

探析土壤氡污染及检测方法研究

赵俊杰

山西佳东建筑工程质量检测有限公司 山西忻州 034000

摘要: 作为天然放射性惰性气体的氡, 在土壤中的富集与释放已成为威胁人居安全和生态环境的突出隐患, 土壤作为其主要赋存载体, 精准管控土壤氡污染对保障人体健康意义重大。本文系统阐述土壤氡特性、来源及迁移规律, 深入分析其健康与环境危害, 全面梳理主动式与被动式检测方法的技术特性, 结合案例明确检测方法选择与质量控制要点, 提出针对性防控策略。研究成果为土壤氡污染的科学评估、精准检测及有效治理提供理论支撑与技术参考。

关键词: 土壤氡; 放射性污染; 迁移规律; 检测技术

引言

随着城市化进程加速与人居环境质量要求提升, 室内外放射性污染问题愈发受到社会关注, 无色无味的氡作为铀-238衰变链重要子体, 已被证实为除吸烟外肺癌的第二大诱因, 全球约10%肺癌病例与氡暴露相关。土壤是氡最主要生成与释放场所, 建筑物地基下的土壤氡可通过多种缝隙渗透至室内, 占室内氡来源的60%以上。我国地质条件复杂, 土壤氡污染呈明显区域性, 房地产开发与地下工程建设更凸显其威胁, 相关检测防控已纳入法规体系, 加强研究极具现实意义。

1 土壤氡的迁移规律与影响因素

1.1 土壤氡的迁移机制

在土壤孔隙结构与外界环境共同作用下, 土壤氡的迁移展现出复杂物理特性, 该过程依赖多种作用力驱动, 其中扩散与对流构成两种核心路径, 二者作用强度随温度、气压等环境条件变化呈现明显差异。扩散凭借氡自身浓度梯度形成动力, 氡自土壤深层高浓度区域向地表或孔隙空气低浓度区域移动, 这一过程遵循菲克定律, 扩散系数受土壤孔隙度、连通性及颗粒粒径影响, 砂土因孔隙通畅系数达 10^{-6} – $10^{-5} \text{m}^2/\text{s}$, 远高于黏土的 10^{-8} – $10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$ 。对流则依托孔隙流体流动实现, 气压差促使土壤孔隙内氡在低压时向地表涌动, 温度差引发的空气升降与地下水流动, 均会带动氡完成迁移^[1]。

1.2 影响土壤氡迁移与释放的关键因素

1.2.1 土壤理化性质: 氡迁移的内在驱动

土壤理化性质作为内在因素, 通过孔隙特征与物质组成

调控氡的迁移释放, 核心参数涵盖孔隙度、质地、含水量及有机质含量。孔隙度直接决定迁移通道通畅度, 数值越高则氡扩散对流阻力越小, 释放速率随之加快。砂土等粗质地土壤孔隙连通性优良, 氡释放率显著高于黏土等细质地土壤。含水量影响呈双重性, 低含水量填充孔隙抑制释放, 高含水量虽降低扩散系数, 但地下水流动可能助推对流迁移。有机质凭借大比表面积吸附部分氡, 间接降低其释放速率。

1.2.2 地质构造: 氡分布的宏观框架

地质构造从宏观上塑造土壤氡的分布格局, 断裂带与褶皱带常成为氡富集核心区域。断裂带岩石破碎、裂隙发育, 为地下含氡气体提供便捷迁移通道, 促使氡快速抵达地表形成高值异常区, 郟庐断裂带周边部分点位浓度已超 $100000 \text{Bq}/\text{m}^3$ 。背斜顶部岩层受张力裂隙发育, 氡易在此聚集; 向斜槽部岩层挤压孔隙闭合, 限制氡的迁移。下伏岩层若富含铀、钍等放射性元素, 会直接提升土壤氡的生成潜力。

1.2.3 气象条件: 氡释放的外部调控

气象条件作为外部因素, 通过温度、气压、降水等参数动态调控土壤氡释放。温度升高加快孔隙空气流动, 推动氡扩散对流以提升释放率, 低温则产生抑制作用。气压与释放呈负相关, 台风等低气压天气促使土壤孔隙压力高于大气, 引发氡向地表涌动。短期强降水因快速提升含水量抑制释放, 长期干旱后的适度降水却能改善孔隙结构助力释放。风速增大通过扰动气流带走地表氡, 扩大浓度梯度以促进释放。

2 土壤氡污染的健康危害与环境影响

2.1 对人体健康的辐射危害

作为天然放射性惰性气体的土壤氡, 其对人体健康的危

害完全依托氡及其子体释放的放射性辐射,这种辐射损伤自带累积性与潜伏性特征,长期暴露状态下会严重损害人体呼吸系统与免疫系统,诱发肺癌成为最突出的健康威胁^[2]。氡及其子体经呼吸道进入人体后,化学活性较强的氡子体会吸附于肺部黏膜或肺泡壁,衰变释放的 α 粒子直接损伤肺部细胞。 α 粒子电离能力强,短距离内传递大量能量,造成肺部细胞DNA断裂突变,未及时修复便会引发细胞异常增殖。氡浓度达 100 Bq/m^3 时肺癌发病率提升1.08倍, 400 Bq/m^3 时提升1.36倍,同时还会损伤呼吸道黏膜、破坏免疫细胞,儿童与孕妇受害更甚。

2.2 对环境的潜在影响

在对人体健康产生直接威胁的同时,土壤氡污染还会以潜移默化的方式作用于生态环境,这种影响聚焦于土壤生态系统与大气环境两大载体,其危害虽不即时显现却具备长期累积效应。土壤生态系统直接承载土壤氡,高浓度辐射会损伤土壤微生物与动植物。微生物作为生态核心,细胞结构遭破坏后活性与多样性下降,高氡区域细菌真菌数量减少30%~50%,有机质分解速率降低20%~30%。植物细胞组织受损会抑制光合作用,小麦水稻等作物生长指标降低10%~20%,产量下降15%~25%。土壤氡持续释放补充大气放射性物质,形成的放射性气溶胶随环流扩散,参与大气反应后威胁大气生态。

3 土壤氡污染检测方法及技术特性

土壤氡污染检测是评估污染程度、制定防控措施的基础,根据检测原理和操作方式的不同,可将土壤氡检测方法分为主动式检测和被动式检测两大类,两类方法各有特点,适用于不同的检测场景。

3.1 主动式检测方法

3.1.1 电离室法

电离室法是基于氡及其子体的电离特性设计的检测方法,其核心原理是:氡及其子体衰变过程中释放的 α 粒子具有较强的电离能力,能够使电离室内的气体发生电离,产生正负离子;在电离室两端施加高压电场的作用下,正负离子会向两极移动,形成微弱的电离电流;电离电流的大小与氡浓度呈正相关关系,通过测量电离电流的强度即可计算出土壤氡的浓度。电离室法的检测设备主要由电离室、高压电源、微弱电流测量仪等组成,根据电离室的结构不同,可分为脉冲电离室和积分电离室两种类型^[3]。脉冲电离室通过记

录每个 α 粒子电离产生的脉冲信号来计算氡浓度,适用于低浓度氡的检测;积分电离室则通过测量一定时间内电离电流的积分值来计算氡浓度,适用于高浓度氡的检测。电离室法的检测范围通常为 $10\text{--}10^6\text{ Bq/m}^3$,检测精度可达 $\pm 5\%$,响应时间为1~5分钟,具有检测速度快、精度高、稳定性好的优点。但该方法的检测设备体积较大,携带不便,且受温度、湿度等环境因素的影响较大,在高温、高湿环境下需要进行校准。

3.1.2 闪烁瓶法

闪烁瓶法是利用氡及其子体与闪烁体作用产生荧光的特性进行检测的方法,其原理是:将采集到的土壤孔隙空气注入含有闪烁体的闪烁瓶中,氡及其子体衰变释放的 α 粒子撞击闪烁体,使闪烁体发出荧光;荧光信号被光电倍增管接收并转换为电信号,经过放大、甄别等处理后,记录电信号的脉冲数;脉冲数与氡浓度呈正相关关系,通过校准曲线即可计算出土壤氡的浓度。闪烁瓶法的检测设备主要由闪烁瓶、光电倍增管、信号处理系统等组成,常用的闪烁体包括 ZnS(Ag) 、塑料闪烁体等。该方法的检测范围通常为 $10\text{--}10^5\text{ Bq/m}^3$,检测精度可达 $\pm 8\%$,响应时间为1~3分钟,具有检测速度快、设备体积相对较小的优点。但闪烁体易受空气中的灰尘、水汽等杂质的污染,导致检测灵敏度下降,因此在检测前需要对闪烁瓶进行清洁和干燥处理。此外,闪烁瓶的探测效率会随使用时间的延长而降低,需要定期进行校准^[4]。

3.1.3 泵吸式活性炭法

泵吸式活性炭法是基于活性炭对氡的吸附特性设计的主动检测方法,其原理是:通过真空泵将土壤孔隙空气抽取到装有活性炭的吸附管中,氡被活性炭吸附并富集;吸附完成后,将活性炭吸附管放入专用的测量仪器中,利用 γ 射线能谱仪测量活性炭中氡子体(主要是铅-214、铋-214)的 γ 射线强度;根据 γ 射线强度与氡浓度的校准关系,计算出土壤氡的浓度。该方法的检测流程主要包括样品采集、吸附、测量三个步骤,检测设备由真空泵、活性炭吸附管、 γ 射线能谱仪等组成。检测范围通常为 $100\text{--}10^6\text{ Bq/m}^3$,检测精度可达 $\pm 10\%$,采样时间为5~30分钟,测量时间为10~30分钟。其优点是设备携带方便、操作简单,适用于野外大面积检测;缺点是检测周期相对较长,且活性炭的吸附效率受温度、湿度等环境因素的影响较大,需要在检测过程

中进行环境参数的记录和校准。

3.2 被动式检测方法

3.2.1 径迹蚀刻法

径迹蚀刻法是基于氡及其子体的 α 粒子对固体介质的损伤效应设计的检测方法，其原理是：将含有聚碳酸酯、CR-39 等固体径迹探测器的检测盒埋入土壤中，土壤中的氡及其子体衰变释放的 α 粒子撞击探测器表面，形成微小的损伤径迹；经过一定时间的累积后，将探测器取出，用化学蚀刻剂对探测器进行蚀刻处理，使损伤径迹扩大；通过显微镜观察并计数蚀刻后的径迹数量，径迹密度与氡浓度和暴露时间的乘积呈正相关关系，根据校准系数即可计算出土壤氡的平均浓度^[5]。径迹蚀刻法的检测设备主要由固体径迹探测器、检测盒、化学蚀刻装置、显微镜等组成。该方法的检测范围通常为 $10\text{--}10^4\text{Bq/m}^3$ ，检测精度可达 $\pm 15\%$ ，暴露时间通常为 1-3 个月，具有操作简单、成本低、适用于长期监测的优点。但该方法的检测周期长，无法实现实时检测，且径迹的计数受蚀刻条件的影响较大，需要严格控制蚀刻工艺。此外，探测器易受外界机械损伤和化学腐蚀的影响，导致检测误差增大。

3.2.2 被动式活性炭法

被动式活性炭法是利用活性炭对氡的被动吸附作用进行检测的方法，其原理与泵吸式活性炭法类似，但无需真空泵等主动采样设备，而是将装有活性炭的检测盒直接埋入土壤中，通过土壤孔隙空气与活性炭之间的浓度差，使氡被动

扩散至活性炭表面并被吸附；暴露一定时间后，将检测盒取出，利用 γ 射线能谱仪测量活性炭中氡子体的 γ 射线强度，计算土壤氡的平均浓度，该方法的检测设备主要由活性炭检测盒、 γ 射线能谱仪等组成，检测范围通常为 $50\text{--}10^5\text{Bq/m}^3$ ，检测精度可达 $\pm 12\%$ ，暴露时间通常为 3-7 天。其优点是设备简单、成本低、操作方便，适用于大面积、多点位的土壤氡普查；缺点是检测周期较长，受环境因素的影响较大，且活性炭的吸附容量有限，当氡浓度过高或暴露时间过长时，易出现吸附饱和现象，导致检测结果偏低。

3.2.3 热释光法

热释光法是基于热释光材料对氡及其子体辐射的响应特性设计的检测方法，其原理是：热释光材料（如 LiF、 $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ 等）在氡及其子体的辐射作用下，会将部分辐射能量储存起来；当对热释光材料进行加热时，储存的能量会以光的形式释放出来，即热释光现象；热释光强度与材料吸收的辐射剂量呈正相关关系，而辐射剂量又与氡浓度和暴露时间相关，通过测量热释光强度即可计算出土壤氡的平均浓度。热释光法的检测设备主要由热释光探测器、加热装置、光测量系统等组成，检测范围通常为 $10\text{--}10^4\text{Bq/m}^3$ ，检测精度可达 $\pm 10\%$ ，暴露时间通常为 1-4 周。其优点是探测器体积小、重量轻、稳定性好，适用于复杂地形的土壤氡监测；缺点是检测周期长，需要专业的加热和光测量设备，且热释光材料的信号易受温度、湿度等环境因素的影响，需要进行严格的质量控制。

表 1 不同检测方法的对比分析

检测类型	具体方法	核心原理	检测范围 (Bq/m^3)	精度	响应 / 暴露时间	设备成本	适用场景
主动式	电离室法	α 粒子电离气体，测电流算浓度	$10\text{--}10^6$	$\pm 5\%$	1-5 分钟	高 (50-80 万)	工程现场、应急监测
	闪烁瓶法	α 粒子激发闪烁体发光，测脉冲数	$10\text{--}10^5$	$\pm 8\%$	1-3 分钟	中 (20-30 万)	快速检测、应急监测
	泵吸式活性炭法	活性炭吸附氡，测子体 γ 射线强度	$100\text{--}10^6$	$\pm 10\%$	采样 5-30 分钟	中低	野外大面积检测
被动式	径迹蚀刻法	α 粒子致损伤，测径迹密度	$10\text{--}10^4$	$\pm 15\%$	1-3 个月	低	长期监测、区域普查
	被动式活性炭法	被动吸附氡，测子体 γ 射线强度	$50\text{--}10^5$	$\pm 12\%$	3-7 天	低 (1-2 万 / 套)	大面积多点普查
	热释光法	热释光材料储能，加热发光测强度	$10\text{--}10^4$	$\pm 10\%$	1-4 周	中低	复杂地形监测

3.3 不同检测方法的对比分析

为了更直观地反映不同土壤氡检测方法的技术特性，从检测原理、检测范围、精度、响应时间、设备成本、适用场景等方面对上述主流检测方法进行了对比分析，结果如表

1 所示，主动式检测方法具有响应时间短、检测精度高的特点，适用于需要快速获取检测结果的场景，如建筑工程场地的土壤氡现场检测、污染事故的应急监测等，但这类方法的设备成本较高，操作相对复杂，对检测人员的专业水平要求

较高。被动式检测方法具有设备简单、成本低、操作方便的特点,适用于大面积、长期的土壤氨普查和监测,这类方法的检测周期长,无法实现实时检测,检测结果受环境因素的影响较大。

4 结束语

土壤氨污染的科学管控是保障人居安全与生态稳定的重要课题,其治理需依托对特性、规律及危害的深刻认知,结合精准检测技术与针对性防控措施形成闭环。现有研究已明确各类检测方法的适用场景,主动式与被动式方法的合理搭配可实现精度与成本的平衡,为污染评估提供可靠依据。未来检测技术将向智能化、精准化升级,防控技术朝高效化创新,一体化体系的构建将推动土壤氨污染治理向规范化发

展,为生态安全筑牢防线。

参考文献:

- [1] 韦益. 土壤污染检测方法与监测技术的发展趋势探究 [J]. 皮革制作与环保科技, 2025,6(16):19-21.
- [2] 景艳霞. 农业废弃物处理区水、土壤、大气污染检测与治理对策 [J]. 清洗世界, 2025,41(09):110-112.
- [3] 高春真. 土壤污染的危害及土壤污染检测技术 [J]. 现代农村科技, 2025,(07):141.
- [4] 朱丹丹. 气相色谱-质谱联用技术在土壤污染检测中的应用 [J]. 中国资源综合利用, 2025,43(03):63-65.
- [5] 潘晓荣. 土壤污染检测技术在环保领域的研究进展 [J]. 皮革制作与环保科技, 2025,6(02):117-119.