

第三章

密闭环境化学污染健康风险识别及评估

人类有 80% ~ 90% 的时间是在室内度过，室内空气质量直接关乎人体健康。其化学污染源分为室内和室外两部分，室外污染物因为空气渗透、通风等引入室内，主要以粉尘和无机物污染物为主；而室内污染物包括室内装修材料和家具产生的污染、室内人员使用的有机物品散发的污染物（杀虫剂、漂白剂、清洁剂等）、室内人员的行为（如作业、烹饪）、室内人员自身代谢产物而产生的污染物等。一般而言，挥发性有机物（VOCs）是室内环境中具有强毒性的典型空气污染物，室内杀虫剂、漂白剂、清洁剂、装修材料和家具是其主要排放源。

第一节 无机气体污染

一、无机气体种类

1. 一氧化碳（CO）CO 是一种无色、无味、无臭的气体，在空气中燃烧时呈现蓝色。大气中的 CO 相当稳定，一般不易被破坏，只有在太阳光紫外线照射下或土壤中细菌作用下才会有少部分被氧化为 CO₂。而室内的 CO 几乎不被氧化，只能依靠通风稀释来降低室内 CO 浓度。

吸烟是室内 CO 的主要来源，其排放量为每支 31 mg（主流烟）和每支 148 mg（副流烟）。另外，炊事活动也是产生 CO 的主要原因，炊事的 CO 排放量与灶具的耗气量、燃烧状况等有很大关系，当燃烧较为充分时，CO 的排放量约为 0.59 mg/L 耗气量；若燃烧不完全时，CO 的排放量可达 3.88 mg/L 耗气量。

CO 对人体的影响主要是会造成低氧血症，引起组织缺氧。CO 与红细胞中血红蛋白的结合能力是氧的 200 ~ 250 倍，因此可造成血液中含氧量大大降低。人在 CO 浓度 250 mg/m³ 的室内空气中暴露 2 ~ 4 小时，就会出现头痛、烦躁、情绪不定、

健忘等症状；在 CO 浓度 625 mg/m^3 的室内空气中暴露 2 ~ 4 小时，就会出现剧烈头痛、无力、视觉障碍、虚脱感等症状；而当 CO 浓度达到 2500 mg/m^3 时，人只需停留 1 ~ 2 小时，就会呼吸困难、意识丧失，甚至死亡。《室内空气质量标准 GB/T 18883-2022》规定室内空气中 CO 浓度的小时均值 10 mg/m^3 （表 3-1）。

表 3-1 室内空气质量要求

序号	指标分类	指标	计量单位	要求	备注
01	物理性	温度	°C	22 ~ 28	夏季
				16 ~ 24	冬季
02		相对湿度	%	40% ~ 80%	夏季
				30% ~ 60%	冬季
03		风速	m/s	≤ 0.3	夏季
				≤ 0.2	冬季
04		新风量	每人 m^3/h	≥ 30	-
05	化学性	臭氧 (O_3)	mg/m^3	≤ 0.16	1 小时平均
06		二氧化氮 (NO_2)	mg/m^3	≤ 0.20	1 小时平均
07		二氧化硫 (SO_2)	mg/m^3	≤ 0.50	1 小时平均
08		二氧化碳 (CO_2)	% ^a	≤ 0.10	1 小时平均
09		一氧化碳 (CO)	mg/m^3	≤ 10	1 小时平均
10		氨 (NH_3)	mg/m^3	≤ 0.20	1 小时平均
11		甲醛 (HCHO)	mg/m^3	≤ 0.08	1 小时平均
12		苯 (C_6H_6)	mg/m^3	≤ 0.03	1 小时平均
13		甲苯 (C_7H_8)	mg/m^3	≤ 0.20	1 小时平均
14		二甲苯 (C_8H_{10})	mg/m^3	≤ 0.20	1 小时平均
15		总挥发性有机化合物 (TVOC)	mg/m^3	≤ 0.60	8 小时平均
16		三氯乙烯 (C_2HCl_3)	mg/m^3	≤ 0.006	8 小时平均
17		四氯乙烯 (C_2Cl_4)	mg/m^3	≤ 0.12	8 小时平均
18		苯并[a]芘 (BaP) ^b	mg/m^3	≤ 1.0	24 小时平均
19		可吸入颗粒物 (PM ₁₀)	mg/m^3	≤ 0.10	24 小时平均
20		细颗粒物 (PM _{2.5})	mg/m^3	≤ 0.05	24 小时平均

续表

序号	指标分类	指标	计量单位	要求	备注
21	生物性	细菌总数	CFU/m ³	≤ 1500	—
22	放射性	氡 (²²² Rn)	Bq/m ³	≤ 300	年平均 ^c (参考水平 ^d)

注：a，体积分数。
b，指可吸入颗粒物中的苯并芘。
c，至少采样3个月（包括冬季）。
d，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。当室内氡浓度超过该参考水平时，宜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的原则

2. 二氧化碳（CO₂） 室内 CO₂ 的主要发生源是人体。另外吸烟及做饭过程中也会产生 CO₂，吸烟中的排放量为每支 42 mg（主流烟）和每支 474 mg（副流烟），相对于人体或做饭过程中的 CO₂ 产生量可以忽略不计。

CO₂ 的主要危害是当室内空气中 CO₂ 体积分数达到 3% 时，人体呼吸程度加深；当室内空气中 CO₂ 体积分数达到 4% 时，人会出现耳鸣、头痛、血压升高等症状；当室内空气中 CO₂ 体积分数达到 8% ~ 10% 时，会引起人体呼吸困难，出现脉搏加快、全身无力、肌肉痉挛等症状；当室内空气中 CO₂ 体积分数达到 20% 以上，造成人的中枢神经损害并危及生命。《室内空气质量标准 GB/T 18883—2022》规定室内空气中 CO₂ 体积分数的 1 小时平均值为 0.10%。

3. 二氧化硫（SO₂） SO₂ 是具有刺激性、易溶于水的无色气体，密度比空气大，是最常见的硫氧化物。室内 SO₂ 主要来自于燃烧过程，SO₂ 腐蚀性较强，能够改变建筑材料颜色，降低皮革强度，日常用品也会受到腐蚀。

对于长期接触低浓度 SO₂ 的人来说，SO₂ 被吸入气管、支气管后，刺激上呼吸道黏膜，引起气管炎、支气管哮喘、肺气肿等呼吸道疾病。另外需要指出的是，由于 SO₂ 污染的同时一般还伴有 CO、NO_x、颗粒物 VOCs 等其他污染物，SO₂ 与其他污染物共同作用产生的毒性要比单独作用的危害大得多。《室内空气质量标准 GB/T 18883—2022》规定室内空气中 SO₂ 浓度的小时均值为 0.5 mg/m³。

4. 氮氧化物（NO_x） NO_x 主要指 NO、NO₂、N₂O、N₂O₃、N₂O₄ 及 N₂O₅ 等化合物。对人体健康影响较大的有 NO 和 NO₂。NO 为无色气体，不稳定，与氧气反应变为 NO₂，标准状态下密度是 1.340 kg/m³；NO₂ 为红褐色气体，密度 1.41 kg/m³，熔点 -9.3℃，是一种强氧化剂。大气中的 NO_x 的来源主要是森林火灾、雷电及火山爆发等。机动车尾气及化工生产也会产生大量 NO_x。NO_x 的室内来源主要是吸烟和燃烧过程。吸烟的 NO_x 排放量每支为 0.23 mg（主流烟）和每支 0.9 mg（副流烟）。从燃烧的角度，

煤气灶具的 NO_x 排放量约为 0.063 mg/L 耗气量；液化石油气灶具的 NO_x 排放量约为 0.91 mg/L 耗气量。

NO 能与血红蛋白作用，降低血液的输氧能力。 NO_2 对呼吸器官有强烈刺激，能引起急性哮喘病。氮氧化物侵入呼吸道深部细支气管及肺泡，并缓慢地溶于肺泡表面的水分中，形成亚硝酸、硝酸，对肺部组织产生强烈的刺激及腐蚀作用。当 NO_2 浓度为 0.25 ~ 0.45 mg/m^3 时，即可嗅出；吸入 NO_2 浓度为 10.3 mg/m^3 的空气 10 分钟即可引起人的呼吸道阻力增高；当浓度达到 123 ~ 309 mg/m^3 时，会立即引发咳嗽及喉头和胸部的灼热感；当浓度达到 41 ~ 617 mg/m^3 时，暴露 30 ~ 60 分钟会导致呼吸道阻塞，出现呼吸困难、发绀等症状，严重的可因窒息而死亡。《室内空气质量标准 GB/T 1883—2022》规定室内空气中 NO_2 浓度的小时均值为 0.24 mg/m^3 。

5. 氨气 (NH_3) NH_3 是一种无色气体，有强烈的刺激气味。极易溶于水，常温常压下 1 体积水可溶解约 700 倍体积氨。建筑环境中的氨气主要来源于施工中使用的混凝土添加剂，如防冻剂、膨胀剂和早强剂，建筑装修材料中的胶黏剂、涂料添加剂和增白剂。

NH_3 的溶解度较大，易溶于上呼吸道的水分中，因而吸入后仅很小的一部分能够到达肺组织。可造成眼睛、呼吸道和皮肤的刺激，伤害神经系统、生殖系统呼吸系统，长期接触严重者可以导致肺癌。《室内空气质量标准 GB/T 1883—2022》规定室内空气中氨浓度的小时均值为 0.2 mg/m^3 。

6. 氡 氡是惰性气体中最重要的一种单原子气体，可以从镭的放射性衰变中以气体射气的形式得到。包括四个同位素，即 ^{222}Rn 、 ^{220}Rn 、 ^{219}Rn 和 ^{218}Rn ，与人关系最密切的是 ^{222}Rn ，它的半衰期为 3.825 天，衰变常数 2.097×10^{-4} 秒在 0℃ 和标准大气压下气态氡的密度为 9.727 kg/m^3 。

氡气为一种无色无味放射性污染气体，从其来源方面分析其造成的室内空气污染主要体现在混凝土、砖、石块以及土壤或供水系统中（图 3-1）。建筑环境中的氡及其子体主要来源于地基土壤或岩石，可通过地基、建筑物的缝隙或管道等进入室内。另外，大理石、花岗岩、瓷砖和某些类型的水泥、煤渣、石膏等建筑材料也会释放氡气。表 3-2 显示室内放射性气体氡的来源。

由于氡气无色无味，无法通过嗅觉进行观察和检查，因此其造成的危害相较于其他有气味的有机污染物，产生的危害高、影响大，同时根据相关研究数据，氡气也为造成人体肺癌的主要致病因素。氡由于半衰期较长，在人体内停留时间较短，因此危害尚不算太大。但氡子体进入体内后，可通过渗透作用融入血液，一大部分停留于呼吸器官，不断衰变并对支气管上皮组织放出 α 粒子，破坏周围细胞，会增

加患肺癌或上呼吸道癌的概率。另外，大剂量的射作用下，还可能引起皮肤癌和白血病。《室内空气质量标准 GB/T 18883—2022》规定室内空气中氡年平均浓度为 300 Bq/m^3 （年平均）。

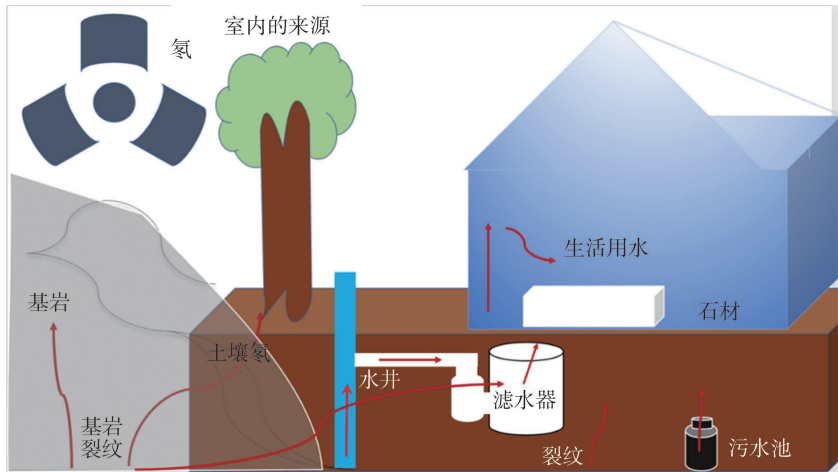


图 3-1 氡的来源

表 3-2 室内氡的来源比例

氡源	北京地区		世界平均	
	进入率 /[Bq/(m ³ ·h)]	份额 /%	进入率 /[Bq/(m ³ ·h)]	份额 /%
房基及其周围土壤	27.5	56.3	34	60.4
建筑材料	10	20.5	11	19.5
室外空气	10	30.5	10	17.8
供水	1	2	1	1.8
家用燃料	0.3	0.7	0.3	0.5
合计	48.8	100	56.3	100

7. 臭氧 打印机、复印机采用激光头扫描硒鼓的方式在硒鼓上产生高压静电，用以吸附碳粉，这样硒鼓表面的高压电荷会电离空气中的氧气生成臭氧。碳粉颗粒则会进入室内，形成室内颗粒物污染。对于办公室来讲，工作过程的打印机和复印机是臭氧的主要来源，也是室内颗粒物的重要来源。另外，人们会出于空气净化的目的采用臭氧发生器来氧化室内其他的空气污染物，如果使用不当，则过剩的臭氧成为室内污染物。

二、监测方法综合

(一) 一般要求

各类指标的采样方法参照测定方法中的具体规定，在经过方法适用性验证的基础上，可适当调整采样方法参数，包括采样体积、采样流量和采样时间，以满足室内空气质量指标检测要求，指标要求采用年平均和 8 小时平均的指标。在测定方法允许的情况下，可先进行筛选法采样，若检验结果符合指标要求，可直接评价；若不符合，应按累积采样。苯并[a]芘、PM2.5、PM10 等采用 24 小时平均的指标因测定方法限制，无法采用筛选法，需直接采用积累法。

(二) 无机气体检测方法

1. 无机气体检测方法概述 室内无机气体检测，一般抽取现场空气冲洗采气袋 3 ~ 4 次后，采气 400 ~ 600 mL，密封进气口，带回实验室分析。各项指标的测试方法如表 3-3 所示。

表 3-3 无机气体的检测方法

无机气体	检测方法	测定标准
一氧化碳	不分光外分析法	公共场所卫生检验方法 第 2 部分：化学污染物 GB/T 18204.2—2014
	气相色谱法	
二氧化碳	不分光外分析法	
	气相色谱法	
	容量滴定法	
二氧化硫	甲醛吸收 - 副玫瑰苯胺分光光度法	环境空气 二氧化硫的测定 甲醛吸收 - 副玫瑰苯胺分光光度法 HJ 482—2009
氮氧化物	盐酸萘乙二胺分光光度法	环境空气 氮氧化物（一氧化氮和二氧化氮）的测定 盐酸萘乙二胺分光光度法 HJ 479—2009
氨气	纳氏试剂分光光度法	环境空气和废气 氨的测定纳氏试剂分光光度法 HJ 533—2009
	次氯酸钠 - 水杨酸分光光度法	环境空气 氨的测定 次氯酸钠 - 水杨酸分光光度法 HJ 534—2009
氡	闪烁瓶测定方法	GBZ/T 155—2002 空气中氡浓度的闪烁瓶测定方法
	径迹蚀刻法	环境空气中的监测方法 HJ1212—2021
	活性炭盒法	
	脉冲电离室法	
	静电收集法	

续表

无机气体	检测方法	测定标准
臭氧	紫外光度法	环境空气 臭氧的测定 紫外光度法 HJ 590—2010
	靛蓝二磺酸钠分光光度法	环境空气 臭氧的测定 靛蓝二磺酸钠分光光度法 HJ 504—2009

2. 便携式傅里叶红外仪检测 目前便携式傅里叶红外仪应用较为广泛，可测定环境空气中的一氧化碳、二氧化氮、一氧化氮、二氧化硫、二氧化碳、氯化氢、氰化氢、氟化氢、一氧化二氮、氨等 10 种无机有害气体。测定原理：当波长连续变化的红外光照射被测定的分子时，与分子固有振动频率相同的特定波长的红外光被吸收，将照射分子的红外光用单色器色散，按其波数依序排列，并测定不同波数被吸收的强度，得到红外吸收光谱。通过比对样品的红外光谱和标准谱图库中定量标准物质的光谱在特征波数上的吸收峰进行定性分析；根据样品目标物的峰面积响应值与标准图库中对应的标准物质吸收峰的峰面积响应值之比来进行半定量分析。结构示意图如图 3-2 所示。

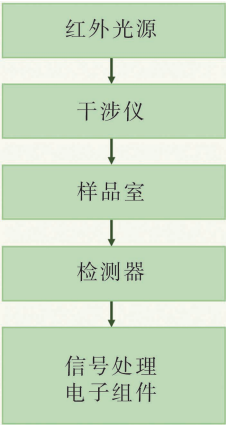


图 3-2 仪器结构示意图

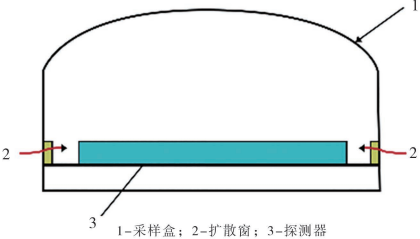
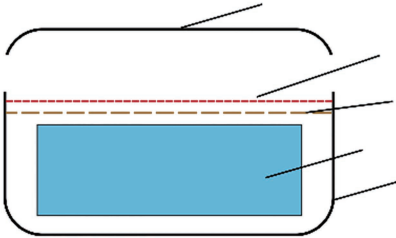
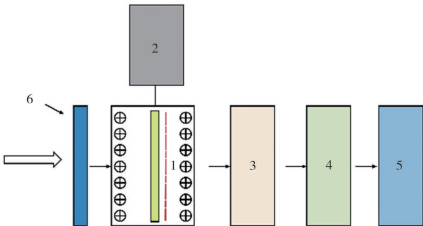
3. 氡的检测 目前室内空气中氡的现场检测一般用便携式仪器，其测量原理多为闪烁瓶法或半导体法。闪烁瓶法仪器灵敏度及测量准确度较高；半导体法仪器结构简单，但测量灵敏度较低，只适用于氡浓度较高的地区。

闪烁瓶法：按规定的程序将待测点的空气吸入已抽成真空态的闪烁瓶内。闪烁瓶密封避光 3 小时，待氡及其短寿命子体平衡后测量 ^{222}Rn 、 ^{218}Po 和 ^{214}Po 衰变时放射出的 α 粒子。它们入射到闪烁瓶的 $\text{ZnS}(\text{Ag})$ 涂层，使 $\text{ZnS}(\text{Ag})$ 发光，经光电倍增管收集并转变成电脉冲，通过脉冲放大、甄别，被定标计数线路记录。在确定时间内脉冲数与所收集空气中氡的浓度是函数相关的，根据刻度源测得的净计数率 -

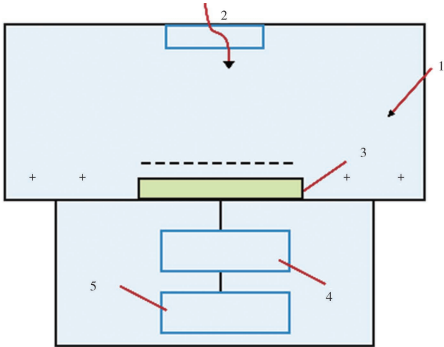
氡浓度刻度曲线，可由所测脉冲计数率，得到待测空气中氡浓度。

径迹蚀刻法：探测器采用固体核径迹材料（如柯达阿尔法胶片 LR-115 或碳本酸丙烯酸乙酸 CR-39），置于一定形状的采样盒内组成径迹蚀刻法测氡采样器（以下简称“采样器”），如表 3-4 所示。氡气经扩散窗进入采样盒内，氡及其新衰变产生的子体发射的 α 粒子轰击探测器时，使其产生潜径迹。将此探测器在一定条件下进行化学或电化学蚀刻，扩大损伤径迹，以至能用显微镜或自动计数装置进行观测统计或计数。单位面积上的径迹数与氡浓度和暴露时间的乘积成正比。用刻度系数将径迹密度换算成氡浓度。此方法可用于累积测量。

表 3-4 不同氡检测方法的优缺点比较

方法	装置结构图	优点	缺点
闪烁瓶法		快速，灵敏度高，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，闪烁瓶本底易增高且消除困难，瞬时取样结果误差较大，对气压敏感
径迹蚀刻法	 1-采样盒；2-扩散窗；3-探测器	采样器操作及携带方便，价格低廉，适合于大面积长期测量	现场无法得到测量结果，低浓度测量时不确定度大，只能得到平均测量结果
活性炭盒法	 1-密封盖；2-扩散窗（可选）；3-金属网；4-活性炭；5-活性炭盒	采样器批样性好，操作及携带方便，价格低廉，适合于短期大面积筛选测量	对温度和湿度敏感，暴露周期 < 7 天，只能得到平均测量结果，对于变化的环境氡浓度只能做半定量的测量，要有可靠的修正方法对测量结果进行修正
脉冲电离室法	 1-电离室；2-高压电源；3-放大器；4-分析器；5-计数器或多道分析器；6-扩散窗	测量设备灵敏度高，稳定性好，现场能得到测量结果，能够得到氡浓度随时间的变化	测量设备价格较高，野外长时间测量需提供电力保障，无法辨别氡钍射气

续表

方法	装置结构图	优点	缺点
静电收集法		测量设备灵敏度高，稳定性好，现场能得到测量结果，能够得到氡浓度随时间的变化	测量设备价格较高，野外长时间测量需提供电力保障，收集效率易受湿度影响

活性炭盒法：活性炭盒一般由塑料或金属制成，直径 6 ~ 10 cm，高 3 ~ 5 cm，内装 25 ~ 100 g 活性炭。盒的敞开面用滤膜（过滤氡子体）封住，固定活性炭且允许氡进入炭盒。空气扩散进炭床内，其中的氡被活性炭吸附，同时衰变，新生的子体便沉积在活性炭内。用 γ 谱仪测量采样器的氡子体特征 γ 射线峰（或峰群）强度，根据特征峰面积计算出氡浓度。此方法可用于累积测量。在活性炭和被测空气间设置扩散垒，有助于减少活性炭已吸附氡的解析。扩散垒的存在也减少了活性炭对水蒸气的吸收，因此即使在湿度大于 75% 的地方，也能使采样器的暴露期超过 7 天。

脉冲电离室法：空气经过滤后，扩散进入或经气泵抽入电离室，在电离室灵敏区中氡及其衰变子体衰变发出的 α 粒子使空气电离，产生大量电子和正离子，在电场的作用下电子和正离子分别向两极漂移，在收集电极上形成电压脉冲或电流脉冲。这些脉冲经电子学测量单元放大后记录，记录的脉冲数与 α 粒子数成正比，即与氡浓度成正比。此方法可用于瞬时测量或连续测量。

静电收集法：空气经干燥后通过滤膜过滤掉氡子体后进入收集室，收集室一般为半球形或圆柱形，在中心部位装有 α 能谱探测器。收集室中的氡将衰变出新生氡子体（主要是带正电的 ^{218}Po ）， ^{218}Po 在静电场的作用下被收集到探测器的表面，通过对氡子体放出的 α 粒子进行测量计算出氡浓度。此方法可用于瞬时测量或连续测量。

第二节 挥发性有机气体污染

一、挥发性有机气体种类

1. 总挥发性有机物 室内空气中挥发性有机污染物的构成成分较为复杂，无法

通过单一命名进行概括，因此在实际发展中对存在多种异类污染物气体的物质，称其为总挥发性有机物（total volatile organic compound, TVOC）。TVOC 组成成分主要有醛类物质、苯类物质、三氯乙烯、二异氰酸酯等多类污染物。室内 TVOC 主要产生于各类黏合剂、化学涂料以及各类人造材料中。

TVOC 的出现对于室内空气质量、室内宜居性、人员安全性都造成了极大的危害，如人员长期处于总挥发性有机物的环境中，将会对人体的神经系统及呼吸道健康状况造成极大的危害，同时还会产生较高的致癌率。《室内空气质量标准 GB/T 18883—2022》规定室内空气中总挥发性有机物浓度的一般 $\leq 0.60 \text{ mg/m}^3$ 。

2. 甲醛 甲醛是室内空气中挥发性有机物（VOCs）的主要构成成分，主要源于室内装修中应用的各种黏合剂、胶质物、油漆以及各类涂料。

甲醛对人体的健康危害有：刺激作用，甲醛对人的眼睛和呼吸系统有着强烈的刺激作用；毒性作用，甲醛可以跟人体的蛋白质相结合，使蛋白质变性，对细胞有强大的破坏作用，其危害程度与它在空气中的浓度和接触时间的长短有关；致癌作用，研究表明甲醛对人体有很强的致癌作用。美国职业安全卫生研究所（NOSH）将甲醛确定为致癌物质，国际癌症研究所也建议将甲醛作为可疑致癌物对待，而世界卫生组织及美国环境保护局均将甲醛列为潜在的危险致癌物与重要的环境污染物加以研究和对待。《室内空气质量标准 GB/T 18883—2022》规定室内空气中甲醛浓度 1 小时平均值为 0.08 mg/m^3 。

3. 苯及其同系物 苯及其同系物是室内空气中 VOCs 的主要构成成分之一。苯从其物理表现方面分析，特点是：无色，带有一定的芳香气味，易挥发，易燃，通常情况下为液体及气体两种相态，通常以蒸气气体的形式在室内环境存在。

人体过量吸入苯及其同系物，或长期皮肤接触该类物质，会造成人体急性中毒，会对人体的中枢神经系统、血液系统造成一定的危害，极大地影响人体健康，同时也造成较大的安全隐患。《室内空气质量标准 GB/T 18883—2022》规定室内空气中苯一般 $\leq 0.03 \text{ mg/m}^3 \cdot \text{h}$ ，甲苯一般 $\leq 0.20 \text{ mg/m}^3 \cdot \text{h}$ ，二甲苯一般 $\leq 0.20 \text{ mg/m}^3 \cdot \text{h}$ 。

4. 苯并[a]芘 苯并[a]芘为多环芳香烃类化合物，无色至淡黄色，针状，晶体（纯品），熔点为 179°C ，沸点为 475°C ，是多环芳烃中毒性最大的一种致癌物。主要来源于含碳燃料及有机物的热解过程。烟气中的悬浮颗粒物上常吸附有苯并[a]芘，随颗粒散布于大气后，可污染空气、水源和土壤等。《室内空气质量标准 GB/T 18883—2022》规定室内空气中苯并[a]芘的 24 小时一般 $\leq 0.60 \text{ ng/m}^3$ 。