

耿 闯,刘璧源,盖浩南,等.衣服中二手烟污染物的释放特性[J].中国环境科学,2025,45(1):1-10.

Geng C, Liu B Y, Ge H N, et al. Release characteristics of thirdhand smoke pollutants from clothing [J]. China Environmental Science, 2025,45(1):1-10.

## 衣服中二手烟污染物的释放特性

耿 闯<sup>1</sup>,刘璧源<sup>1</sup>,盖浩南<sup>1</sup>,张家瑞<sup>1</sup>,朱雨晴<sup>1</sup>,黄海保<sup>1,2</sup>,曹建平<sup>1\*</sup> (1.中山大学环境科学与工程学院,广东 广州 510006; 2.新疆大学化工学院,新疆 乌鲁木齐 830017)

**摘要:** 使用质子转移反应飞行时间质谱仪(PTR-TOF-MS)从衣服释放的二手烟(THS)中鉴定出 100 余种挥发性有机物(含 36 种致癌物),并发现不同衣服面料释放的 THS 成分和含量存在显著差异(涤纶释放的 THS 显著低于棉布).进一步发现,衣服中 THS 的可释放量随时间呈指数衰减趋势,持续释放 30min 后 THS 含量可降低 80%以上,说明烟民吸烟后在室外停留 30min 以上有助于降低衣服介导的 THS 污染.本文为研究衣服介导的 THS 污染问题提供了一种有效手段,深化了对衣服中 THS 释放特性的认识,对降低不吸烟人群的 THS 暴露有重要意义.

**关键词:** 二手烟(THS); 衣服; 质子转移反应飞行时间质谱(PTR-TOF-MS); 挥发性有机物(VOCs); 室内空气质量

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2025)01-0001-10

**Release characteristics of thirdhand smoke pollutants from clothing.** GENG Chuang<sup>1</sup>, LIU Bi-yuan<sup>1</sup>, GE Hao-nan<sup>1</sup>, ZHANG Jia-rui<sup>1</sup>, ZHU Yu-qing<sup>1</sup>, HUANG Hai-bao<sup>1,2</sup>, CAO Jian-ping<sup>1\*</sup> (1.School of Environmental Science and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China; 2.Chemical Engineering Institute, Xinjiang University, Urumqi 830017, China). *China Environmental Science*, 2025,45(1): 1~10

**Abstract:** More than 100 volatile organic compounds (including 36 carcinogens) were identified in the clothing-mediated thirdhand smoke (THS) by using a proton transfer reaction time-of-flight mass spectrometry (PTR-TOF-MS). Significant differences were found in the component and amount for the THS released from different clothing material. Specifically, the amount of THS released from polyester was significantly lower than that released from cotton. Furthermore, the amount of THS released from clothing exponentially decreased as increasing time, and the decrease ratio was more than 80% after 30 minutes, suggesting that the clothing-mediated THS pollution could be reduced if the smokers stay outdoors for more than 30 minutes after smoking cigarettes. This study provided a useful method for the investigations of clothing-mediated THS pollution, deepening the understanding on the release characteristics of THS pollution from clothing, which should have great significance in reducing the THS exposure for non-smokers.

**Key words:** thirdhand smoke (THS); clothing; proton transfer reaction time-of-flight mass spectrometry (PTR-TOF-MS); volatile organic compounds (VOCs); indoor air quality

烟草对人类健康的危害是当前最严重的公共卫生问题之一,烟草烟雾中约有 4800 种化合物,其中超过 200 种已被证实对人体有害<sup>[1-2]</sup>.近几十年来,通过设立无烟区或吸烟室,非吸烟人群的二手烟暴露风险已得到有效控制,但一种全新的被动吸烟形式——“二手烟”逐渐引起公众及学界的关注<sup>[3]</sup>.二手烟(THS)是指烟草烟雾消散后残留在衣服、地毯、墙壁、头发等物体表面的烟雾残留物<sup>[3]</sup>.这些污染物可在吸烟结束后重新释放回空气中,对非吸烟人群的健康形成长期威胁.一种典型且常见的情况便是烟民的衣服在吸烟过程中会富集大量烟草烟雾,其中的挥发性成分会逐渐释放回空气中,不仅会产生令人不悦的气味,也可能会对

周围人群的健康造成危害<sup>[4-6]</sup>.因此,深入了解衣服释放的 THS 成分及其释放规律对于全面评估 THS 健康风险十分重要.

固相微萃取-气相色谱-质谱联用仪(SPME-GC-MS)常被用于研究衣服释放的 THS 污染物<sup>[4-6]</sup>.使用该方法,已有研究从衣服释放的 THS 中鉴定出 60 多种挥发性有机物(VOCs)<sup>[4-5]</sup>,并发现衣服可在吸烟后的 10min 内持续释放这些 VOCs<sup>[6]</sup>.SPME-GC-MS 法的关键步骤是借助 SPME 采样头对有机

收稿日期: 2024-06-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51908563);广东省基础与应用基础研究基金资助项目(2022A1515011142)

\* 责任作者, 副教授, caojp3@mail.sysu.edu.cn

物的吸附作用以实现 THS 的富集采样,但由于 SPME 采样头对小分子有机物的吸附能力很弱且不同有机物间存在竞争吸附,该方法难以实现对 THS 成分的全面鉴定,极大制约了对衣服中 THS 释放特性的深入研究.除此之外,已有研究仅借助实验舱测量了衣服释放的 THS 成分及总量,THS 在真实场景下的释放特性(释放速率、持续时长、影响因素等)目前尚不清楚.

质子转移反应飞行时间质谱仪(PTR-TOF-MS)具有检测限低、质量分辨率高、响应时间短等特点,可以实现对复杂气态混合物中各痕量成分的实时在线监测和定性定量分析,被视为目前最先进的质谱分析技术之一<sup>[7-10]</sup>.相关研究<sup>[11-12]</sup>通过 PTR-TOF-MS 从烟民呼出气及无烟电影院空气中成功鉴定出多种烟草烟雾标识物,证实吸烟者衣服/身体是 THS 的重要传播源,并指出该途径可导致其他观影者吸入相当于 1~10 支香烟产生的二手烟.尽管 PTR-TOF-MS 已在不少烟草烟雾的相关研究中得到成功应用,但其在衣服中 THS 成分鉴定和定量分析方面的应用尚无研究报道.

鉴于此,本研究使用 PTR-TOF-MS 对衣服释放的 THS 进行实时监测,对 THS 成分进行定性和定量分析,并进一步探究衣服中 THS 的释放特性,旨在为深入研究衣服介导的 THS 污染问题提供有效手段和数据基础.

## 1 材料与方 法

### 1.1 实验材料与仪器

双喜牌香烟(广东中烟工业有限责任公司),用于产生烟草烟雾.

织物:纯棉纱布(医用纱布,克重  $70\text{g}/\text{m}^2$ )、纯棉布片(纯棉 T 恤,克重  $130\text{g}/\text{m}^2$ )、涤纶布片(涤纶 T 恤,克重  $90\text{g}/\text{m}^2$ ),均为白色面料,裁剪成  $8\text{cm}\times 10\text{cm}$  的尺寸.实验前布片置于  $80^\circ\text{C}$  干燥箱中烘干 4h 以去除其中的水分.纯棉和涤纶分别是最常用的天然和化学纤维材料<sup>[13]</sup>,选用这两类布料旨在探究面料材质的影响;此外,选用纯棉纱布(疏松)和纯棉 T 恤(致密)这两类纯棉布料旨在探究面料疏密程度的影响.

自制样品管:由 50mL 聚丙烯离心管(BS-500-MC, Biosharp)改装而成,待测布片置于离心管

内.如图 1 所示,在管盖顶部钻取一个小孔,使一个 3mm 不锈钢三通的一端可以经管盖伸入管内,三通与管盖的接触处用橡胶垫圈密封,三通的另一端连接一根 3mm 气管.

PTR-TOF-MS (PTR-TOF 1000, 奥地利 Ionicon),用于分析衣服释放的 THS 成分和含量. PTR-TOF-MS 的进样口连接至 3mm 气管的另一端,进样口自带的抽气泵可以将样品管内的空气以  $25\text{mL}/\text{min}$  的速率抽取出来进而进行检测分析.

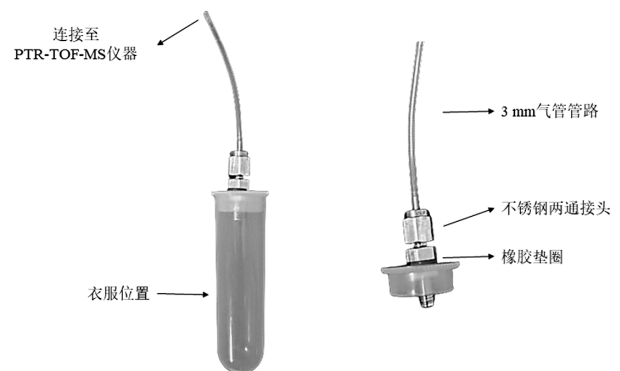


图 1 自制样品管实物图

Fig.1 Photos of the self-made sample tube

### 1.2 实验流程

在  $3\text{m}\times 3\text{m}\times 2.8\text{m}$  的房间内点燃一根香烟(温度:  $22.4\sim 22.8^\circ\text{C}$ ,相对湿度:  $88.9\%\sim 91.2\%$ ,换气次数  $0.8\text{h}^{-1}$ ),将所有待测布片同时悬挂在房间内使其暴露于烟草烟雾中,香烟持续燃烧 8min (期间,房间内烟雾颗粒物的质量浓度线性升高至  $(728\pm 12)\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ ).暴露 8min 后,将布片取出并放入样品管中,保持气管密闭并立即将样品管放置在  $37^\circ\text{C}$ (模拟体温)恒温箱内平衡 30min,然后将样品管取出并将气管连接至 PTR-TOF-MS 进行测试.为保证衣服释放的 THS 能被完全抽取至 PTR-TOF-MS 进样口,每个布片样品的检测时长均为 5min,相当于 PTR-TOF-MS 需从样品管内抽取  $125\text{mL}$  气体( $25\text{mL}/\text{min}\times 5\text{min}$ ),远大于样品管体积( $50\text{mL}$ ).为保证 PTR-TOF-MS 能正常进样(避免管内真空),测样前需用金属针头在样品管底部开一小孔.

为研究衣服中 THS 可释放量随释放时间的变化规律,将暴露 8min 后的布片悬挂在通风良好的室外环境(温度:  $22.7\sim 22.9^\circ\text{C}$ ,相对湿度:  $77.5\%\sim 77.9\%$ )及无烟的室内环境中(室内温湿度可根据需要进行

调控,室内体积  $25\text{m}^3$ ,换气次数  $0.8\text{h}^{-1}$ ),经过不同长度的释放时间后(5~60min)将布片放入样品管中,同样在  $37^\circ\text{C}$  条件下平衡 30min 后用 PTR-TOF-MS 进行测试.为研究环境温湿度的影响,改变室内温湿度条件,重复上述实验.

### 1.3 数据分析

**1.3.1 PTR-TOF-MS 工作原理** 待测化合物被送入仪器后,首先与底物离子( $\text{H}_3\text{O}^+$ )发生质子转移反应,生成带正电的离子(捕获一个  $\text{H}^+$ ),最后被引入飞行时间质谱仪进行分析.一般而言,每种化合物的质子化形式在 PTR-TOF-MS 中具有特定的质荷比( $m/z$ ,对应化合物分子量+1)和飞行时间(TOF),据此可以进行成分鉴定(即定性分析,比对 PTR-MS Viewer 软件配套的数据库中已知化合物的质子化形式的  $m/z$  和 TOF),再借助离子信号强度可以计算出化合物浓度(即定量分析).

**1.3.2 定性分析** Soleimani 等<sup>[14]</sup>对过往研究中已鉴定出的烟草烟雾成分进行了全面总结,为本文的定性分析提供了有力参考:首先借助 PTR-MS Viewer 软件数据库确定 Soleimani 等<sup>[14]</sup>总结的各化合物的质子化形式的  $m/z$  及 TOF,若 PTR-TOF-MS 结果中某质量峰的  $m/z$  及 TOF 与上述某化合物的质子化形式完全一致,则认为二者相对应.对于无法通过此方法确定相应化合物的质量峰,则借助软件对全数据库进行比对以鉴定成分.需要指出的是, PTR-TOF-MS 本质是通过化合物分子量及 TOF 进行成分鉴定的,对于存在同分异构体的情况,同一质量峰可能对应多种潜在成分,此时本文暂无法确定该质量峰对应的确切化合物(如表 1 所示,  $m/z=59$  质量峰对应的 THS 成分可能是丙酮或丙醛),未来需协同其他仪器进行更精准的成分鉴定(如 GC-MS).

**1.3.3 定量分析** 对某一质量峰的所有离子计数进行积分以计算出峰面积,借助离子传输效率和 PTR 反应参数(二者数值直接从 PTR-MS Viewer 软件获取)将峰面积换算为该成分在样品管空气内的平均浓度( $C, \times 10^{-9}$ ),再根据下式将  $C$  换算为衣服样品中该成分的释放量( $M, \mu\text{g}$ ),

$$M = 10^{-3} \times V \times C \times MW / V_m \quad (1)$$

式中:  $V$  为 PTR-TOF-MS 从样品管内抽取的空气体积( $0.125\text{L}$ );  $MW$  为化合物分子量( $\text{g/mol}$ );  $V_m$  为标准气体摩尔体积( $22.4\text{L/mol}$ );  $10^{-3}$  为单位换算系数.

根据仪器检测限,以上定性和定量分析过程仅考虑信号强度  $>1$  的质量峰,其余峰视为仪器背景峰.

其余数据分析和统计过程均使用 OriginPro 2018C 软件完成.

## 2 结果与讨论

### 2.1 衣服释放的 THS 成分及含量

表 1 所列为 3 种面料释放的 THS 成分鉴定结果及定量结果.在 PTR-TOF-MS 的质谱图中共识别出 64 个信号强度  $>1$  的质量峰,对应鉴定出 111 种可能的化合物(由于存在同分异构体,化合物种类多于质量峰个数),包括 30 种芳香烃、23 种醛/酮、17 种胺、14 种醇/酚、6 种脂肪烃、11 种杂环化合物、10 种其他化合物,其中有 36 种为致癌物(4 种 1 类致癌物、2 种 2A 类致癌物、16 种 2B 类致癌物、14 种 3 类致癌物).相较于 Chien 等<sup>[4]</sup>和 Borujeni 等<sup>[5]</sup>借助 SPME-GC-MS 的测量结果,本研究在小分子化合物的鉴定上取得了更显著的效果:前两项研究分别仅鉴定出 3 种和 2 种分子量小于 80 的化合物,而本研究鉴定出超过 20 种小分子化合物.总体而言,本文使用 PTR-TOF-MS 从衣服释放的 THS 中多检测出 40 余种化合物,其中半数以上为小分子化合物(分子量  $<80$ ),有效克服了已有研究中常用方法(SPME-GC-MS)在检测小分子化合物方面的局限性.但由于实验环境条件、香烟烟雾浓度、衣服材质等因素与已有研究均有所不同,上述结论可能存在一定偏差.

由于烟草烟雾没有安全暴露剂量<sup>[15]</sup>,因此衣服介导的 THS 污染问题不容忽视,尤其是其中还含有 40%左右的致癌物.由表 1 可知,衣服共可能释放 36 种致癌物,其中 22 种为本研究新检测出的致癌物.本次实验中所用衣服面积为  $80\text{cm}^2$ ,假设成人正常着装面积为  $1.6\text{m}^2$ (长袖衫+长裤)<sup>[16]</sup>,表 1 中的致癌物总释放量可换算为一名烟民吸烟后其衣物释放的致癌物总量:纯棉 T 恤和涤纶 T 恤可分别释放 6.3 和 2.0mg 致癌物(按成人着装面积  $1.6\text{m}^2$  与实验布片面积  $80\text{cm}^2$  的比例进行换算,即估算结果为实验测得的致癌物总释放量的 200 倍).在不止一名烟民聚集的场所(如车厢、影院等),烟民衣物释放的 THS 致癌物只会更多,这对周围非吸烟人群的健康将是一个巨大威胁.需要注意的是, PTR-TOF-MS 的同一质量峰可能对应多种化合物,若该质量峰包含某种致

癌物,本文在估算时便将其纳入致癌物总量中,这可能会导致对致癌物总释放量的过高估算.

表 1 衣服释放的 THS 化合物种类及含量  
Table 1 Compositions and amount of THS pollutants released from clothing

m/z	分子式	化合物名称	物质分类	致癌等级 <sup>a</sup>	总释放量(μg)		
					纱布(棉)	棉布	涤纶
27	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	乙炔 <sup>b</sup>	脂肪烃		0.07	0.07	0.03
28	CHN	氰化烃 <sup>b</sup>	其他化合物		-	-	0.02
31	CH <sub>2</sub> O	甲醛	醛和酮	1	0.14	-	0.35
33	CH <sub>4</sub> O	甲醇 <sup>b</sup>	醇和酚		6.19	6.08	1.90
41	C <sub>3</sub> H <sub>4</sub>	1,2-丙二烯 <sup>b</sup>	脂肪烃		1.03	5.52	0.76
42	C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> N	乙腈 <sup>b</sup>	其他化合物		1.71	2.57	0.23
45	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O	乙醛 <sup>b</sup>	醛和酮	2B	1.29	7.25	3.72
46	C <sub>2</sub> H <sub>7</sub> N	二甲胺 <sup>b</sup>	胺		0.08	-	-
54	C <sub>3</sub> H <sub>3</sub> N	丙烯腈 <sup>b</sup>	其他化合物	2B	0.12	0.15	0.16
55	C <sub>4</sub> H <sub>6</sub>	1,3-丁二烯 <sup>b</sup>	脂肪烃	1	0.39	2.51	0.43
57	C <sub>3</sub> H <sub>4</sub> O	丙烯醛 <sup>b</sup>	醛和酮	3	0.24	0.41	0.13
59	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	丙酮	醛和酮		2.04	2.18	2.41
		丙醛	醛和酮				
69	C <sub>4</sub> H <sub>4</sub> O	呋喃 <sup>b</sup>	杂环化合物	2B	1.53	13.90	1.23
71	C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O	2-丁烯醛 <sup>b</sup>	醛和酮	3	1.24	0.61	0.55
		2-甲基-2-丙烯醛 <sup>b</sup>	醛和酮				
		3-丁烯-2-酮 <sup>b</sup>	醛和酮				
73	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O	丁酮 <sup>b</sup>	醛和酮		0.34	17.47	0.78
		丁醛 <sup>b</sup>	醛和酮				
		异丁醛 <sup>b</sup>	醛和酮				
75	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> N <sub>2</sub> O C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	N-亚硝基二甲胺 <sup>b</sup>	胺	2A	5.99	2.15	2.09
		1-羟基-2-丙酮 <sup>b</sup>	醛和酮				
		乙酸甲酯 <sup>b</sup>	其他化合物				
76	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> NO <sub>2</sub>	硝基乙烷 <sup>b</sup>	其他化合物		0.23	0.08	0.08
77	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	丙二醇 <sup>b</sup>	醇和酚		0.04	0.02	0.05
79	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	苯	芳香烃	1	0.22	0.18	0.15
80	C <sub>3</sub> H <sub>5</sub> N	吡啶 <sup>b</sup>	杂环化合物	2B	1.70	-	-
83	C <sub>5</sub> H <sub>6</sub> O	2-环戊烯-1-酮 <sup>b</sup>	醛和酮		2.83	-	0.75
		2-甲基呋喃 <sup>b</sup>	杂环化合物				
85	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>	1-乙烯 <sup>b</sup>	脂肪烃		0.38	0.23	0.71
87	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	异戊醛	醛和酮		2.18	12.99	0.84
		戊醛	醛和酮				
		2-戊酮	醛和酮				
		3-戊酮	醛和酮				
89	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> N <sub>2</sub> O	N-亚硝基甲基乙基胺 <sup>b</sup>	胺	2B	0.69	0.30	0.18
93	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	甲苯	芳香烃	3	-	0.16	0.25
94	C <sub>6</sub> H <sub>7</sub> N	苯胺	胺	3	1.63	-	-
		3-甲基吡啶	杂环化合物				
		2-甲基吡啶	杂环化合物				
		4-甲基吡啶	杂环化合物				
95	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> O	苯酚	醇和酚	3	2.15	-	-
97	C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> O	2,5-二甲基呋喃 <sup>b</sup>	杂环化合物		11.76	1.46	-
99	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub> C <sub>7</sub> H <sub>14</sub>	糠醇	醇和酚	2B	1.58	0.75	0.31
		1-庚烯	脂肪烃				
101	C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub> C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O	2,4-戊二酮	醛和酮		0.37	0.43	0.15
		乙醛	醛和酮				
104	C <sub>7</sub> H <sub>5</sub> N	苯甲腈 <sup>b</sup>	其他化合物		0.23	0.01	-
105	C <sub>8</sub> H <sub>8</sub>	苯乙烯	芳香烃	2B	0.40	0.07	-

续表 1

m/z	分子式	化合物名称	物质分类	致癌等级 <sup>a</sup>	总释放量( $\mu\text{g}$ )									
					纱布(棉)	棉布	涤纶							
106	C <sub>7</sub> H <sub>7</sub> N	3-乙烯基吡啶 <sup>b</sup>	杂环化合物		2.01	-	-							
107	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	邻二甲苯	芳香烃	3	0.29	-	-							
		对二甲苯	芳香烃	3										
		间二甲苯	芳香烃	3										
		乙基苯	芳香烃	2B										
108	C <sub>7</sub> H <sub>9</sub> N	邻甲苯胺 <sup>b</sup>	胺	1	1.27	-	-							
		间甲苯胺 <sup>b</sup>	胺											
		对甲苯胺 <sup>b</sup>	胺											
109	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> O	邻甲酚	醇和酚		0.75	-	-							
		间甲酚	醇和酚											
		对甲酚	醇和酚											
111	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	对苯二酚 <sup>b</sup>	醇和酚	3	4.57	0.61	-							
		间苯二酚 <sup>b</sup>	醇和酚					3						
		邻苯二酚 <sup>b</sup>	醇和酚					2B						
113	C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	2-羟基-3-甲基-2-环戊烯-1-酮 <sup>b</sup>	醛和酮		0.74	0.50	0.25							
115	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> N <sub>2</sub> O	N-亚硝基吡啶 <sup>b</sup>	其他化合物	2B	0.12	0.29	0.07							
118	C <sub>5</sub> H <sub>11</sub> NO <sub>2</sub>	1-硝基正戊烷 <sup>b</sup>	其他化合物		0.13	-	-							
119	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> N <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	N-亚硝基氨酸 <sup>b</sup>	其他化合物	2B	0.09	0.01	-							
121	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	异丙苯	芳香烃	2B	0.47	1.81	0.12							
		4-乙基甲苯	芳香烃											
		2-乙基甲苯	芳香烃											
		3-乙基甲苯	芳香烃											
		1,3,5-三甲苯	芳香烃											
		1,2,4-三甲苯	芳香烃											
		1,2,3-三甲苯	芳香烃											
		1-乙基-3-甲基苯	芳香烃											
		丙基苯	芳香烃											
		C <sub>8</sub> H <sub>8</sub> O	苯乙酮					醛和酮						
			对甲基苯甲醛					醛和酮						
			间/邻甲基苯甲醛					醛和酮						
			122					C <sub>8</sub> H <sub>11</sub> N	2,4-二甲基苯胺 <sup>b</sup>	胺	3	0.19	-	-
									2,5-二甲基苯胺 <sup>b</sup>	胺				
2,6-二甲基苯胺 <sup>b</sup>	胺			2B										
2-乙基苯胺 <sup>b</sup>	胺													
3-乙基苯胺 <sup>b</sup>	胺													
4-乙基苯胺 <sup>b</sup>	胺													
2,3-二甲基苯胺 <sup>b</sup>	胺													
3,4-二甲基苯胺 <sup>b</sup>	胺													
3,5-二甲基苯胺 <sup>b</sup>	胺													
123	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> O	2,4-二甲基苯酚 <sup>b</sup>	醇和酚		0.51	0.02	-							
		对乙基苯酚 <sup>b</sup>	醇和酚											
124	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> NO <sub>2</sub>	硝基苯 <sup>b</sup>	芳香烃	2B	0.13	0.02	-							
	C <sub>7</sub> H <sub>9</sub> NO	邻甲氧基苯胺 <sup>b</sup>	胺					2B						
125	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	2-甲氧基苯酚 <sup>b</sup>	醇和酚		1.13	0.38	0.09							
127	C <sub>7</sub> H <sub>7</sub> Cl	1-氯-4-甲基苯 <sup>b</sup>	芳香烃		0.12	0.06	-							
	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>	1-壬烯 <sup>b</sup>	脂肪烃											
129	C <sub>10</sub> H <sub>8</sub>	萘	芳香烃	2B	0.07	0.13	0.11							
130	C <sub>9</sub> H <sub>7</sub> N	喹啉 <sup>b</sup>	杂环化合物		0.04	-	-							
133	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> N <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3-(N-亚硝基甲基氨基)丙酸 <sup>b</sup>	其他化合物		0.11	-	-							
135	C <sub>10</sub> H <sub>14</sub>	对异丙基甲苯	芳香烃		0.21	0.05	-							
		1-甲基-4-(1-甲基乙基)苯	芳香烃											
		叔丁基苯	芳香烃											
		丁基苯	芳香烃											
138	C <sub>7</sub> H <sub>7</sub> NO <sub>2</sub>	2-硝基甲苯 <sup>b</sup>	芳香烃	2A	0.04	-	-							

续表 1

m/z	分子式	化合物名称	物质分类	致癌等级 <sup>a</sup>	总释放量( $\mu\text{g}$ )		
					纱布(棉)	棉布	涤纶
		3-硝基甲苯 <sup>b</sup>	芳香烃	3			
		4-硝基甲苯 <sup>b</sup>	芳香烃	3			
139	$\text{C}_8\text{H}_{10}\text{O}_2$	2-甲氧基-4-甲基苯酚 <sup>b</sup>	醇和酚		0.40	0.20	0.04
143	$\text{C}_{11}\text{H}_{10}$	1-甲基萘	芳香烃		-	0.09	-
		2-甲基萘	芳香烃				
147	$\text{C}_9\text{H}_{10}\text{N}_2$	麦斯明	杂环化合物		0.08	-	-
149	$\text{C}_9\text{H}_{12}\text{N}_2$	去甲尼古丁	杂环化合物		0.02	-	-
153	$\text{C}_{12}\text{H}_8$	芘 <sup>b</sup>	芳香烃		0.16	0.05	-
157	$\text{C}_{12}\text{H}_{12}$	2,6-二甲基萘	芳香烃		0.10	0.01	-
致癌物总计					26.56	31.32	9.84
释放量总计					62.56	81.76	18.94

注: <sup>a</sup> 该物质被列于世界卫生组织国际癌症研究机构致癌物清单中,根据该清单,致癌等级分为以下几类:“1类致癌物”为对人的致癌风险有充足证据的物质;“2A类致癌物”为对人很可能致癌的物质(对人致癌性证据有限,对实验动物致癌性证据充分);“2B类致癌物”为对人可能致癌的物质(对人致癌性证据有限,对实验动物致癌性证据不充分;或对人类致癌性证据不足,对实验动物致癌性证据充分);“3类致癌物”为对人类致癌性可疑的物质(尚无充分的人体或动物数据).<sup>b</sup> 相对于Chien等<sup>[4]</sup>、Borujeni等<sup>[5]</sup>使用SPME-GC-MS法的结果,本文新鉴定出的THS成分.-表示未检出.

## 2.2 衣服面料对 THS 成分及含量的影响

由表 1 可知,各面料释放的 THS 总量由高到低排序为:棉布>纱布>涤纶,与 Chien 等<sup>[4]</sup>的结论一致(天然面料的 THS 释放量高于人工面料).这表明,吸

烟者穿着涤纶等人工面料衣服可以减少衣服介导的 THS 污染问题,进而降低 THS 对周围非吸烟人群带来的危害.下面对不同面料释放的 THS 化合物种类进行深入分析.

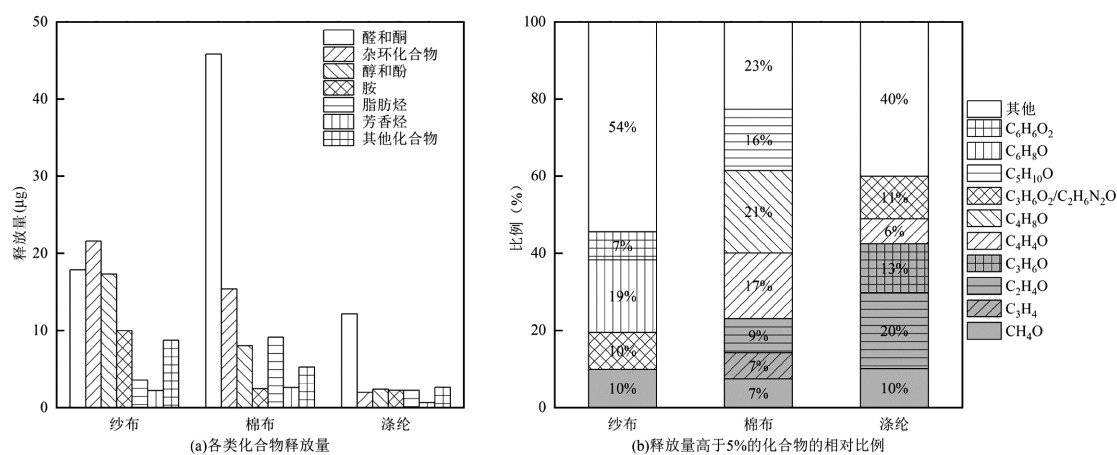


图 2 不同面料衣服释放的 THS 成分统计结果

Fig.2 Statistical results of THS compositions released from different clothing material

如表 1 所列,本文将衣服释放的 THS 化合物分为 6 大类:脂肪烃、芳香烃、醛/酮、醇/酚、胺、杂环化合物(主要为含氮化合物)以及其他化合物.图 2(a)所示为分类统计结果,可以看出不同面料衣服释放的化合物种类存在明显差异,但仍存在一些共性规律: 1) 醛/酮类化合物的占比总体更高,其为棉布和涤纶释放量最高的化合物,也是纱布释放量第二高的化合物,此类化合物通常为烟草成分(多糖、脂质和蜡等)的不完全燃烧产物<sup>[17-18]</sup>; 2) 杂环化合物在

棉质面料释放的 THS 中有很高占比,其为纱布释放量最高的一类化合物,在棉布释放的 THS 中占比第二高,此类化合物通常为含氮有机物在加热过程中形成的<sup>[19]</sup>; 3) 芳香烃在不同面料样品释放的 THS 中占比均最低,这可能是由于芳香烃的分子量普遍较大而导致的(分子量普遍大于 100,有机物的分子量越大通常越难挥发<sup>[20-21]</sup>).此外,棉布和涤纶释放的 THS 化合物种类非常集中(50%以上为醛/酮),而纱布则相对分散(杂环化合物、醛/酮、醇/酚均有 20%

以上占比).

若将释放量占比高于 5% 的化合物定义为主要化合物,图 2(b)所示为这些主要化合物释放量的比例(某主要化合物释放量除以所有化合物的总释放量).从中可以发现,不同面料释放的主要化合物存在一定的偏向性: 1) 纱布释放的大分子化合物更多,主要为 2,5-二甲基咪喃(简称 2,5-DMF,  $C_6H_8O$ , 分子量 96, 相对比例为 19%), 该物质常被用作烟草烟雾标志物<sup>[22]</sup>; 2) 棉布释放量最大的是 C4 醛酮( $C_4H_8O$ , 分子量 72, 相对比例为 21%), 此外还有咪喃( $C_4H_4O$ , 分子量 68, 相对比例为 17%)和 C5 醛酮( $C_5H_{10}O$ , 分子量 86, 相对比例为 16%), 总体以分子量 < 80 的物质为主; 3) 涤纶释放的小分子化合物占比最高, 主要为乙醛( $C_2H_4O$ , 分子量 44, 相对比例为 20%)和 C3 醛酮( $C_3H_6O$ , 分子量 58, 相对比例为 13%), 其中乙醛不仅有强烈的刺激性臭味, 还是 2B 类致癌物, 需要重点关注. 在所有面料样品中, 甲醇( $CH_4O$ , 分子量 32)均为主要化合物, 且释放量占比相对接近(7%~10%), 是主要化合物中唯一的醇类物质.

以上结果表明面料材质对衣服释放的 THS 成分及含量均有显著影响, 最明显的特点是纯棉面料释放的 THS 总量及种类均远多于涤纶面料, 这可能是由于棉纤维表面存在较多褶皱且纤维之间有部分缠结, 有利于香烟烟雾的富集; 而涤纶纤维表面则较为光滑, 不具备这样的吸附优势<sup>[23]</sup>. 另外, 与涤纶相比, 研究发现棉纤维表面还存在大量羟基官能团<sup>[23]</sup>, 这可能促进了棉纤维对极性化合物的吸附能力: 如图 2(a)所示, 纱布和棉布中, 醛/酮、醇/酚等化合物的释放量均显著高于涤纶. 但总的来讲, 面料材质对衣服释放的 THS 成分及含量的影响规律及其背后的原因仍需进一步研究.

### 2.3 THS 可释放量随时间的变化规律

衣服中 THS 的释放过程实质是化合物从衣服表面经对流传质重新释放回空气的过程, 因此 THS 各成分的可释放量( $M$ ,  $\mu\text{g}$ )随时间的变化规律可用下列方程进行描述<sup>[24]</sup>,

$$\frac{dM}{dt} = -2h_m A(C_m - C_a) \quad (2)$$

式中:  $t$  为衣服释放 THS 的时长, min, 衣服停止吸附烟草烟雾的时刻记为  $t = 0$ ;  $h_m$  为对流传质系数, m/min;  $A$  为衣服单侧表面积,  $\text{m}^2$ ;  $C_m$  为衣

服表面空气侧的化合物浓度,  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ;  $C_a$  为环境空气中的化合物浓度,  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . 由于脱附实验在足够大的空间内进行, THS 成分的浓度均很低, 故假设  $C_a$  等于 0.

假设 THS 化合物在空气和衣服表面间存在瞬态平衡分配关系<sup>[24]</sup>, 则有,

$$\frac{M}{A} = m_s = K_s C_m \quad (3)$$

式中:  $m_s$  为 THS 化合物在单位面积衣服上的含量, 等于  $M/A$ ,  $\mu\text{g}/\text{m}^2$ ;  $K_s$  为 THS 化合物的衣服-空气分配系数, m.

假设衣服中 THS 化合物的初始可释放量为  $M_0$ , 联立式(2)和(3)可得,

$$\frac{M}{M_0} = \exp\left(-\frac{2h_m}{K_s} t\right) = \exp(-kt) \quad (4)$$

式中:  $k$  为 THS 可释放量的时间衰减速率,  $\text{min}^{-1}$ . 可以看出, 衣服中 THS 可释放量理论上会随时间指数衰减.

若将衣服吸附烟草烟雾后立即放入样品管中分析得到的 THS 可释放量记为  $M_0$  (即脱附时长为 0 的衣服样品的 THS 可释放量), 则可对悬挂不同时长(5~60min)的衣服样品的 THS 可释放量做归一化处理( $M/M_0$ ), 进而可以分析实验结果与式(4)的吻合程度. 图 3(a)所示为典型烟草烟雾标志物(咪喃<sup>[25]</sup>)的结果, 可以看出实验结果与式(4)的拟合优度很高(拟合优度系数  $R^2 > 0.8$ ), 其余衣服释放的主要 VOCs 与式(4)同样具有很高的拟合度( $R^2 > 0.7$ , 结果详见表 2), 这表明式(4)可用于描述衣服中 THS 各 VOC 成分可释放量随时间的变化规律.

式(4)中的时间衰减速率  $k$  实际表示的是化合物从衣服表面的脱附速率:  $k$  值越大, 脱附速率越快. 由表 2 可知, 衣服中脱附速率最快的是苯, 借助式(4)及其  $k$  值估算可知在本研究的环境条件下 3 种衣服在室外悬挂 5min 后其可释放量均将衰减 70% 以上; 咪喃(2B 类致癌物)的脱附速率则慢许多, 若要使其可释放量衰减 70%, 需将衣服在室外悬挂 30min 以上. 上述结果表明衣服中 THS 各成分的释放规律存在显著差异, 主要体现在时间衰减速率  $k$  因化合物而异. 已有研究发现有机物在衣服与空气间的分配系数( $K_s$ )随分子量升高而升高(即分子量越大,  $k$  越小)<sup>[26-29]</sup>, 但表 2 所列数据并不符合该规律: 如咪喃的

分子量仅为 68,但它的  $k$  显著低于吡啶(分子量 79)和 2,5-二甲基咪唑(分子量 96).时间衰减速率  $k$  与 THS 成分理化性质间的关系、其有哪些关键影响因素等问题仍需进一步研究.如 2.2 所述,不同面料材质衣服的表面微观结构和化学性质也不尽相同,从而可能导致衣服中 THS 的释放规律存在差异.由图 3 和表 2 可知,相同释放条件下涤纶释放 THS 的速率明显快于纯棉面料,这可能是由于涤纶纤维表面更

为光滑,THS 更易从其中脱附.纱布释放 THS 的速率明显快于 T 恤,这可能是由于纱布更为疏松,结构较 T 恤更为简单,有利于 THS 分子从中逸出.图 3 和表 2 还展示了室内外环境对 THS 释放速率的影响(以涤纶为研究对象):衣服在通风良好的室外环境释放 THS 的速率显著高于在气流速度明显更低的室内环境,室外环境中更高的气流速度有利于 THS 分子从衣服表面扩散至主流空气中.

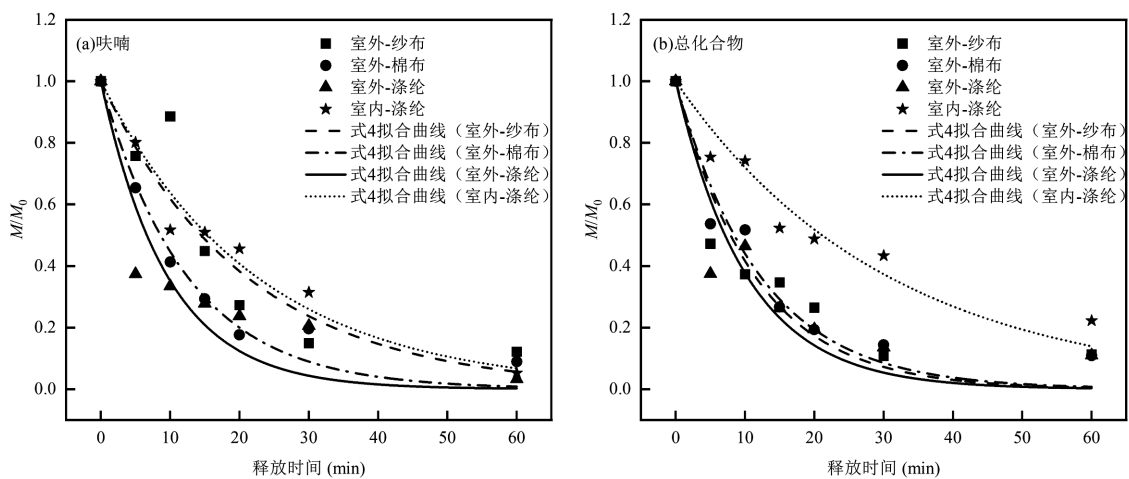


图 3 衣服中 THS 可释放量随时间的变化规律

Fig.3 Time dependence of THS amount released from clothing

表 2 衣服释放的代表性 THS 化合物的时间衰减速率拟合结果

Table 2 Fitting results for the time decreasing rates of representative THS compositions released from clothing

化合物	室外纱布		室外棉布		室外涤纶		室内涤纶		类型
	$k(\text{min}^{-1})$	$R^2$	$k(\text{min}^{-1})$	$R^2$	$k(\text{min}^{-1})$	$R^2$	$k(\text{min}^{-1})$	$R^2$	
乙腈( $\text{C}_2\text{H}_5\text{N}$ )	0.091	0.931	0.086	0.912	0.097	0.931	0.025	0.810	香烟标志物
咪唑( $\text{C}_4\text{H}_4\text{O}$ )	0.048	0.875	0.081	0.968	0.104	0.835	0.045	0.990	致癌物
苯( $\text{C}_6\text{H}_6$ )	0.272	0.956	0.238	0.920	2.881	0.994	0.084	0.813	致癌物,香烟标志物
吡啶( $\text{C}_5\text{H}_5\text{N}$ )	0.125	0.744	0.060	0.820	0.175	0.956	0.027	0.843	致癌物,香烟标志物
2,5-二甲基咪唑( $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}$ )	0.220	0.989	0.110	0.968	0.244	0.783	0.036	0.911	香烟标志物

如图 3(b)所示,对于 THS 总可释放量,式(4)预测结果则与实验结果存在较大偏差,特别是当释放时间较长时(30min 后,式(4)预测结果显著低于实测结果),这主要是由于时间衰减速率  $k$  因化合物而异,式(4)仅适用于描述单种化合物的释放规律,而 THS 总可释放量为混合物,如何准确描述 THS 总可释放量随时间的变化规律仍需进一步研究.尽管如此,THS 总可释放量仍随时间呈指数下降趋势:当衣服在室外悬挂 5min 后,THS 总可释放量下降了 20%以上;悬挂 30min 后,THS 总可释放量下降至初始值的 20%以下;而在 30min 之后,THS 总可释放量的下降

趋势变得非常缓慢.由此可知,若吸烟后在通风良好的室外停留 30min 以上,衣服介导的 THS 污染问题或许可以得到明显减缓.

#### 2.4 环境温湿度对 THS 释放特性的影响

温度和湿度作为两个重要的环境参数,对衣服中 THS 释放特性的影响不容忽视,故本文在温湿度可控的室内环境中测量了温湿度对 THS 释放速率的影响规律.图 4(a)所示为温度对 THS 释放速率的影响(温度分别为 $(25.1\pm 0.4)^\circ\text{C}$ 、 $(28.1\pm 0.2)^\circ\text{C}$ 和 $(30.2\pm 0.3)^\circ\text{C}$ ,相对湿度稳定在 $(87.3\%\pm 2.0\%)$ ):升高温度将促进衣服中 THS 的释放速率,这可能是由于随着温度的升

高,分子热运动加剧,从而促进 THS 从衣物表面解吸并释放到空气中.由此可知,吸烟后可将衣物置于尽可能高温的环境中以促进 THS 的释放,从而在加快缓解衣服介导的 THS 污染.

图4(b)所示为相对湿度对 THS 释放速率的影响(相对湿度分别为(64.0%±4.3%)、(76.0%±3.1%)和(87.3%±2.0%),温度稳定在(30.0±0.5)°C):湿度对衣

服中 THS 总释放速率的影响并不显著,但对某些极性化合物的释放速率仍有显著影响(如乙腈和呋喃的释放速率与相对湿度正相关),这可能是由于水蒸气的存在降低了衣服表面对极性化合物吸附亲和力(存在竞争吸附关系),从而加快极性化合物的脱附.总体而言,湿度对衣服释放 THS 速率的影响规律较为复杂,后续仍需开展深入研究.

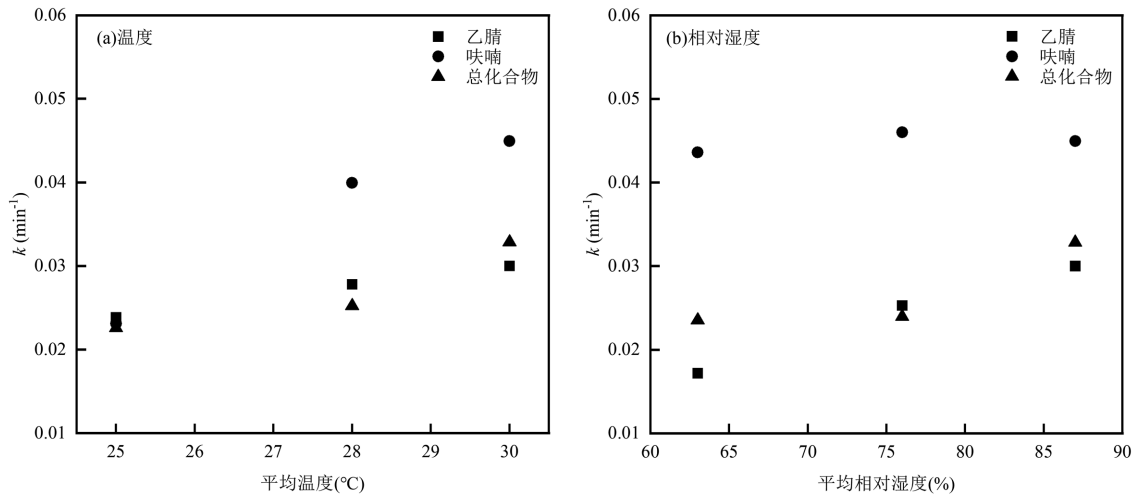


图4 环境温湿度对衣服中 THS 释放速率的影响规律

Fig.4 Effects of temperature and relative humidity on THS release rate from clothing

### 3 结论

3.1 使用 PTR-TOF-MS 从衣服释放的 THS 中鉴定出 111 种可能的化合物,包括 36 种致癌物、20 种分子量低于 80 的小分子化合物,为进一步深入研究衣服中 THS 的释放特性提供了一种有效可行的新方法.

3.2 不同面料衣服释放的 THS 含量、成分及速率存在显著区别:THS 释放量由高到低依次为纯棉 T 恤、纯棉纱布、涤纶 T 恤(天然面料高于人工面料);纱布释放的大分子量化合物更多,醛/酮、醇/酚及杂环化合物是其释放量最高的几类化合物;棉布及涤纶释放的小分子量化合物更多,其中 50%以上为醛/酮类化合物;涤纶面料释放 THS 的速率显著快于棉质面料.

3.3 衣服中 THS 污染物的可释放量随时间呈指数衰减趋势,THS 总可释放量及绝大多数 THS 成分的可释放量均可在 30min 后下降 80%以上;升高温度可加快衣服中 THS 各成分的释放速率,升高湿度则

仅可加快 THS 中极性化合物的释放速率.

### 参考文献:

- [1] 王 辰,肖 丹,池 慧.《中国吸烟危害健康报告 2020》概要 [J]. 中国循环杂志, 2021,36(10):937-952.  
Wang C, Xiao D, Chi H. 2020Report on health hazard of smoking in China: An updated summary [J]. Chinese Circulation Journal, 2021, 36(10):937-952.
- [2] Daisey J M. Tracers for assessing exposure to environmental tobacco smoke: What are they tracing? [J]. Environmental Health Perspectives, 1999,107(2):319-327.
- [3] Matt G E, Quintana P J E, Destailats H, et al. Thirdhand tobacco smoke: Emerging evidence and arguments for a multidisciplinary research agenda [J]. Environmental Health Perspectives, 2011, 119(9):1218-1226.
- [4] Chien Y, Chang C, Liu Z. Volatile organics off-gassed among tobacco-exposed clothing fabrics [J]. Journal of Hazardous Materials, 2011,193:139-148.
- [5] Borujeni E T, Yaghmaian K, Naddafi K, et al. Identification and determination of the volatile organics of third-hand smoke from different cigarettes and clothing fabrics [J]. Journal of Environmental Health Science and Engineering, 2022,20(1):53-63.
- [6] Ueta I, Saito Y, Teraoka K, et al. Determination of volatile organic compounds for a systematic evaluation of third-hand smoking [J].

- Analytical Sciences, 2010,26(5):569-574.
- [7] 范亮,张海杰,王玮,等.大气中酰胺的研究进展与展望 [J]. 中国环境科学, 2024,44(5):2369-2385.  
Fan L, Zhang H J, Wang W, et al. Research progress and prospect of amide in atmosphere [J]. China Environmental Science, 2024,44(5): 2369-2385.
- [8] Håland A, Mikoviny T, Syse E E, et al. On the development of a new prototype PTR-ToF-MS instrument and its application to the detection of atmospheric amines [J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2022,15(21):6297-6307.
- [9] Shrestha S, Zhou S, Mehra M, et al. Evaluation of aerosol- and gas-phase tracers for identification of transported biomass burning emissions in an industrially influenced location in Texas, USA [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2023,23(19):10845-10867.
- [10] 张颖,孔少飞,郑煌,等.牛粪燃烧实时排放挥发性有机物特征研究 [J]. 中国环境科学, 2020,40(5):1932-1939.  
Zhang Y, Kong S F, Zheng H, et al. Real-time emission of volatile organic compounds from cow dung combustion [J]. China Environmental Science, 2020,40(5):1932-1939.
- [11] Kohl I, Herbig J, Dunkl J, et al. Smokers breath as seen by proton-transfer-reaction time-of-flight mass spectrometry (PTR-TOF-MS) [M]. Boston: Elsevier, 2013:89-116.
- [12] Sheu R, Stöner C, Ditto J C, et al. Human transport of thirdhand tobacco smoke: A prominent source of hazardous air pollutants into indoor nonsmoking environments [J]. Science Advances, 2020,6(10): eaay4109.
- [13] 顾惠琴,陈辉华,王佳欢.不同纤度涤纶短纤的性能研究 [J]. 纺织检测与标准, 2024,10(3):15-19.  
Gu H Q, Chen H H, Wang J H. Research on the performance of different denier polyester staple fibers [J]. Textile Testing and Standard, 2024,10(3):15-19.
- [14] Soleimani F, Dobaradaran S, De-la-Torre G E, et al. Content of toxic components of cigarette, cigarette smoke vs cigarette butts: A comprehensive systematic review [J]. Science of The Total Environment, 2022,813:152667.
- [15] Office on Smoking and Health (US). The health consequences of involuntary exposure to tobacco smoke: A report of the Surgeon General [M]. Atlanta (GA): Centers for Disease Control and Prevention (US), 2006:11.
- [16] Yu C, Lo Y, Chiou W. The 3D scanner for measuring body surface area: a simplified calculation in the Chinese adult [J]. Applied Ergonomics, 2003,34(3):273-278.
- [17] Ding Y, Trommel J S, Yan X, et al. Determination of 14 polycyclic aromatic hydrocarbons in mainstream smoke from domestic cigarettes [J]. Environmental Science & Technology, 2005,39(2): 471-478.
- [18] Ding Y, Ashley D L, Watson C H. Determination of 10 carcinogenic polycyclic aromatic hydrocarbons in mainstream cigarette smoke [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2007,55(15):5966-5973.
- [19] Zhao G, Wang S, Fu Y, et al. Analysis of the heterocyclic aromatic amines in cigarette smoke by liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. Chromatographia, 2014,77(11):813-820.
- [20] Rochman C M, Manzano C, Hentschel B T, et al. Polystyrene plastic: A source and sink for polycyclic aromatic hydrocarbons in the marine environment [J]. Environmental Science & Technology, 2013,47(24): 13976-13984.
- [21] Neira C, Cossaboon J, Mendoza G, et al. Occurrence and distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediments of San Diego Bay marinas [J]. Marine Pollution Bulletin, 2017,114(1):466-479.
- [22] Charles S M, Jia C, Batterman S A, et al. VOC and particulate emissions from commercial cigarettes: Analysis of 2,5-DMF as an ETS tracer [J]. Environmental Science & Technology, 2008,42(4): 1324-1331.
- [23] 陈远.共沉积改性涤纶、棉和涤棉废旧织物增强环氧复合材料研究 [D]. 天津:天津工业大学, 2023.  
Chen Y. Research on epoxy composites reinforced by co-deposition modified waste fabrics of polyester, cotton, and polyester-cotton blend [D]. Tianjin: Tiangong University, 2023.
- [24] Zhang Y, Xiong J, Mo J, et al. Understanding and controlling airborne organic compounds in the indoor environment: mass transfer analysis and applications [J]. Indoor Air, 2016,26(1):39-60.
- [25] Bekki K, Uchiyama S, Inaba Y, et al. Analysis of furans and pyridines from new generation heated tobacco product in Japan [J]. Environmental Health and Preventive Medicine, 2021,26(1):89.
- [26] Cao J, Weschler C J, Luo J, et al. C<sub>m</sub>-history method, a novel approach to simultaneously measure source and sink parameters important for estimating indoor exposures to phthalates [J]. Environmental Science & Technology, 2016,50(2):825-834.
- [27] Eichler C M A, Hubal E A C, Xu Y, et al. Assessing human exposure to SVOCs in materials, products, and articles: A modular mechanistic framework [J]. Environmental Science & Technology, 2021,55(1): 25-43.
- [28] 朱腾义,陈颖,程浩淼,等.基于QSAR模型预测有机污染物在XAD与空气中的分配系数 [J]. 中国环境科学, 2022,42(5):2269-2274.  
Zhu T Y, Chen Y, Cheng H M, et al. Prediction of organic pollutants partition coefficients between XAD and air based on QSAR models [J]. China Environmental Science, 2024,42(5):2269-2274.
- [29] 王子倩,郝伟伟,董玲池,等.重庆大气中多环芳香类物质气粒分配模型预测 [J]. 中国环境科学, 2024,44(2):629-637.  
Wang Z Q, Hao W W, Dong L C, et al. Modeling prediction of particle distribution of polycyclic aromatic compounds in the winter atmosphere over Chongqing urban area [J]. China Environmental Science, 2024,44(2):629-637.

作者简介: 耿 闯(1999-),男,河南信阳人,中山大学硕士研究生,主要研究方向为室内空气质量.发表论文 1 篇, gengch3@mail2.sysu.edu.cn.