

室内环境空气质量检测技术应用研究

余志文

上海建科检验检测认证有限公司

DOI:10.32629/eep.v9i6.3234

[摘要] 室内空气污染危害人体健康,属于公共卫生和检测研究的重点。本文对空气质量检测技术的工程应用进行系统的梳理,包括污染物识别、多级标准体系、主流检测技术原理、仪器计量溯源、现场采样规范等各个方面,并结合一线实践给出改进路径,总结出住宅装修验收、公共建筑以及高氡风险建筑等典型场景下的应用实践。研究成果可以给检测机构提高结果的科学性和规范性提供一定的参考,有利于行业技术能力的不断改善。

[关键词] 室内空气质量; 污染物检测; 采样方法; 氡气检测

中图分类号: X-652 **文献标识码:** A

Research on the Application of Indoor Air Quality Testing Technology

Zhiwen Yu

Shanghai Jianke Inspection, Testing and Certification Co., Ltd

[Abstract] Indoor air pollution poses a significant threat to public health and remains a key concern for public health authorities and inspection agencies. This paper systematically reviews the engineering applications of indoor air quality detection technologies, covering pollutant identification, the multi-tiered standard system, principles of mainstream detection methods, metrological traceability of instruments, and on-site sampling protocols. Based on frontline practice, it proposes specific improvement pathways and summarizes application practices in typical scenarios such as residential decoration acceptance, public buildings, and high-radon-risk constructions. The findings offer valuable references for inspection agencies to enhance the scientific rigor and standardization of test results, thereby promoting the continuous advancement of technical capabilities across the industry.

[Key words] indoor air quality; Pollutant detection; Sampling method; Radon gas detection

伴随城镇化推进与装饰材料迭代,室内空气污染已从专业议题转为公众关切。现代人室内停留时间长,挥发性有机物、氡及微生物等长期暴露会损害呼吸与免疫系统。与此同时,国家相关标准持续更新,对检测机构的方法选择、环境控制及结果评定能力提出更高要求。为扭转检测“走过场”倾向,系统厘清技术链条逻辑与偏差来源,推动检测向“可追溯、可论证”转型,成为本文研究出发点。

1 室内空气主要污染物类型

1.1 化学性与颗粒物复合污染特征

室内化学性污染物大多来自于装饰材料,甲醛(限值 $0.08\text{mg}/\text{m}^3$)来自脲醛树脂,新装修的环境常常是它的几倍甚至几十倍;苯系物(BTEX)来源于油漆,苯是I类致癌物(限值 $0.11\text{mg}/\text{m}^3$),TVOC含有几十种组分,限值为 $0.60\text{mg}/\text{m}^3$ 。该类污染物受温湿度影响大,温度每升高 10°C ,甲醛散发速率就增加1.5到2倍。颗粒物主要为PM_{2.5},能携带重金属进入肺泡,来源有室外渗透、烹饪油

烟和二手烟。通风不好的时候PM_{2.5}可达 $500\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上,远远超过世卫的指导标准,需要分等级评价。

1.2 放射性污染——氡的隐匿风险

氡(²²²Rn)是由地基土壤、建筑材料中的铀、镭衰变产生的,无色无味,是吸烟外第二大肺癌的诱因。人入体之后会释放出 α 粒子,会对人的支气管黏膜产生较长时间的放射性辐射作用,危害极大。GB50325中规定I类建筑氡浓度限值不大于 $200\text{Bq}/\text{m}^3$ 。检测要考虑到季节性,冬季通风少且烟囱效应造成浓度高于夏季,工程验收要关窗12小时以上来稳定积累水平。由于氡散发具有间歇性、波动性,单次瞬时测量不能反映真实暴露,必须和长期累积监测结合起来才能评价风险。

1.3 微生物污染与快速检测技术

微生物污染有细菌、真菌、病毒,来源于人体代谢、空调积水、建材表面等。高温高湿容易引起青霉、曲霉等繁殖,集中空调冷却水是军团菌的主要栖息地,规范要求送风细菌、真菌总数

均 $\leq 500\text{CFU}/\text{m}^3$ 。传统的撞击法、过滤膜法受湿度影响较大,培养周期为48~72小时,结果滞后明显^[1]。近几年来,qPCR快速检测技术直接检测微生物DNA,大大缩短了检测时间,提高了灵敏度,适合于医院、洁净手术室等需要严格控制的场所的即时监测预警。

2 室内空气质量检测标准体系

2.1 现行室内空气质量检测标准体系构成

我国室内空气质量检测已经形成了以多部门共同建立的标准化体系,主要的标准有《室内空气质量标准》(GB/T18883-2022)、《民用建筑工程室内环境污染控制标准》(GB50325-2020)和《公共场所卫生检验方法》(GB/T18204)。GB/T18883-2022中给出了19项参数的限值和检验方法,比2002版收严了很多指标,甲醛限值从原来的 $0.10\text{mg}/\text{m}^3$ 降低到 $0.08\text{mg}/\text{m}^3$,苯并[a]芘等项目也进行了更新。GB50325-2020对新建、改建、扩建民用建筑竣工验收时甲醛、苯、氨、TVOC、氡等5项强制性指标作出规定。检测机构要随着标准的更新而不断提高自身的技术能力,使其达到要求。

2.2 不同标准体系的适用边界与差异辨析

GB/T18883和GB50325在标准性质、适用范围、检测条件等方面存在着本质的区别,不能互相替代使用。GB/T18883为推荐性标准,用来评价已经使用的建筑的正常使用状况,GB50325为强制性标准,专门用于新建工程的竣工验收,对房间密闭时间、采样点位数、限值等有特别规定。检测报告中应注明所引用的标准版本以及相应的检测条件,防止评价结论有误。另外,幼儿园、学校教室、医疗机构等特殊场所要按照《托儿所、幼儿园建筑设计规范》等专项标准综合判定,保证检测方案符合建筑实际用途和更高的要求。

3 主要检测方法及技术特点

3.1 化学性污染物检测技术

化学性污染物检测主要采用分光光度法和气相色谱法。甲醛测定首选酚试剂分光光度法,以 $0.5\text{L}/\text{min}$ 流量采样20~30min,经显色反应后于630nm测定,检出限达 $0.01\text{mg}/\text{m}^3$;高精度场景可选用DNPH-HPLC法。苯系物(BTEX)、TVOC检测用活性炭采样,经二硫化碳解吸后用GC-FID分析,苯的检出限可以达到 $0.003\text{mg}/\text{m}^3$ 。TVOC结果是由正己烷到正十六烷的色谱峰面积相加得到的,不同的实验室积分会存在差异,这是造成其不确定度的主要原因。高端机构开始使用TD-GC/MS法,用热解吸提高解吸效率(>95%),结合质谱定性,大大降低了误判率,但是仪器投入和运维成本高^[2]。

3.2 放射性及物理性污染监测方法

气检测主要分为被动累积和主动连续两种方式。径迹蚀刻法用CR-39探测器暴露30~90天,用显微镜计数 α 径迹换算均值,成本低适合普查,但是不能反映短期动态。工程验收大多采用电离室法,主动抽气并用 α 能谱分析,响应时间1~2小时,不确定度控制在15%~20%,仪器探测下限应小于 $10\text{Bq}/\text{m}^3$ 。颗粒物监测主要是对粒径进行分级,由于PM_{2.5}可以深入肺泡,并且会携带

重金属,而且受到烹饪油烟等的影响较大(高峰时可达 $500\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上),单个质量浓度不能完全反映风险,需要采用多级采样技术来分析各个粒径颗粒物的分布情况,从而完善健康风险评估评价体系。

3.3 微生物检测方法 with 质控要求

微生物检测一般用撞击法和沉降法。撞击法(Andersen采样器)用28.3L/min的流量把微生物撞击到培养基上,结果以 CFU/m^3 表示,符合GB/T18204的要求,是公共场所检测的首选。沉降法操作简单,但是受到气流的干扰大,重复性差,只做辅助手段。采样后必须严格控制培养条件,细菌培养 $36^\circ\text{C}\pm 1^\circ\text{C}$ 、48小时,真菌培养 28°C 、72小时;菌落数少于30或多于300的平皿为无效,重新采样。对医院洁净手术室等高要求场所还要按GB50333同步检测沉降菌和浮游菌。近些年来,以qPCR为基础的快速检测技术被采用,其优点在于可以克服传统的培养法滞后48~72小时的缺点。

4 室内环境空气质量检测技术的应用要点

4.1 检测仪器设备的选型与质量保证

4.1.1 大气采样器的技术要求与维护

大气采样器属于主要的辅助设备,它的流量稳定情况直接影响到采样量以及结果的准确性。设备应具有恒流控制功能,流量波动不超过设定值的 $\pm 5\%$;对于超过1小时的长时间采样,应该使用带有流量反馈补偿的电子质量流量控制型采样器。按照JJG956《大气采样器检定规程》要求,采样器要定期送CMA资质机构进行检定,周期不能大于12个月。日常维护时用皂膜流量计在现场校核,偏差超过 $\pm 5\%$ 的不得使用,必须送修后重新检定。气密性也是重要的指标,进气口封堵后运行,流量应该接近于零;如果变化不大,就说明泵体有泄漏,会造成采样量虚高、结果偏低。检测记录要保留采样器编号、检定证书编号和校核流量值,保证数据可追溯。

4.1.2 分析仪器的校准与期间核查

分光光度计、气相色谱仪等分析仪器要定期进行计量检定。分光光度计按照JJG178执行,主要对波长准确度(误差 $\leq \pm 0.5\text{nm}$)、透射比误差($\leq \pm 0.3\%$)、杂散光(630nm处 $\leq 0.5\%$)进行检定,周期为一年;气相色谱仪按照JJG700执行,对检测器灵敏度、基线噪声和漂移进行核查,FID的最小检测量应小于等于 $5\times 10^{-12}\text{g}/\text{s}$ 。两次检定时必须进行期间核查,一般采取每月或者每季度用有证标准物质(CRM)来核查的方式,如果结果超出控制限(均值 $\pm 3\sigma$),就进行调查并停止检测。质量体系还要建立不确定度评定档案,对各种方法的合成不确定度进行系统评定,保证不确定度和结果同时报告,满足CNAS-CL01认可准则以及客户对数据质量的要求。

4.1.3 标准物质的管理与使用

标准物质是保证量值溯源的关键,其管理使用要严格。常用的物质有甲醛标准溶液($1000\mu\text{g}/\text{mL}$ GBW系列)、苯系物/TVOC混合标准气体和氨标准源(中国计量院溯源)。标准物质应按规定储存,甲醛溶液在 4°C 避光密闭保存,开封后有效期为30天,记录中应注明开封日期和使用人。标准曲线的绘制需要使用到至少5

个浓度梯度,线性相关系数(r)大于等于0.9990,并且每批样品前要重新绘制或者做单点校正。标准使用液的配制需要容量瓶经过检定,分级稀释误差不大于0.5%。严禁使用临期或者超期的标准物质,防止由于系统误差影响检测结果的准确性、公正性^[3]。

4.2 采样方案设计与现场操作规范

4.2.1 采样点布设原则

采样点科学布设是得到代表性的数据的前提。依据GB50325,室内面积 $<50\text{m}^2$ 设1个点, $50\sim 100\text{m}^2$ 设2个点, $>100\text{m}^2$ 每增 50m^2 增设1点,最多不超过5个点。点位距离墙不小于0.5m,距离门窗不小于1m,高度0.8~1.5m(呼吸带),避开通风死角或者正对出风口,点间距不小于2m。精装修住宅或者大型公建应按照功能区(厨房、卫生间、客厅、卧室)分别布置采样点,不能合并取样。工程验收抽检比例不得少于5%,不得少于3间,应包括各类房间。现场平面图、点位标注照片应为原始记录保存,保证点位分布情况可以客观地反映整个工程的工程质量水平。

4.2.2 采样前环境条件控制

采样前的环境控制是保证结果准确的关键,也是问题高发区。GB50325规定验收检测要提前关闭门窗12小时以上,使污染物达到稳定状态。但是现实中委托方经常采用过度通风或者空调除湿等人为干预手段来影响结果。检测人员到达现场后要查看密闭情况,观察装修新旧和气味,发现密闭不严的,不得采样,应书面通知重新采样。温度、湿度都会影响甲醛等污染物的散发,GB/T18883规定采样条件为室温 $22^\circ\text{C}\pm 2^\circ\text{C}$ 、湿度45%~65%。采样时要实时记录温湿度和气压,成为原始记录的一部分,给数据评价赋予正确的背景环境参数。

4.2.3 采样操作要点与空白样品管理

规范操作可以保证样品的可信度。使用化学采样管(活性炭管、DNPH管)时要检查密封性,保证玻璃端头不损坏,DNPH管需要 4°C 冷藏并在有效期内使用。连接管路应短小、内壁光洁度高,以减小吸附损失。采样结束后,活性炭管立即用原配帽密封,低温盒运输,活性炭管24h内、DNPH管48h内(4°C)完成分析。每一批次必须同时制备全程序空白(现场开盖即封),经过相同的运输和分析过程,如果空白值超过目标限值的10%,该批结果无效。氨检测仪器进入室内前要在室外预热30分钟,本底平衡后才能开始计数。

5 检测技术典型应用场景分析

5.1 住宅装修工程验收应用

住宅精装修竣工验收是化学性污染物检测的核心应用场景。检测机构通常采用“初检—整改—复检”的闭环模式:竣工关窗24小时后对甲醛、苯系物及TVOC进行初检,超标房间针对重点装修材料追加溯源采样,指导施工方锁定主要污染源;整改

并充分通风后再行复检,依据GB50325-2020出具正式验收报告。面积 150m^2 以上的大户型按功能区(主卧、客厅、厨房等)分别布设采样点,出具分区评价结论,使检测结果直接服务于业主入住决策和室内环境治理。

5.2 公共建筑及特殊场所应用

学校、幼儿园、医疗机构等公共建筑人员密集,是室内空气质量检测的重点应用领域。此类场所须同时执行GB/T18883和专项建设标准,检测指标更严、评价要求更高。医院洁净手术室需依据GB50333同步检测浮游菌与沉降菌,并引入qPCR技术对军团菌等特殊致病微生物开展专项筛查,实现精准防控。商场、影剧院等人员集中场所应选在人流高峰时段采集 CO_2 和 $\text{PM}_{2.5}$ 等代表性样品,以真实反映使用过程中的污染暴露水平,将检测结果直接转化为卫生管理措施的决策依据。

5.3 高氡风险建筑专项应用

南方花岗岩地区、北方黄土高原地区的建筑及地下室空间是氡超标高风险区域。实际工程中,检测机构普遍采用“筛查+确认”两步法:先以电离室法快速筛查,排除明显超标房间;对浓度在 $150\sim 250\text{Bq/m}^3$ 之间的临界案例,再采用径迹蚀刻法开展30天以上的长期累积监测,获取年均暴露水平。检测完成后向委托方提供氡浓度分布图,标注不同区域的风险等级,辅助指导防氡隔离措施的施工落实,将检测数据转化为切实可行的工程改善方案,充分体现检测工作的应用价值。

6 结束语

室内空气质量检测属于一个复杂的、多环节相互联系的系统工程,任何一个环节出现疏漏都会影响到数据的公信力。目前行业普遍存在的标准适用混淆、采样环境控制缺失、仪器核查形式化等质量问题,必须依靠建立完善的质量管理体系以及加强人员的技术培训来加以纠正。面向未来检测机构在巩固传统方法的基础上积极布局热解吸-GC/MS、qPCR等前沿技术,跟上GB/T18883-2022新规的要求做好方法确认工作。只有不断加强技术硬实力和数据权威性,才能筑牢公众健康防线,履行检验检测行业主要的社会责任。

[参考文献]

- [1]吴彬,何松强.室内环境检测的常见问题剖析与防治策略体系研究[J].中国资源综合利用,2025,43(12):140-142.
- [2]万智皓.室内环境检测的主要影响因素及控制策略研究[J].皮革制作与环保科技,2025,6(20):61-63.
- [3]段好熹.室内环境空气有害物质检测及其质量控制措施研究[J].皮革制作与环保科技,2022,3(21):41-43.

作者简介:

余志文(1986--),男,汉族,浙江淳安人,本科,工程师,研究方向:辐射环评、环境监测。