

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

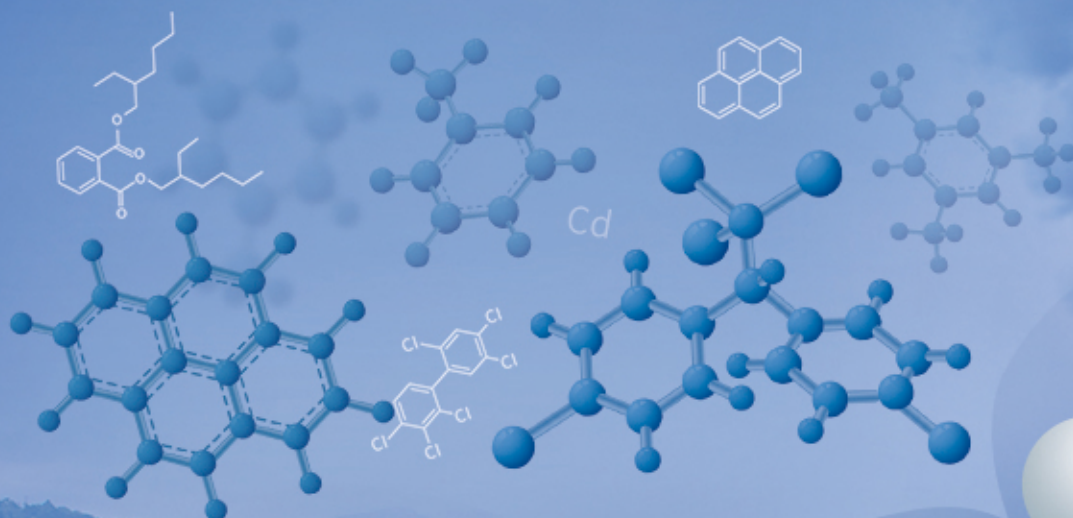
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

升金湖水体优先污染物筛选与风险评价

龚雄虎, 丁琪琪, 金苗, 薛滨, 张路, 姚书春, 王兆德, 卢少勇, 赵中华



PAHs

VOCs

HMs

PCBs

PAEs

OCPs

ANTs

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年10月

第42卷 第10期
Vol.42 No.10

目次

PM _{2.5} 化学组分连续观测在污染事件源解析中的应用	蔡凡涛, 尚玥, 戴维, 谢鸣捷 (4575)
汾渭平原 PM _{2.5} 空间分布的地形效应	黄小刚, 赵景波, 孙从建, 汤慧玲, 梁旭琦 (4582)
华中地区冬季灰霾天气下 PM _{2.5} 中重金属污染特征及健康风险评价: 以湖北黄冈为例	李星谕, 毛瑶, 陈展乐, 刘威杰, 程铖, 石明明, 许安, 苏业旺, 胡天鹏, 祁士华, 邢新丽 (4593)
华北区域大气中羰基化合物体积分数水平及化学反应活性	黄禹, 陈曦, 王迎红, 刘子锐, 唐贵谦, 李杏茹 (4602)
成都市春季 O ₃ 污染特征及关键前体物识别	韩丽, 陈军辉, 姜涛, 徐晨曦, 李英杰, 王成辉, 王波, 钱骏, 刘政 (4611)
基于边界观测的长三角某工业区 O ₃ 来源特征	黄晴, 黄银芝, 张珊, 金丹, 高松, 修光利 (4621)
廊坊开发区 8~9 月 O ₃ 污染过程 VOCs 污染特征及来源分析	张敬巧, 王宏亮, 方小云, 刘锐泽, 丁文文, 凌德印, 王淑兰 (4632)
广东省家具行业基于涂料类型的 VOCs 排放特征及其环境影响	曾春玲, 邵霞, 刘锐源, 姚懿娟, 李银松, 侯墨, 刘洋, 范丽雅, 叶代启 (4641)
厦门湾空气质量对新冠疫情管控的响应	徐超, 吴水平, 刘怡靖, 钟雪芬 (4650)
北京平原和延庆地区山谷风异同及对污染的影响	吴进, 李琛, 马志强, 孙兆彬, 韩婷婷, 邱雨露, 马小会, 李颖若, 朱晓娟 (4660)
两湖盆地冬季区域大气颗粒物污染特征及独特的风场和下垫面影响	朱燕, 赵天良, 白永清, 徐家平, 孙晓芸, 胡未央, 常嘉成, 杨婕, 朱从祯 (4669)
燃煤电厂颗粒物中硫酸根与硝酸根离子的转化规律	杨柳, 何晴, 盛重义 (4678)
长江流域主要干/支流化学特征及外源酸的影响	王琪, 于爽, 蒋萍萍, 孙平安 (4687)
土地利用对太湖入湖河道营养盐的影响	连心桥, 朱广伟, 杨文斌, 康丽娟, 朱梦圆, 许海 (4698)
基于 eDNA 技术的渭河浮游动物多样性及关键种生态位特征	梁东, 夏军, 宋进喜, 常剑波, 吴琼, 程丹东, 张怡恒, 孔飞鹤, 任源鑫 (4708)
三亚市水体中 PPCPs 的污染水平、分布特征及生态风险评价	任丙南, 耿静 (4717)
升金湖水体优先污染物筛选与风险评价	龚雄虎, 丁琪琪, 金苗, 薛滨, 张路, 姚书春, 王兆德, 卢少勇, 赵中华 (4727)
天目湖沙河水库水生态安全状况长期变化及影响因素	杨文斌, 段文秀, 崔扬, 朱广伟, 吴天浩, 许海, 朱梦圆 (4739)
华中地区供水水库抗生素抗性基因的季节变化及影响因素	张凯, 辛蕊, 李观家, 王倩, 王亚南, 许智恒, 崔向超, 魏巍 (4753)
快速城镇化进程中珠江三角洲硝酸型地下水赋存特征及驱动因素	吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 朱亮, 张玉玺 (4761)
盐城地区地表水化学空间特征及控制因素分析	王建, 张华兵, 许君利, 彭俊 (4772)
基于沉积物中总氮和总磷垂向分布与吸附解吸特征的白洋淀清淤深度	周亚婷, 陈兴宏, 李立青, 张伟军, 张美一, 王东升, 王洪杰 (4781)
硼酸和磷酸对 PMS/Co ²⁺ 均相催化氧化有机物的影响因素与机制	万琪琪, 陈铸昊, 曹瑞华, 王静怡, 文刚 (4789)
磁性生物炭负载 α-MnO ₂ 活化过一硫酸盐降解 2,2',4,4'-四溴联苯醚	李鑫, 尹华, 罗昊昱, 欧阳晓芳, 刘航, 祝铭韩 (4798)
紫外活化过硫酸钠灭活水中噬菌体 MS2 的特性及机制	张崇森, 杨昊明, 王真 (4807)
铈改性水葫芦生物炭对磷酸盐的吸附特性	王光泽, 曾薇, 李帅帅 (4815)
低温地下水净化工艺中氨氮去除性能及机制	李冬, 刘孟浩, 张瑞苗, 曾辉平, 张杰 (4826)
我国城市污泥中重金属的赋存形态与生态风险评价	耿源濂, 张传兵, 张勇, 黄豆豆, 闫姝晓, 孙腾飞, 程柳, 王静, 毛宇翔 (4834)
不同气候类型下污水厂活性污泥中微生物群落比较	杨思航, 秦泽生, 梁漫春 (4844)
部分亚硝化-厌氧氨氧化协同反硝化处理生活污水脱氮除碳	秦彦荣, 袁忠玲, 张明, 张民安, 刘安迪, 付雪, 马娟, 陈永志 (4853)
同步短程硝化-厌氧氨氧化-短程反硝化颗粒污泥培育过程及其性能	周峰, 刘勇弟, 厉巍 (4864)
多种微塑料提取方法在中国典型土壤中的应用	赵小丽, 刘子涵, 从辰宇, 韩剑桥 (4872)
柴达木盆地表土重金属污染与来源分析	陈亮, 张西营, 唐启亮, 耿盛, 王二龙, 李姜瑶 (4880)
快速城市化区域不同用地类型土壤重金属含量分布特征及生态风险	李梦婷, 沈城, 吴健, 黄沈发, 李大雁, 王敏 (4889)
广西都安县典型水田晒地球化学特征及影响因素	刘飞, 杨柯, 徐仁廷, 唐世琪 (4897)
炭化苹果枝通过减少土壤 DTPA-Cd 降低苹果砷木镉积累和镉伤害	邓波, 荀咪, 张玮玮, 杨洪强 (4908)
海南省集约化种植园中谷物、蔬菜和水果中重金属累积程度及健康风险	杨剑洲, 王振亮, 高健翁, 严慧, 胡树起, 唐世新, 龚晶晶 (4916)
环境中抗生素抗性基因丰度与抗生素和重金属含量的相关性分析: 基于 Web of Science 数据库检索	苗荪, 陈磊, 左剑恶 (4925)
银川市农田土壤中四环素类抗生素的污染特征及生态风险评估	张小红, 陶红, 王亚娟, 马志义, 周泽英 (4933)
施用不同来源粪肥对土壤中抗生素淋溶的影响	李斌绪, 朱昌雄, 宋婷婷, 马金莲, 张治国, 李红娜 (4942)
我国典型森林土壤微生物驱动的氮代谢途径特征解析	吕雪丽, 赵永鹏, 林清火, 彭显龙, 尹云锋, 蒋先军 (4951)
青藏高原高寒湿地春夏两季根际与非根际土壤反硝化速率及 nirS 型反硝化细菌群落特征分析	李玉倩, 马俊伟, 高超, 霍守亮, 夏星辉 (4959)
松嫩平原芦苇湿地退化与修复过程中土壤细菌和甲烷代谢微生物的群落结构	王秋颖, 王娜, 刘颖, 陈功, 何辉, 高婕, 庄绪亮, 庄国强 (4968)
不同轮作休耕下潮土细菌群落结构特征	南镇武, 刘柱, 代红翠, 张磊, 王娜, 徐杰, 刘开昌, 孟维伟, 王旭清 (4977)
稻田土壤光合细菌群落对镉污染的响应	罗路云, 金德才, 王殿东, 陈昂, 张德咏, 曾军, 匡炜, 张卓, 刘勇 (4988)
铁尾矿芦苇根际微生物和根内生菌群落分布及其限制性因子解析	曹曼曼, 王飞, 周北海, 陈辉伦, 袁蓉芳 (4998)
有机无机氮配施对不同程度盐渍土硝化和反硝化作用的影响	周慧, 史海滨, 张文聪, 王维刚, 苏永德, 闫妍 (5010)
水稻产量、稻田 CH ₄ 和 N ₂ O 排放对长期大气 CO ₂ 浓度升高的响应	于海洋, 宋开付, 黄琼, 王天宇, 张广斌, 马静, 朱春梧, 徐华 (5021)
原料和热解温度对生物炭中可溶性有机质的影响	闫代红, 马亚培, 宋凯悦, 马红亮, 高人, 尹云锋 (5030)
中国 84 个主要城市大气热岛效应的时空变化特征及影响因素	李宇, 周德成, 闫章美 (5037)
室内建筑装饰装修材料气味物质及其释放研究进展	张万众, 张彭义 (5046)
《环境科学》征订启事 (4814) 《环境科学》征稿简则 (4871) 信息 (4907, 5009, 5029)	

室内建筑装饰装修材料气味物质及其释放研究进展

张万众¹, 张彭义^{1,2,*}

(1. 清华大学环境学院, 环境模拟与污染控制国家重点实验室, 北京 100084; 2. 室内空气质量评价与控制北京市重点实验室, 北京 100084)

摘要: 室内建筑装饰装修材料释放的污染物可能导致气味, 是消费者抱怨室内空气质量的主要原因。目前, 针对室内建材气味污染物识别、定量及其释放规律的研究较少。本文总结了近年来室内气味物质的分析测定方法, 梳理了已有研究中有关石膏、木质材料、油毡、地毯、塑料、橡胶、人造革、涂料和胶粘剂等9类建筑装饰装修材料释放的气味污染物的研究结果, 列出了各类材料可能的致嗅物质及其嗅觉阈值, 最后对加强室内气味污染研究和控制提出了建议。本研究发现, 尽管不同建筑材料气味污染评价方法不统一, 嗅觉测定法却是主要的评价方法。此外, 虽然建筑材料释放的气味物质组成差异大, 但建筑材料随时间老化和臭氧氧化时产生的气味物质主要为含氧基团的化合物, 如醛、酮和酸等。

关键词: 建筑材料; 气味污染物; 嗅觉阈值; 臭氧; 二次释放

中图分类号: X823 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)10-5046-13 DOI: 10.13227/j.hjxx.202101284

Research Progress in the Odorants and Their Emissions from Indoor Building Decoration Materials

ZHANG Wan-zhong¹, ZHANG Peng-yi^{1,2,*}

(1. State Key Joint Laboratory of Environment Simulation and Pollution Control, School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Beijing Key Laboratory for Indoor Air Quality Evaluation and Control, Beijing 100084, China)

Abstract: The emission of pollutants from building decoration and furnishing materials associated with unpleasant odors is the main reason for complaints relating to poor quality indoor air. Currently, few studies have focused on the identification of odorants and the quantification of emissions from these building materials. Here, we summarize the analytical methods available for the study of indoor odorants and evaluate existing understanding of odorants from nine kinds of building materials, namely plaster board, wood-based materials, linoleum, carpets, plastics, rubber, artificial leather, paints, and adhesives. The possible odor-causing compounds emitted by these different materials and their odor threshold values are identified. Finally, suggestions are proposed for future research and control measures to minimize indoor odor pollution. Overall, olfactometry is the most important tool for odor analysis despite the non-standardized application of the technique when used in the assessment of odor emissions from building materials. In addition, there are large differences in the reported patterns of odorant emissions from building materials, although oxidized substances such as aldehydes, ketones, and acids are frequently identified in association with the aging of the materials via processes such as oxidation and ozone degradation over time.

Key words: building materials; odorants; odor threshold; ozone; secondary emission

有研究表明,人们在公共建筑和住宅内的时间约占80%~90%,乘坐公共交通工具的时间占7%;老年人在室内的时间甚至达到95%;儿童在学校的时间仅为5~8 h,其余时间均在家中;人们在户外度过的时间只有5%^[1~5]。可见,人们绝大部分时间都在室内度过。因此,室内空气质量(indoor air quality, IAQ)吸引了人们越来越多的关注,也成了当今的研究热点。有研究表明,IAQ对人体的舒适度和健康有重要影响^[6]。室内空气中难闻的气味、过高的气温和湿度以及各种化学物质的存在都可能对人体和心理产生有害影响^[7]。人体出现的头痛、过敏以及眼、鼻和咽喉发炎等症状统称为病态建筑物综合征(sick building syndrome, SBS)^[8,9]。该症状的致病机制尚无明确结论,但学者们通常将其归因于挥发性有机化合物(volatile organic compounds, VOCs)的存在。尽管,国内外已出台了建筑、装饰装修材料中污染物限量和检测的标准,消费者使用了低释放量的建筑材料,但是抱怨IAQ的

案例依然很常见^[10]。究其原因,一是SBS的成因十分复杂;二是人们对于气味与感觉刺激的混淆^[11]。鉴于消费者投诉案例的不断增多,生产厂家提供的产品不仅需要减少总挥发性有机物(total amount of VOCs, TVOC)的释放,而且要减少气味物质的释放。因此,开展气味污染物检测分析及其来源识别的研究显得十分重要。目前,国内外对气味的研究主要聚焦在废水治理^[12]、食品加工^[13]、垃圾填埋^[14]和畜禽养殖^[15]等一些释放气味的工农业生产过程和典型区域,包括气味物质采样及前处理技术、测定方法、嗅味评价、气味物质的分类、释放和扩散模型,以及气味物质的去除和控制技术研究^[16~18]。但是,室内环境中的气味研究和控制尚未得到广泛关注,尤其是装饰装修材料所释放的气味物质。

收稿日期: 2021-01-30; 修订日期: 2021-04-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(51878374, 22076094)

作者简介: 张万众(1989~),男,博士,主要研究方向为气味污染物识别及其释放机制, E-mail: zhzw0825@163.com

* 通信作者, E-mail: zpy@tsinghua.edu.cn

本文总结了近年来室内气味物质的分析测定方法,梳理了常用装饰装修材料释放的一次和二次气味污染物的种类、气味、嗅觉阈值和释放量等,并针对室内气味污染现状提出了建议,以期为相关工作者进行气味污染评价和控制研究提供参考。

1 室内气味物质的分析方法

用于建筑装饰装修材料气味测定的方法主要有嗅觉测定法^[19~21]、气相色谱/嗅觉测定 (gas chromatography coupled with olfactometry, GC/O)法、气相色谱/质谱/嗅觉测定 (gas chromatography coupled with mass spectrometry and olfactometry, GC/MS/O)法、分馏法和稀释法(包括注射器法和三点比较式臭袋法)。此外,用到的前处理方法有顶空法和热脱附法^[22~24]。近年来,基于在线 MS 检测技术的质子转移反应飞行时间质谱 (proton transfer reaction-time of flight-MS, PTR/TOF/MS)技术和传感器(电子鼻)法也已用于评估建筑材料的气味^[25, 26]。已有研究使用嗅觉测定法,确定了空气中的气味强度和释放的 VOCs 之间的关系。Zhang 等^[25]和 Gralapp 等^[26]采用动态嗅觉测定法,评估畜禽舍的气味强度。此外,嗅觉测定法耦合色谱技术也用来测试室内空气。Clausen 等^[27]使用 GC/O 技术评估可能导致不愉快气味的化合物。Cai 等^[28]采用 GC/MS/O 技术识别畜禽舍内动物释放的 VOCs。有研究表明,尽管建材的总释放量减少,其气味问题并

没有同时得到解决。这可能是因为建材的 TVOC 值和气味强度的相关性不大。通常情况下,嗅阈值很小的气味物质在室内空气中的浓度仅达到痕量级别 ($\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$),且用常规仪器分析方法难以检测其浓度,但它们对感官刺激(特别是嗅觉刺激)的贡献却很大。表 1 列出了不同测定方法检测到的室内气味物质。GC/O 法与 GC/MS/O 法^[15, 29~31]常用于检测和识别建材产品的气味物质。将从测试舱采集的样品进行气相色谱分析以确定 VOC 含量,评估员通过规律性的呼吸识别嗅辨端口的气味。评估小组一般由多人组成,每位评估员记录 VOC 的气味特征。通过计算气味物质的检出频率,评估建材产品的气味特性。筛选法用于确定待测场地的气味特性。该测试方法需在每个工作日进行 3 次,每次有 3~5 名评估员参加。评估员记录待测场地的气味特性,至少有两名评估员检测到的气味即被筛选为目标气味。统计筛选结果,计算目标气味的检出频率。嗅觉测定法^[32, 33]通过测试舱进行建筑产品气味排放测定。评估员通过标记有气味强度刻度的扩散器,评估试验箱中排出气体的即时气味强度。排序/匹配法^[34]通过评估员的感官对待测场地空气质量可接受度、气味强度和空气新鲜度进行评估。消费者健康调研法^[4]通过评估气味物质的气味、感官刺激和慢性毒性作用对 VOC 进行分类。基于气味商、感官刺激商和慢性毒性商确定危害商,计算得到气味物质的最优指导值。

表 1 不同测定方法检出的室内气味物质¹⁾

Table 1 Indoor odorants detected by various analysis methods

场地	测定方法	气味污染物	文献
办公室	筛选法	壬醛和癸醛	[35]
	GC/MS/O 法	丙烯醛、乙醛、甲基丙烯醛、丙醛、己醛、丙酸、己酸、反-2-辛烯醛、壬醛和丁酸	[29]
	嗅觉测定法	卡丁基醇、丙醛、丁醛、戊醛、己醛、庚醛、辛醛、壬醛、癸醛、丁酸、戊酸、己酸、庚酸、辛酸和甲基己酸	[32]
	嗅觉测定法	4-乙烯基环己烯、乙苯、正丁醚、苯乙烯、正壬烷、正丙苯、正癸烷、对异丙基苯、4-苯基-环己烯和异长叶烯	[30]
	排序/匹配法	癸醛、庚醛、己醛、壬醛、辛醛和戊醛	[34]
	嗅觉测定法	2-乙基-1-己醇、4-苯基环己烯、壬醛、癸醛、乙二醇单丁醚、乙酸丁酯、3,7-二甲基辛醇、2-(2-丁氧基乙氧基)乙醇、2-丁氧基乙醇、正甲基吡咯烷酮和香茶酚	[33]
商场	GC/O 法	乙醛、丙醛、丁醛、2-丁酮、甲酸、2-丁烯醛、戊醛、乙酸、己醛、丙酸、1-羟基-2-丁酮、1-戊烯-3-酮、1-戊烯-3-醇、丁酸、庚醛、辛醛、壬醛、月桂醛、己酸、十一醛、甲基萘、苯甲醛、戊酸和辛酸	[30]
教室	消费者健康调查法	苯、乙苯、甲醛、萘、对-二甲苯、间-二甲苯、邻-二甲苯、苯乙烯、甲苯、1,2,4-三甲苯、1,3-二氯苯和 1,4-二氯苯	[4]
畜禽舍	GC/MS/O 法	硫化氢、三甲胺、丙酮、丁醛、3-甲基丁醛、戊醛、己醛、庚醛、辛醛、壬醛、乙酸、丙酸、异丁酸、3-甲基丁酸、丁酸、戊酸、己酸、苯酚、4-甲基苯酚、4-乙基苯酚、吡啶和 3-甲基吡啶	[31]
	GC/MS/O 法	乙酸、丙酸、乙基乙酸、异丁酸甲酯、3-己醇、乙醛、苯甲醛、苯乙酮、1,3,5-环庚三烯、吡啶、四氯甲烷和丁烷	[15]

1) GC/MS/O 法和 GC/O 法气味物质检出限分别为 ppb 级别 (检出浓度低至 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 和 ppm 级别 (检出浓度低至 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$) ; 筛选法、嗅觉测定法、排序/匹配法和消费者健康调研法并未测定气味物质浓度,因此均未给出气味物质的检出限

表 2 列出了我国关于环境空气/材料气味和装饰装修材料释放限量标准的评价指标、试验条件和
表 2 与气味和装饰装修材料释放限量相关的标准

Table 2 Standards relating to limiting emissions of odorants from indoor decorating and refurbishing materials					
类别	标准名称 (标准号)	评价指标	试验条件	适用范围	文献
气味标准	包装材料及制品气味的评价 (GB/T 35773-2017)	气味强度	装置: 金属罐 温度: 未指出	纸和纸板、塑料、金属、木材和复合材料等包装材料及制品	[36]
	皮革 气味的测定 (QB/T 2725-2005)	气味等级	装置: 金属罐 温度: $(65 \pm 3) ^\circ\text{C}$	皮革	[37]
	絮用纤维制品异味的测定 (GB/T 28024-2011)	异味类别	装置: 金属容器 温度: $(40 \pm 3) ^\circ\text{C}$	絮用纤维制品及其他纺织产品	[38]
	空气质量 恶臭的测定 三点比较式臭袋法 (GB/T 14675-93)	臭气浓度	装置: 聚酯无臭袋和采样瓶 温度: 未指出	不同形式排放的气体样品和环境空气样品	[39]
	感官分析 方法学 检测和识别气味方面评价员的入门和培训 (GB/T 15549-1995)	气味名称和气味描述	装置: 棕色玻璃瓶 温度: 未指出	农产食品业和使用嗅觉分析的行业	[40]
	胶粘剂气味评价方法 (HG/T 4065-2008)	气味等级	装置: 玻璃罐 温度: $65 ^\circ\text{C}$	干湿胶粘剂	[41]
	室内装饰装修材料 人造板及其制品中甲醛释放限量 (GB 18580-2017)	甲醛释放量	装置: 气候箱 温度: $(23 \pm 0.5) ^\circ\text{C}$ 湿度: $(45 \pm 3) \%$ 空气交换率: $(1.0 \pm 0.05) \text{h}^{-1}$	室内用各种类人造板及其制品	[42]
装饰装修材料释放限量标准	室内装饰装修材料 溶剂型木器涂料中有害物质限量 (GB 18581-2009)	密度、挥发物含量、光泽、挥发性有机化合物含量	温度: $(23 \pm 0.5) ^\circ\text{C}$ 湿度: $(50 \pm 5) \%$	溶剂型木器涂料及木器用溶剂型腻子	[43]
	室内装饰装修材料 内墙涂料中有害物质限量 (GB 18582-2008)	挥发性有机化合物含量、苯、甲苯、乙苯和二甲苯总和、游离甲醛以及可溶性重金属	装置: 取样器和装样容器	室内装饰装修用水性墙面涂料和水性墙面腻子	[44]
	室内装饰装修材料 胶粘剂中有害物质限量 (GB 18583-2008)	游离甲醛、苯、甲苯、二甲苯以及总挥发性有机物含量	温度: $(105 \pm 1) ^\circ\text{C}$	室内建筑装饰装修用胶粘剂	[45]
	室内装饰装修材料 木家具中有害物质限量 (GB 18584-2001)	甲醛释放量和可溶性重金属含量	装置: 干燥器 温度: $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$	木家具产品	[46]
	室内装饰装修材料 壁纸中有害物质限量 (GB 18585-2001)	重金属元素、氯乙烯单体和甲醛含量	装置: 玻璃器皿 温度: $40 ^\circ\text{C}$	以纸为基材的壁纸	[47]
	室内装饰装修材料 聚氯乙烯卷材地板中有害物质限量 (GB 18586-2001)	氯乙烯单体、可溶性重金属和挥发物含量	装置: 广口瓶 温度: $(70 \pm 1) ^\circ\text{C}$	聚氯乙烯卷材地板、聚氯乙烯复合铺贴板和聚氯乙烯车用地板	[48]
	室内装饰装修材料 地毯、地毯衬垫及地毯胶粘剂 有害物质释放限量 (GB 18587-2001)	TVOC、甲醛、苯乙烯、4-苯基环己烯、丁基经基甲苯和2-乙基己醇含量	装置: 小型环境试验舱 温度: $(23 \pm 1) ^\circ\text{C}$ 湿度: $(50 \pm 5) \%$ 空气交换率: 1h^{-1}	地毯、地毯衬垫及地毯胶粘剂	[49]
	混凝土外加剂中释放氨的限量 (GB 18588-2001)	氨释放量	装置: 干燥瓶	室内混凝土外加剂及室外工程用混凝土外加剂	[50]
	建筑材料放射性核素限量 (GB 6566-2010)	内照射指数和外照射指数	装置: 样品盒	无机非金属材料	[51]
	室内装饰装修材料 水性木器涂料中有害物质限量 (GB 24410-2009)	挥发性有机化合物含量、苯系物含量和乙二醇醚及其酯类含量	装置: 取样器和装样容器	水性木器涂料以及木器用水性腻子	[52]
	塑料家具中有害物质限量 (GB 28481-2012)	邻苯二甲酸酯、重金属、多环芳烃、多溴联苯和多溴二苯醚	装置: 索氏提取器和圆底烧瓶	室内外和公共场所使用的各类塑料家具产品	[53]
	建筑胶粘剂有害物质限量 (GB 30982-2014)	游离甲醛、苯、甲苯、二甲苯、卤代烃、甲苯二异氰酸酯和邻苯二甲酸酯	装置: 蒸馏瓶	溶剂型、水基型和本体型建筑胶粘剂	[54]
	混凝土外加剂中残留甲醛的限量 (GB 31040-2014)	甲醛	装置: 蒸馏瓶	具有室内使用功能的建筑用混凝土外加剂	[55]
	室内装饰装修材料 门、窗用未增塑聚氯乙烯 (PVC-U) 型材有害物质限量 (GB/T 33284-2016)	氯乙烯单体、可溶性重金属和邻苯二甲酸二(2-乙基)己酯含量	装置: 广口瓶 温度: $(70 \pm 1) ^\circ\text{C}$	以聚氯乙烯树脂为主要原料的门和窗用未增塑聚氯乙烯 (PVC-U) 型材	[56]
	胶粘剂挥发性有机化合物限量 (GB 33372-2020)	VOC 含量	温度: $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$	溶剂型、水基型和本体型胶粘剂	[57]

适用范围等. 迄今为止,我国与环境空气/材料气味有关的国家和行业标准有6项,其中,1项检测和识别评价人员的培训标准,1项空气质量恶臭测定标准,4项材料和产品气味测定标准. 仅有皮革气味的测定(QB/T 2725-2005)和胶粘剂气味评价方法(HG/T 4065-2008)与建筑装饰装修材料气味测定有关. 与建筑装饰装修材料有害物质限量有关的标准比较多,除2001年左右发布的10项强制性标准外,近年来也陆续增补了有关水性木器涂料、塑料家具和建筑胶粘剂等强制性标准,以上标准给出了主要建筑材料及装饰装修材料有害物质的限量,但并未从气味污染物的角度给出具体规定. 此外,用于室内气味污染物的评价方法尚未统一,气味评价体系尚未完善,不同建材产品气味污染评价方法不一致,相同建材产品气味污染评价方法也不尽相同. 随着近些年市场上新材料和新产品不断出现,迫切需要制订针对气味污染物的相关标准,如材料和产品气味测定、气味释放限量和室内空气气味质量标准,保障消费者的健康.

2 室内各类材料释放的气味物质

室内VOC和气味来源于建筑材料、家具、家电设备和人类活动等. 其中,人类日常活动包括:烹饪、吸烟、家具清洁及保养、吸尘和扫地^[34,58-60]等;家电设备如复印机和计算机^[61]. 另外,外部环境的气味物质也可能转移到衣服等织物上,以上污染物包括动物毛发、香烟烟雾和化学制剂等^[4,34,62].

建筑和装饰装修材料、家具的表面也会散发出对人体健康构成危害的物质. 建筑材料的选择不仅对建筑物的结构强度有重要意义,而且对室内空气质量很重要. 不同类型的材料可能具有不同的气味释放模式,这取决于使用的原料、添加剂和加工技术等. 在各类材料释放的物质中,具有典型气味的物质可能对人体健康带来生理上或心理上的不适. 随着材料使用周期的延长,由材料氧化、水解等降解过程产生的二次释放物也可能产生气味. 值得注意的是,材料中潜在气味物质不一定会导致该材料散发出典型的气味. 这是因为,材料在空气中释放的气味受多种环境因素影响. 因此,了解室内各种环境因素是如何影响气味和气味物质的释放速率就显得十分必要. 已有研究考虑的环境因素包括空气中的气味物质浓度、换气次数和建材产品的使用年限、温度和湿度等^[63]. Cometto-Muñiz等^[64]的研究测定了多种醛和酮的嗅觉阈值,发现随着碳链的增加,醛酮的嗅觉阈值随之降低,提出了刺激阈值机制的关键

是吸入物质从气相到可感知生物相的转移. Xiong等^[65]采用理论研究法推导出甲醛和半挥发性有机物的释放速率与温度之间的关系式,此关系式与试验结果高度一致性证实了该方法的可靠性和有效性. 利用此关系式,研究者们可获得试验温度之外的污染物释放速率,为其工程应用提供了可能. Clausen等^[27]的研究发现相对湿度对乙烯基地板的半挥发性有机物释放速率几乎无影响,但对造成该结果的机制却并未提及. Shu等^[66]的研究表明,随着室内空气相对湿度的增加,极性物质更易吸附于建筑材料表面,这大大增加了其表面反应的可能性. Duncan等^[67]的研究发现,与室外相比,室内水溶性有机物的含量大幅度增加. 潮湿的室内环境下,水溶性有机物的存在会增大室内具有刺激性氧化物的浓度.

2.1 石膏/熟石膏产品释放的气味物质

石膏是一种普通且常用的建筑材料,由于其加工方便和用途广泛,可用作墙面和天花板涂覆的干墙、灰泥或砂浆等. 石膏一般由颗粒状的建筑骨料(沙子)和粘合剂(石灰)组成. 表3列出了石膏/熟石膏释放到室内空气中的污染物、嗅阈值及其释放量. 石膏材料会释放多种污染物,引起气味的物质种类较多,但主要气味物质是酸类、醛类、酮类和醇类. Burdack-Freitag等^[68]的研究通过GC/MS/O分析了含有机粘合剂的石膏成分. 石膏材料释放的有机酸,如乙酸、戊酸和己酸是汗酸味和霉味的主要贡献者. 石膏样品释放的(*E*)-2-丁烯醛、2-乙基-1-己醇、1-己烯-3-酮和对-二甲苯,是塑料气味的主要贡献者. 而(*z*)-4-庚醛是腐烂气味的主要贡献者. 此外,石膏还释放出其他VOCs,例如,(环)烷烃/烯烃、胺、酰胺、酯、乙二醇、杂环化合物、酚类化合物、邻-苯二甲酸酯、硅烷、硅氧烷和萜烯. 以上物质的浓度低于其气味阈值,一般不会造成气味污染. 熟石膏是一种基于CaSO₄结构并发出石膏和略带牛奶气味的建材产品^[69]. Mayer等^[69]的研究发现,GC/O法测定的熟石膏样品中,醛、酮、乙酸、2-乙酰基-1-吡咯啉以及微量的含硫化合物(硫化物、二硫化物、三硫化物、硫醇和芳香族硫化物)是其主要气味物质. 根据熟石膏原料和加工方法的差异性,其硫化物的浓度可能达到致气味(含硫气味占主导地位)的水平. 经过臭氧处理的熟石膏样品会导致苯甲醛二次释放的增加,因此,苯甲醛也可能是熟石膏的气味源之一^[70].

2.2 木质材料释放的气味物质

迄今为止,木材的气味研究主要集中在木材用作葡萄酒和白酒的增香剂,一般通过溶剂萃取技术

表 3 石膏/熟石膏释放到室内空气中的气味物质¹⁾

Table 3 Potential odorants emitted into indoor air by plaster/gypsum

基团化合物	气味物质	气味描述	嗅阈值 / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	释放量 / $\mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$	文献
有机酸	乙酸	汗酸味和霉味	15 ~ 363	—	[11]
	戊酸		0.16	—	[71]
	己酸		3 ~ 60	—	[11]
脂肪醛	(<i>E</i>)-2-丁烯醛	塑料气味	—	—	[68]
	乙醛	腐烂气味	2.7	2.1	[70,72]
	(<i>Z</i>)-4-庚醛	腐烂气味	56 ~ 220	—	[73]
	丙醛	—	2.4	0.2	[70,74]
	苯甲醛	苦味	85	0.2	[70,75]
	甲基苯甲醛	—	—	0.5	[70]
	戊醛	青草味	1.5	0.4	[70,74]
	己醛	青草味	1.2	0.4	[70,75]
	庚醛	腐烂味	0.9	—	[74]
	辛醛	柑橘味	0.1	—	[74]
	壬醛	柑橘味	2.0	—	[74]
	癸醛	香菜味	2.6	—	[74]
脂肪酮	1-己烯-3-酮	塑料气味	0.01 ~ 0.1	—	[68]
醇	2-乙基-1-己醇		500	—	[11]
苯	对-二甲苯		1410	—	[11]
单/二/三硫化物	二甲基三硫化物	硫磺味	—	—	[69]
硫醇	丙硫醇	硫磺味	0.04	—	[71]
芳香族硫化物	芳香族硫化物	硫磺味	—	—	[69]

1) “—”表示文献中没有对应的数据,下同

手段进行分析^[76-78].对于广泛用作装修和家居的木质材料释放的气味物质研究相对较少.表4列出了木质材料释放到室内空气中的气味物质及其嗅阈值等.有研究表明,经加工处理的木材、木制品和家具释放的主要 VOCs 是萜烯、饱和醛、不饱和醛和光反应产生的苯甲醛和苯乙酮等.而萜烯包括 α -蒎烯、 β -蒎烯、 Δ^3 -蒎烯、长叶烯、 β -水芹烯、莰烯、月桂烯、柠檬烯和石竹烯等^[69].Liu 等^[79]的研究通过 GC/MS/O 法发现黄松比冷杉的气味物质数量多.萃取处理使气味物质的含量和气味强度有所降低或不变,但苯的残留也增加了苯气味.Mayer 等^[80]的研究通过 GC/O 和动态稀释技术分析在涂油/蜡/清漆的实木复合地板样品中,戊醛和己醛均具有青草气味, α -蒎烯和 β -蒎烯具有木质气味,1-辛烯-3-酮具有蘑菇味.涂油/蜡的实木复合地板释放的特殊气味物质为辛醛、(*Z*)-2-壬烯醛和 (*E*)-2-壬烯醛;涂清漆的样品释放的特殊气味物质为苯甲醛和苯乙酮.此外,木质材料在气味类型和强度上均表现出差异性.与涂覆蜡和油相比,涂覆清漆防止气味从木质材料释放的作用更强,因此,清漆木地板的气味强度较小.刨花板、定向刨花板及中密度纤维板等人造板材之所以受欢迎,是因为它们价格便宜、用途广泛且使家具等建材有了自然的质感.人造板是通过小块木材、粘合剂、木材防腐剂、阻燃剂、硬化剂和疏水剂等制成的.在以上材料中,甲醛和 VOCs 的

排放是已有研究主要关注的问题.He 等^[81]的研究发现,刨花板和中密度纤维板的甲醛主要来源于粘结木质颗粒的树脂(如脲醛树脂),而其他 VOC 主要来源于木材本身.Baumann 等^[82,83]研究了在其他 VOC 中,醛类(戊醛、己醛、庚醛、辛醛和壬醛)和萜烯(α -蒎烯、 β -蒎烯、 Δ^3 -蒎烯、柠檬烯和樟脑烯)来源于木材自身或木材降解.尽管醛类和萜烯是众所周知的气味物质,相关研究并未评估以上化合物对木质材料的气味影响.本课题组在研究刨花板释放的挥发性有机物时发现,正己醛和正戊醛是主要的气味物质^[84].Väisänen 等^[85]的研究通过 PTR/TOF/MS 技术发现 7 种不同塑木板萜烯、愈创木酚、糠醛和乙醛的释放量随时间逐渐衰减,而主要气味物质是愈创木酚和乙醛.此外,有研究发现,定向刨花板粘合剂释放的乙酸和丁酸源具有汗酸味.Schreiner 等^[86]的研究通过 GC/MS/O 检测了苏格兰松的主要气味物质是 (*E,E*)-壬-2,4-二烯醛、香草醛、苯乙酸、3-苯丙酸、 δ -辛内酯和 α -蒎烯,发现气味物质是由有机酸和木质素的降解产生的.

Nicolas 等^[70]的研究报道了在臭氧的影响下,萜烯释放量会下降,而醛(如正 C3 醛、正 C5 ~ C10 醛,苯甲醛、2-壬烯醛、4-壬烯醛和 6-壬烯醛)的释放量随之增加.Gunschera 等^[87]的研究发现,以前使用的木材防腐剂五氯苯酚虽然可以防止木材腐烂,

但是在潮湿的高海拔环境下,因微生物作用而生成的2,3,4,6-四氯苯甲醚被确定为室内空气中的主要成分.由于2,3,4,6-四氯苯甲醚的嗅阈值非常低($0.01\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$),它可能是产生气味的来源^[88].

表4 木质材料释放的气味物质
Table 4 Potential odorants emitted by wood-based materials

基团化合物	气味物质	气味描述	嗅阈值/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	文献
有机酸	乙酸	汗酸味	15~363	[11]
	丁酸	汗酸味	1	[74]
脂肪醛	戊醛	甜和乙醇味	1.47	[74]
	己醛	青草味	1~58	[11]
	庚醛	腐烂味	14	[71]
	辛醛	肥皂和柑橘味	0.05	[72]
	壬醛	柑橘味	0.5	[71]
	(<i>z</i>)-2-壬烯醛	油脂味	0.02	[73]
	(<i>E</i>)-2-壬烯醛	油脂味	0.1	[80]
萜烯	α -萜烯	木质气味	100	[11]
	β -萜烯	木质气味	187	[72]
	Δ^3 -萜烯	柑橘味	3 391	[72]
	长叶烯	—	920	[89]
	月桂烯	青草味	44.5	[90]
	柠檬烯	柑橘味	215	[74]
	石竹烯	泥土、木头和丁香味	1 500	[91]
芳香醛	苯甲醛	苦味	0.8	[71]
苯酮	苯乙酮	甜和杏仁味	835	[71]
烯酮	1-辛烯-3-酮	蘑菇味	0.03	[80]

2.3 油毡释放的气味物质

油毡作为一种具有优良弹性、经久耐用的地板材料已得到了广泛应用.它一般由亚麻酸(亚麻籽油)天然树脂、软木或木材刨花、矿物填料和颜料制成.表5列出了油毡释放到室内空气中的气味物质.Jensen等^[92]利用GC/O法研究了油毡的气味物质,检测结果显示其主要气味物质是青草味、柠檬味和腐臭味的短链2-烯醛(不超过9个碳)和脂肪酸(不超过6个碳),其他还有酮、甲苯以及2-戊基

呋喃.经过氧化作用后,油毡释放的醛会生成相应的脂肪酸,这可能是老化油毡的气味与新油毡相比发生变化的原因^[92].Nicolas等^[70]的研究发现,在臭氧的作用下,苯甲酸、丙酸和醛的释放量均会增加,而1-戊烯-3-醇和2-戊酮的释放量会减少.此外,在撒水或高含水量混凝土的条件下,油毡会释放出二次气味物质,如脂肪酸、乙二醇醚和2-癸醛.其中,戊酸和2-癸醛的嗅阈值极低($<5\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$),因此,油毡会产生气味^[75].

表5 油毡释放的气味物质
Table 5 Potential odorants emitted by linoleum

基团化合物	气味物质	气味描述	嗅阈值/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	文献
有机酸	C8以下的酸	腐臭味	—	[92]
脂肪醛	C11以下的2-烯醛	青草和柠檬味	—	[92]
酮	2,3-丁二酮	苦味	15	[79]
	1-辛烯-3-酮	蘑菇味	0.03	[80]
	1-戊烯-3-酮	—	0.1~1	[93]
芳烃	甲苯	橡胶和樟脑味	600~6 000	[71]
呋喃	2-戊基呋喃	—	19	[75]

2.4 地毯释放的气味物质

长期以来,地毯因其绝缘性和美观性一直被用作地板的覆盖层.它一般由附着在胶黏剂上的天然或合成纤维组成.表6列出了地毯释放的气味物质及其嗅阈值.Hodgson等^[94]的研究发现,以聚氯乙烯为衬底的地毯会释放出醋酸乙烯酯和1,2-丙二醇,而聚氨酯衬底的地毯会释放出丁羟甲苯.丁苯橡胶

乳胶衬垫的地毯会释放出苯乙烯、4-苯基环己烯和4-乙基环己烯.而在以上地毯产品中,均检测出了正构脂肪醛(最高C10)、苯甲醛和甲基苯甲醛^[70].臭氧处理对不同地毯的总挥发性有机化合物的释放产生显著影响.经臭氧处理后,饱和或不饱和醛(2-壬烯醛、乙醛和甲基苯甲醛)、支链/无支链的酮(如2-丁酮)和脂肪酸的含量均有不同程度的增加.

其中,由于2-壬烯醛的持久性释放和极低的嗅觉阈值($\leq 0.1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$),会导致气味的产生^[70,95,96].有研究表明,丁苯橡胶衬底的地毯释放的苯并噻唑随

温度的增加而增加.尽管在建筑环境中,温度的变化差异不大,但是太阳下停放的汽车内温度可高达70℃,因此地毯可能是汽车内气味来源之一.

表6 地毯释放的气味物质

Table 6 Potential odorants emitted by carpets

基团化合物	气味物质	气味描述	嗅觉阈值/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	文献
酯	醋酸乙烯酯	—	400	[89]
醇	1,2-丙二醇	—	16 000	[97]
芳香醛	苯甲醛	苦味	0.8	[80]
烃	苯乙烯; 4-苯基环己烯	橡胶味; —	202 ~ 430; 2	[80,98]

2.5 各类塑料释放的气味物质

塑料在室内环境中广为使用.塑料在制造过程中,由于外界条件的影响,如热、压力、光或氧气等,会发生一系列复杂的反应.用作添加剂和促进剂的单体、反应产物以及原材料等均可能具有气味.表7列出了不同类型塑料释放的气味物质.聚苯醚的主要气味物质分别为酚醛味的2-甲基苯酚

和烤烟味的2-甲氧基苯酚;而其他聚烯烃的主要气味物质为烘烤味的2-乙酰-1-吡咯啉.有研究表明,聚乙烯的塑料产品中,气味物质主要为醛类,如乙醛、丙-2醛、正丙醛、丁-2醛、正丁醛、异丁醛、2-甲基正戊醛、正己醛、正庚醛、正辛醛、辛-2醛、壬-2醛和正壬醛^[99~101].表7为具体的分类说明.

表7 塑料释放到室内空气中的气味物质

Table 7 Potential odorants emitted into indoor air by plastics

建筑材料	基团化合物	气味物质	气味描述	嗅阈值/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	文献
聚丙烯	酯	乙酸苄酯	—	1	[89,102]
	酚	2-甲氧基苯酚	烟味	0.1	[80,102]
	烯	柠檬烯	柑橘味	135	[80,102]
聚乙烯	脂肪醛	8-壬烯醛	—	0.2	[73]
其他聚烯烃	吡咯啉类	2-乙酰基-1-吡咯啉	烘烤味	0.02	[80]
	烯酮	2,3-丁二酮	苦味	15	[80]
	脂肪醛	1-己烯-3-酮	蘑菇味	0.18	[80]
		(<i>z</i>)-2-壬烯醛	油脂味	0.02	[73]
		(<i>E</i>)-2-壬烯醛	油脂味	0.1	[80]
聚苯乙烯	烃	苯乙烯	橡胶味	202 ~ 430	[80]
聚氯乙烯	醇	2-乙基-1-己醇	塑料味	500	[80]
	酚	1-丁醇	—	117	[71]
		苯酚	酚味	22	[71]
聚氨酯	甲胺	三甲胺	鱼腥味	0.08	[71]
	吡嗪类	2-乙基-3,5-二甲基吡嗪	土腥味	0.007	[80]
聚苯醚	酚	愈创木酚	烟味	0.1 ~ 0.8	[103]
		甲酚	酚味	0.3	[80]
		2-甲基苯酚	酚味	0.3	[80]

2.5.1 聚丙烯

Hopfer等^[104]的研究通过GC/O分析发现,聚丙烯释放出的气味物质主要为不饱和的C6~C9酮和醛.以上气味物质是由烷烃和烯烃的氧化产生的,其浓度随老化时间的增加而增加.在生产过程中添加的常用稳定剂并不能阻止氧化反应的进行.Zobel^[102]的研究设计了一种新型装置,发现聚丙烯包装膜的气味物质为乙酸苄酯、2-甲氧基苯酚和柠檬烯,三者的释放速率分别为0.005 1~0.17、0.001 6~0.12和0.003 7~2.8 $\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$.

2.5.2 聚乙烯

与聚丙烯相似,聚乙烯塑料的主要气味物质同

样为不饱和的C6~C9酮和醛,也是由于氧化作用而产生,而添加的抗氧化剂仍然无法阻止氧化反应的发生^[104].Sanders等^[105]的研究表明,8-壬烯醛是高密度聚乙烯塑料气味的主要贡献者,但是,该研究未分析空气样品,仅使用蒸馏法获得了VOCs.另外,聚乙烯样品中还检测出了来源于矿物油原料且具有硫磺气味的硫化物和硫醇等.此外,聚乙烯热氧化处理后形成的二次VOC会引起强烈的蜡味或烧焦的塑料味.使用GC/O方法分析,可以识别出热氧化的样品中有C6~C9饱和/不饱和醛和酮.其中,Bravo等^[106]的研究证实了聚乙烯样品的主要气味贡献物质是2,3-丁二酮、己醛、1-庚烯-3-酮、辛醛、1-辛

烯-3-酮、壬醛、1-壬烯-3-酮和(*E*)-2-壬烯醛。Strangl 等^[107]的研究通过 GC/O 法和 GC/MS/O 法发现长久使用后的高密度聚乙烯废料中的气味物质是苯丙素类和萜烯类,异味物质萃取稀释试验证实了传统的回收处理方法对气味的消除效果不明显。

2.5.3 其他聚烯烃

聚丁烯、聚异丁烯和聚 4-甲基戊烯等也是重要的聚烯烃产品。通常,以上聚烯烃在加工过程中会添加聚丙烯、聚乙烯和苯乙烯-丙烯腈等产品生成共聚物^[108]。Mayer 等^[80]的研究发现,一种共聚物的主要气味物质是含氮化合物 2-乙酰基-1-吡咯啉,且其具有强烈的烘烤味。聚烯烃的主要成分中不含氮,因此这种气味来源于添加剂。由于 2-乙酰基-1-吡咯啉气味阈值非常低($0.02 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$),即使其含量低也会引起气味^[80,109]。Mayer 等^[110]的研究发现,共聚物的气味贡献者主要为具有烘烤或天竺葵气味的 2,3-丁二酮、1-己烯-3-酮、3-甲基磺胺基丙醛、(*z*)-2-壬烯醛和(*E*)-2-壬烯醛。共聚物气味组分和总体气味与注塑过程中的原料配方和加工条件(如熔体温度和停留时间)密切相关。在共聚物加工过程中添加气味清除剂可减少除醛以外的酸、酚和呋喃酮的量。因此,为寻求正确的共聚物气味消除方法,考察致气味成分的化学结构就显得十分重要。

2.5.4 聚苯乙烯

聚苯乙烯通常会释放出具有刺激性气味的单体苯乙烯和甲基苯乙烯。有研究表明,聚苯乙烯经臭氧处理 24 h 后,虽然苯乙烯释放量下降,但甲醛、苯甲醛和苯甲酸等气味物质的释放量反而会增加^[70]。

2.5.5 聚氯乙烯

Väisänen 等^[85]的研究表明,聚氯乙烯地板释放的气味污染物主要是 2-乙基-1-己醇、苯酚和 1-丁醇。当其与潮湿的建筑材料接触时,如呈碱性的潮湿混凝土,2-乙基-1-己醇的释放量急剧增加。这是因为该物质可通过增塑剂邻苯二甲酸二-2-乙基己酯发生的水解反应生成。经臭氧处理的聚氯乙烯会导致 2-丁酮的二次释放及醛类的增加^[70]。

2.5.6 聚氨酯

聚氨酯的气味通常是在生产制造流程中的加热固化工段产生的。Mayer 等^[69]的研究发现,聚氨酯气味来源于胺催化剂,以上催化剂加热时被降解为具有较低气味阈值的甲胺,如三甲胺,具有鱼腥味。此外,在聚氨酯样品中还检测出了气味阈值极低的具泥土味和坚果味吡嗪类化合物,如 2-乙基-3,5-二甲基吡嗪(其嗅觉阈值为 $7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)^[69,78]。

2.5.7 聚苯醚

以取代酚为原料,以酚类抗氧化剂为添加剂合

成聚苯醚。因此,以上酚及其降解产物可能从塑料材料中释放出来。Mayer 等^[80]的研究通过 GC/O 法,识别出聚苯醚样品中气味活性物质分别为愈创木酚、甲酚和 2-甲基苯酚。

2.6 橡胶释放的气味物质

橡胶是一种由天然或人工合成的具有弹性的聚合物。为了提高橡胶材料的耐久性,其通常会经过硫化处理。在硫化处理过程中,弹性体在加热条件下与添加剂如过氧化物或硫以及含氮/硫的促进剂(如苯并噻唑)发生交联作用。因此,橡胶可释放苯并噻唑衍生物和胺类化合物,这是造成其典型气味的主要成分。Mayer 等^[80]的研究通过 GC/O 技术,检测到丁二烯橡胶的主要气味物质为具有腐烂味的甲烷硫醇、果香味的戊酸乙酯和 2-甲基丁酸乙酯。Mayer 等^[69]的研究发现,橡胶也会释放出其他化合物包括 4-乙烯基环己烯等碳氢化合物、醛类、酮类、甲基丙酸乙酯、2-甲基丁酸乙酯和戊酸乙酯等酯类、对-甲酚和间-甲酚等酚类化合物、硫化氢、二硫化碳、二甲硫醚以及萘、苯乙烯和苯甲醛。

2.7 人造革

人造革通常是一种以柔软的聚氨酯或聚氯乙烯层为基底的涂层纺织基材。聚氨酯和聚氯乙烯人造革通常都带有明显的气味,以上气味物质包括氯化氢、苯系物、醛和邻-苯二甲酸酐等^[111]。Sommer^[112]的研究通过挥发分测定/FTIR 技术,发现茉莉香水、甘油和石蜡油作添加剂均能除去人造革的气味,且气味物质主要为醛和苯系物。Kalman 等^[24]的研究通过电子鼻技术检测了皮革释放的气味物质,该试验为车内装饰材料的在线质量检测奠定了基础。Chien^[113]通过正交试验研究发现,汽车的皮革内饰会释放出环己烷。Mohammed 等^[114]研究了经草药处理的皮革(山羊皮)会释放出气味,但未明确其气味的化学成分。

2.8 涂料

涂料在工业生产中的作用至关重要,按照其分散介质的差异,可将其分为水性和溶剂型涂料。涂料一般由成膜物质、颜料、溶剂和助剂组成。在涂料加工过程中,有机物的添加会导致强烈的气味产生。Gallagher 等^[35]的研究通过固相萃取联合 GC/MS 和 GC/O 法检测了涂覆添加/不添加 Texanol 涂料的石膏板的气味物质,该试验发现与只添加 Texanol 或芳烃的涂料相比,同时添加两者的涂料涂覆的石膏板气味强度最大。正丁醚、三甲苯、乙基二甲苯和四甲苯是主要的气味物质。Wang 等^[115]的研究评估了 5 种涂料暴露人员的健康风险,包括 3 种水性涂料和 2 种溶剂性涂料。有研究发现,水性丙烯酸底

漆、环氧底漆和丙烯酸面漆的气味污染物均为乙苯、间/对-二甲苯、邻-二甲苯、苯乙烯、苯甲醛和丁酸乙酯. Knudsen 等^[33]的研究通过 GC/O 法和 GC/MS/O 法研究了添加/不添加亚麻油的建材产品气味污染物,发现与未添加亚麻油的建材相比,添加亚麻油的油毡、涂料和地板油释放的气味均超过评估员可接受度,主要气味污染物为丙烯酸、乙醛、丙醛、己醛、丁酸和己酸. Bauer 等^[116]的研究通过 GC/O 法和 GC/MS/O 法研究了 6 种丙烯酸涂料的气味物质,发现其主要的的气味物质是塑料和芳香味的苯乙烯、苯丙烯和二甲苯,塑料和樟脑味的萘、吡啶和四氢萘以及蘑菇味的丙烯酸丁酯. Wang 等^[117]的研究通过 GC/MS/O 法分析了水性涂料涂覆的刨花板的气味物质,发现其主要的的气味物质是芳烃和醇. 温度升高,其气味强度随之增大,相对湿度和空气交换率与承载率的比值增大,其气味强度随之降低. Maeno 等^[118]的研究通过 GC/MS/O 法和 GC/MS/FTIR 法发现聚丙烯酸酯超吸水聚合物的主要气味物质是 5-甲基-1-己烯-3-酮和异丁基乙烯基酮. 在合成该聚合物的过程中,将作为原料的异丁基乙烯基酮替换可以有效降低产品的气味强度.

2.9 胶粘剂

胶粘剂广泛用于工业产品和装修过程,近 100 a 来其使用量大大增加. 胶粘剂的性能受变形剂、润湿剂和粘着剂等控制,胶粘剂通常具有强烈且令人不愉快的气味,其可接受气味和不可接受气味之间的界限很难确定. Denk 等^[119]的研究通过 GC/O 法和 GC/MS/O 法发现丙烯酸、甲基丙烯酸和苯丙烯酸胶粘剂的气味污染物多达 27 种,丙烯酸胶粘剂的气味主要源于产品的副成分. Vera 等^[120]的研究通过固相微萃取联合 GC/MS/O 法分析了食品包装中胶粘剂的气味污染物,发现热熔型胶粘剂的气味源于萘蒎烯和长叶烯,乙烯树脂型胶粘剂的气味来源于对-二甲苯、苯甲醛和乙酸,聚乙烯酯型胶粘剂的主要气味来源于乙酸,丙烯酸胶粘剂的樟脑气味来源于 1-辛醇.

室内空气环境会发生多种类型的反应,其中包括氧化、水解、酸碱、光解和脱卤等气相和表面反应. 氧化和光解反应对室内空气质量产生重要影响. Weschler 等^[121]的研究报道,在一定的臭氧和柠檬烯浓度条件下,臭氧和柠檬烯的反应对柠檬烯的去除量相当于其在中等空气交换率下的去除量. 尽管室内空气的 NO_x 和 $\cdot\text{OH}$ 含量相对较低,它们却易与萘蒎烯反应^[122]. 由于室内缺乏太阳光直接照射,与室外光反应相比,室内光反应速率较慢. 在室内光源照射下,室内空气中 $\cdot\text{OH}$ 含量明显提高. Rossignol 等^[123]

和 Tinel 等^[124]的研究发现,在光作用下,壬酸涂覆的水性表面薄膜会生成气相的饱和醛、不饱和醛以及其他高浓度的非挥发性氧化产物.

3 结论

识别室内空气气味释放来源和确定其主要气味污染物对于改善室内空气质量和保障人类健康是十分必要的. 装饰装修材料气味物质的识别和分析是了解气味来源和形成机制的先决条件,生产厂家和研究人员采取有效的策略(如替换产品成分或改进工艺)才能减少气味的产生. 然而,我国关于室内装饰装修材料气味物质排放的标准尚不完善,仍需进一步健全. GC/MS/O 法和 GC/O 法是目前研究室内建材气味物质释放的重要方法,该法可以确定材料释放气味物质的浓度、气味强度和室内空气质量的关系. 臭氧与材料发生的表面和气相反应会促进气味物质的二次释放,这成为影响室内空气质量的重要因素. 本文总结了 9 类建筑装饰装修材料释放的气味污染物的研究现状,初步揭示了各类材料气味和主要致嗅物质之间的关系,分析了一些材料随时间老化和臭氧氧化时所释放的气味物质的变化.

4 建议

(1) 系统研究广泛使用的室内装饰装修材料和产品所释放的气味物质,并关注材料使用过程中气味物质在室内环境中的转化. 目前,室内装饰装修产业发展迅速,新型材料层出不穷. 但是,消费者对室内气味的抱怨却从未停止. 因此,对广泛使用的建材产品气味污染物的识别研究显得十分必要. 探究温/湿度、空气交换率和臭氧存在与否等环境因素作用下气味物质的变化,从根本上解答消费者关于气味污染物是何物、气味污染来自哪里以及气味如何变化等问题. 例如,木质家具/地板会释放大量萘蒎烯,通风条件下从户外转移到室内的臭氧会与萘蒎烯发生一系列复杂反应(表面/气相反应),这导致室内气味源由萘蒎烯向醛酮转变. 消费者可以采取适当措施,降低室内臭氧含量,减少不愉快的气味.

(2) 制订相关标准,包括建筑装饰装修材料和室内产品的气味评价方法的标准、气味污染物释放量限量标准和室内空气气味污染物质量标准. 迄今为止,我国有 2 项与室内装饰装修材料气味有关的行业标准,即皮革气味的测定(QB/T 2725-2005)和胶粘剂气味评价方法(HG/T 4065-2008). 两者分别规定了皮革和胶粘剂的气味评价方法,而缺乏其他建筑装饰装修材料气味评价的标准. 此外,用于室内建筑装饰装修材料有害物质限量标准未明确气味物

质的限量,气味评价方法也未列出。

(3)开展气味物质控制方法和技术的研究,包括源头控制(生产工艺和选材)、净化治理方法和净化材料开发等研究。为最大程度地减少室内空气中装饰装修材料气味污染,首先要改进建筑装饰装修材料的制造工艺或改变原材料,从源头上避免气味的产生;其次是研究开发室内气味污染物的治理方法和净化材料。

参考文献:

- [1] Sarif N M, Salleh M Z, Nazar R. Numerical solution of flow and heat transfer over a stretching sheet with Newtonian heating using the Keller box method[J]. *Procedia Engineering*, 2013, **53**: 542-554.
- [2] Król S, Namieśnik J, Zabiegała B. α -Pinene, 3-carene and d-limonene in indoor air of Polish apartments: the impact on air quality and human exposure [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **468-469**: 985-995.
- [3] Almeida-Silva M, Wolterbeek H T, Almeida S M. Elderly exposure to indoor air pollutants[J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **85**: 54-63.
- [4] Sofuoglu S C, Aslan G, Inal F, *et al.* An assessment of indoor air concentrations and health risks of volatile organic compounds in three primary schools[J]. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 2011, **214**(1): 38-46.
- [5] Lewkowska P, Dymerski T, Gębicki J, *et al.* The use of sensory analysis techniques to assess the quality of indoor air[J]. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 2017, **47**(1): 37-50.
- [6] Fransson N, Västfjäll D, Skoog J. In search of the comfortable indoor environment: a comparison of the utility of objective and subjective indicators of indoor comfort [J]. *Building and Environment*, 2007, **42**(5): 1886-1890.
- [7] Bluyssen P M, Cox C. Indoor environment quality and upgrading of European office buildings[J]. *Energy and Buildings*, 2002, **34**(2): 155-162.
- [8] Han K H, Zhang J S, Knudsen H N, *et al.* Development of a novel methodology for indoor emission source identification[J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(18): 3034-3045.
- [9] Rotton J, White S M. Air pollution, the sick building syndrome, and social behavior[J]. *Environment International*, 1996, **22**(1): 53-60.
- [10] Wolkoff P. Indoor air pollutants in office environments: assessment of comfort, health, and performance [J]. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 2013, **216**(4): 371-394.
- [11] Wolkoff P, Wilkins C K, Clausen P A, *et al.* Organic compounds in office environments-sensory irritation, odor, measurements and the role of reactive chemistry[J]. *Indoor Air*, 2006, **16**(1): 7-19.
- [12] Altmann J, Ruhl A S, Zietzschmann F, *et al.* Direct comparison of ozonation and adsorption onto powdered activated carbon for micropollutant removal in advanced wastewater treatment [J]. *Water Research*, 2014, **55**: 185-193.
- [13] Nicolay X. *Odors in the food industry*[M]. Boston: Springer, 2006.
- [14] Dalby F R, Svane S, Sigurdarson J J, *et al.* Synergistic tannic acid-fluoride inhibition of ammonia emissions and simultaneous reduction of methane and odor emissions from livestock waste [J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, **54**(12): 7639-7650.
- [15] Rabaud N E, Ebeler S E, Ashbaugh L L, *et al.* The application of thermal desorption GC/MS with simultaneous olfactory evaluation for the characterization and quantification of odor compounds from a dairy [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2002, **50**(18): 5139-5145.
- [16] Trabue S L, Scoggin K D, Li H, *et al.* Field sampling method for quantifying odorants in humid environments [J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, **42**(10): 3745-3750.
- [17] Gallego E, Roca X, Perales J F, *et al.* Determining indoor air quality and identifying the origin of odour episodes in indoor environments[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, **21**(3): 333-339.
- [18] 王东升, 朱新梦, 杨晓芳, 等. 生物发酵制药 VOCs 与异味治理技术研究与发展[J]. *环境科学*, 2019, **40**(4): 1990-1998.
- Wang D S, Zhu X M, Yang X F, *et al.* VOCs and odors control and development in pharmaceutical fermentation industry [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(4): 1990-1998.
- [19] Brattoli M, De Gennaro G, De Pinto V, *et al.* Odour detection methods: olfactometry and chemical sensors[J]. *Sensors*, 2011, **11**(5): 5290-5322.
- [20] Brattoli M, Cisternino E, Dambruoso P R, *et al.* Gas chromatography analysis with olfactometric detection (GC-O) as a useful methodology for chemical characterization of odorous compounds[J]. *Sensors*, 2013, **13**(12): 16759-16800.
- [21] 颜鲁春, 刘杰民, 付慧婷, 等. 异味混合物中组分浓度与其强度贡献关系研究[J]. *环境科学*, 2013, **34**(12): 4743-4746.
- Yan L C, Liu J M, Fu H T, *et al.* Study on the relationship between odor intensity and components concentrations of odor mixture[J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(12): 4743-4746.
- [22] Strangl M, Lok B, Breunig P, *et al.* The challenge of deodorizing post-consumer polypropylene packaging: screening of the effect of washing, color-sorting and heat exposure [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, **164**, doi: 10.1016/j.resconrec.2020.105143.
- [23] Capelli L, Sironi S, Del Rosso R. Odor sampling: techniques and strategies for the estimation of odor emission rates from different source types[J]. *Sensors*, 2013, **13**(1): 938-955.
- [24] Kalman E L, Löfvendahl A, Winquist F, *et al.* Classification of complex gas mixtures from automotive leather using an electronic nose[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2000, **403**(1-2): 31-38.
- [25] Zhang Q, Feddes J J R, Edeogu I K, *et al.* Correlation between odour intensity assessed by human assessors and odour concentration measured with olfactometers [J]. *Canadian Biosystems Engineering*, 2002, **44**: 6.27-6.32.
- [26] Galapp A K, Powers W J, Bundy D S. Comparison of olfactometry, gas chromatography, and electronic nose technology for measurement of indoor air from swine facilities [J]. *Transactions of the ASAE*, 2001, **44**(5): 1283-1290.
- [27] Clausen P A, Knudsen H N, Larsen K, *et al.* Use of thermal desorption gas chromatography-olfactometry/mass spectrometry for the comparison of identified and unidentified odor active compounds emitted from building products containing linseed oil [J]. *Journal of Chromatography A*, 2008, **1210**(2): 203-211.
- [28] Cai L S, Koziel J A, Lo Y C, *et al.* Characterization of volatile organic compounds and odorants associated with swine barn particulate matter using solid-phase microextraction and gas

- chromatography-mass spectrometry-olfactometry [J]. *Journal of Chromatography A*, 2006, **1102**(1-2): 60-72.
- [29] Massold E, Kühn V, Salthammer T. Evaluation of indoor products by sensory and chemical testing. Part II: comparison of olfactometric and VOC analysis[A]. In: *Proceedings: Indoor Air 2002*[C]. Monterey, 2002. 261-266.
- [30] Knudsen H N, Kjaer U D, Nielsen P A, *et al.* Sensory and chemical characterization of VOC emissions from building products: impact of concentration and air velocity [J]. *Atmospheric Environment*, 1999, **33**(8): 1217-1230.
- [31] Vanker A, Barnett W, Nduru P M, *et al.* Home environment and indoor air pollution exposure in an African birth cohort study[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **536**: 362-367.
- [32] Wargocki P, Bakó-Biró Z, Clausen G, *et al.* Air quality in a simulated office environment as a result of reducing pollution sources and increasing ventilation [J]. *Energy and Buildings*, 2002, **34**(8): 775-783.
- [33] Knudsen H N, Clausen P A, Wilkins C K, *et al.* Sensory and chemical evaluation of odorous emissions from building products with and without linseed oil [J]. *Building and Environment*, 2007, **42**(12): 4059-4067.
- [34] Junker M, Koller T, Monn C. An assessment of indoor air contaminants in buildings with recreational activity[J]. *Science of the Total Environment*, 2000, **246**(2-3): 139-152.
- [35] Gallagher M, Dalton P, Sitvarin L, *et al.* Sensory and analytical evaluations of paints with and without texanol [J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, **42**(1): 243-248.
- [36] GB/T 35773-2017, 包装材料及制品气味的评价[S].
- [37] QB/T 2725-2005, 皮革 气味的测定[S].
- [38] GB/T 28024-2011, 絮用纤维制品异味的测定[S].
- [39] GB/T 14675-1993, 空气质量 恶臭的测定 三点比较式臭袋法 [S].
- [40] GB/T 15549-1995, 感官分析 方法学 检测和识别气味方面评价员的入门和培训[S].
- [41] HG/T 4065-2008, 胶粘剂气味评价方法[S].
- [42] GB 18580-2017, 室内装饰装修材料 人造板及其制品中甲醛释放限量[S].
- [43] GB 18581-2009, 室内装饰装修材料 溶剂型木器涂料中有害物质限量[S].
- [44] GB 18582-2008, 室内装饰装修材料 内墙涂料中有害物质限量[S].
- [45] GB 18583-2008, 室内装饰装修材料 胶粘剂中有害物质限量[S].
- [46] GB 18584-2001, 室内装饰装修材料 木家具中有害物质限量[S].
- [47] GB 18585-2001, 室内装饰装修材料 壁纸中有害物质限量[S].
- [48] GB 18586-2001, 室内装饰装修材料 聚氯乙烯卷材地板中有害物质限量[S].
- [49] GB 18587-2001, 室内装饰装修材料 地毯、地毯衬垫及地毯胶粘剂有害物质释放限量[S].
- [50] GB 18588-2001, 混凝土外加剂中释放氨的限量[S].
- [51] GB 6566-2010, 建筑材料放射性核素限量[S].
- [52] GB 24410-2009, 室内装饰装修材料 水性木器涂料中有害物质限量[S].
- [53] GB 28481-2012, 塑料家具中有害物质限量[S].
- [54] GB 30982-2014, 建筑胶粘剂有害物质限量[S].
- [55] GB 31040-2014, 混凝土外加剂中残留甲醛的限量[S].
- [56] GB/T 33284-2016, 室内装饰装修材料 门、窗用未增塑聚氯乙烯(PVC-U)型材有害物质限量[S].
- [57] GB 33372-2020, 胶粘剂挥发性有机化合物限量[S].
- [58] Takeuchi S, Kojima H, Saito I, *et al.* Detection of 34 plasticizers and 25 flame retardants in indoor air from houses in Sapporo, Japan[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **491-492**: 28-33.
- [59] Cheng K C, Zheng D, Tetteh A O, *et al.* Personal exposure to airborne particulate matter due to residential dryer lint cleaning [J]. *Building and Environment*, 2016, **98**: 145-149.
- [60] Sercombe J K, Taylor D J M, Battucci S, *et al.* Allergen removal from hard floors: assessment of a range of sweeping devices[J]. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 2002, **109**(4): 716-717.
- [61] Bourdin D, Mocho P, Desauziers V, *et al.* Formaldehyde emission behavior of building materials: on-site measurements and modeling approach to predict indoor air pollution [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2014, **280**: 164-173.
- [62] Norbäck D, Smedje G. Aerosols, subjective indoor air quality and asthma in schools[J]. *The Annals of Occupational Hygiene*, 1997, **41** Suppl 1: 689-694.
- [63] Huang S D, Xiong J Y, Cai C R, *et al.* Influence of humidity on the initial emittable concentration of formaldehyde and hexaldehyde in building materials: experimental observation and correlation[J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**(1), doi: 10.1038/srep23388.
- [64] Cometto-Muñiz J E, Cain W S, Abraham M H. Nasal pungency and odor of homologous aldehydes and carboxylic acids [J]. *Experimental Brain Research*, 1998, **118**(2): 180-188.
- [65] Xiong J Y, Wei W J, Huang S D, *et al.* Association between the emission rate and temperature for chemical pollutants in building materials: general correlation and understanding [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47**(15): 8540-8547.
- [66] Shu S, Morrison G C. Surface reaction rate and probability of ozone and alpha-terpineol on glass, polyvinyl chloride, and latex paint surfaces[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **45**(10): 4285-4292.
- [67] Duncan S M, Sexton K G, Turpin B J. Oxygenated VOCs, aqueous chemistry, and potential impacts on residential indoor air composition[J]. *Indoor Air*, 2018, **28**(1): 198-212.
- [68] Burdack-Freitag A, Mayer F, Breuer K. Identification of odor-active organic sulfur compounds in gypsum products [J]. *CLEAN-Soil Air Water*, 2009, **37**(6): 459-465.
- [69] Mayer F, Breuer K, Sedlbauer K. Material and indoor odors and odorants[A]. In: Salthammer T, Uhde E (Eds.). *Organic Indoor Air Pollutants: Occurrence, Measurement, Evaluation* (2nd ed.) [M]. Weinheim: Wiley, 2009.
- [70] Nicolas M, Ramalho O, Maupetit F. Reactions between ozone and building products: impact on primary and secondary emissions[J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(15): 3129-3138.
- [71] Ruth J H. Odor thresholds and irritation levels of several chemical substances: a review[J]. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 1986, **47**(3): A-142-A-151.
- [72] Nagata Y. Measurement of odor threshold value Review of "Measurement of threshold value by triangle odor bag method Bull. Jap. Env. Sanit. Cent. No. 17. 1990" paper [J]. *Journal of Japan Association on Odor Environment*, 2012, **43**(6): 401-407.
- [73] von Ranson C, Belitz H D. Untersuchungen zur Struktur-Aktivitätsbeziehung bei Geruchsstoffen: investigations in structure-activity relationships of odorous substances. 2nd communication: detection and recognition thresholds and odour

- qualities of saturated and unsaturated aliphatic aldehydes [J]. *Zeitschrift für Lebensmittel-Untersuchung und Forschung*, 1992, **195**(6): 515-522.
- [74] Nagata Y. Measurement of odor threshold by triangle odor bag method [R]. *Odor Measurement Review*, Tokyo: Ministry of Environment, 2003. 118-127.
- [75] Yang D S, Shewfelt R L, Lee K S, *et al.* Comparison of odor-active compounds from six distinctly different rice flavor types [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2008, **56**(8): 2780-2787.
- [76] Ghadiriasli R, Wagenstaller M, Buettner A. Identification of odorous compounds in oak wood using odor extract dilution analysis and two-dimensional gas chromatography-mass spectrometry/olfactometry [J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2018, **410**(25): 6595-6607.
- [77] Liu R, Wang C, Huang A M, *et al.* Characterization of odors of wood by gas chromatography-olfactometry with removal of extractives as attempt to control indoor air quality [J]. *Molecules*, 2018, **23**(1), doi: 10.3390/molecules23010203.
- [78] Culleré L, de Simón B F, Cadahía E, *et al.* Characterization by gas chromatography-olfactometry of the most odor-active compounds in extracts prepared from acacia, chestnut, cherry, ash and oak woods [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2013, **53**(1): 240-248.
- [79] Liu R, Wang C, Huang A M, *et al.* Identification of odorous constituents of Southern yellow pine and China fir wood: the effects of extractive removal [J]. *Analytical Methods*, 2018, **10**(18): 2115-2122.
- [80] Mayer F, Breuer K. Material odor-odoractive compounds identified in different materials-the surprising similarities with certain foods, possible sources and hypotheses on their formation [J]. *Indoor Air*, 2006, **16**(5): 373-382.
- [81] He Z K, Zhang Y P, Wei W J. Formaldehyde and VOC emissions at different manufacturing stages of wood-based panels [J]. *Building and Environment*, 2012, **47**: 197-204.
- [82] Baumann M G D, Batterman S A, Zhang G Z. Terpene emissions from particleboard and medium-density fiberboard products [J]. *Forest Products Journal*, 1999, **49**(1): 49-56.
- [83] Baumann M G D, Lorenz L F, Batterman S A, *et al.* Aldehyde emissions from particleboard and medium density fiberboard products [J]. *Forest Products Journal*, 2000, **50**(9): 75-82.
- [84] Jiang C J, Li D D, Zhang P Y, *et al.* Formaldehyde and volatile organic compound (VOC) emissions from particleboard: identification of odorous compounds and effects of heat treatment [J]. *Building and Environment*, 2017, **117**: 118-126.
- [85] Väisänen T, Laitinen K, Tomppo L, *et al.* A rapid technique for monitoring volatile organic compound emissions from wood-plastic composites [J]. *Indoor and Built Environment*, 2018, **27**(2): 194-204.
- [86] Schreiner L, Bauer P, Buettner A. Resolving the smell of wood-identification of odour-active compounds in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) [J]. *Scientific Reports*, 2018, **8**(1), doi: 10.1038/s41598-018-26626-8.
- [87] Günschera J, Fuhrmann F, Salthammer T, *et al.* Formation and emission of chloroanisoles as indoor pollutants [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2004, **11**(3): 147-151.
- [88] Strube A, Buettner A. The influence of chemical structure on odour qualities and odour potencies in chloro-organic substances [A]. In: *Proceedings of the 12th International Weurman Flavour Research Symposium* [C]. Interlaken, Switzerland, 2008. 486-489.
- [89] 里奥·范海默特. 化合物嗅觉阈值汇编 [M]. 李智宇, 王凯, 冒德寿, 等译. 北京: 科学出版社, 2018. 9.
- Gemert L J. Compilations of odour threshold values in air, water and other media [M]. Li Z Y, Wang K, Mao D S, *et al.*, trans. Beijing: China Science Publishing and Media Ltd., 2018. 9.
- [90] Buettner A, Schieberle P. Evaluation of key aroma compounds in hand-squeezed grapefruit juice (*Citrus paradisi Macfayden*) by quantitation and flavor reconstitution experiments [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2001, **49**(3): 1358-1363.
- [91] Etzweiler F, Neuner-Jehle N, Senn E. Einsatz der quantitativen headspace analyse zur untersuchung des verhaltens von riechstoffen in seifen und detergentien [J]. *Seife-Öle-Fette-Wachse*, 1980, **106**: 419-427.
- [92] Jensen B, Wolkoff P, Wilkins C K. Characterization of linoleum. Part 2: preliminary odor evaluation [J]. *Indoor Air*, 1995, **5**(1): 44-49.
- [93] Schieberle P, Buettner A. Influence of the chain length on the aroma properties of homologous epoxy-aldehydes, ketones and alcohols [A]. In: Takeoka G R, Günter M, Engel K H (Eds.). *Aroma Active Compounds in Food: Chemistry and Sensory Properties* [M]. Washington, DC: American Chemical Society, 2001. 109-118.
- [94] Hodgson A T, Wooley J D, Daisey J M. Emissions of volatile organic compounds from new carpets measured in a large-scale environmental chamber [J]. *Air & Waste*, 1993, **43**(3): 316-324.
- [95] Morrison G C, Nazaroff W W. Ozone interactions with carpet: secondary emissions of aldehydes [J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, **36**(10): 2185-2192.
- [96] Schieberle P, Grosch W. Potent odorants of rye bread crust-differences from the crumb and from wheat bread crust [J]. *Zeitschrift für Lebensmittel-Untersuchung und Forschung*, 1994, **198**(4): 292-296.
- [97] Nagy G Z. The odor impact model [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 1991, **41**(10): 1360-1362.
- [98] Fang L, Clausen G, Fanger P O. Impact of temperature and humidity on chemical and sensory emissions from building materials [J]. *Indoor Air*, 1999, **9**(3): 193-201.
- [99] Villberg K. Volatile organic compounds in LDPE films and air during extrusion coating [J]. *Tappi Journal*, 1998, **81**(8): 165-170.
- [100] Wypych G. *Handbook of odors in plastic materials* (2nd ed.) [M]. Toronto: ChemTec publishing, 2017.
- [101] Hodgson S C, Casey R J, Bigger S W, *et al.* Review of volatile organic compounds derived from polyethylene [J]. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 2000, **39**(5): 845-874.
- [102] Zobel M G R. Measurement of odour permeability of polypropylene packaging films at low odourant levels [J]. *Polymer Testing*, 1982, **3**(2): 133-142.
- [103] Guth H, Grosch W. A comparative study of the potent odorants of different virgin olive oils [J]. *Fette Seifen Anstrichmittel*, 1991, **93**(9): 335-339.
- [104] Hopfer H, Haar N, Stockreiter W, *et al.* Combining different analytical approaches to identify odor formation mechanisms in polyethylene and polypropylene [J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2012, **402**(2): 903-919.
- [105] Sanders R A, Zyzak D V, Morsch T R, *et al.* Identification of 8-nonenal as an important contributor to "plastic" off-odor in polyethylene packaging [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2005, **53**(5): 1713-1716.

- [106] Bravo A, Hotchkiss J H, Acree T E. Identification of odor-active compounds resulting from thermal oxidation of polyethylene[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1992, **40**(10): 1881-1885.
- [107] Strangl M, Schlummer M, Maeurer A, *et al.* Comparison of the odorant composition of post-consumer high-density polyethylene waste with corresponding recycled and virgin pellets by combined instrumental and sensory analysis [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, **181**: 599-607.
- [108] Piringir O G, Baner A L. Plastic packaging: interactions with food and pharmaceuticals (2nd ed.) [M]. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2008. 41-42.
- [109] Belitz H D, Grosch W. *Lehrbuch der lebensmittelchemie* [M]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1982.
- [110] Mayer F, Breuer K. The influence of processing conditions on plastic material odor [A]. In: *Proceedings of the 11th International Conference on Indoor Air Quality and Climate* [C]. Copenhagen, 2008. 495.
- [111] Kang G, Seo H J, Yun M J, *et al.* Method for removing odor of artificial leather and artificial leather manufactured using the same [P]. US Patent: US 9828572, 2017-11-28.
- [112] Sommer C. The role of musk and musk compounds in the fragrance industry [A]. In: Rimkus G G (Ed.). *Series Anthropogenic Compounds: Synthetic Musk Fragrances in the Environment* [M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2004. 1-16.
- [113] Chien Y C. Variations in amounts and potential sources of volatile organic chemicals in new cars [J]. *Science of the Total Environment*, 2007, **382**(2-3): 228-239.
- [114] Mohammed S A, Madhan B, Demissie B A, *et al.* *Rumex abyssinicus* (mekmeko) Ethiopian plant material for preservation of goat skins: approach for cleaner leather manufacture [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, **133**: 1043-1052.
- [115] Wang D, Yu H, Shao X, *et al.* Direct and potential risk assessment of exposure to volatile organic compounds for primary receptor associated with solvent consumption [J]. *Environmental Pollution*, 2018, **233**: 501-509.
- [116] Bauer P, Buettner A. Characterization of odorous and potentially harmful substances in artists' acrylic paint [J]. *Frontiers in Public Health*, 2018, **6**, doi: 10.3389/fpubh.2018.00350.
- [117] Wang Q F, Shen J, Shao Y L, *et al.* Volatile organic compounds and odor emissions from veneered particleboards coated with water-based lacquer detected by gas chromatography-mass spectrometry/olfactometry [J]. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2019, **77**(5): 771-781.
- [118] Maeno S, Eddy C L, Rodriguez P A. Identification of compounds responsible for an off-odor in wet polyacrylate superabsorbent polymers [J]. *Journal of Chromatography A*, 1999, **849**(1): 217-224.
- [119] Denk P, Buettner A. Sensory characterization and identification of odorous constituents in acrylic adhesives [J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2017, **78**: 182-188.
- [120] Vera P, Uliaque B, Canellas E, *et al.* Identification and quantification of odorous compounds from adhesives used in food packaging materials by headspace solid phase extraction and headspace solid phase microextraction coupled to gas chromatography-olfactometry-mass spectrometry [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2012, **745**: 53-63.
- [121] Weschler C J, Carslaw N. Indoor chemistry [J]. *Environmental Science and Technology*, 2018, **52**(5): 2419-2428.
- [122] 陈天增, 葛艳丽, 刘永春, 等. 我国机动车排放 VOCs 及其大气环境影响 [J]. *环境科学*, 2018, **39**(2): 478-492.
- Chen T Z, Ge Y L, Liu Y C, *et al.* VOCs emission from motor vehicles in China and its impact on the atmospheric environment [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(2): 478-492.
- [123] Rossignol S, Tinel L, Bianco A, *et al.* Atmospheric photochemistry at a fatty acid-coated air-water interface [J]. *Science*, 2016, **353**(6300): 699-702.
- [124] Tinel L, Rossignol S, Bianco A, *et al.* Mechanistic insights on the photosensitized chemistry of a fatty acid at the air/water interface [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, **50**(20): 11041-11048.

CONTENTS

Continuous PM _{2.5} Composition Measurements for Source Apportionment During Air Pollution Events	CAI Fan-tao, SHANG Yue, DAI Wei, <i>et al.</i>	(4575)
Orographic Influences on the Spatial Distribution of PM _{2.5} on the Fen-Wei Plain	HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, SUN Cong-jian, <i>et al.</i>	(4582)
Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} Under Winter Haze Conditions in Central China: A Case Study of Huanggang, Hubei Province	LI Xing-yu, MAO Yao, CHEN Zhan-le, <i>et al.</i>	(4593)
Concentration and Reactivity of Carbonyl Compounds in the Atmosphere of North China	HUANG Yu, CHEN Xi, WANG Ying-hong, <i>et al.</i>	(4602)
Characteristics of O ₃ Pollution and Key Precursors in Chengdu During Spring	HAN Li, CHEN Jun-hui, JIANG Tao, <i>et al.</i>	(4611)
O ₃ Source Characteristics of an Industrial Area in the Yangtze River Delta Based on Boundary Observations	HUANG Qing, HUANG Yin-zhi, ZHANG Shan, <i>et al.</i>	(4621)
Characteristics and Source of VOCs During O ₃ Pollution Between August to September, Langfang Development Zones	ZHANG Jing-qiao, WANG Hong-liang, FANG Xiao-yun, <i>et al.</i>	(4632)
Coating-derived VOCs Emission Characteristics and Environmental Impacts from the Furniture Industry in Guangdong Province	ZENG Chun-ling, SHAO Xia, LIU Rui-yuan, <i>et al.</i>	(4641)
Response of Air Quality to COVID-19 Lockdown in Xiamen Bay	XU Chao, WU Shui-ping, LIU Yi-jing, <i>et al.</i>	(4650)
Similarities and Differences of Valley Winds in the Beijing Plain and Yanqing Areas and Its Impact on Pollution	WU Jin, LI Chen, MA Zhi-qiang, <i>et al.</i>	(4660)
Characteristics of Atmospheric Particulate Matter Pollution and the Unique Wind and Underlying Surface Impact in the Twain-Hu Basin in Winter	ZHU Yan, ZHAO Tian-liang, BAI Yong-qing, <i>et al.</i>	(4669)
Conversion Characterizations of Sulfate Ion and Nitrate Ion in Particulate Matter from Coal-fired Power Plants	YANG Liu, HE Qing, SHENG Zhong-yi	(4678)
Water Chemical Characteristics and Influence of Exogenous Acids in the Yangtze River Basin	WANG Qi, YU Shi, JIANG Ping-ping, <i>et al.</i>	(4687)
Effects of Land Use on Nutrient Concentrations in the Inflow River of Lake Taihu, China	LIAN Xin-qiao, ZHU Guang-wei, YANG Wen-bin, <i>et al.</i>	(4698)
Diversity of Zooplankton and Niche Characteristics of Keystone Species in the Weihe River Based on eDNA	LIANG Dong, XIA Jun, SONG Jin-xi, <i>et al.</i>	(4708)
Occurrence, Distribution, and Ecological Risk Assessment of Pharmaceutical and Personal Care Products in the Aquatic Environment of Sanya City, China	REN Bing-nan, GENG Jing	(4717)
Screening of Priority Pollutants and Risk Assessment for Surface Water from Shengjin Lake	GONG Xiong-hu, DING Qi-qi, JIN Miao, <i>et al.</i>	(4727)
Long-term Changes and Drivers of Ecological Security in Shahe Reservoir, China	YANG Wen-bin, DUAN Wen-xiu, CUI Yang, <i>et al.</i>	(4739)
Seasonal Variation and Influencing Factor Analysis of Antibiotic Resistance Genes in Water Supply Reservoirs of Central China	ZHANG Kai, XIN Rui, LI Kuang-jia, <i>et al.</i>	(4753)
Geochemical Characteristics and Driving Factors of NO ₃ -Type Groundwater in the Rapidly Urbanizing Pearl River Delta	LÜ Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i>	(4761)
Spatial Hydrochemical Characteristics and Controlling Factors of Surface Water in the Yancheng Area	WANG Jian, ZHANG Hua-bing, XU Jun-li, <i>et al.</i>	(4772)
Identification of Dredging Depths Based on Sediment Vertical Distribution Profiles of Total Nitrogen and Total Phosphorus and Their Adsorption-desorption Equilibria	ZHOU Ya-ting, CHEN Xing-hong, LI Li-qing, <i>et al.</i>	(4781)
Role of Borate and Phosphate Buffers in the Degradation of Organic Compounds in a PMS/Co ²⁺ System: Influencing Factors and Mechanisms	WAN Qi-qi, CHEN Zhu-hao, CAO Rui-hua, <i>et al.</i>	(4789)
Degradation 2,2',4,4'-Tetrabromodiphenyl Ether by Activated Peroxymonosulfate Using Magnetic Biochar Supported α -MnO ₂	LI Xin, YIN Hua, LUO Hao-yu, <i>et al.</i>	(4798)
Characteristics and Mechanisms of Bacteriophage MS2 Inactivation in Water by UV Activated Sodium Persulfate	ZHANG Chong-miao, YANG Hao-ming, WANG Zhen	(4807)
Adsorption Characteristics of Phosphate on Cerium Modified Water Hyacinth Biochar	WANG Guang-ze, ZENG Wei, LI Shuai-shuai	(4815)
Removal Efficiency and Mechanism of Ammonia Nitrogen in a Low Temperature Groundwater Purification Process	LI Dong, LIU Meng-hao, ZHANG Rui-miao, <i>et al.</i>	(4826)
Speciation and Ecological Risk Assessment of Heavy Metal(loid)s in the Municipal Sewage Sludge of China	GENG Yuan-meng, ZHANG Chuan-bing, ZHANG Yong, <i>et al.</i>	(4834)
Meta-analysis of Microbial Communities in the Activated Sludge of Wastewater Treatment Plants Under Different Climate Types	YANG Si-hang, QIN Ze-sheng, LIANG Man-chun	(4844)
Partial Nitrification and Anaerobic Ammonia Oxidation Synergistic Denitrification to Remove Nitrogen and Carbon from Domestic Sewage	QIN Yan-rong, YUAN Zhong-ling, ZHANG Ming, <i>et al.</i>	(4853)
Cultivation and Performance Analysis of Simultaneous Partial Nitrification, ANAMMOX, and Denitrification Granular Sludge	ZHOU Feng, LIU Yong-di, LI Wei	(4864)
Application of Various Methods to Extract Microplastic from Typical Soils in China	ZHAO Xiao-li, LIU Zi-han, CONG Chen-yu, <i>et al.</i>	(4872)
Evaluation and Sources of Heavy Metal Pollution in the Surface Soil of the Qaidam Basin	CHEN Liang, ZHANG Xi-ying, TANG Qi-liang, <i>et al.</i>	(4880)
Content and Ecological Risks of Heavy Metals in Soil with Different Land Uses in a Rapidly Urbanizing Area	LI Meng-ting, SHEN Cheng, WU Jian, <i>et al.</i>	(4889)
Selenium Geochemical Characteristics and Influencing Factors of Paddy Fields in Du'an County, Guangxi	LIU Fei, YANG Ke, XU Ren-ting, <i>et al.</i>	(4897)
Carbonized Apple Branches Decrease the Accumulation and Damage of Cadmium on Apple Rootstock by Reducing DTPA-Cd in Soil	DENG Bo, XUN Mi, ZHANG Wei-wei, <i>et al.</i>	(4908)
Accumulation and Health Risk of Heavy Metals in Cereals, Vegetables, and Fruits of Intensive Plantations in Hainan Province	YANG Jian-zhou, WANG Zhen-liang, GAO Jian-weng, <i>et al.</i>	(4916)
Correlation Analysis among Environmental Antibiotic Resistance Genes Abundance, Antibiotics Concentrations, and Heavy Metals Concentrations Based on Web of Science Searches	MIAO Sun, CHEN Lei, ZUO Jian-e	(4925)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Tetracycline Antibiotics in Farmland Soil in Yinchuan	ZHANG Xiao-hong, TAO Hong, WANG Ya-juan, <i>et al.</i>	(4933)
Effect of Manure from Different Sources on the Leaching of Antibiotics in Soil	LI Bin-xu, ZHU Chang-xiong, SONG Ting-ting, <i>et al.</i>	(4942)
Analysis of the Traits of Nitrogen Metabolism Pathways for Several Forest Soils in Eastern China	LÜ Xue-li, ZHAO Yong-peng, LIN Qing-huo, <i>et al.</i>	(4951)
Denitrification Rates and <i>nirS</i> -type Denitrifying Bacteria Community Structure Characteristics of Bulk and Rhizosphere Soil in Spring and Summer in the Alpine Wetlands of the Qinghai-Tibet Plateau	LI Yu-qian, MA Jun-wei, GAO Chao, <i>et al.</i>	(4959)
Microbial Community Structure of Soil Methanogens and Methanotrophs During Degradation and Restoration of Reed Wetlands in the Songnen Plain	WANG Qiu-ying, WANG Na, LIU Ying, <i>et al.</i>	(4968)
Characteristics of Bacterial Community Structure in Fluvio-aquic Soil Under Different Rotation Fallow	NAN Zhen-wu, LIU Zhu, DAI Hong-cui, <i>et al.</i>	(4977)
Response of Photosynthetic Bacterial Community to Cadmium Contamination in Paddy Soil	LUO Lu-yun, JIN De-cai, WANG Dian-dong, <i>et al.</i>	(4988)
Community Distribution of the Rhizospheric and Endophytic Bacteria of <i>Phragmites australis</i> and Their Limiting Factors in Iron Tailings	CAO Man-man, WANG Fei, ZHOU Bei-hai, <i>et al.</i>	(4998)
Effects of Combination of Organic and Inorganic Nitrogen on Nitrification and Denitrification in Two Salinized Soils	ZHOU Hui, SHI Hai-bin, ZHANG Wen-cong, <i>et al.</i>	(5010)
Response of Yield, CH ₄ , and N ₂ O Emissions from Paddy Fields to Long-term Elevated CO ₂ Concentrations	YU Hai-yang, SONG Kai-fu, HUANG Qiong, <i>et al.</i>	(5021)
Effects of Feedstock Material and Pyrolysis Temperature on Dissolved Organic Matter in Biochars	YAN Dai-hong, MA Ya-pei, SONG Kai-yue, <i>et al.</i>	(5030)
Spatiotemporal Variations in Atmospheric Urban Heat Island Effects and Their Driving Factors in 84 Major Chinese Cities	LI Yu, ZHOU De-cheng, YAN Zhang-mei	(5037)
Research Progress in the Odorants and Their Emissions from Indoor Building Decoration Materials	ZHANG Wan-zhong, ZHANG Peng-yi	(5046)