



Investigation and Analysis of Indoor Radon Level in a Newly Built Building in Chengdu

Yang Han, Weicheng Ding*, Boshuai Liu, Chenglong Qi

College of Nuclear Technology and Automation Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu, China
Email: 981676449@qq.com, *17817717@qq.com

How to cite this paper: Han, Y., Ding, W.C., Liu, B.S. and Qi, C.L. (2023) Investigation and Analysis of Indoor Radon Level in a Newly Built Building in Chengdu. *Open Access Library Journal*, 10: e10040. <https://doi.org/10.4236/oalib.1110040>

Received: March 21, 2023

Accepted: April 24, 2023

Published: April 27, 2023

Copyright © 2023 by author(s) and Open Access Library Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Objective: In order to understand the indoor radon level of a newly built residential building in Chengdu, estimate the dose of exposure to residents, and provide effective radon concentration data for public health. **Method:** Use a continuous radon meter to measure the indoor radon level in the target community. The study selected a total of 38 households and 4 monitoring points were chosen for each household. The monitoring points were measured continuously for one hour, and the average value of all monitoring points was considered as the radon concentration level of each point. This was used to evaluate the annual effective dose received by residents. **Results:** The average indoor air radon concentration in the newly built community is about $(249 \pm 72) \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$, and the annual effective dose received by residents is about 8 mSv. After the removal of the more radioactive materials, the indoor radon concentration was reduced to $95 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$. **Conclusions:** The indoor radon level in the residential area is higher than the international standard limit value. Ventilation and fresh air systems can effectively reduce indoor radon concentration and reduce its harm to human health. Building materials and decoration materials are the main sources of indoor air radon concentration, so it is necessary to monitor their radioactivity.

Subject Areas

Architecture, Radiochemistry

Keywords

Radon Concentration, Air Radon, Dose Estimation, Indoor

1. 引言

氡及其子体所致人体有效剂量约为 1.3 mSv/a, 约占天然辐射的 50%, 其

中绝大部分来自于室内氡及其子体[1] [2]。当人体吸入氡气后,氡及其子体会在呼吸道和肺部衰变产生大量 α 射线,对人体器官造成极大的损伤,数据统计显示全球患肺癌死亡人数中有 8%~25%是氡所导致的[3]。国际癌症研究机构(IARC)将氡归为 I 类致癌因素[4],世界卫生组织(WHO)将氡列为十九种主要的环境致癌物质之一,并于 2009 年颁布了《WHO 室内氡手册》[5]。相关研究证明氡的致癌效应随着氡浓度的升高而增加,氡浓度每升高 $100 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$,致癌的风险提高约 16% [6]。我国室内氡浓度水平较上世纪 80 年代末总体提高了 80% [7],室内氡主要来源于建筑材料、装修材料、家具、地下水以及天然气的使用[8] [9]。人在室内度过的时间约占人的一生的一半甚至更多,随着氡的有关知识的普及,人们对工作、居住环境的氡浓度的关系日益增加。我国颁布并不断修订了一系列国家标准: GB/T 16146—2015《室内氡及其子体控制要求》、GB 50325—2020《民用建筑工程室内环境污染控制规范》、GB/T18883-2002《室内空气质量标准》[10] [11] [12],对空气中的氡浓度水平特别是新建住宅的空气氡浓度水平进行有效干预。

2. 研究内容及方法

2.1. 研究内容

- 1) 对调查小区室内氡浓度进行整体性评价;
- 2) 探究室内氡浓度和楼层的关系;
- 3) 研究房间面积大小和氡浓度的关系;
- 4) 研究通风对室内氡浓度的影响;
- 5) 对氡浓度超标的住宅进行溯源检测,排查产生氡气的主要装修建筑材料。

2.2. 监测点

本次调查对象为成都市某新建小区住宅,分别选取不同栋数、不同楼层的室内进行监测。根据户型选取 4 个监测点,分别为客厅、主卧、书房、次卧。

2.3. 布放原则

连续性测氡仪布放于每个房间的正中间,通过支架固定在高度 1.5 m 处。

2.4. 测量方法

测量采用空气脉冲电离室连续测量仪,能够实时响应 Rn_{222} 及其子体,仪器相关参数如表 1 所示。

所用仪器均在标准氡室内进行刻度后再进行测量,封闭门窗(包含各房间门)以及新风系统 24 小时后进行 1 小时的连续性测量。

2.5. 统计学处理

室内空气氡浓度值以平均数±标准差($\bar{x} \pm s$)表示;评价楼层与室内空气氡浓度的关系、通风条件与室内空气氡浓度的关系时,对数据进行单因素 t 检

Table 1. Performance index of radon meter**表 1.** 测氡仪性能指标

指标名称	性能参数
检测对象	^{222}Rn 、 ^{220}Rn 及其子体
温度	精度 $\pm 0.5^\circ\text{C}$
湿度	精度 $\pm 3\%$ Rh
探测下限	2 Bq/m ³
测量范围	高量程: 20,000 - 2,000,000 Bq/m ³ 低量程: 2 - 20,000 Bq/m ³
灵敏度	1 cpm 即 37 Bq/m ³
不确定度	$\leq 10\%$ (K = 2)

验, 如式(1)。若 $P < 0.05$, 则表示有显著性差异, 具有统计学意义。

$$t = \frac{\bar{X} - \mu}{\frac{s}{\sqrt{n}}} \quad (1)$$

式中: \bar{X} ——样本均值;

μ ——总体均值;

s ——样本标准差;

N ——样本容量。

3. 结果

3.1. 室内氡浓度监测结果

本次监测共获得 63 个室内氡浓度的有效数据, 采用正态性检验, 显著性检验 P 值 = 0.098 > 0.05, 表明目标小区室内氡浓度频数分布呈正态分布, 相关统计参数如表 2 所示。由于建筑室内封闭性较好, 测量中温度及湿度受外界影响极小, 再加上仪器所用常温常压空气脉冲电离室基本不受温度、湿度影响的特性, 因此保障了测量数据的稳定性。从表 2 中可以看出, 该新建小区室内氡浓度平均值为 249 Bq·m⁻³, 高于《民用建筑工程室内环境污染控制规范》(GB 50325—2020) I 类民用建筑工程室内氡浓度限值(150 Bq·m⁻³), 标准差为 72 Bq·m⁻³。其中最大值为 453 Bq·m⁻³, 约为标准室内氡浓度限值的 3 倍, 最小值为 144 Bq·m⁻³, 略低于标准室内氡浓度限值。在 63 个样本点中, 大于标准值的样本点数有 61 个, 约占总样本数的 97%。

3.2. 不同楼层室内氡浓度水平

为探寻室内氡浓度与楼层的关系, 将关闭窗户状态下的监测点按照楼层划分列出表 3。从表 2 中可以看出, 除了第 1 层测量点, 第 2、3、6、7、8、9 层室内氡浓度与楼层高度并无显著性关系($P > 0.05$), 与德小明在调查银川市居民室内氡浓度水平与楼层关系的结果一致[13]。第一层室内平均氡浓度最小, 但其标准差也最小, 推测有两点原因, 其一: 室内氡来源主要为装修、

Table 2. Statistical table of indoor radon concentration in the target community (unit: Bq/m³)**表 2.** 目标小区室内氡浓度统计表, 单位: Bq/m³

样点数	平均值	范围	标准差	大于标准值点数
63	249	144~453	72	61

Table 3. Indoor radon concentration levels in different floors (unit: Bq/m³)**表 3.** 不同楼层的室内空气氡浓度水平, 单位: Bq/m³

楼层	样点数	平均值	范围	标准差	大于标准值点数
1	4	177	164~186	8	4
2	5	271	190~313	44	5
3	15	246	144~373	71	14
6	12	270	174~453	94	12
7	8	231	159~311	52	8
8	8	258	199~404	65	8
9	8	289	194~369	58	8

建筑材料, 由于第一层受光照影响较小、温差小, 而高楼层由于太阳照射关系 24 小时内温差较大, 温度对氡及其子体的扩散运动影响很大, 所以统计标准差也相对较大; 其二: 核辐射测量中的样本的测量值会因为放射性原子核衰变的随机性产生围绕某一值上下浮动的现象, 这个现象被称为核辐射计数的统计涨落。在本次测量中, 第一层室内氡的测量也有统计涨落现象, 由于样本点少, 所以不能排除第一层室内氡浓度低的原因是统计涨落导致的。

3.3. 不同房间室内氡浓度水平

为探寻室内氡浓度与房间面积大小的关系, 将监测点按照房间划分列出表 4。已知客厅面积 > 主卧面积 > 次卧面积 > 书房面积。从表 4 中可以看出, 房间面积越大, 室内空气氡浓度越小, 根据下文氡浓度溯源可知, 室内氡浓度主要来源于自流平和隔墙板材料。而该小区客厅地面采用瓷砖通铺, 而卧室地面则用自流平材料, 且客厅面积较大, 单位面积内的放射性氡及其子体较少。因此, 可以得出结论: 室内空气氡浓度与房间面积成正比关系。

3.4. 不同通风条件室内氡浓度水平

通风条件对室内氡浓度的影响极大, 因此我们对不同通风条件下的室内空气氡浓度进行监测, 得出的统计学结果如表 5。3 种不同通风条件分别是全密闭即不通风、门窗关条件下开新风系统、只开室内门窗不开新风系统。从表 5 中可以明显看出通风条件对室内氡浓度水平有显著性的影响($P < 0.05$), 从全密闭条件下的平均氡浓度值 $249 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ 降低到了平均氡浓度 $78 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $51 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$, 所有测量点氡浓度均低于标准值; 开门窗条件下的室内空气氡浓度降低效果最为明显, 较不通风条件下的氡浓度值降低了大约 4 倍, 但也依旧

Table 4. Indoor radon concentration levels in different rooms (unit: Bq/m³)**表 4.** 不同房间的室内空气氡浓度水平, 单位: Bq/m³

房间	样点数	平均值	范围	标准差	大于标准值点数
客厅	13	183	144~207	47	11
主卧	16	249	174~313	28	16
次卧	17	253	159~383	60	17
书房	16	300	160~454	85	16

Table 5. Indoor radon concentration levels under different ventilation conditions (unit: Bq/m³)**表 5.** 不同通风条件下的室内空气氡浓度水平, 单位: Bq/m³

通风条件	样点数	平均值	范围	标准差	大于标准值点数
密闭	63	249	144~453	72	61
密闭 + 新风系统	32	78	33~59	7	0
开门窗	32	51	58~119	15	0

略高于 2009 年成都市室内空气 39.4 Bq·m⁻³ 的氡浓度平均值[14], 为此还需进一步分析氡的来源。

3.5. 氡浓度溯源

为了找到该住宅小区室内空气氡的来源, 我们分别对主体结构混凝土、隔墙空心板、烧结砖、地暖保护层几类建筑材料和自流平、腻子、砂浆几类装修材料进行放射性检测, 检验结果见表 6。表 6 中可以看到所检主体结构混凝土、隔墙空心板、烧结砖、地暖保护层的放射性满足标准 GB 6566-2010《建筑材料放射性核素限量》[15]中对建筑主体材料的要求($I_{Ra} < 1.00$); 所检自流平、腻子、砂浆的放射性满足标准 GB6566-2010《建筑材料放射性核素限量》中对 A 类装饰装修材料的要求($I_{Ra} < 1.00$); 两种自流平和隔墙空心板的平均内照射指数较大, 分别为 0.64、0.34、0.36, 最大内照射指数达到 0.70。

为进一步验证自流平和隔墙板对室内氡浓度的贡献, 又选取了一户进行自流平和隔墙板的拆除, 再次进行全封闭的室内氡浓度监测, 得出结果见图 1。从图 1 可以得知, 拆除自流平后, 室内平均氡浓度从 254 Bq·m⁻³ 下降到了 158 Bq·m⁻³, 氡浓度约降低 38%; 再拆除隔墙空心板后, 氡浓度又下降到 95 Bq·m⁻³, 较未拆除前氡浓度降低约 63%, 低于了限定值 150 Bq·m⁻³。

3.6. 剂量估算

剂量估算采用 GB/T 16146—2015《室内氡及其子体控制要求》中吸入氡及其子体相关人员产生的年均有效剂量 E_{Rn} 估算公式, 氡及其子体对居民产生的年均有效剂量 E_{Rn} 为

$$E_{Rn} = \bar{C}_{Rn,a} \times (DCF_{Rn} + F \times DCF_{RnD}) \times t$$

其中 DCF_{Rn} 和 DCF_{RnD} 分别为氡转换因子和氡子体转换因子, 分别取

Table 6. Internal and external exposure indexes of different building materials
表 6. 不同建筑材料的内、外照射指数

材料名称	样本数	内照射指数 I_{Ra}	\bar{I}_{Ra}	外照射指数 I_y	\bar{I}_y
主体结构混凝土	4	0.10	0.10	0.20	0.20
隔墙空心板	9	0.20~0.60	0.36	0.30~0.50	0.39
烧结砖	6	0.10~0.20	0.18	0.30~0.50	0.47
细石混凝土	8	0.10	0.10	0.20~0.30	0.21
自流平 1	5	0.50~0.70	0.64	0.30~0.40	0.38
自流平 2	8	0.30~0.40	0.34	0.20	0.20
腻子	7	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
砂浆	11	0.10~0.20	0.13	0.20~0.50	0.28

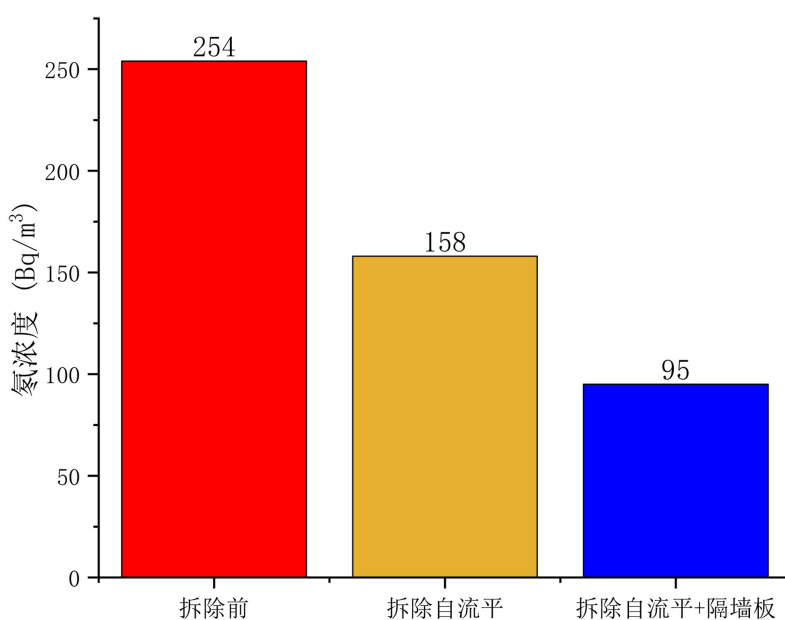


Figure 1. Comparison of radon concentration in air before and after demolition (unit: Bq/m³)

图 1. 拆除前后氡浓度对比。单位: Bq/m³

UNSCEAR 2000 年报告中给出的参考值 $0.17 \times 10^{-6} \text{ mSv}/(\text{Bq}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3})$ 和 $9 \times 10^{-6} \text{ mSv}/(\text{Bq}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3})$; F 为平衡因子, 我国室内典型值 F 为 0.5; t 为室内年停留时间, 取 7000 h。计算所得, 如若居住在该住宅一年, 氡及其子体对居民所产生的年有效剂量约为 8 mSv, 高于个人公众所受年有效剂量 1 mSv, 高于 2010 年《中国辐射水平》中室内氡及其子体对居民的年有效照射量 1.44 mSv [16], 室内氡污染应引起高度重视。

4. 讨论

1) 成都市该新建小区住宅的平均室内空气氡浓度为 $(249 \pm 72) \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$, 高于《民用建筑工程室内环境污染控制规范》(GB 50325—2020) I 类民用建筑工

程室内氡浓度限值($150 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$)。室内氡及其子体所致居民人体年有效剂量为 8 mSv ，高于公众年有效剂量安全值 1 mSv ，高于 2010 年《中国辐射水平》中室内氡及其子体所致居民年平均内照射剂量 1.44 mSv ，应当引起高度重视，应采取必要措施进行补救，例如：多开窗增加风量流通，加速室内氡排放、进行氡屏蔽、净化除氡等。

2) 在分析过程中，发现室内氡浓度水平与楼层并无明显关系；开窗通风能够很大的减少室内氡含量，居民应尽量保证房间多通风；新风系统也能一定程度上降低室内的空气氡浓度。

3) 本次调查发现居民室内氡主要来源于建筑材料和装修材料。近年来，社会发展、生活质量的提高，各类建筑数量日益增长，科技的提高也带来了新型建筑、装修材料的应用，住宅的密闭性和隔热性得到提高的同时，也为氡的积蓄创造了良好的条件。要减少高放射性建筑材料的使用，加强对建筑材料的放射性监测；在进行室内装修时，应选用绿色环保的装修材料，避免产生新的氡源。

4) 李鑫提到我国在绿色、健康建筑标准上，已经形成了比较完整、系统的体系，但是他指出由于标准多而且在氡浓度限值、剂量估算、点位布置以及测量方式等方面各类标准给出的参考并不统一，在实践中存在一些不足 [17]。在本次调查中，在对建筑材料和装修材料的放射性检测后，发现单种材料其实并没有超过规定的限制，但是多种材料叠加也最终导致了氡浓度超标，并未在相关国家标准中提及此类问题，这也是值得关注的问题；一些建筑材料如隔墙板采用大量的工业废渣制成，同时还利用了发泡等技术，使得建筑材料的氡析出率增加，导致室内氡浓度的提高，在相关国家标准中并未提及对建筑材料氡析出率的限制。因此必须修改完善相关国家标准，保障公众的健康。

作者贡献声明

本研究由署名作者按以下贡献声明独立开展，排名无争议。韩阳负责设计研究方案、研究方案可行性调查分析、进行对比实验、对实验结果进行分析，调研大量文献、撰写论文。刘博帅负责进行实验，参与对实验结果的分析处理，负责修订论文、审核论文。漆成龙负责进行实验，参与实验结果分析处理、收集数据、绘制图谱。

Conflicts of Interest

The authors declare no conflicts of interest.

References

- [1] (2000) UNSCEAR 2000 Report. United Nations New York.
- [2] Zeeb, H. and Shannoun, F., Eds. (2009) WHO Handbook on In-Door Radon: A Public Health Perspective. World Health Organization, Geneva.
- [3] 孙璐, 王小春, 潘艳, 等. 云南省某矿区氡浓度水平调查分析[J]. 中国辐射卫生, 2020, 29(1): 57-60.

- [4] ICRP. 室内氡子体照射产生的肺癌危险. ICRP 第 50 号出版物[M]. 李素云, 译. 北京: 原子能出版社, 1992.
- [5] 朱立, 周银芬, 陈寿生, 等. 放射性元素氡与室内环境[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [6] 王作元, J. H. Lubin, 王陇德, 等. 室内氡与肺癌关系研究[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2002, 22(3): 209-214.
- [7] 李先杰. 环境空气中氡的监测方法[J]. 辐射防护通讯, 2021, 41(6): 1-17.
- [8] 马吉英等. 室内氡对人体健康的危害及防护[J]. 中国辐射卫生, 2012, 21(4): 506-507.
- [9] 彭金梅, 王兴飞, 刘学峰, 等. 部分建筑材料氡析出率测试分析[J]. 辐射防护通讯, 2012, 32(1): 28-31.
- [10] 国家质量监督检验检疫总局, 中华人民共和国建设部. GB50325—2020 民用建筑工程室内环境污染控制规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2020.
- [11] 国家质量监督检验检疫总局, 中国标准化管理委员会. GB/T 16146—2015 室内氡及其子体控制要求[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T 18883-2002 室内空气质量标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [13] 德小明, 刘宗杰, 杨参军, 刘红梅, 等. 银川市 26 户居室内氡污染水平调查[J]. 宁夏医学院学报, 2004, 26(6): 402-403.
- [14] 徐立鹏, 葛良全, 曾兵, 谷懿, 等. 成都地区室内氡浓度调查[J]. 辐射防护, 2012, 32(3): 177-180.
- [15] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB 6566-2010 建筑材料放射性核素限量[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [16] 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.
- [17] 李鑫, 高国恒. 国内外绿色健康建筑标准中室内氡浓度限值与优化策略研究[J]. 广东建材, 2019, 35(8): 54-58.

Appendix (Abstract and Keywords in Chinese)

成都市某新建住宅室内氡浓度水平调查与分析

摘要: 目的: 了解成都某新建住宅室内氡浓度水平, 估算居民所受照射剂量, 为保障公众健康提供有效的氡浓度数据。方法: 采用连续测氡仪对目标小区室内氡浓度水平进行监测测量。共选取住宅数 38 户, 每户选取 4 个监测点, 对监测点连续测量 1 h, 所有监测点的平均值即为该点的氡浓度水平, 以此来评估居民所受年有效剂量。结果: 该新建小区平均室内空气氡浓度值约为 $(249 \pm 72) \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$, 居民所受年有效剂量约为 8 mSv。在拆除较高放射性的材料后, 室内氡浓度降低到了 $95 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ 。结论: 该新建小区室内氡水平高于国际标准限定值; 通风和新风系统可以有效降低室内氡浓度水平, 减少其对人类健康的伤害; 建筑材料和装修材料是室内空气氡浓度的主要来源, 对其进行放射性监测十分必要。

关键词: 氡浓度, 空气氡, 剂量估算, 室内