



中国疾病预防控制中心  
辐射防护与核安全医学所  
National Institute for Radiological Protection, China CDC  
国家卫生健康委核事故医学应急中心  
Chinese Center for Medical Response to Radiation Emergency



# 《室内空气质量标准》检验方法 解读——放射性指标（氡）

武云云 研究员

中国疾病预防控制中心辐射防护与核安全医学所



# 目录

1. 背景知识
2. 检测方法
3. 质量控制
4. 要点解读



# 1

## 背景知识

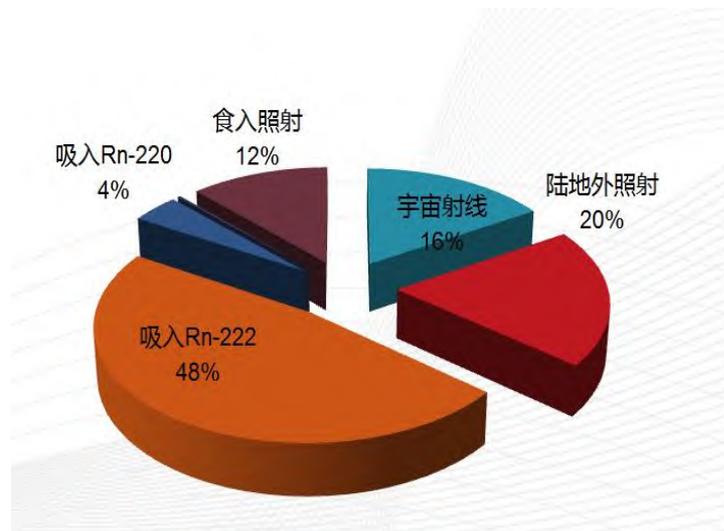


- 氡是一种无色无味的放射性气体，广泛存在于人类生活环境中。
- 氡是人类所受天然辐射照射的主要来源，约占天然辐射剂量的**52%**。

➤ 自然界3个同位素： $^{222}\text{Rn}$ ， $^{220}\text{Rn}$ ， $^{219}\text{Rn}$ ，分别来自天然放射系铀系、钍系和锕系。

➤ 通常，氡指 $^{222}\text{Rn}$ ，是铀系 $^{226}\text{Ra}$ 的衰变产物，半衰期为3.8d。

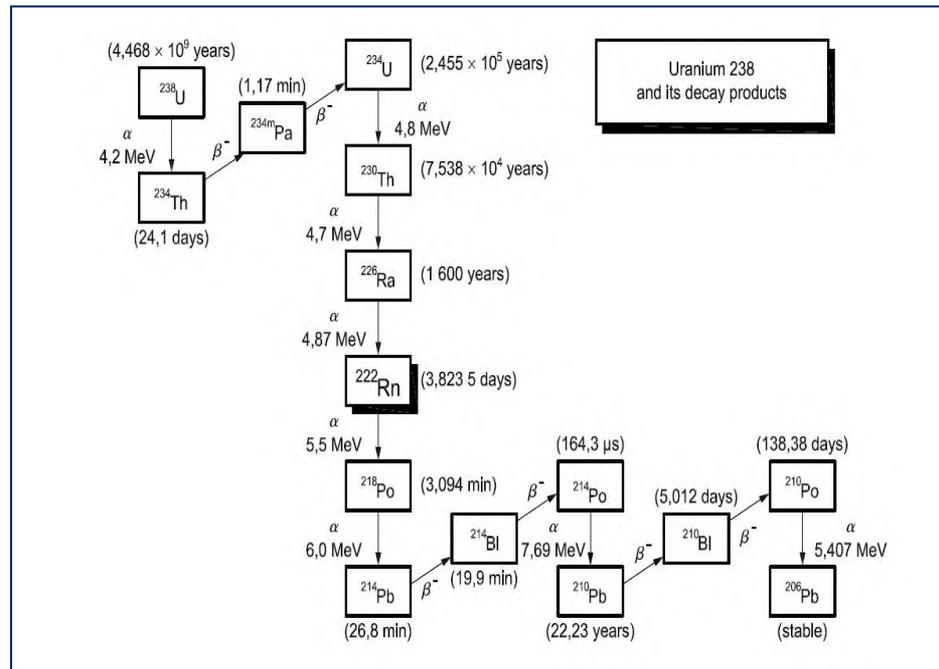
➤  $^{220}\text{Rn}$ 的半衰期为55.6s，只有在高 $^{232}\text{Th}$ 背景地区等特定环境下才有卫生学意义。



公众天然辐射剂量贡献（来源：UNSCEAR 2006）



- $^{222}\text{Rn}$ 是地壳中铀系的衰变产物，该系列第一个衰变核素是 $^{238}\text{U}$ ，半衰期是45亿年。
- $^{238}\text{U}$ 经过一系列衰变后生成 $^{226}\text{Ra}$ ，其半衰期为1602年，是 $^{222}\text{Rn}$ 的直接母体。
- $^{222}\text{Rn}$ 子体可分为短寿命子体和长寿命子体，有剂量学意义的是 $^{222}\text{Rn}$ 的短寿命子体。



U-238衰变链



- 铀（镭）是自然界中广泛分布的微量元素，陆地岩石、土壤中都含铀（镭），而在花岗岩中的含量最高。
- 如果含水层含有天然放射性值比较高（如花岗岩）， $^{222}\text{Rn}$  可能会在地下水中富集。
- 氡从岩石、土壤析出到空气中受诸如岩土中镭含量、孔隙度、水分以及气压、温度等许多因素的影响。
- 环境空气中的氡77.7%来源于陆地释放。其次，陆地植物、地下水载带约占10.2%，核工业释放约占10.2%，磷酸盐工业释放约占1%。



## 室内氡的来源

- (1) 建筑物地基和周围土壤；
- (2) 建筑材料中析出的氡；
- (3) 家用燃料释放的氡；
- (4) 生活用水载带的氡；
- (5) 室外空气中进入室内的氡。



➤ 房屋地基及周围土壤主要对三层以下建筑的室内氡有贡献。

➤ **建筑材料**是多层和高层建筑室内氡主要来源。

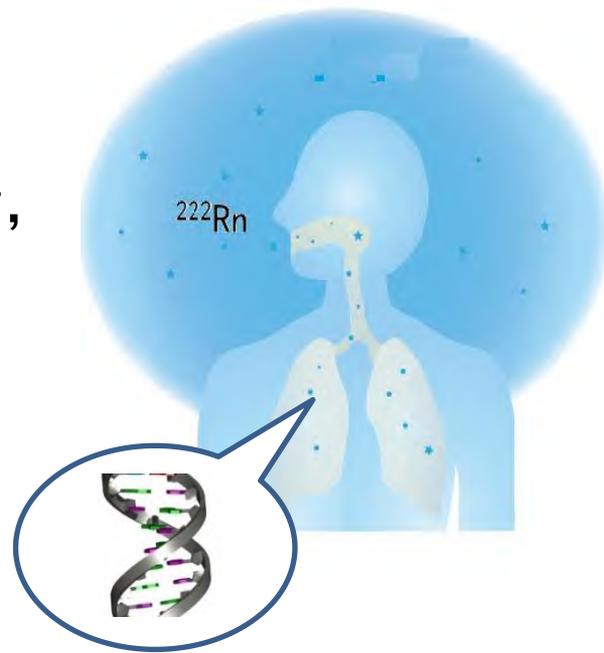


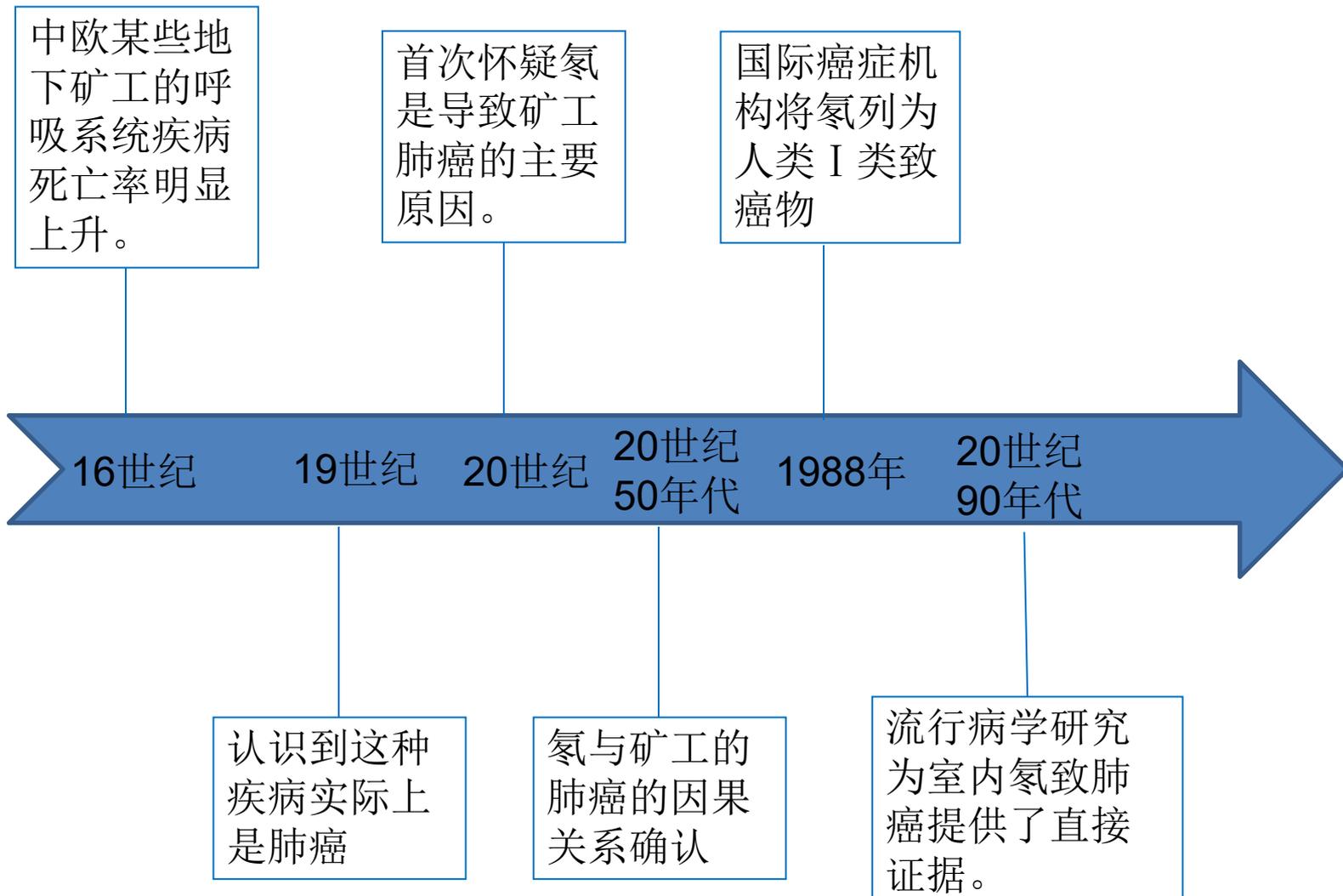
➤ **暴露途径：呼吸途径**

➤ **作用机制：**  $\alpha$  粒子对肺部敏感细胞，产生辐射照射，造成DNA遗传损伤。

➤ 氡的大部分辐射暴露来自吸入其短寿命子体。

➤ DNA损伤可能发生在任何氡暴露水平，即使是单一的  $\alpha$  粒子也会对细胞造成严重的遗传损伤。





健康影响



►近期，全球3个居室氡致肺癌流行病学联合分析，包括欧洲的13项研究的联合、北美的7项研究的联合及中国2项研究的联合。

	研究数量	肺癌数量	对照数量	暴露窗口 <sup>a</sup>	氡浓度增加100 Bq/m <sup>3</sup> 肺癌增加风险比例	
					根据测量氡浓度	长期平均氡浓度 <sup>b</sup>
欧洲	13	7 148	14 208	5-35	8 (3, 16)	16 (5, 31)
北美	7	3 662	4 966	5-30	11 (0, 28)	-
中国	2	1 050	1 995	5-30	13 (1, 36)	-
加权均值					10	~20 <sup>c</sup>

a 考虑肺癌病例诊断前5-35年期间的氡浓度

b调整了室内氡浓度年与年之间的随机变化

c根据 BEIR VI分析，所有矿工暴露< 50 WLM 和 < 0.5 WL 的矿工估计数的比率



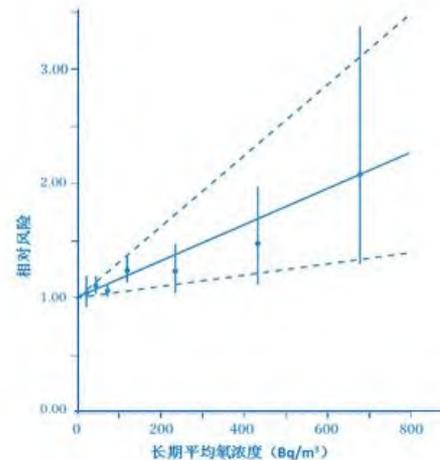
➤2009年，世界卫生组织发布《室内氡手册》，基于最新的流行病学研究，认为室内氡是继吸烟后导致公众肺癌的第二大危险因素，约有3%-14%的肺癌由室内氡导致。

➤绝大多数肺癌与中低氡浓度有关，而不是高浓度氡。

➤吸烟者因氡导致的肺癌风险估计比非吸烟者高出25倍。

➤氡致肺癌剂量-反应关系呈线性无阈。

➤WHO建议室内氡参考水平为 $100\text{Bq}/\text{m}^3$ ；如果部分国家达不到该标准，建议室内氡参考水平不超过 $300\text{Bq}/\text{m}^3$



来源：Darby et al. 2005，

## 不同时期我国室内氡浓度调查汇总

我国室内氡水平

调查	时间	地区	n	AM	
<b>NIRP</b>	1986~1994	26	9967	23.7	23.2
环保	1987~1990	15	1610	20.2	
<b>NIRP</b>	2001-2004	26	3098	43.8	38.9
核总	2006~2010	8	2029	32.6	
建设部	2008~2010	9	619	34.9	
南华大学	2012	江苏省	980	30	65.2
陕西师大	2015	西安	92	89.9	
环保	2015	乌鲁木齐	141	55.4	
<b>NIRP</b>	2016	深圳	108	63.9	
建设部	2016	广州	1796	84.2	
<b>NIRP</b>	2016	北京	86	60.0	

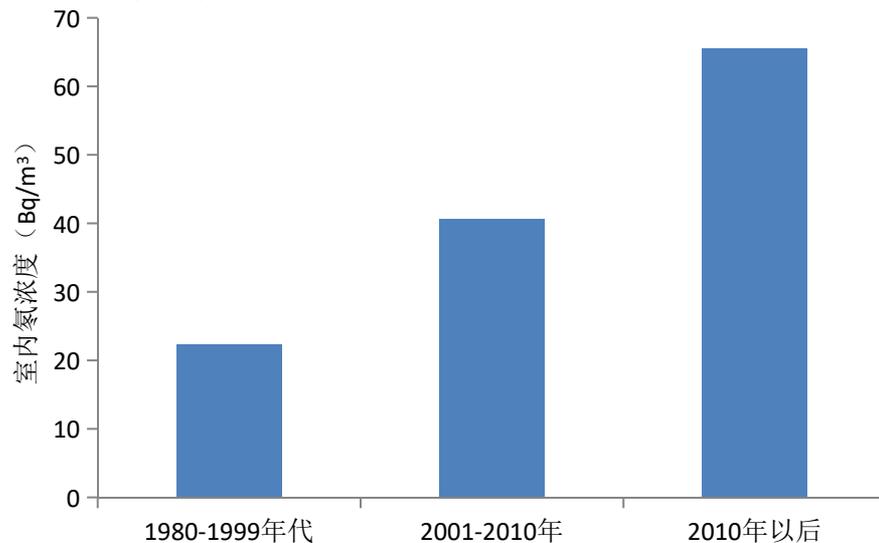
近年调查结果显示，我国室内氡浓度呈整体增高趋势。



## ➤我国室内氡浓度呈现持续增长的趋势。

主要原因：

- ①采用新型建材（粉煤灰、加气混凝土等）；
- ②新的建筑结构和节能设计（墙体保温等）；
- ③新的生活方式（空调使用）等。



不同时期室内氡浓度变化



# 2

## 检测方法



## 方法分类

闪烁室法

脉冲电离室

静电收集法

$\alpha$  能谱法

$\gamma$  能谱法

固体径迹法

主动测量

被动测量

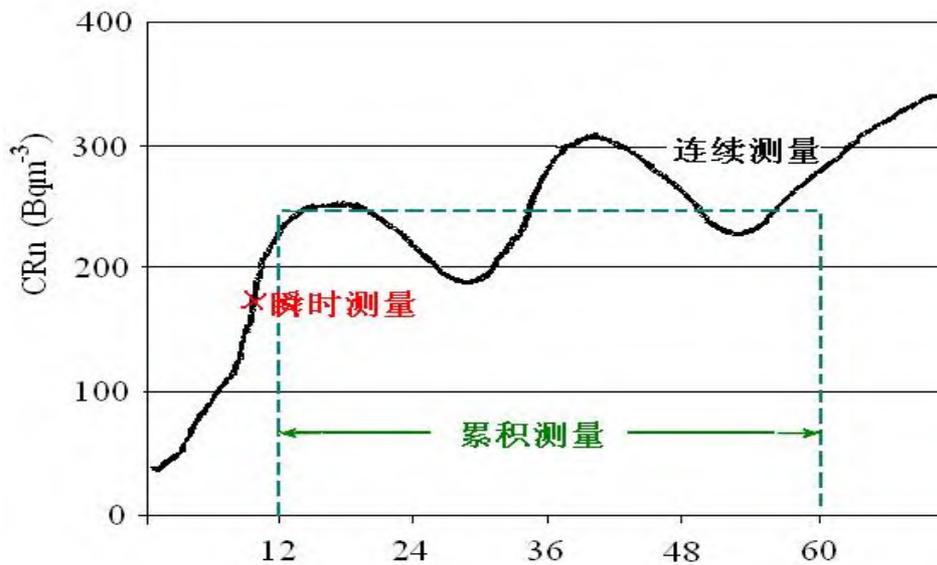
累积测量

瞬时测量

连续测量



## 不同方法与测量时间的关系





	瞬时(快速)测量	连续(实时)测量	累积测量
采样时间	< 1小时	n小时~n天	2天~1年
测量技术	闪烁室、气袋法、 双滤膜法、气球 法、RaA法	静电收集法、 脉冲电离室、 闪烁室	$\alpha$ 径迹法 活性炭盒法 (短期) 驻极体探测器



原标准中的检验方法: 闪烁瓶法、**径迹蚀刻法**、双滤膜法和**活性炭盒法**。

修订后的检验方法:

1. 固体核径迹测量方法

2. 连续测量方法

闪烁室

脉冲电离室

静电收集法

3. 活性炭盒测量方法



本次修订保留径迹法和活性炭盒法，增加具有快速、灵敏、便携、易操作等特点的连续测量方法，删除误差大、操作不方便等问题的闪烁瓶法和双滤膜法。



## 固体核径迹法

- 原理：氡经过一系列衰变产生的  $\alpha$  粒子碰撞到径迹片上，产生损伤径迹（潜径迹），经蚀刻后，这些潜径迹扩大为可观察径迹。根据径迹密度和在标准浓度暴露下的刻度系数可计算得到被测场所的平均氡浓度。





➤试剂和材料:

探测器 (CR-39)、采样盒、蚀刻液 (氢氧化钠或氢氧化钾)

➤仪器设备:

恒温水浴锅

蚀刻容器

测读装置



恒温水浴锅



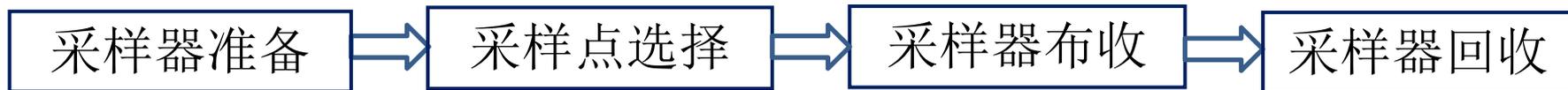
显微镜



CR-39



## 样品采集：



➤采样点选择：人员经常停留的房间，住宅选择卧室、客厅或活动室。工作场所选择办公室、工作间或值班室。

➤布放位置：可以平放在桌子、衣柜、书架、床头柜等表面，**距离墙壁的至少为20 cm**，避免选择空气不流动的死角和室内通风速度较快的风道、易被干扰的地方。期间严禁打开、随意挪动位置，防止水喷洒浸泡到探测器，防止损坏，丢失。

➤记录编号、地址、布放时间、回收时间、房屋信息、通风情况等信息。

➤布放时间：3-6个月，

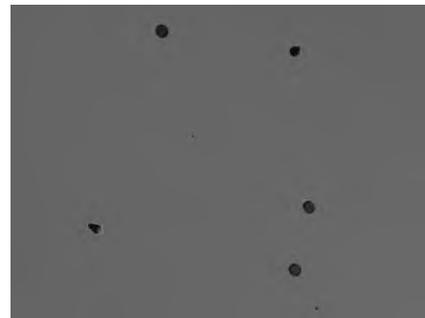


## 分析步骤:



- 将探测器放入蚀刻容器中，加入蚀刻液，放入恒温水浴箱中，按预订的蚀刻温度和时间蚀刻。
- 将处理好的探测器用测读装置测读，计算单位面积的径迹数。
- 计算

$$C_{Rn} = \frac{(n - n_b)}{T \cdot F}$$





特点：用于环境水平氡浓度的累积测量，得到平均浓度，避免了由于时间、气象因素的影响。方法稳定、测量结果重现性好，而且体积小，便于布放和邮寄，操作简便，价格低廉。



## 连续测量方法

- 原理：

  - 闪烁室法

  - 脉冲电离室

  - 静电收集法



- 仪器和设备：

  - 闪烁室测氡仪、脉冲电离室测氡仪、静电收集型测氡仪



## 测量步骤

- 1、使用前应对仪器或系统进行检查，如电池电压、各种参数、测量模式、时间间隔等应符合测量要求；仪器的本底和稳定性应与校准时一致。
- 2、连续测量一般为短期测量，季节和通风状况会对测量结果产生影响，必要时需要对测量场所密闭后进行测量。
- 3、将仪器放置到选定的测量位置，按操作程序进行测量。
- 4、按要求进行现场记录。
- 5、有些仪器需要1 h - 4 h的稳定时间，测量时间至少为 24 h连续测量。
- 6、测量结束应对现场进行检查，记录可能影响测量结果的因素及与实验条件不符的情况。
- 7、取仪器稳定后测量值的算术平均值作为该点的测量结果，然后用体积活度响应校正。



## 三种测量技术的比较

方法	优点	缺点
闪烁室法	快速、 <b>灵敏度高</b> 、取样简单、对住户干扰小、能反映氡浓度的时间变化	需要事先对房间条件进行控制、 <b>闪烁室本底易增高且清除困难</b> 、瞬时取样结果误差较大、 <b>对气压敏感</b>
电离室法	灵敏度高、 <b>稳定性好</b> 、现场能得到结果、能反映氡浓度的时间变化	需要事先对房间条件进行控制、怕振动、 <b>对气压敏感</b> 、操作人员需培训、 <b>费用较高</b>
静电收集法	快速、灵敏度高、易操作、 <b>可分辨<math>\alpha</math>粒子的能量</b> 、现场能得到结果、能反映氡浓度的时间变化	需要事先对房间条件进行控制、 <b>对湿度敏感</b> 、注意校正氡子体残留对本底的影响、有些仪器需要稳定时间

特点：快速、灵敏、便携、易操作，可以反映氡浓度的时间变化，现场能得到结果。



## 注意事项

- 闪烁室的本底要定期测量，或每次测量前都要测量。
- 应定期对仪器和系统进行定期维护，包括常规的性能检验，使仪器或测量装置的工作参数如本底、探测效率、时间间隔、泵的流量等处于正常工作状态。当发现某些参数在预定的控制值以外时，应及时查找原因，进行适当的校正或调整。定期更换滤膜、防止滤膜阻塞。
- 针对不同测量目的，选择合适的测量仪器及工作模式。



## 活性炭盒法

➤ **原理**：氡气扩散进入活性炭盒内被活性炭吸附，同时衰变产生的氡子体沉积在活性炭内。一定时间后，活性炭对氡的吸附和解吸过程达到动态平衡，活性炭盒内氡与其子体达到放射平衡。用  $\gamma$  谱仪测量活性炭盒内 **氡子体特征  $\gamma$  射线峰（或峰群）强度**，根据特征峰面积计算氡浓度。

➤ **试剂和材料**：活性炭、采样盒、金属网

➤ **仪器和设备**：烘箱、电子天平、 $\gamma$  谱仪



活性炭盒



## 测量步骤：



- 制备：选定的活性炭放入烘箱内，120 °C下烘烤5 h~6 h，称取一定量烘烤好的活性炭装入采样盒中，密封，称重。
- 将活性炭盒敞开放在选定的采样点上，放置2 d~7 d后终止采样，将活性炭盒密封，做好记录，立刻送回实验室测量。采样周期为2-7天。
- 采样停止3 h后立即测量，测量前再次称取活性炭盒的总质量，以计算水分吸收量。将活性炭盒放在 $\gamma$ 谱仪上计数，测量条件与刻度时一致。一般测量氡子体特征 $\gamma$ 射线峰（或峰群）面积。



# 计算

$$C_{Rn} = \left( \frac{n_N}{t_g} - \frac{n_{N0}}{t_0} \right) \cdot \frac{f_H \cdot f_S \cdot f_d}{F_C}$$
$$f_d^{-1} = e^{\lambda \cdot t_i} \cdot \left( \frac{\lambda \cdot t_g}{1 - e^{-\lambda \cdot t_g}} \right)$$

- $C_{Rn}$  ——氡浓度平均值，单位为贝可每立方米 ( $Bq/m^3$ ) ；  
 $n_N$  ——特征峰（群峰）对应的净计数，单位为个；  
 $t_g$  ——样品测量时间，单位为秒（s）；  
 $n_{N0}$  ——特征峰（群峰）对应的本底计数，单位为个；  
 $t_0$  ——本底测量时间，单位为秒（s）；  
 $f_H$  ——湿度修正因子，无量纲；  
 $f_S$  ——采样时间和刻度暴露时间不一致造成的修正系数，无量纲；  
 $f_d$  ——衰变修正系数，无量纲；  
 $F_C$  ——刻度系数，单位为个每秒每贝可每立方米 ( $个/s$ ) / ( $Bq/m^3$ ) ；  
 $\lambda$  ——氡衰变常数， $2.10 \times 10^{-6} s^{-1}$ ；  
 $t_i$  ——采样结束到开始测量的开始间隔，单位为秒（s）。

➤ 等同采纳ISO活性炭盒测氡方法。



- 优点:成本低,对于已有 $\gamma$ 能谱仪的单位,只需很少花费即可开展工作,而且操作简便,无需特殊技能。
- 缺点:对温度、湿度敏感,不适合室外和湿度大的地区使用;采样后必须尽快(小于7天)送回实验室分析,否则氡将衰变掉。



## 检测方法选择

- 根据检测目的和时间要求选择不同的测量方法，并了解不同方法的使用范围和局限性。
- 如果需要了解被测场所的氡浓度变化，须选择连续测量；进行剂量估算或流行病学研究应选择长期累积测量。



# 3

## 质量控制



## 测量装置的刻度、检定/校准

- 仪器和测量装置应在国家计量授权的标准氡室中进行刻度或校准，至少每年在标准氡室检定一次，仪器修理或调整后需重新检定。
- 主动式测量装置刻度的全部过程应按与现场操作一致的测量程序在标准氡室进行。
- 被动式累积测量装置每次刻度需至少选择两种不同的氡浓度水平，固体核径迹每个水平放置至少10个测量装置；对于活性炭盒，每种条件至少放置5个活性炭盒，需要进行3个相对湿度（ $\sim 30\%$ 、 $\sim 50\%$ 和 $\sim 80\%$ ）的刻度。
- 测量装置的校准在标准氡室进行，以确定和校验测量装置对氡的响应能力和测量准确性。



标准氡室



## 本底测量

每次检定前需要对仪器进行本底测量。对于被动式探测器，每批需要留5%或5个~10个探测器进行本底测量，需要运输或邮寄时，本底应与测量用探测器同时邮寄。

## 平行测量

在选定的采样点布放2个采样器平行采样，数量不低于布放总数的10%，每次平行测量测定值之差与平均值的相对偏差不超过20%。

## 实验室比对

定期参加比对，检查不同实验室或测量方法间是否存在系统误差。

## 常规性能检查

应定期对（如每次测量前）对仪器和系统进行常规性能检查，使本底，泵流量等参数处于正常状态，发现问题，应查找原因，及时进行调整和校正。



## 特殊情况

- 固体核径迹探测器应在失效日期前使用，若发现探测器有裂痕或其他变质现象，立即停止使用；采样器的准备应在低氡环境中进行，注意**静电影响**。
- 应了解活性炭盒对氡吸附的饱和特性，合理选择采样时间，避免活性炭饱和，避免在氡浓度急剧变化的环境中使用。



# 4

## 要点解读



➤ 氡 ( $^{222}\text{Rn}$ ) : 年平均浓度 (参考水平)  $\leq 300 \text{ Bq/m}^3$

➤ 年平均浓度应至少采样3个月 (包括冬季)

- 参考水平表示室内可接受的最大年平均氡浓度，并非安全与危险的严格界限，为国家可接受的室内氡风险水平。
- 当室内氡浓度超过该参考水平时，建议采取行动降低室内氡浓度。当室内氡浓度低于该参考水平时，也可以采取防护措施降低室内氡浓度，体现辐射防护最优化原则。
- 参考水平替代行动水平，体现辐射防护最优化原则，与国际接轨。





1. 固体核径迹测量方法（**第一法，仲裁法**） $\geq 3$ 个月
2. 连续测量方法（**筛选**）至少24小时
  - 闪烁室
  - 脉冲电离室
  - 静电收集法
3. 活性炭盒测量方法（**筛选**） 2 d~7 d



包括连续测量和累积测量



2021年，生态环境部《环境空气中氡的标准测量方法》（HJ 1212-2021）  
修订后：

脉冲电离室法  
静电收集法  
径迹蚀刻法  
活性炭盒法

包括：瞬时 连续 累积测量





## 两个标准比较

标准	《环境空气中氡的标准测量方法》 HJ1212-2021		《室内空气质量标准》 GB18883-2022	
	采样方式	推荐采样时间	采样方式	推荐采样时间
径迹蚀刻法	累积	30 d~1 y	累积	≥3个月
活性炭盒法	累积	3 d~7 d	累积	2 d~7 d
<b>闪烁室法</b>	-	-	连续	至少24小时
脉冲电离室法	瞬时	<b>4 h ~ 1 d</b>	连续	至少24小时
	连续	2 d~7 d		
静电收集法	瞬时	<b>4 h ~ 1 d</b>	连续	至少24小时
	连续	2 d~7 d		

两个标准测量方法，采样方式以及采样时间有差异。



- 长期累积测量是评估室内年平均氡浓度的首选方法，室内空气中氡的年平均浓度需要至少三个月或更长时间的可靠测量。
- 由于室内氡浓度随时间变化大，大多数情况下，短期测量不可靠；短期测量结果仅作为实际氡浓度的粗略估计。



中国疾病预防控制中心  
辐射防护与核安全医学所  
National Institute for Radiological Protection, China CDC  
国家卫生健康委核事故医学应急中心  
Chinese Center for Medical Response to Radiation Emergency



谢谢!