·论 著·

地铁环境氡浓度调查及工作人员暴露剂量评估

郝小吉，俞顺飞，郭佳娣，赖忠俊，曹艺耀，王东航，宣志强

浙江省疾病预防控制中心，浙江 杭州 310051

摘要：目的 了解杭州市地铁1号线和5号线氡浓度及工作人员氡暴露剂量，为评估氡暴露潜在健康风险、保障地铁工作人员职业健康提供依据。**方法** 于2022年3月—2023年3月，对杭州市地铁1号线和5号线53个车站开展氡浓度监测，每个车站布设车控室、客服中心、安检区和站台4个采样点；其中车控室开展为期1年的连续监测，其他采样点开展为期1个季度的连续监测。采用CR-39累积氡探测杯检测氡浓度，采用RAD7测氡仪检测瞬时氡浓度，并估算氡及其子体所致的工作人员人均年有效剂量；分析不同线路、采样点和季度氡浓度。**结果** 地铁1号线氡浓度M（Q_R）为26.8（11.2）Bq/m^3，瞬时氡浓度M（Q_R）为4.7（8.5）Bq/m^3；5号线氡浓度为（26.1±6.1）Bq/m^3，瞬时氡浓度M（Q_R）为4.7（7.4）Bq/m^3；2条线路氡浓度和瞬时氡浓度差异无统计学意义（均P>0.05）。地铁1号线和5号线车控室氡浓度较高，M（Q_R）分别为42.5（24.3）、26.8（6.1）Bq/m^3。1号线车控室各季度氡浓度M（Q_R）分别为37.7（27.5）、42.5（24.4）、46.8（26.0）和34.9（29.0）Bq/m^3，差异无统计学意义（P>0.05）；5号线分别为24.8±6.7、26.6（5.9）、33.8±7.9、22.8（8.7）Bq/m^3，差异有统计学意义（P<0.05），其中第三季度氡浓度高于第一季度和第四季度（均P<0.05）。地铁1号线车控室、5号线站台氡及其子体所致的工作人员人均年有效剂量较高，分别为0.305 2、0.255 9 mSv。**结论** 杭州市地铁1号线、5号线环境氡浓度处于低剂量辐射范围，符合国家相关标准限值要求，无显著健康风险；需重点关注车控室和第三季度氡浓度，加强监测与通风管理。

关键词：氡浓度；地铁；年有效剂量；氡子体浓度

中图分类号：R144 **文献标识码：**A **文章编号：**2096-5087（2026）05-0483-05

Investigation of radon concentration and assessment of occupational exposure dose in the metro environment

HAO Xiaoji, YU Shunfei, GUO Jiadi, LAI Zhongjun, CAO Yiyao, WANG Donghang, XUAN Zhiqiang

Zhejiang Provincial Center for Disease Control and Prevention, Hangzhou, Zhejiang 310051, China

Abstract: Objective To investigate the radon concentration and occupational radon exposure doses in Hangzhou Metro Line 1 and Line 5, so as to provide a basis for assessing potential health risks of radon exposure and protecting the occupational health of metro workers. **Methods** From March 2022 to March 2023, radon concentration monitoring was conducted at 53 stations on Hangzhou Metro Lines 1 and 5. Four sampling points were set up at each station: train control room, customer service center, security checkpoint area, and platform. Continuous monitoring was conducted for one year at the train control room, while continuous monitoring at the other sampling points lasted for one quarter. CR-39 cumulative radon detection cups were used to measure radon concentrations, while RAD7 radon detectors were used to measure instantaneous radon concentrations. The annual effective dose to workers from radon and its progeny was estimated. Radon concentrations across different lines, sampling points, and seasons were analyzed. **Results** The median radon concentration was 26.8 (interquartile range, 11.2) Bq/m^3 in Line 1, and the median instantaneous radon concentration was 4.7 (interquartile range, 8.5) Bq/m^3. In Line 5, the radon concentration was (26.1±6.1) Bq/m^3, and the median instantaneous radon concentration was 4.7 (interquartile range, 7.4) Bq/m^3. No significant differences were found

DOI：10.19485/j.cnki.issn2096-5087.2026.05.012

基金项目：浙江省医药卫生科学研究基金项目（2022KY133）

作者简介：郝小吉，硕士，主管医师，主要从事放射卫生工作

通信作者：宣志强，E-mail：zhqxuan@cdc.zj.cn

between the two lines in either radon or instantaneous radon concentrations (both P>0.05). The control rooms in both lines showed relatively high radon levels, with a median of 42.5 (interquartile ranges, 24.3) Bq/m^3 in Line 1 and a median of 26.8 (interquartile ranges, 6.1) Bq/m^3 in Line 5. In the Line 1 control room, the median radon concentrations across four quarters were 37.7 (interquartile range, 27.5), 42.5 (interquartile range, 24.4), 46.8 (interquartile range, 26.0), and 34.9 (interquartile range, 29.0) Bq/m^3, respectively. No significant seasonal variation was observed (P>0.05). In the Line 5 control room, the values were 24.8±6.7, 26.6 (5.9), 33.8±7.9, and 22.8 (8.7) Bq/m^3, respectively. A significant seasonal difference was found (P<0.05), with the third quarter showing higher radon levels than the first and fourth quarters (both P<0.05). The annual effective doses to workers from radon and its progeny were relatively high in the Line 1 control room (0.305 2 mSv) and the Line 5 platform (0.255 9 mSv). **Conclusions** The radon concentrations in Hangzhou Metro Lines 1 and 5 were within the low-dose radiation range and met the national standard limits. No significant health risks were identified. However, attention should be paid to radon levels in control rooms and during the third quarter. Enhanced monitoring and ventilation management are recommended.

Keywords: radon concentration; metro; annual effective dose; radon progeny concentration

氡是一种无色、无味、广泛存在于自然界的惰性气体，世界卫生组织（WHO）已证实氡是仅次于吸烟的肺癌第二大危险因素[1]。室内氡主要来源于自然界的地下土壤和建筑装饰材料，易在相对密闭的环境中积聚。研究表明，环境中氡浓度升高可导致人群肺癌患病风险增加[2-3]。随着社会经济与城市化进程加快，城市轨道交通在居民通勤中发挥着重要作用[4]。数据显示，2023年初杭州市地铁线网日均客流量为370万人次，同年9月达到历史峰值，约503.2万人次[4]。多数地铁线路位于较深的地下且空间相对密闭，易受周围岩石与土壤氡析出的影响，若通风不良，易导致站内氡浓度升高[5-6]。杭州市地铁客流量较大，且工作人员处于地下作业环境，氡浓度较高可能对其健康构成潜在危害。为评估氡暴露潜在健康风险、保障地铁工作人员职业健康，于2022年3月—2023年3月，对杭州市地铁1号线和5号线氡浓度开展监测，现报道如下。

1 材料与方法

1.1 监测点选择

选择杭州市1号线和5号线2条地铁线路的53个车站进行布点，每个车站选择4个采样点，分别为车控室（负一层）、客服中心（负一层）、安检区（负一层）和站台（负二层）；并选取53个车站的车控室作为监测点开展为期1年的连续监测，分析地铁氡（^{222}Rn）浓度的季度变化特征；安检区、客服中心和站台开展为期1个季度的连续监测。采样点均在地铁正常运行情况下进行氡浓度监测。

1.2 方法

1.2.1 氡浓度检测

采用中国疾病预防控制中心辐射防护与核安全医学所生产的CR-39累积式氡探测杯检测氡浓度。车控室和客服中心的探测杯放置于文件柜顶部（离墙30 cm），安检区的探测杯放置于安检仪顶部，站台的探测杯放置于路牌指示台顶部。放置3个月后回收探测杯，于实验室使用塑料镊子取出探测器片，将其安装至蚀刻盘，在6.25 mol/L的氢氧化钠（NaOH）溶液、90 ℃条件下蚀刻4 h。蚀刻结束后，采用RADOSYS固体径迹自动测量系统对探测器片进行测量。测量结束后导出数据并建立数据库，记录各个地铁站点每个采样点的探测器片径迹密度；根据校准证书的校准因子对检测数据进行校准修正，计算相应氡浓度。RADOSYS固体径迹自动测量系统使用前经中国计量科学研究院校准，且在有效期内。氡浓度计算公式：$C_{Rn}=(t_r-t_{r0})\times1\ 000/C_f/t$。式中：$C_{Rn}$为空气氡浓度，单位为Bq/m^3；$t_r$为径迹密度测量值，单位为Tr/cm^2；$t_{r0}$为本底径迹密度，单位为Tr/cm^2；1 000为kBq与Bq的因子；C_f为校准因子，单位为Tr/cm^2/（kBq·h/m^3），由中国计量科学研究院校准后提供；t为暴露时间，单位为h。

1.2.2 瞬时氡浓度检测

2022年4—5月，采用美国Durridge公司生产的RAD7测氡仪检测瞬时氡浓度。测量前按照RAD7测氡仪说明书对仪器进行常规检查，确认仪器经检定且在有效期内；测量时避开风速>13.4 m/s或暴雨天气的环境[7]，测量高度约1.2 m，距周边墙面≥1 m，采用连续测量模式，持续时间1 h，每30 min仪器自动读取数据并记录，共2个周期数据。测量结束后导出数据并建立数据库，记录各个地铁站点每个采样点的瞬时氡浓度数据；根据检定证书的校准因子对检测值进行校准修正，以2个周期的平均值作为该测量点的瞬时氡浓度结果。RAD7测氡仪为直读式仪器，瞬时氡浓度计算公式：$C_{Rn}=X_n/C_f$。式中：C_{Rn}为氡浓度，单位为Bq/m^3；X_n为仪器显示值，单位为

Bq/m³；C_f为校准因子，由中国计量科学研究院校准后提供。RAD7测氡仪最低探测限为4.0 Bq/m³，低于探测限的结果以其1/2的数值（2.0 Bq/m³）表示。

1.2.3 平衡因子测量

选择地铁5号线某地铁站的车控室、客服中心和站台，采用美国Durrige公司的RAD7测氡仪、德国SARAD公司的DOSEman Pro氡子体仪和中国赛睿环仪的PRM-FF01氡子体仪连续测量氡浓度和平衡当量氡浓度，周期设定1 h，测量时间24 h，去除前3 h数据，取仪器稳定后数据的平均值，并用仪器修正因子进行修正作为测量结果。基于氡浓度及平衡当量氡浓度测量结果，采用$F = EEC_{Rn}/C_{Rn}$计算每个测量点的平衡因子F值。式中：EEC_{Rn}为测量点的平衡当量氡浓度（Bq/m³）；C_{Rn}为测量点氡浓度（Bq/m³）；F为平衡因子，无量纲。

1.2.4 人均年有效剂量估算

根据联合国原子辐射效应科学委员会（UNSCEAR）推荐剂量估算模式，估算地铁氡及其子体对地铁工作人员的人均年有效剂量。氡人均年有效剂量=$C_{Rn}\cdot D_e\cdot t$，氡子体人均年有效剂量=$F\cdot C_{Rn}\cdot D_{Rn}\cdot t$。式中：$C_{Rn}$为氡浓度，单位为Bq/m³；$D_e$为^{222}Rn剂量转换因子，为0.17 nSv/（Bq·h·m-3）；F为平衡因子；D_{Rn}为氡子体剂量转换因子，为9 nSv/（Bq·h·m^{-3}）；t为年照射时间，单位为h，设定为2 000 h。

1.3 统计分析

采用SPSS 30.0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；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，两两比较采用Boferroni法校正。以$P<0.05$为差异有统计学意义。

2 结 果

2.1 地铁氡浓度分析

杭州市地铁1号线车控室、客服中心、安检区和站台氡浓度分别为42.5（24.3）、（23.5±5.2）、（22.5±5.8）和（27.6±5.9）Bq/m³，范围分别为24.5~320.0、15.9~35.1、32.7~57.0和14.0~36.7 Bq/m³，差异有统计学意义（H=47.876，$P<0.001$）。地铁5号线车控室、客服中心、安检区和站台氡浓度分别为26.8(6.1)、(23.6±5.8)、(25.3±6.4)和(27.4±5.8) Bq/m³，范围分别为20.0~44.7、10.4~33.5、14.9~40.6和18.8~40.6 Bq/m³，差异无统计学意义（H=6.871，P=0.076）。地铁1号线26个车站氡浓度M（Q_R）为26.8（11.2）Bq/m³，范围为14.0~320.0 Bq/m³；5号线27个车站氡浓度为（26.1±6.1） Bq/m³，范围为10.4~44.7 Bq/m³。地铁1号线和5号线氡浓度比较，差异无统计学意义（Z=-1.395，P=0.163）。见表1。

表1 杭州市地铁1号线、5号线氡浓度监测结果

Table 1 Monitoring results of radon concentration in Hangzhou Metro Line 1 and Line 5

地铁线路	测量点	样本量	测量值/（Bq/m³）	浓度范围/（Bq/m³）
1号线	车控室	26	42.5（24.3）	24.5~320.0
	客服中心	25	23.5±5.2	15.9~35.1
	安检区	25	22.5±5.8	32.7~57.0
	站台	25	27.6±5.9	14.0~36.7
	全线	101	26.8（11.2）	14.0~320.0
5号线	车控室	27	26.8 （6.1）	20.0~44.7
	客服中心	27	23.6±5.8	10.4~33.5
	安检区	27	25.3±6.4	14.9~40.6
	站台	27	27.4±5.8	18.8~40.6
	全线	108	26.1±6.1	10.4～44.7

2.2 瞬时氡浓度分析

杭州市地铁1号线车控室、客服中心、安检区和站台瞬时氡浓度M（Q_R）分别为8.5（13.8）、4.7（7.4）、4.7（7.9）和4.7（7.1）Bq/m³，范围分别为2.0~34.1、2.0~29.8、2.0~23.6和2.0~23.5 Bq/m³，差异无统计学意义（H=5.475，P=0.140）。地铁5号线车控室、客服中心、安检区和站台瞬时氡浓度M（Q_R）分别为4.3（8.7）、4.7（4.2）、4.7（9.8）和4.7（6.5）Bq/m³，范围分别为2.0~17.0、2.0~21.3、2.0~18.9和2.0~21.3 Bq/m³，差异有统计学意义（H=8.027，P=0.045）。地铁1号线26个车站的瞬时氡浓度M（Q_R）为4.7（8.5） Bq/m³，范围为2.0~34.1 Bq/m³；5号线27个车站的瞬时氡浓度M（Q_R）为4.7（7.4） Bq/m³，范围为2.0~21.3 Bq/m³。地铁1号线和5号线瞬时氡浓度比较，差异无统计学意义（Z=-1.722，P=0.085）。见表2。

2.3 不同季度地铁氡浓度变化

杭州市地铁1号线车控室各季度氡浓度M（Q_R）分别为37.7（27.5）、42.5（24.4）、46.8（26.0）和34.9（29.0）Bq/m³，差异无统计学意义（H=6.595，P=0.086）。5号线车控室各季度氡浓度分别为24.8±6.7、26.6（5.9）、33.8±7.9和22.8（8.7）Bq/m³，差异有统计学意义（H=26.318，P<0.001），其中第三季度氡浓度高于第一季度（P<0.001）、第四季度（P<

0.001）。地铁1号线车控室各季度氡浓度高于5号线车控室各季度氡浓度，差异有统计学意义（Z=−3.663、4.806、−3.903和−4.260，均$P<0.001$）。

2.4 人均年有效剂量分析

车控室、客服中心和站台平衡因子分别为0.38、0.52和0.50，安检区平衡因子取平均值为0.47，见表3。杭州市地铁1号线车控室氡及其子体所致的工作人员人均年有效剂量较高，为0.305 2 mSv；地铁5号线站台氡及其子体所致的工作人员人均年有效剂量较高，为0.255 9 mSv，见表4。

表2 杭州市地铁1号线、5号线瞬时氡浓度监测结果

Table 2 Monitoring results of instantaneous radon concentration in Hangzhou Metro Line 1 and Line 5

地铁线路	测量点	样本量	测量值（Bq/m³）	浓度范围/（Bq/m³）
1号线	车控室	26	8.5（13.8）	2.0~34.1
	客服中心	26	4.7（7.4）	2.0~29.8
	安检区	26	4.7（7.9）	2.0~23.6
	站台	26	4.7（7.1）	2.0~23.5
	全线	104	4.7（8.5）	2.0~34.1
5号线	车控室	27	4.3（8.7）	2.0~17.0
	客服中心	27	4.7（4.2）	2.0~21.3
	安检区	27	4.7（9.8）	2.0~18.9
	站台	27	4.7（6.5）	2.0~21.3
	全线	108	4.7（7.4）	2.0~21.3

表3 杭州市地铁1号线、5号线各测量点平衡因子监测结果

Table 3 Monitoring results of balance factors at each measurement point in Hangzhou Metro Line 1 and Line 5

测量点	平衡当量氡浓度/（Bq/m³）	氡浓度/（Bq/m³）	平衡因子
车控室	7.3	19.0	0.38
客服中心	8.3	16.1	0.52
站台	15.2	30.5	0.50

3 讨　论

地铁环境的氡主要来源于地下土壤、岩石及建筑装饰材料，其扩散受温度、通风设施的影响，因此不同地区、不同站点的氡浓度存在一定差异[8]。本研究采用CR-39累积式氡探测杯检测氡浓度，CR-39是目前应用最广泛的氡剂量固体核径迹探测器材料，相较于其他径迹探测器材料，CR-39具有灵敏度高、潜径迹相对稳定、受温度和湿度影响小和对γ和β射线不敏感等优点[9]。本研究杭州市地铁1号线氡浓度范围为14.0~320.0 Bq/m³，中位数为26.8 Bq/m³，瞬时氡浓度范围为2.0~34.1 Bq/m³，中位数为4.7 Bq/m³；地铁5号线氡浓度范围为10.4~44.7 Bq/m³，均值为26.1 Bq/m³,瞬时氡浓度范围为2.0~21.3 Bq/m³，中位数为4.7 Bq/m³，均低于400 Bq/m³，符合WS/T 668—2019《公共地下建筑及地热水应用中氡的放射防护要求》[10]对地下建筑氡浓度的限值要求。研究表明，氡由土壤岩石释放后，通过扩散、渗透等方式自下而上运动，因此越靠近建筑物底部氡浓度会越高[11]。然而，地铁1号线和5号线4个采样点中，车控室的平均氡浓度较高，可能因为地铁机械通风和列车运行时产生的活塞效应改变了氡浓度的垂直分布规律，使得地铁内并未出现下层氡浓度高于上层的现象。此外，车控室环境相对密闭，与其他环境相比通风较弱，从而导致氡浓度相对较高。

表4 杭州市地铁1号线、5号线氡及其子体所致的工作人员人均年有效剂量

Table 4 Average annual effective dose per person caused by radon and its progeny among staff in Hangzhou Metro Line 1 and Line 5

地铁线路	工作地点	氡所致的人均年有效剂量/mSv	氡子体所致的人均年有效剂量/mSv	氡及其子体所致的人均年有效剂量/mSv
1号线	车控室	0.014 5	0.290 7	0.305 2
	客服中心	0.008 0	0.220 0	0.228 0
	安检区	0.007 7	0.190 4	0.198 1
	站台	0.009 4	0.248 4	0.257 8
5号线	车控室	0.009 1	0.183 3	0.192 4
	客服中心	0.008 0	0.220 9	0.228 9
	安检区	0.008 6	0.214 0	0.222 6
	站台	0.009 3	0.246 6	0.255 9

杭州市地铁平均氡浓度高于北京市地铁平均氡浓度（22.3 Bq/m³）[12]，瞬时氡浓度低于武汉市（11.5 Bq/m³）[7]、成都市（16.6 Bq/m³）[13]、贵阳市（23.1 Bq/m³）[14]和南宁市（9.68 Bq/m³）[15]地铁的瞬时氡浓度。2条地铁线路的瞬时氡浓度监测结果均低于平均氡浓度，可能原因包括：瞬时氡浓度监测时间较短，监测过程中受风速、温度及湿度等因素影响；同时，瞬时氡浓度监测主要是在日间完成，此时地铁人流量较大，通风系统处于满功率运行状态，从而导致空气中氡浓度较低。

地铁氡浓度不仅受地质环境、通风情况、列车运行时的活塞效应影响，还与季节有关[14]。地铁车控

室是工作人员长期驻留场所，空间狭小、通风较差，可能导致氡浓度升高。本研究对杭州市地铁车控室氡浓度进行为期1年的监测，结果显示，地铁5号线车控室第三季度氡浓度高于第一季度和第四季度。该结果可能与气温有关，氡的析出率随气温升高而增加[16]，杭州市第三季度气温相对较高，且车控室环境相对密闭、通风量与送风量不及站台、安检区等区域，从而导致车控室氡浓度稀释不彻底而增高。地铁1号线车控室各季度氡浓度均高于5号线，可能与不同站点的地质结构不同和2条线路的运营年限及通风系统维护状况有关。地铁1号线于2012年建成通车，是杭州市最早开通的地铁线路，比5号线早运营7年，可能通风系统运行时间较长，缺乏有效维护和保养，导致1号线通风效果不及5号线。建议加强地铁1号线通风系统的维护保养，确保通风系统高效运行，从而有效降低地铁空气中的氡浓度。

杭州市居室环境中氡浓度范围为2.2~183.5 Bq/m^3，平均值为29.7 Bq/m^3[17]，杭州地铁平均氡浓度与杭州市居住室内环境中的氡浓度相近。本研究进一步估算地铁氡及其子体所致的工作人员人均年有效剂量，结果显示，2条线路的工作人员人均年有效剂量均低于GB 18871—2002《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》[18]规定的工作人员年有效剂量（20 mSv）与公众受照年有效剂量限制（1 mSv）。

杭州市地铁1号线和5号线的氡浓度处于低剂量辐射范围，符合国家相关标准限值要求，不存在明显的氡暴露健康风险。但本研究存在一定局限性：仅对2条地铁线路开展了氡浓度监测，数据代表性有限；受地铁运行时车厢比较拥挤、空气流速快等因素的影响，未开展氡浓度监测，导致对乘客群体的健康评估相对不足。

参考文献

[1] GRZYWA-CELIŃSKA A，KRUSIŃSKI A，MAZUR J，et al.Radon：the element of risk.the impact of radon exposure on human health［J/OL］.Toxics，2020，8（4）［2026-04-28］.https://doi.org/10.3390/toxics8040120.

[2] NIE J H，CHEN Z H，LIU X，et al.Oxidative damage in various tissues of rats exposed to radon［J］.J Toxicol Environ Health Part A，2012，75（12）：694-699.

[3] 苗晓翔，苏垠平，武云云，等 . 我国室内氡致肺癌的疾病负担估算［J］. 中华放射医学与防护杂志，2024，44（12）：1069-1076.

[4] 司凌霄，唐梦然，童海强，等 . 杭州地铁通勤客流特征研究［J］. 现代城市轨道交通，2024（7）：100-108.

[5] 王欣，陈英民，王垒，等 . 山东省矿井下工作人员职业性照射初步评价［J］. 中国辐射卫生，2018，27（3）：273-275.

[6] 徐立鹏，陈立，王先良，等 . 成都地铁氡浓度水平调查研究［J］. 辐射防护，2024，44（4）：367-373.

[7] 石梦蝶，闵之藤，刘华牛，等 . 武汉市地铁线路运行期间氡浓度调查分析［J］. 中国辐射卫生，2024，33（5）：505-509.

[8] 朱伟寿，林静，李仲修，等 . 乌鲁木齐地铁一号线氡浓度调查［J］. 疾病预防控制通报，2021，36（4）：59-60，72.

[9] 王晨，丁艳秋，邓君，等 . 基于TASLIMAGE系统的CR-39氡探测器测量氡的蚀刻条件研究［J］. 中国医学装备，2020，17（2）：148-152.

[10] 中华人民共和国国家卫生健康委员会 . 公共地下建筑及地热水应用中氡的放射防护要求：WS/T 668—2019［S］. 北京：中国标准出版社，2019.

[11] 张凯，杨翊方，王海军，等 . 密闭空间氡浓度垂直分布规律的实验研究［J］. 辐射研究与辐射工艺学报，2011，29（3）：189-191.

[12] 高鹏，刘陆，甘睿琳，等 . 北京市地铁站台及车箱内氡浓度水平调查［J］. 核安全，2021，20（1）：17-21.

[13] 王成明 . 成都地铁一号线站台内空气中氡浓度分布状况研究［J］. 四川环境，2015，34（1）：146-149.

[14] 翁绪，罗维均，王彦伟，等 . 贵阳地铁1号线氡浓度特征及其潜在健康效应评估［J］. 地球与环境，2022，50（1）：131-139.

[15] 鞠志萍，黄伊林，彭文斌，等 . 南宁市地铁一号线氡浓度调查与分析［J］. 广西科技大学学报，2019，30（04）：1-5，14.

[16] 翟江龙，朱国英，张燕燕，等 .2009年上海市地铁车站放射性水平［J］. 环境与职业医学，2012，29（7）：407-410，419.

[17] 胡丹，杨维耿，宋建锋，等 . 浙江省居室内氡浓度和γ辐射水平的初步调查［J］. 中国辐射卫生，2011，20（1）：77-79.

[18] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局 . 电离辐射防护与辐射源安全基本标准：GB 18871—2002［S］. 北京：中国标准出版社，2003.

收稿日期：2025-12-26 **修回日期**：2026-04-28 **本文编辑**：徐亚慧