean summer indoor radon concentration was (96.86±13.01) Bq/m^3, which was significantly higher than that in spring (59.00±10.20) Bq/m^3 (P<0.05). The median radon concentration for residential buildings constructed between 1990 and 2009 was 48.00 (interquartile range, 33.92) Bq/m^3, and that for buildings constructed between 2010 and 2023 was 53.80 (interquartile range, 41.25) Bq/m^3, with no statistically significant difference (P>0.05). **Conclusions** The mean indoor radon concentration in residential buildings in Wuxi City is below the national annual average radon concentration target level. However, the annual effective dose to the public attributable to indoor radon is relatively high. Attention should be paid to the effects of building material type, seasonal variation, and ventilation conditions on radon concentration.

Keywords: radon concentration; solid state nuclear track detector; annual effective dose; indoor

氡是源于含铀土壤与多孔岩石的放射性气体，其短寿命子体（^{214}Po 和 ^{218}Po）被吸入后滞留于肺部，可对呼吸系统造成持续损伤。根据联合国原子辐射效应科学委员会（UNSCEAR）2008 年报告，氡所致公众年均有效剂量为 1.25 mSv，占全部天然辐射源所致剂量（2.4 mSv）的 52%[1]。铀富集区域氡浓度较高，但由于地壳中铀的普遍微量存在，氡暴露具有广泛性，是重要的公共卫生问题。氡气可从土壤和建材逸出，并在通风不良的室内环境中累积[2]。研究表明，室内氡浓度水平、暴露时间、暴露起始年龄与肺癌风险呈正相关，世界卫生组织（WHO）已将其列为第二大肺癌致病因素[3]。本研究以江苏省无锡市为调查点，了解住宅室内氡浓度及其分布特征，为室内氡风险评估与健康防护提供依据。

1 材料与方法

1.1 调查地点

于 2023 年 4—9 月，采用分层随机抽样方法在无锡市 6 个区（市）按楼层高度和建筑年代分层抽取 120 户居民住宅进行室内氡浓度测量。住宅结构类型以当前主流的钢筋混凝土结构为主，保留部分存量砖混结构；建筑年代覆盖无锡市城镇化快速发展期（1990 年至今），该阶段基本覆盖城镇住宅建设的主要存量，其中 2010 年后建造、符合新建筑节能标准的住宅比例较高；楼层分布依据 GB 50352—2019《民用建筑设计统一标准》[4]，≥10 层为高层住宅，＜10 层为普通住宅，并进一步将住宅楼层细分为 1～5 层、6～9 层、10～20 层和>20 层，在结构类型、建筑高度和建筑年代方面具有代表性。

1.2 方法

1.2.1 采样方法

居民领取探测器前，由工作人员详细告知其布设点位要求。常居房间（卧室、客厅或书房）内布设 1 个探测器，布设点位远离空调进风口、门口、窗口、通风口和风扇等风口，远离墙角、柜后等死角，远离炉灶和暖气等热源附近，避免太阳直射及湿度高的场所。放置高度为呼吸带水平（距地面 1.5～1.8 m），与墙体保持至少 20 cm 距离。布设点位完成后，探测器在监测期间保持固定位置，避免遮盖，防止水浸或人为触碰，监测 3 个月。选择 27 户住宅同一位置分别在春季（4—6 月）、夏季（7—9 月）布设探测器，监测室内氡浓度，持续 3 个月。在部分点位布设平行样，即 2 台探测器放置于同一位置。

1.2.2 氡浓度测量

采用中国疾病预防控制中心辐射防护与核安全医学所开发的 Rn-2012 型被动累积式氡杯作为本底探测器进行采样，该探测器核心探测材料为日本 FUKUVI 化学公司生产的 CR-39 固体核径迹片。探测器回收后，CR-39 置于 6.25 mol/L 的氢氧化钠（NaOH）溶液中，在 90 ℃条件下蚀刻 4.5 h；采用 TASLimage 固体核径迹蚀刻测量分析系统对蚀刻后的径迹进行分析。依据 GB/T 16146—2015《室内氡及其子体控制要求》[5]，新建建筑物年均氡浓度目标水平为 100 Bq/m^3，既有建筑物行动水平为 300 Bq/m^3。

1.2.3 年有效剂量估算

有效剂量是辐射致癌随机性效应的主要指标，采用《室内氡及其子体控制要求》附录 A 中的公式（1）[5]，并参考 UNSCEAR 2000 年报告[6]，计算室内氡导致的年有效剂量，公式如下。

$$E_{Rn}=C_{Rn,a}\times(DCF_{Rn}+F\cdot DCF_{RnD})\times t$$

式中：E_{Rn} 为年有效剂量（mSv）；$C_{Rn,a}$ 为年均氡浓度（Bq/m^3）；DCF_{Rn} 为氡剂量转换系数，取 0.17×10^{-6} mSv/（Bq·h·m^{-3}）；F 为我国室内平衡系数的典型值，取 0.5；DCF_{RnD} 为氡子体剂量转换系数，取 9×10^{-6} mSv/（Bq·h·m^{-3}）；t 为年居住时间，取 7 000 h。

1.3 质量控制

氡杯探测器每年在中国计量科学研究院刻度，刻度系数为 2.02 径迹·cm^{-2}·（kBq·m^{-3}·h）$^{-1}$。为保证测量可靠性，平行样品布放数量超过总样本量的

10%。现场回收探测器后，立即使用铝箔袋进行密封包装，并送至实验室完成蚀刻与分析流程。在邮寄过程中，Rn-2012型被动累积式氡杯保持原有包装完好，与其他探测器一并寄送。

1.4 统计分析

采用Excel 2021软件录入与整理数据，采用SAS 9.0软件统计分析。定量资料服从正态分布的采用均数±标准差（$\bar{x}\pm s$）描述，组间比较采用单因素方差分析或t检验；不服从正态分布的采用中位数和四分位数间距［M（Q_R）］描述，组间比较采用Mann-Whitney U检验或Kruskal-Wallis H检验。以P<0.05为差异有统计学意义。

2 结 果

2.1 无锡市室内氡浓度和年均有效剂量

无锡市室内氡浓度为（62.43±40.41）Bq/m³，范围为<MDL～377.3 Bq/m³。20～100 Bq/m³的测量点99个，占82.50%；<20 Bq/m³的测量点9个，占7.50%；>100 Bq/m³的测量点12个，占10.00%。无锡市住宅室内氡所致公众年均有效剂量为2.04 mSv。滨湖区、梁溪区、新吴区、惠山区、锡山区和宜兴市室内氡浓度分别为(68.13±41.13)(42.63±24.86)（70.00±40.37）(41.97±24.52)（65.50±48.44）(56.04±27.49) Bq/m³，差异无统计学意义（F=1.090，P=0.371）；其中滨湖区、新吴区氡浓度较高，梁溪区、惠山区氡浓度较低。见表1。

表1 无锡市不同区（市）住宅室内氡浓度

Table 1 Indoor radon concentration of residential buildings across different districts (cities) in Wuxi City

地区	测量点数	测量值/（Bq/m³）	范围/（Bq/m³）
滨湖区	14	68.13±41.13	<MDL～151.3
梁溪区	14	42.63±24.86	<MDL～82.1
新吴区	32	70.00±40.37	11.2～220.8
惠山区	5	41.97±24.52	25.4～71.1
锡山区	27	65.50±48.44	25.9～377.3
宜兴市	28	56.04±27.49	14.4～179.7
合计	120	62.43±40.41	<MDL～377.3

注：<MDL指低于检出限。

2.2 不同楼层室内氡浓度分析

1~5层、6~9层、10~20层和>20层室内氡浓度M（Q_R）分别为49.20（29.68）、67.60（62.00）、76.09（49.65）和48.26（17.27）Bq/m³，范围分别为<MDL～377.3、13.3～173.5、<MDL～179.7和18.7～96.2 Bq/m³。各楼层室内氡浓度比较，差异无统计学意义（H=1.778，P=0.620）。

表2 无锡市不同楼层住宅室内氡浓度

Table 2 Indoor radon concentration of residential buildings across different floors in Wuxi City

楼层	测量点	测量值/（Bq/m³）	范围/（Bq/m³）
1～5	55	49.20（29.68）	<MDL～377.3
6～9	23	67.60（62.00）	13.3～173.5
10～20	30	76.09（49.65）	<MDL～179.7
>20	12	48.26（17.27）	18.7～96.2

注：<MDL指低于检出限。

2.3 不同季节室内氡浓度分析

27个测量点春季室内氡浓度为(59.00±10.20)Bq/m³，范围为10.3～272.3 Bq/m³；夏季室内氡浓度为（96.86±13.01）Bq/m³，范围为36.7～377.3 Bq/m³，其中有1个测量点氡浓度>300 Bq/m³。夏季室内氡浓度高于春季室内氡浓度，差异有统计学意义（t=-5.434，P<0.001）。

2.4 不同建筑年代室内氡浓度分析

1990—2009年住宅测量点39个，氡浓度M（Q_R）为48.00（33.92）Bq/m³，范围为11.2～220.8 Bq/m³；>100 Bq/m³的测量点4个，占33.33%。2010—2023年住宅测量点81个，氡浓度M（Q_R）为53.80（41.25）Bq/m³，范围为<MDL～377.3 Bq/m³；>100 Bq/m³的测量点8个，占66.67%。不同建筑年代室内氡浓度比较，差异无统计学意义（Z=-0.945，P=0.345）。

3 讨 论

WHO和欧洲联盟建议，即使氡浓度较低，也应在住宅和有公共通道的建筑物中监测氡易发区[7]。研究发现，室内氡浓度水平和室内外环境有关，其中室外地形、地质、土壤，室内温度、湿度、建材和通风状况对氡浓度均有影响[8]。本次调查无锡市120户不同居民住宅，氡浓度范围为<MDL～377.3 Bq/m³，均值为62.43 Bq/m³，与广东省深圳市63 Bq/m³[9]、银川市64 Bq/m³[10]相近，低于长春市80.64 Bq/m³[11]，高于西藏自治区47.8 Bq/m³[12]。无锡市调查结果显示，有12个室内氡测量点（10.00%）超出100 Bq/m³的目标水平，夏季有1个测量点超过300 Bq/m³的行动水平。夏季测量点超过300 Bq/m³可能与该测量点位于别墅内，建材包含花

岗岩等石材，其表面氡析出率较高有关[8]；同时监测期间户主长期外出，窗户关闭、通风不足，导致氡累积。无锡市住宅室内氡所致公众年均有效剂量为2.04 mSv，高于全国水平（1.44 mSv）[13]和UNSCEAR 2008年报告的氡所致公众年有效剂量均值（1.25 mSv）[1]，提示在氡高析出率的建材与不良通风习惯叠加作用下，部分住宅（如别墅、大量使用天然石材装修的房屋）内居民的个体暴露风险可能升高，需重点关注。

无锡市不同楼层室内氡浓度分布特点与兰州市[14]、昆明市[15]不同，这两地低层1～3层氡浓度较高，而本研究1~5层氡浓度较低。分析原因可能与无锡市监测点房屋结构以钢筋混凝土结构为主，土壤中析出的氡难以通过致密的混凝土影响测量点的氡浓度；而兰州市、昆明市两地纳入了部分农村房屋为测量点，该类建筑以砖混结构为主，土壤氡更易渗透进入室内低层区域。

不同季节室内氡浓度结果表明，无锡市夏季室内氡浓度高于春季，可能与无锡市夏季气候炎热、湿度较高，居民多使用空调而开窗通风时间减少有关。有研究表明温度、湿度与氡浓度呈负相关[8]，但考虑到高温高湿环境可能影响居民生活习惯，抑制通风行为，可能是导致夏季氡浓度较高的主要因素。

2005年6月我国颁布了《关于进一步推进墙体材料革新和推广节能建筑的通知》[16]，推荐使用新型建材，提高了房屋密封性；无锡市随后于2005年9月和2007年9月发布相应文件[17-18]，建立了新型墙体材料备案管理制度，从材料源头推动新型建材的普及。因此，2010年及以后住宅为新建筑节能标准的住宅，可能影响不同建筑年代室内氡浓度。但本研究未发现不同建筑年代间的室内氡浓度存在差异，可能氡浓度不仅受建筑材料影响，还有通风条件、气候因素等多重因素的综合作用，单一因素的效应可能被其他因素稀释。但2010—2023年住宅室内氡浓度>100 Bq/m^{3}的比例偏高，仍需加强室内氡浓度监测与居民健康教育，降低室内氡暴露风险，保障居民健康。

无锡市住宅室内氡浓度均值为62.43 Bq/m^3，低于《室内氡及其子体控制要求》规定的年均氡浓度目标水平（100 Bq/m^3），需关注建材类型、季节变化和通风状况对氡浓度的影响。为有效降低氡暴露对健康的影响，建议居民在装修时尽量避免使用氡析出率较高的建材（如花岗岩等天然石材），并注意日常开窗通风，以改善室内空气质量。

参考文献

[1] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. UNSCEAR 2008 Report. The general assembly with scientific annexes volume Ⅰ. Sources and effects of ionizing radiation［R］. New York：United Nations，2010.

[2] BISSETT R J，MCLAUGHLIN J R. Radon［J］. Chronic Dis Can，2010，29（Suppl. 1）：38-50.

[3] 潘自强，刘艳阳. 人为活动引起的天然辐射照射的增加——当前我国国民所受人为活动照射的最大者［J］. 辐射防护，2011，31（6）：323-327.

[4] 中华人民共和国住房和城乡建设部，国家市场监督管理总局. 民用建筑设计统一标准：GB 50352—2019［S］. 北京：中国建筑工业出版社，2019.

[5] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局，中国国家标准化管理委员会. 室内氡及其子体控制要求：GB/T 16146—2015［S］. 北京：中国标准出版社，2016.

[6] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. UNSCEAR 2000 Report. Volume Ⅰ sources and effects of ionizing radiation. Annex b：exposures from natural radiation sources［R］. New York：United Nations，2000.

[7] BOCHICCHIO F. Protection from radon exposure at home and at work in the directive 2013/59/Euratom［J］. Radiat Prot Dosimetry，2014，160（1/2/3）：8-13.

[8] 姚美男，于润秋，姜雯雯，等. 室内氡水平现状、影响因素与管理挑战［J］. 职业与健康，2025，41（13）：1867-1872.

[9] 刘焱，郭键锋，时劲松，等. 深圳市室内氡浓度水平调查与研究［J］. 能源与环保，2020，42（7）：74-77，81.

[10] 董良，武云云，宋延超，等. 银川市室内氡浓度调查及公众剂量估算［J］. 中国辐射卫生，2023，32（4）：418-421.

[11] 杨平，汪传文，程遥，等. 长春市室内氡浓度水平及变化规律［J］. 中国卫生工程学，2021，20（2）：190-192.

[12] 王春红，刘森林，王晓峰，等. 西藏居室内氡浓度调查及所致居民剂量估算［J］. 中国辐射卫生，2020，29（4）：366-369.

[13] 潘自强，刘森林. 中国辐射水平［M］. 北京：原子能出版社，2010.

[14] 张涵宇，王赟，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.

[15] 秦启凤，樊芳，周美丰，等. 昆明市居民室内氡浓度水平调查分析［J］. 工业卫生与职业病，2025，51（3）：266-269.

[16] 中华人民共和国国务院办公厅. 国务院办公厅关于进一步推进墙体材料革新和推广节能建筑的通知［EB/OL］.［2026-03-02］. https://www.gov.cn/zwgk/2005-09/08/content_30261.htm.

[17] 无锡市人民政府. 关于进一步加强我市新建民用建筑节能管理工作的实施意见的通知［EB/OL］.［2026-03-02］. https://www.pkulaw.com/lar/ee6991248e3b98b05761000006268d97bdfb.html

[18] 无锡市经济贸易委员会. 无锡市新型墙体材料管理办法的通知［EB/OL］.［2026-03-02］. https://www.pkulaw.com/lar/1b6cad406689f6d3d2e933160be311b8bdfb.html

收稿日期：2025-12-09 **修回日期**：2026-03-02 **本文编辑**：徐亚慧