



# 中国锦屏地下实验室二期洞壁表面氡析出率测量及防水抑氡效果分析

张秋丽<sup>1</sup>, 徐鹏程<sup>1</sup>, 代文翰<sup>1</sup>, 张鹏<sup>1</sup>, 景明坤<sup>1</sup>, 薛涛<sup>1</sup>, 马豪<sup>1</sup>, 曾志<sup>1\*</sup>, 程建平<sup>1,2\*</sup>

1. 清华大学工程物理系, 北京 100084

2. 北京师范大学物理与天文学院, 北京 100875

\*联系人, 曾志, E-mail: [zengzhi@tsinghua.edu.cn](mailto:zengzhi@tsinghua.edu.cn); 程建平, E-mail: [chengjp@tsinghua.edu.cn](mailto:chengjp@tsinghua.edu.cn)

收稿日期: 2024-10-03; 接受日期: 2024-12-03; 网络出版日期: 2025-02-13

国家重点研发计划(编号: 2023YFA1607101)和国家自然科学基金(编号: 12425507, 12175112)资助项目

**摘要** 空气中的氡是地下实验室环境辐射本底重要来源, 国家重大科技基础设施“极深地下极低本底前沿物理实验设施”(简称锦屏大设施)依托中国锦屏地下实验室二期(CJPL-II)建设, 通过建设新风系统与防水抑氡层来控制实验室空气中的氡浓度. 为评估防水抑氡工程效果, 包括防水抑氡层对岩石析氡抑制和工程整体对实验室空气氡浓度的抑制, 本文使用表面氡析出率测量仪测量防水抑氡层各工艺面的表面氡析出率, 使用空气氡测量仪和便携式高纯锗谱仪对防水抑氡工程前后实验室的环境氡浓度以及氡子体的伽马辐射本底进行测量. 测量结果表明, 防水抑氡层建设后表面氡析出率降至岩壁析出率1%以下, 各实验厅防水抑氡层表面氡析出率均小于 $0.1 \text{ mBq m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ; 就地伽马能谱中的 $^{214}\text{Pb}$ 和 $^{214}\text{Bi}$ 特征峰计数率下降约60%, 氡子体 $^{214}\text{Pb}$ 和 $^{214}\text{Bi}$ 对就地测量能谱中 $^{214}\text{Pb}$ 和 $^{214}\text{Bi}$ 特征峰的贡献降低约20%–40%; 抑氡工程后, 实验厅内空气氡浓度降至 $(20.3 \pm 0.1) \text{ Bq m}^{-3}$ , 约为建设前 $(208.0 \pm 0.1) \text{ Bq m}^{-3}$ 的1/10. 以上结果说明防水抑氡工程有效降低了氡及其子体浓度, 为二期实验室的低本底环境提供了坚实保障.

**关键词** 锦屏地下实验室, 防水抑氡层, 氡析出率, 氡浓度

**PACS:** 28.41.Te, 29.30.Kv, 92.20.Td

## 1 引言

地下实验室是开展暗物质探测、中微子实验等前沿物理学研究的重要实验平台<sup>[1–3]</sup>, 其覆盖岩层可以阻挡大部分宇宙射线, 形成一个极低宇宙射线通量的实

验环境<sup>[4]</sup>. 宇宙射线本底大幅度降低后, 空气氡就成为地下实验室开展前沿物理实验需要着重考虑的环境辐射本底.

地下实验室内空气氡的来源复杂, 岩石、土壤或建筑材料中的 $^{226}\text{Ra}$ 衰变形成的氡会通过裂缝和空隙

**引用格式:** 张秋丽, 徐鹏程, 代文翰, 等. 中国锦屏地下实验室二期洞壁表面氡析出率测量及防水抑氡效果分析. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2025, 55: 111018

Zhang Q L, Xu P C, Dai W H, et al. Measurement of radon exhalation rate from the surface of cavity and effect analysis of waterproof and radon suppression project in China Jinping Underground Laboratory phase II (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2025, 55: 111018, doi: [10.1360/SSPMA-2024-0435](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2024-0435)

逃逸到空气中, 地下水也能携带溶解的氡渗漏到实验室内。氡作为气体很容易通过扩散到达探测器附近, 其自身及其子体的放射性将对暗物质直接探测等低本底实验带来本底干扰。此外, 氡作为仅次于吸烟的第二大致癌因素, 高浓度的氡也会对地下实验室工作人员的健康构成威胁。大部分地下实验室通常利用通风系统降低室内氡浓度, 或者配置吸附除氡系统来控制实验区域的局部氡浓度<sup>[5-9]</sup>。

中国锦屏地下实验室二期(简称CJPL-II)建设在锦屏山2400 m岩石埋深下, 可用空间超过30万 m<sup>3</sup>, 是目前世界上空间最大、岩石埋深最深的地下实验室<sup>[10]</sup>。国家重大科技基础设施“极深地下极低本底前沿物理实验设施”(简称锦屏大设施)依托CJPL-II建设而成。为解决极深地下超大空间的氡控制问题, 锦屏大设施在CJPL-II内部建设新风系统和防水抑氡层, 控制氡对实验室的渗透和在其中的累积。其中, 防水抑氡层共有7层工艺面, 从内到外分别是混凝土层、HDPE层、速凝橡胶层、聚合物水泥砂浆层、聚氨酯胶泥层、聚氨酯面漆层和聚氨酯清漆层, 通过在CJPL-II的岩壁和地面表层布设这种多层复合结构来阻挡岩石析出氡气和含氡地下水向实验室的渗入。为保障抑氡效果, 防水抑氡层覆盖CJPL-II整个地下空间范围内所有实验厅、辅助隧道及连接通道的墙面、地面和顶面, 实现了对整个地下空间的全包裹。同时, CJPL-II建设了大流量的实验室新风系统, 以每小时24000–45000 m<sup>3</sup>的流量向实验室输送氡含量在十至几十Bq m<sup>-3</sup>范围的新风, 及时带走实验室中累积的氡。

本文分别从实验室表面氡析出率、空气氡浓度以及氡子体对伽马辐射本底的贡献三方面评估防水抑氡工程的效果。在防水抑氡层建设期间, 使用表面氡析出率测量仪器现场测量了岩石和防水抑氡层各工艺面的氡析出率, 评估其抑制效果。在防水抑氡工程实施前后, 使用AlphaGuard氡浓度仪和便携式高纯锗伽马谱仪分别测量了实验室中的空气氡浓度以及氡子体的伽马辐射本底, 以评估抑氡工程的综合效果。

## 2. 材料与方法

### 2.1 表面氡析出率测量

#### 2.1.1 表面氡析出率测量原理

表面氡析出率测量一般采用集氡罩收集待测表面

析出的氡, 使用集氡罩内氡浓度的变化来计算集氡罩覆盖表面的氡析出率, 并作如下假设: ①待测表面的氡析出率在测量期间不发生变化; ②氡析出后均匀分布在集氡罩内, 不考虑反扩散效应。因此, 集氡罩内部空间氡浓度取决于待测表面的氡析出率, 集氡罩内部空间氡浓度变化的数学模型可用如下公式表示<sup>[11]</sup>:

$$\frac{dC(t)}{dt} = \frac{J_0}{h} - \lambda \cdot C(t) + \frac{K}{V}, \quad (1)$$

其中 $C(t)$ 为 $t$ 时刻氡浓度, 单位Bq m<sup>-3</sup>。 $J_0$ 为待测表面的氡析出率, 单位Bq m<sup>-3</sup> h<sup>-1</sup>。 $\lambda$ 为氡的衰变常数。  $h$ 为集氡罩深度, 单位m。  $V$ 为集氡罩体积, 单位m<sup>3</sup>。  $K$ 为集氡罩漏率, 视为常数, 单位Bq h<sup>-1</sup>。

由于集氡罩的密封性良好, 氡的泄漏可以忽略不计, 根据初始条件 $C(t=0) = C_0$ ,  $C_0$ 为集氡罩内初始氡浓度, 单位Bq m<sup>-3</sup>, 可以得到

$$C(t) = \frac{J_0}{\lambda h} (1 - e^{-\lambda t}) + C_0 e^{-\lambda t}. \quad (2)$$

对每次测量得到的氡浓度进行最小二乘拟合, 得到氡析出率:

$$J_k \pm \sigma_{J_k}, \quad k = 1, 2, \dots, n.$$

将多次测量结果按照下式进行加权平均, 得到某测点的氡析出率和不确定度:

$$J_c = \frac{\sum_k \frac{J_k}{\sigma_{J_k}^2}}{\sum_k \frac{1}{\sigma_{J_k}^2}}, \quad (3)$$

$$\sigma_{J_c} = \frac{1}{\sum_k \frac{1}{\sigma_{J_k}^2}}. \quad (4)$$

使用式(5)计算在95%置信水平下氡析出率的检出限 $L_c$ <sup>[12]</sup>。式中是待测表面无氡析出的情况下, 实测氡析出率 $J$ 的不确定度。

$$L_c = 1.645 \cdot \sigma_{J|J=0}. \quad (5)$$

#### 2.1.2 表面氡析出率测量仪器

本文表面氡析出率现场测量使用集氡罩收集待测表面析出的氡, 集氡罩测量的取样位置贴近氡析出表面, 可以减少集氡罩内部空间对氡析出测量的影响; DR-A3柔性有机堵料作为主要密封材料, 用于封堵集氡罩和待测表面的缝隙; 自喷式防水补漏剂作为辅助

密封材料, 对有机堵料密封后可能存在的微小缝隙进一步密封; 使用SY-42L型氧气袋充装氮气, 对测氡仪和集氡罩内部进行吹除, 降低测量前内部氡浓度; 使用赛睿环仪公司的NRM-P01便携式测氡仪监测集氡罩内氡浓度随时间的变化。

### 2.1.3 表面氡析出率测量点位与步骤

在CJPL-II防水抑氡层建设期间, 在一固定点位依次对裸露岩壁以及防水抑氡层的7层工艺面, 分别是混凝土层、HDPE层、速凝橡胶层、聚合物水泥砂浆层、聚氨酯胶泥层、聚氨酯面漆层和聚氨酯清漆层的表面氡析出率进行了现场测量, 每个工艺面进行2次测量, 如图1所示。

防水抑氡层建设结束后, 对CJPL-II的A1、A2、B1、C2、D1和D2共6个实验厅, 30个点点位的防水抑氡

层表面氡析出率进行测量。每个实验厅选取5个点位, 均匀分布在各个厅的四周墙壁上。每个点位进行2次测量。具体点位分布见图2。

每个点位的测量主要分为以下4个步骤:

①将待测表面清洗、干燥后, 扣放集氡罩, 并对集氡罩进行密封处理。

②使用氮气或环境空气对测氡仪内部空气进行置换。在测量裸露岩石等氡析出率较高的表面时采用环境空气进行置换, 保证集氡罩内部初始氡浓度和环境一致。在测量防水抑氡层各工艺面时, 采用干燥氮气进行置换, 将氡罩内部初始氡浓度降低到尽可能低的水平。

③将集氡罩和测氡仪进行气路连接, 使用密封材料对所有气路连接部位做密封, 然后开启测氡仪, 每次测量设置测量周期为1 h, 连续测量6 h。



图 1 防水抑氡层各工艺面氡析出率测量现场

Figure 1 Measurement site for radon exhalation rate on various process surfaces of the waterproof and radon-suppression layers.

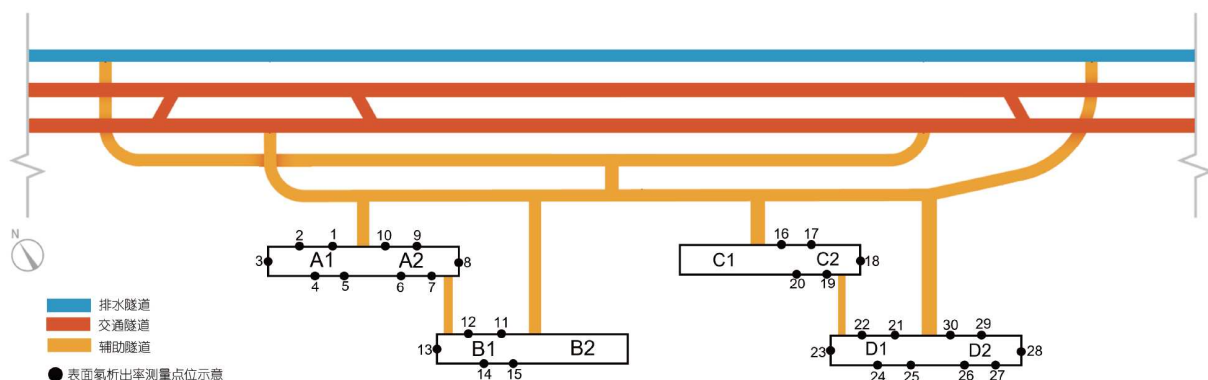


图 2 CJPL-II 各实验厅防水抑氡层测量点位示意图

Figure 2 Measurement positions for the waterproof and radon-suppression layers in various experiment halls of CJPL-II.

④分析6 h中集氡罩内部氡浓度的变化, 根据2.1.1节内容计算表面析出率。

## 2.2 就地伽马能谱测量

就地伽马能谱测量基本原理参考文献[13,14]。本文通过就地伽马能谱测量来评估防水抑氡工程的抑氡效果, 重点关注防水抑氡工程前后空气氡子体对环境伽马本底的贡献变化。氡子体(主要是 $^{214}\text{Pb}$ 和 $^{214}\text{Bi}$ )对伽马能谱的贡献由式(6)计算:

$$\eta = \frac{f_{\text{Rn}} \cdot C_{\text{Rn}}}{N} \quad (6)$$

假设氡子体在实验室内均匀分布, 用测量得到的氡浓度 $C_{\text{Rn}}$ 作为氡子体的平均浓度;  $f_{\text{Rn}}$ 是就地HPGe探测器对空气氡子体 $^{214}\text{Pb}$ 或 $^{214}\text{Bi}$ 的特征 $\gamma$ 射线的效率转换因子, 通过模拟得到;  $N$ 是就地伽马能谱中 $^{214}\text{Pb}$ 或 $^{214}\text{Bi}$ 特征峰的净峰面积, 一部分由氡子体 $^{214}\text{Pb}$ 或 $^{214}\text{Bi}$ 贡献, 另一部分由周围建筑材料中的 $^{214}\text{Pb}$ 或 $^{214}\text{Bi}$ 贡献。

防水抑氡工程实施前后, 使用高纯锗探测器在CJPL-II C2实验厅开展了就地伽马能谱测量, 测量时间约1–3 d。

## 2.3 氡浓度测量

防水抑氡工程实施前后, 使用AlphaGuard氡测量仪对CJPL-II实验厅内空气氡浓度进行了长期监测, 每60 min获得1个空气氡浓度数据。受现场施工限制, 防水抑氡工程实施前, 对CJPL-II裸洞C2实验厅的空气氡浓度进行了测量; 防水抑氡工程实施后, 对CJPL-II的

A1实验厅的空气氡浓度进行了测量。

## 3 结果和讨论

### 3.1 防水抑氡层工艺面氡析出率

图3展示了岩壁和防水抑氡层速凝橡胶层工艺面的氡浓度曲线测量及拟合结果。防水抑氡层各工艺面拟合得到的氡析出率测量结果如表1所示, 当测量值大于检出限时, 认为测量结果显著, 此时报道测量值及其不确定度, 否则给出检出限。结果表明, 混凝土层可以阻挡原岩壁约一半的氡析出; 覆盖HDPE凹凸排水板后, 氡析出率大幅下降至原岩壁的1.28%; 由于水泥砂浆自身存在一定的氡析出, 覆盖水泥砂浆后氡析出率略微升高, 约为原岩壁的2.00%。防水抑氡层工艺面全部完成后, 氡析出率约为原岩壁的1%。

### 3.2 防水抑氡层表面氡析出率

各实验厅不同点位的防水抑氡层表面氡析出率均低于各自的检出限, 如图4展示了各点位的检出限结果。本测量方法没有考虑外界环境中的氡向集氡罩内的泄露, 因此测量得到的氡析出率为保守值。综上, CJPL-II各实验厅防水抑氡层氡析出率低于 $0.1 \text{ mBq m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。

### 3.3 就地伽马测量结果

防水抑氡工程实施前后, C2实验厅就地伽马能谱对比结果如图5所示。可以发现, 和2019年相比,  $^{214}\text{Pb}$ 和 $^{214}\text{Bi}$ 特征峰计数下降约60%, 氡子体对就地伽马能

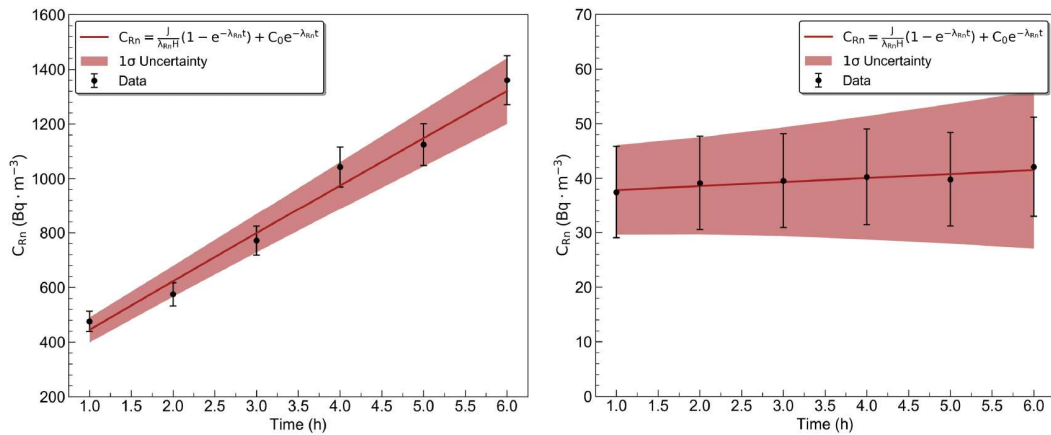


图 3 CJPL-II 岩壁(左图)和防水抑氡层速凝橡胶层工艺面(右图)氡析出率测量中的氡浓度曲线及拟合结果

**Figure 3** The radon concentration curves and fitting results from the radon exhalation rate measurements of the rock wall (left) and the rapid-setting rubber layer of the waterproof radon-suppression layers (right) at CJPL-II.

表 1 防水抑氡层各工艺面氡析出率测量结果

**Table 1** Radon exhalation rate measurement results of various process surfaces of waterproof and radon-suppression layers

| 工艺面名称     | 氡析出率<br>(mBq m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ) | 相对基准 (%)   |
|-----------|------------------------------------------------|------------|
| 岩壁(基准)    | 6.98±0.331                                     | 100        |
| 混凝土层      | 3.22±0.171                                     | 46.13±2.44 |
| HDPE凹凸排水板 | 0.09±0.057                                     | 1.28±0.81  |
| 速凝橡胶层     | ≤0.083                                         | ≤1.18      |
| 水泥砂浆层     | 0.14±0.065                                     | 2.00±0.93  |
| 聚氨酯胶泥层    | ≤0.087                                         | ≤1.24      |
| 聚氨酯面漆层    | ≤0.083                                         | ≤1.18      |
| 聚氨酯清漆层    | ≤0.088                                         | ≤1.26      |

谱中<sup>214</sup>Pb和<sup>214</sup>Bi特征峰的贡献降低约20%–40%。该结果表明防水抑氡工程有效地降低了实验室现场氡及其子体浓度,进而抑制了实验厅内的环境伽马本底。

### 3.4 氡浓度

防水抑氡工程实施前,实验厅内氡浓度测量结果如图6所示,此时新风系统未开,现场氡浓度较高,平均值为(208.0±0.1) Bq m<sup>-3</sup>。在新风系统开启后,实验室内氡浓度主要由新风风量、新风氡浓度、实验室表面氡析出共同决定,在不考虑内部设备的氡析出情况下,实验室内部的氡浓度可以用式(7)<sup>[15]</sup>描述:

$$C(t) = \frac{JS/V + C_b R}{R + \lambda} [1 - e^{-(R+\lambda)t}] + C_a e^{-(R+\lambda)t}, \quad (7)$$

其中 $J$ 为表面氡析出率,单位Bq m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>;  $S$ 为氡析出面

积,单位m<sup>2</sup>;  $V$ 为室内容积,单位m<sup>3</sup>;  $C_b$ 为外部环境的初始空气氡浓度,单位Bq m<sup>-3</sup>;  $R$ 为换气率,表示单位时间内空间的换气次数,  $R = T/V$ ,单位是次 h<sup>-1</sup>;  $T$ 表示单位时间内的通风量,单位m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>;  $C_a$ 是初始氡浓度,单位是Bq m<sup>-3</sup>;  $\lambda$ 为氡的衰变常数,值为0.00756 h<sup>-1</sup>。根据式(7),实验室内氡浓度将随新风量的增加而降低,并逐渐接近新风氡浓度。

根据工程设计, CJPL-II的8个实验厅尺寸相同,每个实验厅内部容积约11830 m<sup>3</sup>,四周墙壁(除实验室大门)、顶部和地面均铺设了防水抑氡层,表面积约3690 m<sup>2</sup>。根据3.2节,防水抑氡层表面氡析出率取0.1 mBq m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>,新风氡浓度均值为15 Bq m<sup>-3</sup>。新风系统正常运行时,每个实验厅新风量为2700–5000 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>,氡浓度的预测值为14.6–14.8 Bq m<sup>-3</sup>。防水抑氡工程实施后,实验厅氡浓度变化如图7所示,其中3月份新风系统调试所致新风量不足导致氡浓度有所上升。2月份新风系统正常运行,氡浓度均值为16.0±0.1 Bq m<sup>-3</sup>,与预测值接近。该结果表明,当新风系统正常运行时,室内氡浓度将主要取决于新风氡浓度。

## 4 结语

本文基于防水抑氡层建设期间对固定点位防水抑氡层各工艺面的氡析出率测量、建设后对防水抑氡层表面氡析出率的测量、以及建设前后的就地伽马能谱、氡浓度测量,评估了CJPL-II防水抑氡工程的综合

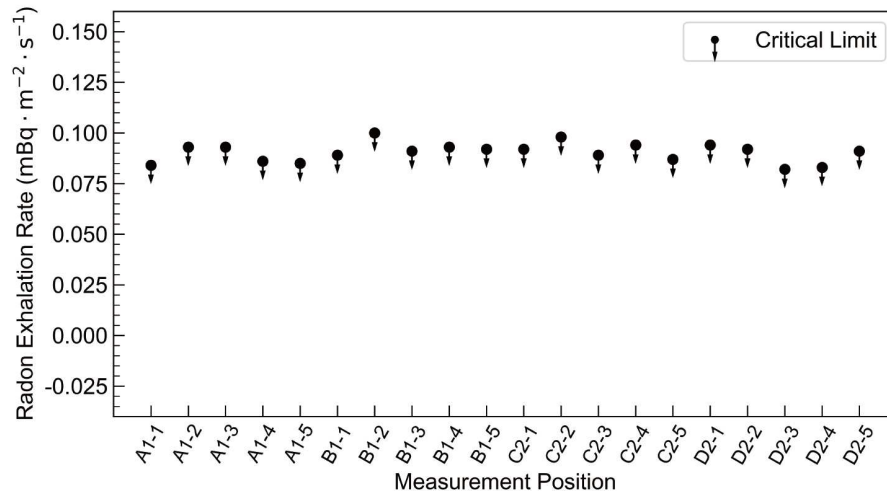


图 4 各实验厅不同点位防水抑氡层表面氡析出率检出限. 其中横轴为测量位置, A1-1 表示 A1 实验厅第一个点位测量结果, 以此类推

**Figure 4** Detection limits of surface radon exhalation rates at different positions in each experiment hall for waterproof and radon-suppression layers. The horizontal axis represents the measurement positions, with A1-1 indicating the first measurement point in hall A1, and so on.

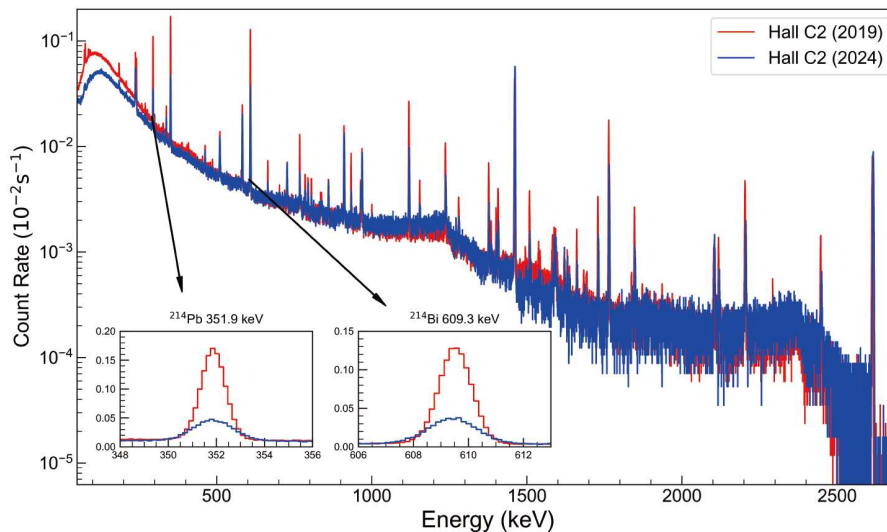


图 5 防水抑氡工程实施前后 C2 实验厅就地伽马能谱对比

**Figure 5** Comparison of *in-situ* gamma spectra in hall C2 before and after the implementation of the waterproof and radon-suppression project.

效果, 得出以下结论:

(1) 防水抑氡层有效抑制了岩壁的氡析出, 将氡析出率降至原岩壁的约 1%.

(2) 建设防水抑氡层后, 实验厅防水抑氡层表面氡析出率小于  $0.1 \text{ mBq m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , 实验厅空气氡浓度主要取决于送入新风的氡浓度.

(3) 比较同一实验厅在防水抑氡工程前后的就地伽马能谱测量结果, 发现工程实施后就地伽马能谱中

的  $^{214}\text{Pb}$  和  $^{214}\text{Bi}$  特征峰计数率下降约 60%, 氡子体  $^{214}\text{Pb}$  和  $^{214}\text{Bi}$  对就地伽马能谱中  $^{214}\text{Pb}$  和  $^{214}\text{Bi}$  特征峰的贡献降低约 20%–40%, 说明防水抑氡层有效降低了氡及其子体浓度.

(4) 防水抑氡建设后, 通过统计 2024 年 1 月 1 日至 3 月 31 日一个季度 A1 实验厅内空气氡浓度, 发现在新风系统持续运行时, A1 室内空气氡浓度为  $(20.3 \pm 0.1) \text{ Bq m}^{-3}$ , 约为建设前  $(208.0 \pm 0.1) \text{ Bq m}^{-3}$  的 1/10, 说明

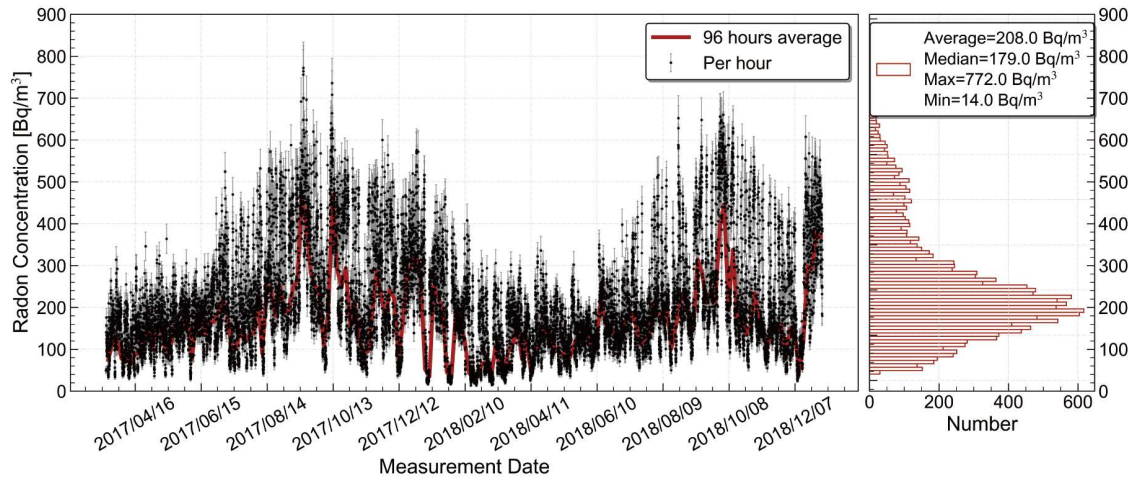


图 6 防水抑氡工程实施前C2实验厅氡浓度测量结果

Figure 6 Measurement results of radon concentration in hall C2 before the implementation of the waterproof and radon-suppression project.

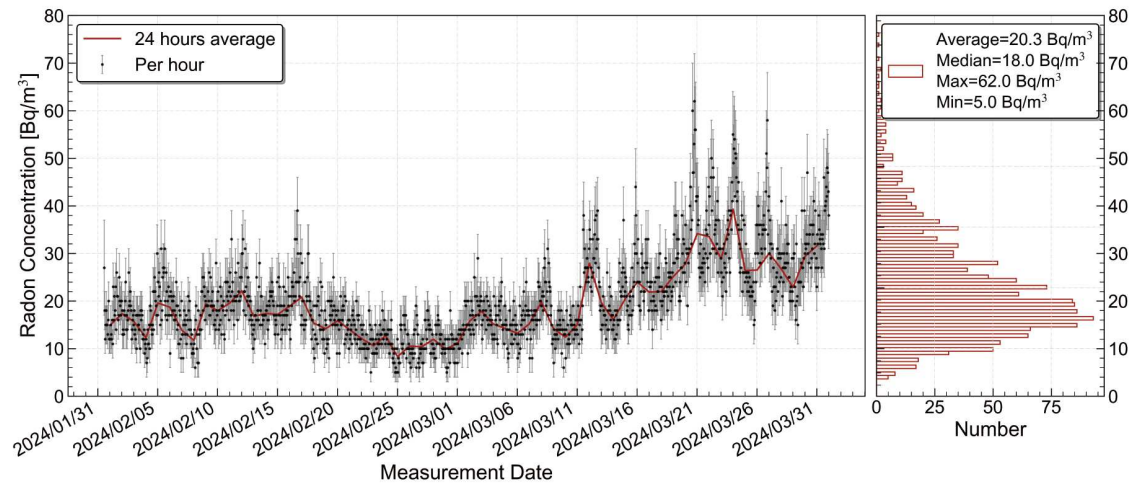


图 7 防水抑氡工程实施后A1实验厅氡浓度测量结果

Figure 7 Measurement results of radon concentration in hall A1 after the implementation of the waterproof and radon-suppression project.

防水抑氡层和新风系统起到了良好的抑氡效果。

综上, CJPL-II抑氡工程中所采用防水抑氡层和新风系统实现了良好的抑氡效果, 解决了极深地下超大

空间的漏水和高氡问题, 为地下实验室低本底环境提供了坚实的保障, 也为其他地下实验室防氡抑氡研究提供了重要参考。

**致谢** 感谢中国锦屏地下实验室现场工作人员对本研究提供的大力支持。中国锦屏地下实验室由清华大学与雅砻江流域水电开发有限公司共同管理和运行。

## 参考文献

- Cheng J, Liu J, Yue Q, et al. Key scientific issues in the research of deep underground frontier physics (in Chinese). Bull Natl Nat Sci Found China, 2022, 36: 447–459 [程建平, 柳卫平, 岳骞, 等. 深地前沿物理研究中的关键科学问题. 中国科学基金, 2022, 36: 447–459]

- 2 Wang Y, Liu J, Yang L, et al. Rare physical events at China Jinping underground laboratory (in Chinese). *Nucl Tech*, 2023, 46: 170–178 [王钰锋, 刘家璇, 杨丽桃, 等. 中国锦屏地下实验室与稀有物理实验. *核技术*, 2023, 46: 170–178]
- 3 Cheng J, Kang K, Li J, et al. The China Jinping underground laboratory and its early science. *Annual Rev*, 2017, 67: 231–251
- 4 Wu Y C, Hao X Q, Yue Q, et al. Measurement of cosmic ray flux in the China Jinping underground laboratory. *Chin Phys C*, 2013, 37: 086001
- 5 Palušová V, Breier R, Chauveau E, et al. Natural radionuclides as background sources in the Modane underground laboratory. *J Environ Radioact*, 2020, 216: 106185
- 6 Udovičić V, Grabež B, Dragić A, et al. Radon problem in an underground low-level laboratory. *Radiat Meas*, 2009, 44: 1009–1012
- 7 Udovicic V, Anicin I, Jokovic D, et al. Radon time-series analysis in the underground low-level laboratory in Belgrade, Serbia. *Radiat Prot Dosim*, 2011, 145: 155–158
- 8 Bandac I, Borjabad S, Ianni A, et al. Ultra-low background and environmental measurements at Laboratorio Subterráneo de Canfranc (LSC). *Appl Radiat Isotopes*, 2017, 126: 127–129
- 9 Bassignani A, Bam B B, Colombo G, et al. Review of long term radon studies at the gran sasso underground laboratory. *Radiat Meas*, 1995, 25: 557–560
- 10 Cheng J P, Li J Y, Zeng Z. Research on radioactive background of dark matter direct detection experiment: Taking Jinping underground facility project as example (in Chinese). *Exp Technol Manage*, 2021, 38: 1–10 [程建平, 李元景, 曾志. 暗物质直接探测实验辐射本底研究——以锦屏大设施项目为例. *实验技术与管理*, 2021, 38: 1–10]
- 11 Zhang Z. Calculation formula for radon exhalation rate using static method (in Chinese). *Metallurg Safety*, 1977, 6: 18–20 [张哲. 关于静态法测氡析出率的计算公式. *冶金安全*, 1977, 6: 18–20]
- 12 Currie L A. Limits for qualitative detection and quantitative determination. Application to radiochemistry. *Anal Chem*, 1968, 40: 586–593
- 13 Feng T, Cheng Z, Su C, et al. Study on applied technology of *in-situ*  $\gamma$  spectrometry (in Chinese). *Nucl Electron Detection Technol*, 2011, 31: 991–997, 1045 [冯天成, 成智威, 苏川英, 等. 就地 $\gamma$ 谱仪应用技术研究. *核电子学与探测技术*, 2011, 31: 991–997, 1045]
- 14 Beck H L, DeCampo J, Gogolak C. *In situ* Ge(Li) and NaI(Tl) Gamma-Ray Spectrometry. HASL-258, United States Atomic Energy Commision, New York. Health and Safety Lab, 1972
- 15 Hu J, Yang G, Hegedűs M, et al. Numerical modeling of the sources and behaviors of  $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{220}\text{Rn}$  and their progenies in the indoor environment —A review. *J Environ Radioact*, 2018, 189: 40–47

# Measurement of radon exhalation rate from the surface of cavity and effect analysis of waterproof and radon suppression project in China Jinping Underground Laboratory phase II

ZHANG QiuLi<sup>1</sup>, XU PengCheng<sup>1</sup>, DAI WenHan<sup>1</sup>, ZHANG Peng<sup>1</sup>, JING MingKun<sup>1</sup>,  
XUE Tao<sup>1</sup>, MA Hao<sup>1</sup>, ZENG Zhi<sup>1\*</sup> & CHENG JianPing<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup> Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China

<sup>2</sup> School of Physics and Astronomy, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

\*Corresponding authors (ZENG Zhi, email: [zengzhi@tsinghua.edu.cn](mailto:zengzhi@tsinghua.edu.cn); CHENG JianPing, E-mail: [chengjp@tsinghua.edu.cn](mailto:chengjp@tsinghua.edu.cn))

Radon is a major contributor to environmental radiation in underground laboratories. The Deep Underground and Ultra-low Radiation Background Facility for frontier physics experiments (DURF), a National Major Science and Technology Infrastructure Project, is being built based on phase II of the China Jinping Underground laboratory (CJPL-II). Through the installation of a new ventilation system and a waterproof radon-suppression layers, radon in the underground lab air is effectively controlled. To assess the effectiveness of the radon suppression project, including the impact of the waterproof radon-suppression layers on radon exhalation from the surrounding rock, as well as its overall effectiveness in reducing air radon concentrations, a surface radon exhalation rate detector was employed to measure radon exhalation rates from various surfaces of the waterproof radon-suppression layers. Additionally, radon concentrations and gamma background from radon progeny were measured using the AlphaGuard and a portable high-purity germanium spectrometer before and after the radon suppression project. The results revealed that following the installation of the waterproof radon-suppression layers, the surface radon exhalation rate dropped to less than 1% of the rock exhalation rate, with all experiment halls showing exhalation rates below  $0.1 \text{ mBq m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ . The count rates of the characteristic peaks of  $^{214}\text{Pb}$  and  $^{214}\text{Bi}$  in the *in-situ* gamma spectrum were reduced by about 60%, and the contribution of radon progeny  $^{214}\text{Pb}$  and  $^{214}\text{Bi}$  to the characteristic peaks in the spectrum decreased by approximately 20%–40%. The radon concentration in the experiment halls decreased to  $(20.3 \pm 0.1) \text{ Bq m}^{-3}$ , roughly one-tenth of the pre-construction level of  $(208.0 \pm 0.1) \text{ Bq m}^{-3}$ . These findings demonstrate that the radon suppression project successfully lowered radon and its progeny concentrations, laying a strong foundation for maintaining a low-background environment in the Phase II laboratory.

**China Jinping Underground laboratory, waterproof and radon-suppression layers, radon exhalation rate, Radon concentration**

PACS: 28.41.Te, 29.30.Kv, 92.20.Td

doi: [10.1360/SSPMA-2024-0435](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2024-0435)