

# 基于“氡”浓度水平测量的博物馆环境分析评价

## ——以汉景帝阳陵博物院为例

程蓓 孔琳 李库

汉景帝阳陵博物院, 陕西西安 712038

### Environmental Analysis and Evaluation of the Museum Environment Based on “Radon” Concentration Level Measurement: A Case Study of Hanyangling Museum

Cheng Bei, Kong Lin, Li Ku

Hanyangling Museum, Xi'an 712038, China

**摘要:** 无色无味的放射性气体氡会对人体健康产生危害, 其在建筑室内的主要来源为土壤、地下水、地下岩体, 以及建筑装饰材料等。由于氡的密度高于空气, 因此氡浓度检测主要对象通常为地下室、一层建筑、库房等通风较差的建筑物空间。汉景帝阳陵博物院主要展陈空间包括地下一层和地上一层建筑, 基于此, 为了让公众清楚地了解汉景帝阳陵博物院的氡浓度情况, 汉阳陵联合中国科学院兰州化学物理研究所, 在考古陈列馆、地下遗址展示厅和文物库房采用氡浓度检测仪开展了氡水平检测, 并结合气象和环境温湿度等相关影响因素进行了综合分析, 结果表明, 汉阳陵主要展陈建筑体室内的氡浓度水平在检测时段达到了国家相应安全要求。

**关键词:** 汉阳陵 室内环境 氡浓度

**Abstract:** Radon is a radioactive inert gas, colorless and odorless, which will do great harm to people's health. Its main sources in the building interior are soil, groundwater, underground rock mass, and building decoration materials. Due to its higher density than air, the main objects of radon concentration detection are usually basement, first-floor building, warehouse and other building spaces with poor ventilation. The main exhibition space of the Hanyangling Museum includes the underground floor and the above-ground floor. In order to enable the public to clearly understand the radon concentration in the Hanyangling Museum, Hanyangling Museum in collaboration with the Lanzhou Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Science carried out radon concentration tests at the exhibition hall, underground site exhibition hall and cultural relics storage room. Combined with the comprehensive analysis of meteorological and environmental temperature and humidity related factors, the results showed that the radon concentration level in the main building of the museum meet the corresponding safety requirements during the detection period.

**Key words:** Hanyang Mausoleum; Indoor environment; Radon concentration

## 引言

氡是岩石和土壤中放射性元素铀、钍和镭衰变时释放出的气体。建筑物室内氡除了来自地下岩体和土壤等以外,还有建筑工程中使用建筑装饰材料的释放。常温下,氡与其子体能形成放射性气溶胶,不仅污染空气,而且被人体吸入后可能诱发肺癌<sup>[1]</sup>,因此世界卫生组织发表的《WHO室内氡手册》(2009年)中被列为19种主要致癌物质之一<sup>[2]</sup>。氡的密度为 $9.727 \times 10^{-3} \text{g/cm}^3$ <sup>[3]</sup>,氡在通风不畅的建筑空间内会累积到较高水平浓度,比如地下室、库房、建筑物一层等。相关研究<sup>[4]</sup>表明,普通建筑室内氡约有60.4%来自地基和周边土壤,还有19.5%来自建筑材料等。因此,有必要对建筑物室内环境进行氡浓度检测,以保证人体健康。

汉阳陵始建于公元前153年,是西汉第四位皇帝景帝刘启与王皇后同茔异穴的合葬陵园,位于陕西省西安市北郊渭河北岸的二级台地咸阳塬上。1998年,陕西省人民政府将汉阳陵确定为陕西汉代文化遗产保护与利用的核心区域。1999年汉阳陵博物馆正式建成并开放,现为国家一级博物馆、国家考古遗址公园、国家AAAA级旅游景区。

目前,依托汉阳陵丰富的历史文化内涵和多年来的考古发掘研究成果,汉景帝阳陵博物院设有考古陈列馆、帝陵外藏坑遗址保护展示厅、南阙门遗址保护展示厅、宗庙遗址四个基本陈列。除了宗庙遗址和南阙门遗址保护展示厅属于室外开放性土遗址保护展示区以外,考古陈列馆和帝陵外藏坑遗址保护展示厅均为地下或者半地下式的展陈场所。考虑到工作人员长期处于博物馆室内环境当中,若氡浓度水平超标将会影响他们的健康。因此,有必要对博物馆场所开展氡浓度水平检测,以消除公众可能在此方面产生的顾虑和误解。

### 一 氡浓度水平检测

2023年1月,汉景帝阳陵博物院联合中国科学

院兰州化学物理研究所对博物院主要展陈建筑内部多处环境开展了氡浓度水平检测。

#### (一) 检测方法

目前常用的氡检测方法主要是在经典静电计法的基础上建立的,有瞬时测量、连续测量和累积测量三种方法<sup>[5]</sup>。本次检测以快速了解测量场所的环境氡浓度水平为目的,故采用瞬时测量法。

研究表明,自然环境中与氡同时存在的钍射气(氡的同位素 $^{220}\text{Rn}$ ),以及环境温湿度等因素可能会对测量结果产生一定影响<sup>[6]</sup>。为了避免这些因素对氡测量结果产生干扰,检测时还需要对钍射气以及环境温湿度分别进行监测记录。

#### (二) 检测仪器

环境测氡仪HS01B(四川成都核盛科技有限公司生产),选取空气模式,取样频率:4分钟/次,净化频率:4分钟/次,测量时间:20分钟/次,浓度单位: $\text{Bq/m}^3$ ,探测下限 $2\text{Bq/m}^3$ (60min,  $2\sigma$ )。

该仪器满足GB50325-2020版《民用建筑工程室内环境污染控制规范》标准,适用于民用建筑工程室内辐射环境氡水平调查、监测、污染控制与评价。设备采用空气氡泵吸静电收集能谱分析法,能同时监测环境氡浓度和钍浓度,灵敏度较高,设备便携,测量时间短,价格适中,可获取即时测量结果和连续监测结果;缺点是静电场受环境湿度影响较大<sup>[7]</sup>。

#### (三) 检测位置

本次室内环境氡检测场所均为地下或半地下空间——汉阳陵考古陈列馆、帝陵外藏坑地下遗址展示厅和文物修复室,氡的污染主要来自建筑建材、装饰装修材料、建筑物地基和周围土壤等。在这些场馆内的每处重点空间分别选取2—3个合适的检测点位,共选取10个检测点位。

##### 1. 帝陵外藏坑地下遗址展示厅(图一)

帝陵外藏坑地下遗址展示厅是一座全地下封闭



图一 帝陵外藏坑地下遗址展示厅



图二 考古陈列馆

式文物和遗址保护与展示建筑，2006年正式建成并对外开放。

整个保护大厅全埋于地下，罩住10座帝陵外藏坑，并在建筑顶部通过覆土植草种树使陵园恢复了原有的历史环境风貌和怡人的自然景观。建筑内部通过温湿度调控系统与外界自然环境进行空气交换。用于该封闭建筑内部结构的特种玻璃达到1900余平方米，其中8条外藏坑被特种玻璃一并合围起来，形成独立保护展示区。立面玻璃通过钢结构与建筑的底部和顶部相连，将遗址保护区域与游客参观区域隔离开，为文物遗址创造了良好的展陈和保存空间。主要遗址展示区域上方横跨一条长60余、宽3米的悬空“U”形玻璃通道，为游客提供了独特的参观体验。

本次检测在该建筑内选取的检测点位为21号外藏坑上方的游客通道东北角、12号外藏坑上方的游客通道西北角和幻影成像放映厅内，这些区域均是参观人流量较为密集，通风不畅，且局部空间狭小的位置。

## 2. 汉阳陵考古陈列馆（图二）

汉阳陵考古陈列馆是一座建筑风格独特的综合性展馆，于1999年正式对外开放，展陈内容为汉阳陵三十余年的考古发掘研究成果。该展厅的总陈列面积约1400平方米，分为地上一层和地下负一层。



图三 文物修复室

2019年5月，因考古陈列馆设施老化陈旧等原因，汉景帝阳陵博物院完成了对该展馆实施的全面提升改造工程，展陈空间效果得到了很大改善。该建筑内部主要利用温湿度调控系统进行通风换气。在该建筑体内的地上一层和地下一层展陈空间分别选取2个检测点位。

## 3. 文物修复室（图三）

汉景帝阳陵博物院文物修复室位于考古陈列馆建筑本体的地下负一层，于2016年经过重新装修完工后投入使用。文物修复室内仅一个出入口，且通过自然方式换气通风。在文物修复室内选取2个检测点位，在修复室外通道选择1个检测点位。

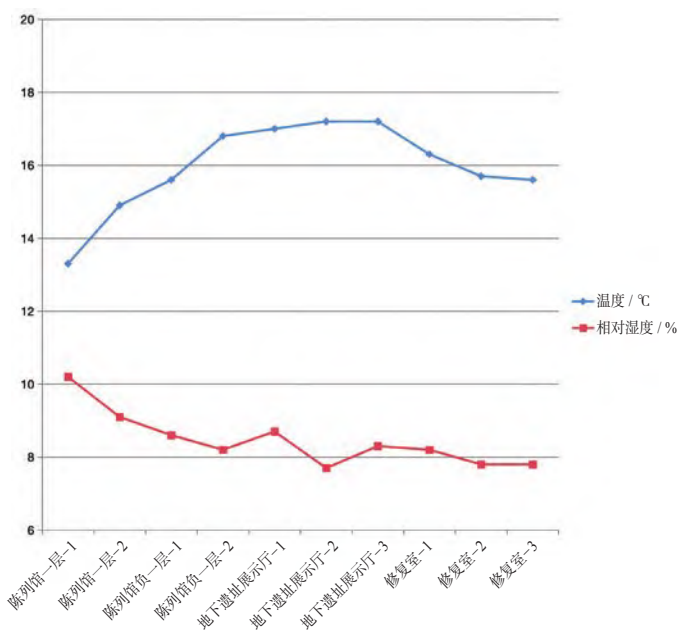
## 二 结果与讨论

### (一) 氡浓度检测结果

经过现场检测, 考古陈列馆两层共4个监测点位的氡浓度值, 最高为 $52\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ , 最低为 $19\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ ; 帝陵外藏坑地下遗址展示厅的3个监测点位氡浓度值最高 $73\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ , 最低 $26\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ ; 文物修复室的3个监测点位氡浓度值最高 $72\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ , 最低 $53\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$  (表一)。从检测结果来看 (图五), 除帝陵外藏坑地下遗址展示厅内21号外藏坑上方的游客通道东北角以外, 文物修复室三个检测点位的氡水平较其他两个检测空间都高一些。文物修复室和考古陈列馆都在同一建筑体的负一层, 前者氡浓度水平整体高于后者, 这可能与该空间内没有专门的通风系统, 室内空气与外界交流缓慢, 而考古陈列馆有空调系统运行有关, 说明空调系统的通风作用能够在一定程度上降低室内氡浓度水平。帝陵外藏坑地下遗址展示厅内21号外藏坑上方的游客通道东北角是本次所有检测点位中氡浓度水平最高的位置 (图五), 为 $73\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ 。该位置是帝陵外藏坑地下遗址展示厅中距离周围岩体、土壤和建筑材料相对较近的地方, 尽管遗址区和游客通道之间玻璃围护能够

减少两个区域之间的空气交换, 但是研究发现玻璃通道并非完全密闭, 遗址区实际上和外界存在气体交换<sup>[8]</sup>, 加之该区域相对狭小, 参观者容易聚集, 通风效果相较于其他宽敞区域略差一点, 因而发生了高于其他检测点位的氡聚集。

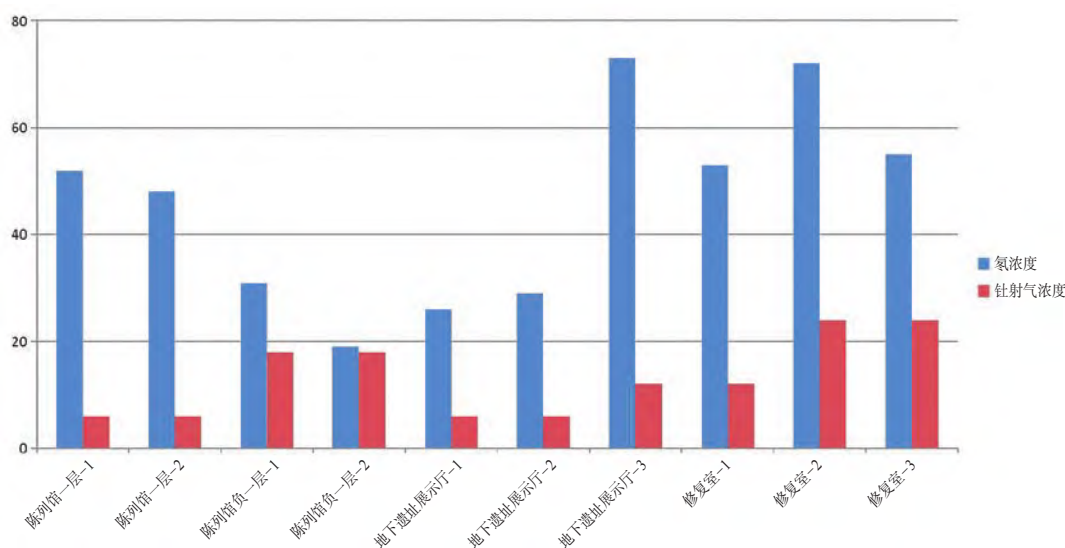
参考我国《民用建筑工程室内环境污染控制标准》(GB50325-2020) 和《室内空气质量标准》(GB/T18883-2022) 对民用建筑和室内空气质量两个标



图四 汉阳陵检测点位的温湿度折线图

表一 汉阳陵建筑室内氡检测数据

场馆	点位号	检测点位	氡浓度 / $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$	钍射气浓度 / $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$	温度 / °C	相对湿度 / %
考古陈列馆 一层	1	四神兽展柜右侧东南角	52	6	13.3	10.2
	2	南区铠甲武士俑展柜西北角	48	6	14.9	9.1
考古陈列馆 负一层	1	东区陪葬墓动物俑展柜东北角	31	18	15.6	8.6
	2	陶俑头展柜东南角	19	18	16.8	8.2
帝陵外藏坑地下遗址 展示厅	1	幻影成像放映厅	26	6	17.0	8.7
	2	12号外藏坑上方游客通道西北角	29	6	17.2	7.7
	3	21号外藏坑上方游客通道东北角	73	12	17.2	8.3
文物修复室	1	修复室外应急通道	53	12	16.3	8.2
	2	修复室内间1	72	24	15.7	7.8
	3	修复室内间2	55	24	15.6	7.8



图五 汉阳陵检测点位的氡浓度和钍射气浓度柱状图

准中的相关规定：住宅、医院、老年建筑、幼儿园、学校教室等Ⅰ类民用建筑的氡浓度 $\leq 150\text{Bq}/\text{m}^3$ ，办公楼、文化娱乐场所、图书馆、展览馆等Ⅱ类民用建筑氡浓度 $\leq 300\text{Bq}/\text{m}^3$ <sup>[9]</sup>。从表一中可以看出，汉阳陵本次检测的三处室内场馆的氡浓度水平均符合我国相关环境控制标准。

### （二）氡浓度检测相关气象条件

研究表明，西安市室内氡浓度水平还会受到气象条件影响，不同天气情况下，霾天升高室内氡浓度水平，雨天则会降低室内氡浓度水平<sup>[10]</sup>。由此可见，空气清洁度可以影响氡浓度水平。本次检测当日（2023年1月9日）虽然正值冬季，西安市室外自然环境温湿度较低，但是当日天气为清洁天，检测前若干日没有降雨或者雾霾发生，检测结果受天气状况干扰较小。汉阳陵考古陈列馆、帝陵外藏坑地下遗址展示厅和文物修复室内的温湿度整体上比较接近（表一、图四），波动范围也较小，温度为13.3—17.2℃，环境温度较低，相对湿度为7.7%—10.2%，环境干燥，检测设备静电场受环境湿度影响也较小。因此，本次检测结果可以较好地说明该时段内汉景帝阳陵博物院主要展陈场馆和工作场所环境的氡浓度水平情况。

检测结果显示（图五），在所有检测点位测量的钍射气浓度水平（ $6\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ — $24\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ ）均低于相应位置的氡浓度水平（ $19\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ — $72\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ ），由此看来本次检测中钍射气未对氡浓度检测结果产生强烈干扰。

### （三）汉阳陵博物馆氡元素来源分析

有研究者<sup>[11]</sup>在对建筑体地下负一层室内环境氡浓度水平进行了五个月的跟踪监测后发现，该环境内的氡浓度变化存在季节性差异，即随着自然环境温度的上升，氡浓度水平也呈上升趋势，环境温度上升是氡扩散加速的诱因之一。本次检测是在1月进行的，相对来讲，环境温度较低也可能降低氡的扩散和析出，导致氡浓度检测结果降低，因此提示文物管理者需要在自然环境温度上升时，继续关注并加强这些场所通风。

## 三 结 论

通过本次氡浓度水平测量，本文认为在检测时段环境条件下，汉景帝阳陵博物院园区主要建筑体室内环境中氡浓度水平符合国家相关标准要求。

同时，由于汉阳陵国家考古遗址公园地处黄土

干旱地区,环境相对湿度低,整体氡析出水平较高。随着外界气温的回升,以及受到霾天等恶劣污染天气的影响,室内氡析出率也会随之上升。因此,对于汉景帝阳陵博物院来说,需要重视不同气候和气象条件下的氡浓度水平监测,做好室内氡污染防治工作。建议持续关注并保持馆区室内环境的通风条件,必要时强制通风,及时应对外界空气污染对博物馆室内空气质量的影响,这样一方面可以为文物提供洁净的展陈及保存环境空间,另一方面也能为游客创造更加优质的参观体验。

致谢:感谢中国科学院兰州化学物理研究所杨博、吴玉琪、钱玲、吕功煊等老师在技术检测方面提供的支持和帮助。

版社,2020. b. 中华人民共和国国家标准. GB/T18883-2022 室内空气质量标准[S]. 北京:中国标准出版社,2022.

[10] 项麦祺,范春兰,李彦鹏,等. 西安市室内外氡的变化特征及影响因素研究[J],安全与环境学报,2017,17(6):2415-2420.

[11] 吕功煊,甄文龙,宁晓峰. 地下建筑内氡分布与去除技术研究进展[J]. 分析检测技术与仪器,2023,29(4):364-377.

[1] 温伟伟,徐荣政,吴友朋,等. 地下工程氡防护方法及能力研究[J],辐射防护,2022,42(1):48-53.

[2] a. 董韬,黄茜蕊. 腾冲县火山地质博物馆建筑地基及周围土壤氡浓度分析评价[J],绿色科技,2020(6):133-135. b. 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.

[3] 邓磊,符适. 民用住宅防氡及降氡措施[J],重庆科技学院学报(自然科学版),2009(1):85-87.

[4] 章晔,程业勋,刘庆成,等. 环境氡的来源与防治对策[J]. 物探与化探,1999(2):81-83.

[5] 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.

[6] 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.

[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] 李莹莹,曹军骥,李库. 示踪气体浓度衰减法定量评价汉阳陵地下遗址厅的空气渗漏[J]. 中国粉体技术,2010(16):93-95.

[9] a. 中华人民共和国国家标准. GB50325-2020 民用建筑工程室内环境污染控制规范[S]. 北京:中国标准出