

有机溶剂挥发对室内空气质量的影响测定

陈颖先

海南中特环境监测技术有限公司 海南 海口 571155

【摘要】：有机溶剂挥发已经成为影响现代建筑室内空气质量的主要因素。本文系统地阐述了室内有机溶剂的来源，即建筑装饰材料、日用化学品、办公设备等，并对其挥发动力学特性进行了分析。主要评述了热解吸-气相色谱/质谱联用（TD-GC/MS）、固相微萃取-气相色谱/质谱联用（SPME-GC/MS）等主要的测定技术。研究显示甲醛、苯系物、三氯乙烯等代表性有机溶剂在密闭空间内积聚，会对接触的人群造成神经毒性、致癌风险、多系统损害。根据风险评价，本文又建立了以源头控制、通风稀释、末端净化为主要内容的综合控制策略体系。本研究给室内空气污染精准监测、科学评价和有效干预提供系统的理论基础和技术参考。

【关键词】：挥发性有机化合物；室内空气质量；采样分析；健康风险评估；污染控制

DOI:10.12417/2811-0528.26.05.064

当代城市居民有 80%到 90%的时间是在室内度过的，室内空气质量好坏直接影响公众的健康和生活方式。随着建筑节能标准的提高，现代建筑高密闭性虽然可以降低能耗，但是也大大减弱了室内外空气的自然交换，造成污染物在室内容易积聚。有机溶剂挥发释放问题最为突出。有机溶剂是指常温常压下可以挥发的有机化合物，一般具有低沸点、高蒸气压的特性。它们广泛存在于涂料、胶粘剂、清洁剂、个人护理用品和各种合成材料中。这些化合物会持续释放，室内形成复杂的混合物，浓度水平一般比室外高很多。世界卫生组织（WHO）已经把室内空气污染归为重要的环境健康风险因素。近些年来，我国新版的室内空气质量标准（GB/T 18883-2022）实行之后，对于三氯乙烯、四氯乙烯等某些有机溶剂的限值作出了规定，这表明室内空气质量管理工作步入了精细化、科学化的全新阶段。在此背景下，对有机溶剂的来源、有机溶剂浓度水平的准确测定、有机溶剂健康风险的科学评价以及有机溶剂有效控制策略的研究，有重要的理论和现实意义。

1 有机溶剂的来源与挥发特性

1.1 主要来源分析

室内有机溶剂的释放源具有多样性与持续性，主要可分为以下几类：①建筑与装修材料：建筑与装修材料是主要的、释放周期最长的污染源。人造板材（刨花板、密度板）生产时用到的脲醛树脂、酚醛树脂等粘合剂会持续释放甲醛和苯、甲苯、二甲苯等苯系物。各种溶剂型涂料、油漆和防水材料中含有的成膜助剂、稀释剂，在施工后数周到数月内持续挥发。②日用化学品、消费品：包括清洁剂、消毒剂、空气清新剂、杀虫剂、发胶、香水等。许多产品为了提高使用体验而添加的合成香料，常常会释放出萜烯类等挥发性有机物。③办公和电子设备：激光打印机、复印机工作时释放苯系物和臭氧；电脑、电视机

等电子设备外壳的塑料部件在发热时加速释放塑化剂（邻苯二甲酸酯）。④人类活动和室外渗入：吸烟、烹饪、燃香等活动也会产生一定量的挥发性有机物。另外室外工业排放、汽车尾气中的污染物也会通过门窗缝隙进入室内。

1.2 挥发动力学与影响因素

有机溶剂的挥发过程本质上是分子从材料内部向表面迁移，进而扩散到空气中的非稳态传质过程。其挥发速率受多种因素控制：内在物性：化合物的饱和蒸气压起决定性作用。蒸气压越大，挥发性越强。例如，甲醛在常温下蒸气压很高，所以在新装修的环境中浓度就特别高。环境参数：温度的影响最大，挥发速率一般随着温度的升高呈指数增长（符合阿伦尼乌斯方程）。相对湿度对亲水性化合物（甲醛、醇类）的挥发有促进作用。空气流速会影响材料表面的扩散边界层厚度，从而影响挥发速率。源特性：材料的装载率（单位空间内污染源材料的表面积）、使用年限、封装程度都会影响释放强度和随时间曲线。新材料释放速率较高，之后随时间逐渐衰减。

表 1 典型室内有机溶剂的特性与标准限值

化合物	主要来源	饱和蒸气压 (kPa, 25°C)	GB/T18883-2022 限值(mg/m ³)	主要健康关注
甲醛	人造板材、胶粘剂、涂料	~1.8	0.08(1小时均值)	致癌物，刺激作用
苯	溶剂、胶粘剂、汽油挥发	~12.7	0.11(1小时均值)	致癌物，造血系统损害
甲苯	涂料、油漆稀释剂	~3.8	0.20(1小时均值)	神经毒性，肾功能影响

三氯乙烯	干洗剂、金属清洗剂、胶水	~7.9	0.006(8小时均值)	致癌物,神经毒性
四氯乙烯	干洗剂、脱脂剂	~2.4	0.12(8小时均值)	可能致癌物,神经毒性

(注:续表1)

2 测定方法与技术

2.1 采样技术

准确测定始于具有代表性的采样。常用方法包括:主动采样(有泵采样):使用采样泵以恒定流量(如 50-200 mL/min)将空气抽过装有吸附剂(如 Tenax TA、Carbotrap 等)的采样管。该方法可采集时间加权平均浓度,流量和时间控制精确,适用于定量分析和标准方法(如 HJ 644-2013)。被动采样(扩散采样):依靠污染物分子的自然扩散作用在吸附介质上富集。无需动力设备,操作简便,成本低,适合进行长期(数天至数周)和大范围的筛查监测,但精度通常低于主动采样。直读式仪器与传感器:基于光离子化检测器(PID)、半导体传感器等原理的便携式设备,可实现实时监测和快速筛查,但可能受交叉干扰影响,多用于定性或半定量分析。

2.2 分析检测技术

实验室分析是获得准确定量结果的核心。气相色谱-质谱联用(GC-MS):当前 VOCs 分析的金标准。GC 实现复杂混合物的高效分离,MS 提供精确的定性(分子结构信息)和定量(特征离子定量)能力。该方法灵敏度高,可同时分析数十种化合物。热解吸-GC-MS(TD-GC/MS):将吸附管中的样品通过热脱附方式直接引入 GC-MS 系统。此过程无需溶剂,实现全样品转移,灵敏度极高,是目前环境空气 VOCs 测定的主流前处理技术。固相微萃取-GC-MS(SPME-GC/MS):一种无溶剂的集成采样-萃取-进样技术。通过涂有吸附涂层的熔融石英纤维进行吸附富集,然后直接热解吸进样。操作简便,适用于现场快速采样和特殊基质分析。高效液相色谱法(HPLC):对于甲醛、乙醛等极性、易溶于水的羰基化合物,通常采用衍生化(如与 2,4-二硝基苯肼反应)后,再进行 HPLC 分离与紫外检测。

表 2 主要 VOCs 测定技术比较

技术方法	原理特点	优点	局限性	典型检出限
TD-GC/MS	吸附管热脱附,在线分析	灵敏度高,无溶剂,自动化	设备昂贵,采样管需老化处理	0.01-0.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
SPME-G	纤维吸	操作简便,	纤维有寿命,	0.1-1.0

C/MS	附,热解吸进样	便携,无溶剂	定量需精细校准	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
被动采样-GC/MS	被动扩散吸附,实验室分析	成本低,可长期布点	精度较低,受环境风速影响	0.5-5.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
PID 直读	紫外光离子化检测	实时响应,便携	不能区分物种,读数受湿度影响	0.001-0.01 ppm

2.3 质量控制与保证

为确保数据准确可靠,需实施全过程质量控制:采样前对吸附管进行老化处理并评估空白值;采样过程中使用平行样、旅行空白和现场空白;实验室分析中采用内标法校正、建立校准曲线并进行加标回收实验,回收率一般要求处于 70%-130% 之间。

3 健康影响与风险评估

3.1 毒理学效应与健康危害

有机溶剂可通过呼吸道、皮肤等途径进入人体,其健康效应取决于暴露浓度、时间和个体敏感性。神经系统:主要靶器官。短期暴露于较高浓度可引起头晕、头痛、嗜睡、反应迟钝等中枢神经系统抑制症状。长期慢性暴露可能导致周围神经病变、记忆力减退和认知功能下降。致癌性与遗传毒性:苯、甲醛、三氯乙烯等被国际癌症研究机构(IARC)列为明确的人类致癌物(1类),与白血病、鼻咽癌等风险增加相关。肝、肾毒性:肝脏是代谢有机溶剂的主要场所,肾脏是排泄器官。长期暴露可导致肝肾功能损伤,如四氯化碳、三氯乙烯的肝毒性已获公认。刺激作用与过敏反应:甲醛、甲苯等对眼、鼻、呼吸道黏膜有强烈刺激作用。部分溶剂可能诱发或加重哮喘、过敏性皮炎等疾病。生殖与发育毒性:某些溶剂(如苯系物、乙二醇醚类)可能影响生殖系统,对胎儿发育造成不良影响。

3.2 风险评估方法

健康风险评估通常遵循四步法:危害识别、剂量-反应评估、暴露评估和风险表征。非致癌风险:采用危害商(HQ)进行评价。 $HQ = \text{暴露浓度} / \text{参考浓度}(RfC)$ 。 $HQ < 1$ 认为风险可接受; $HQ > 1$ 则存在潜在风险。致癌风险:通常采用线性无阈模型估算终身超额致癌风险(Risk)。 $Risk = \text{暴露浓度} \times \text{单位风险值}(UR)$ 。一般将 $Risk < 10^{-6}$ 视为可忽略风险, $> 10^{-4}$ 为不可接受风险。混合暴露:实际室内环境多为多种污染物共存,需关注其相加效应或协同效应。目前常用危害指数(HI,各污染物 HQ 之和)或基于毒理学关注浓度(TTC)的方法进行初步评估。

4 控制策略与措施

4.1 源头控制

从源头减少或消除污染物的释放是最根本有效的策略。选用绿色环保材料:在装修和采购家具时,优先选择具有低 VOCs 标识或符合更严格环保标准(如 CARB、EN 标准)的产品。使用水性涂料替代溶剂型涂料,选择实木或金属家具而非高密度人造板材家具。预处理与工艺优化:对新购的人造板材家具进行边缘封边处理,以封闭释放通道。鼓励装修后留出足够的通风空置期(建议至少夏季1个月、冬季3个月),让初期高浓度污染物充分释放。规范产品使用:减少室内使用空气清新剂、香薰等不必要的化学喷雾产品。按照说明书适量使用清洁剂,使用后及时通风。

4.2 通风稀释

加强通风是降低室内污染物浓度最直接、经济的方法。

自然通风:在室外空气质量良好时,应定期开窗通风,特别是形成对流风,可迅速有效降低室内污染物浓度。建议每日通风2-3次,每次不少于30分钟。机械通风:在无法开窗或室外污染严重时,应依赖机械通风系统。安装和使用新风系统,在引入室外空气的同时进行过滤,并确保新风量满足人均需求(如30 m³/h以上)。厨房、卫生间应安装并正确使用局部排风设备。

4.3 空气净化

当源头控制和通风无法满足需求时,空气净化设备可作为辅助手段。吸附技术:活性炭、活性氧化铝等多孔材料通过物理吸附作用去除 VOCs。优点是技术成熟,缺点在于吸附容量有限,需定期更换以防饱和和脱附造成二次污染。化学分解技术:光催化氧化(如 TiO₂ /UV)和低温等离子体等技术能将 VOCs 分解为水和二氧化碳等无害物质。但需注意可能产生不完全氧化的中间副产物。组合技术:市面上多数高效净化器采用“初效过滤+活性炭+高效催化分解”等多级复合技术,以应对不同

污染物,提升总体净化效率。

4.4 管理措施与公众意识

完善标准与法规:持续更新室内空气质量标准,扩大污染物管控清单,并加强对装修材料、家具产品的市场准入监管。开展专业检测:鼓励在装修后或购买新家具后,委托具备资质的机构进行室内空气质量检测。提升公众认知:通过科普宣传,提高居民对室内空气污染来源、危害及控制方法的认识,引导形成健康的生活习惯。

5 结论与展望

5.1 主要结论

有机溶剂挥发属于室内空气质量的复杂环境问题。来源广,释放具有持续性,在密闭空间里容易产生累积效应。以 TD-GC/MS、SPME-GC/MS 为代表的现代分析技术给精准测定提供有力的工具。甲醛、三氯乙烯等溶剂对人体健康有诸多危害,对儿童、孕妇等敏感人群更是如此。解决该问题要采取以源头控制为主,通风换气为辅,空气净化为辅助,配合有效的管理措施的综合治理方法。

5.2 未来展望

未来研究与应用的发展趋势可能集中在以下方向:快速在线监测技术:开发更高选择性、更低成本的传感器和在线质谱技术,实现室内 VOCs 的实时、连续、联网监测与智能预警。复合暴露与系统毒理学研究:从研究单一化合物转向研究室内环境中真实存在的化学混合物,评估其联合毒性效应。全生命周期与可持续设计:推动建筑材料、家具从设计、生产、使用到报废的全生命周期绿色化管理,从根本上减少污染物释放。智能化管控平台:结合物联网、大数据和人工智能技术,构建集监测、评估、控制、反馈于一体的智能室内环境管理系统,实现个性化、精准化的健康环境营造。通过科技进步、法规完善与公众教育的协同努力,必将有效提升室内环境质量,切实保障公众健康福祉。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会.GB/T 18883-2022 室内空气质量标准[S].北京:中国标准出版社,2022.
- [2] 张瑞,杨妍,任翔.二次热解析-毛细管气相色谱法测定室内空气中三氯乙烯、四氯乙烯、对二氯苯和苯系物[J].微量元素与健康研究,2024,41(02):58-59.
- [3] 向红梅,宋敏.环境检测中挥发性有机物检测技术的应用[J].中国高新科技,2025,(05):146-148.
- [4] 杜红花.基于居住用地规划室内蒸汽入侵模型修正的污染场地健康风险评估研究[D].湘潭大学,2019.
- [5] 陆一夫,董小艳,王秦,等.固体吸附-热解吸 GC-MS 测定室内空气中总挥发性有机物[J].环境卫生学杂志,2021,11(05):462-467.
- [6] 王智伟,梁卫辉.家庭生活用品中挥发性有机化合物的研究进展[J].建筑科学,2020,36(02):153-162.D.
- [7] 邓旭.低温等离子体技术-固定床吸附催化降解乙酸乙酯的应用研究[D].合肥学院,2020.