

吕 喆,李国昊,白画画,等.电子工业挥发性有机物排放及健康风险评估[J].中国环境科学,2025,45(2):1074-1087.

Lv Z, Li G H, Bai H H, et al. Emission characteristics and health risk assessment of volatile organic compounds from electronics-manufacturing industry [J]. China Environmental Science, 2025,45(2):1074-1087.

## 电子工业挥发性有机物排放及健康风险评估

吕 喆,李国昊\*,白画画,刘晓宇,邵 霞,聂 磊 (北京市生态环境保护科学研究院,国家城市环境污染控制工程技术研究中心,城市大气挥发性有机物污染防治技术与应用北京市重点实验室,北京 100037)

**摘要:** 为研究电子工业挥发性有机物(VOCs)排放特征及其健康风险影响,选取 10 家典型的电子企业,对其生产过程中产生的工艺废气进行样品采集和 VOCs 检测,并通过美国 EPA 和 ACGIH 方法评估其对人体健康的影响.结果表明:不同电子企业排气筒 VOCs 排放存在差异,半导体器件与电子终端产品行业 VOCs 浓度相对高于显示器及光电子器件与印制电路板行业,其 VOCs 浓度分别为 13.41~13.63, 3.34~86.11, 7.86~9.75 和 4.31~4.67mg/m<sup>3</sup>;半导体器件排气筒废气中 VOCs 以烷烃为主(70.56%~70.78%),质量分数最高的 VOCs 物种为二甲基戊烷(32.03%~33.60%);显示器及光电子器件和印制电路板企业排气筒废气中 VOCs 均以 OVOCs 为主,质量分数分别为(93.48%~95.87%)和(92.27%~93.05%),且质量分数最高的分别为丙酮(91.89%~94.99%)和异丙醇(80.36%~83.07%);电子终端产品行业由于生产产品不同,导致排气筒废气中 VOCs 组分存在差异,但以 OVOCs、芳香烃和烷烃为主;不同企业间分歧系数为 0.67~0.91,即 VOCs 源成分谱必不相似;半导体器件的非致癌风险 HR 最高(484.35),其次为显示器及光电子器件(447.46)、电子终端产品(11.74~87.35)和印制电路板(2.25),即各电子行业长期暴露均会造成非致癌健康危害;半导体器件( $1.63 \times 10^{-3}$ )、电子终端产品( $1.64 \times 10^{-4}$ ~ $5.16 \times 10^{-3}$ )行业 LCR 值较高,会产生确定的致癌风险;显示器及光电子器件、印制电路板行业 LCR 值分别为  $1.74 \times 10^{-5}$  和  $1.40 \times 10^{-5}$ ,有大概率致癌风险;电子终端产品子行业的总  $E_i$  值相对较大,显示器及光电子器件行业的总  $E_i$  值最小,但所有电子行业的  $E_i$  值均低于 0.1,表明电子行业 VOCs 排放可能不会对工人产生健康影响.EPA 和 ACGIH 方法评估致癌风险的结果差异较大,主要是因为两种方法对 VOCs 物种暴露参考浓度的限定指标不同.但整体来看,电子终端企业产品及半导体器件行业排放的 VOCs 健康风险远高于其他两个子行业,因此,应重点加强两个行业 VOCs 管控以保护工人健康.

**关键词:** 电子工业;挥发性有机物(VOCs);排放特征;健康影响

中图分类号: X503 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2025)02-1074-14

### Emission characteristics and health risk assessment of volatile organic compounds from electronics-manufacturing industry.

LYU Zhe, LI Guo-hao\*, BAI Hua-hua, LIU Xiao-yu, SHAO Xia, NIE Lei (Beijing Key Laboratory of Urban Atmospheric Volatile Organic Compounds Pollution Control and Application, National Engineering Research Center of Urban Environmental Pollution Control, Beijing Municipal Research Institute of Eco-Environmental Protection, Beijing 100037, China) *China Environmental Science*, 2025,45(2): 1074~1087

**Abstract:** In order to study the emission characteristics of VOCs from the electronics-manufacturing industry and associated health risk assessment, ten typical electronics enterprises were selected to carry out sample collection and VOCs detection. Moreover, the impacts of VOCs on human health were evaluated by the US EPA and ACGIH methods. The results showed that: The concentrations of VOCs emitted from different types of electronic enterprises exhaust gas were different. The VOCs concentrations in the semiconductor device and electronic terminal product were relatively higher than those in the display device and printed circuit board, and the VOCs concentrations were 13.41~13.63, 3.34~86.11, 7.86~9.75 and 4.31~4.67mg/m<sup>3</sup>, respectively. The main organic group in semiconductor device exhaust gas was alkanes (70.56%~70.78%), and dimethylpentane (32.03%~33.60%) was the main VOCs species. The main organic group in display device exhaust gas and printed circuit board exhaust gas were both OVOCs, accounting for 93.48%~95.87% and 92.27%~93.05%, respectively. Additionally, the highest mass fraction were acetone (91.89%~94.99%) and isopropanol (80.36%~83.07%) in display device and printed circuit board. Due to the different production products, VOCs components were different in the electronic terminal product, but mainly OVOCs, aromatics and alkanes. The coefficient of divergence between different enterprises was 0.67~0.91, indicating that VOCs source profiles must not be similar. Total hazard ratio for non-cancer risk in semiconductor device was the highest (484.35), followed by display device (447.46), electronic terminal product (11.74~87.35) and printed circuit boards (2.25), suggesting long-term exposure of various electronic industries would cause non-cancer health hazards. The LCRs from semiconductor device ( $1.63 \times 10^{-3}$ ) and electronic terminal product ( $1.64 \times 10^{-4}$ ~ $5.16 \times 10^{-3}$ )

收稿日期: 2024-07-10

基金项目: 北京市科委“首都蓝天行动培育”专项(Z181100005418015);O<sub>3</sub>与PM<sub>2.5</sub>复合污染协同防治预研项目

\* 责任作者, 研究员, liguohao@cee.cn

were much higher, suggesting that these enterprises have a certain cancer risk. The LCRs from display device and printed circuit board were  $1.74 \times 10^{-5}$  and  $1.40 \times 10^{-5}$ , indicating that these enterprises have a high probability cancer risk. The total  $E_i$  from electronic terminal product was the highest, while that from display device was the lowest. However, the  $E_i$  in different electronics industries were lower than 0.1, indicating that VOCs emitted from these industries may not generate many harmful effects to the workers. The results of the cancer risk assessment using the EPA and ACGIH methods vary significantly. This is mainly because two methods have different limiting indicators for the reference concentration of VOCs species exposure. But on the whole, the health risks from VOCs emitted in the electronic terminal product and semiconductor device were much higher than in the other two industries. Therefore, to ensure the safety of workers, measures for controlling VOCs should be strengthened.

**Key words:** electronic manufacturing industry; volatile organic compounds (VOCs); emission characteristics; health impact

随着我国社会经济的快速发展和城市化进程的不断加快,以细颗粒物( $PM_{2.5}$ )和  $O_3$  为特征的区域复合污染问题突出<sup>[1-3]</sup>。为解决我国大气污染问题,国务院先后颁布实施了《大气污染防治行动计划》<sup>[4]</sup>、《打赢蓝天保卫战三年行动计划》<sup>[5]</sup>、《空气质量持续改善行动计划》<sup>[6]</sup>等一系列管控措施,2013~2022年,中国  $PM_{2.5}$  平均浓度下降了 57%,重污染天数减少 93%<sup>[7]</sup>,成为全世界空气质量改善速度最快的国家。然而,2022 年京津冀及周边地区、汾渭平原  $PM_{2.5}$  平均浓度为 44 与  $46 \mu g/m^3$ , $O_3$  日最大 8h 平均值第 90 百分位数浓度平均分别为 179 与  $167 \mu g/m^3$ ,仍分别超过《环境空气质量标准》(GB3095-2012)<sup>[8]</sup>中污染物二级浓度限值的 25.7%和 31.4%、11.9%和 4.4%。秋冬季  $PM_{2.5}$  污染,夏季  $O_3$  污染依然十分严重,区域重污染天气过程仍时有发生。因此,开展  $PM_{2.5}$  和  $O_3$  协同控制成为持续改善空气质量的迫切需要。挥发性有机化合物(VOCs)作为  $PM_{2.5}$  和  $O_3$  的重要前体物,通过控制其排放,可有效促进环境持续改善,减少人体健康影响<sup>[9-12]</sup>。

北京作为中国首都,其空气质量受到全社会的关注。电子工业由于具有技术水平高、附加值高等特点,已经取代传统污染排放较大的工业,在北京获得较大发展。电子工业 VOCs 产生主要来自光刻、清洗、剥离、显影等环节,使用的原辅材料光刻胶、稀释剂、清洗剂和去除剂含有 VOCs<sup>[13]</sup>,2019 年北京市电子工业 VOCs 排放量为 1542t,主要来自显示器件、集成电路、电子专用材料制造与其他行业,分别占比 71%、18%、3.2%和 7.8%<sup>[14]</sup>。电子工业 VOCs 具有种类繁多,成分复杂等特点,会对环境与人体健康均产生一定影响<sup>[15]</sup>。因此,开展电子工业 VOCs 排放特征与健康影响研究具有十分重要的意义。

目前,众多学者对电子工业 VOCs 排放开展了研究。在排放量方面,2011~2016 年我国显示器件行

业 VOCs 排放量呈先增后降的趋势<sup>[16]</sup>,而集成电路制造业 VOCs 排放量呈逐年上升的趋势<sup>[17]</sup>,但是两个行业无组织排放量占比均呈逐年上升。在浓度组分特征方面,黄鹤雯等<sup>[18]</sup>对珠江三角洲地区电子设备制造业开展研究,发现其 VOCs 组分以 OVOCs、芳香烃与烷烃为主,占比达 90%左右。2000~2003 年台湾某半导体工业园区内最丰富的 VOCs 物种是 OVOCs 和芳香烃,环境空气中测得的主要成分是异丙醇、丙酮、苯与甲苯<sup>[19]</sup>。在健康方面,黄慧峰等<sup>[20]</sup>采用美国 EPA 方法评估企业喷粉工艺车间、UV 漆喷涂工艺车间与 PU 漆喷涂工艺车间健康风险,发现三个车间均存在非致癌健康风险,且粉体喷涂替代 UV 和 PU 漆喷涂可以减少印制线路板生产过程中对环境与健康的影响。梁永锡等<sup>[21]</sup>和郭笑笑等<sup>[22]</sup>采用职业病危害因素调查方法,分别对广东省某市 202 家电子企业和天津市某电子元件制造企业开展调研,前者发现化学毒品总体超标率为 3.82%,超标率排前 3 位的为苯乙烯(33.33%)、甲醛(8.00%)与三氯乙烯(7.32%),后者发现该企业主要职业病危害因素有二甲苯、异丙醇、丙酮、丁酮等。此外,也有学者对电子工业中 VOCs 的治理技术进行了综述<sup>[23]</sup>。

目前,尚未有对电子工业各子行业 VOCs 排放特征和人体健康影响开展深入研究。因此,本研究选取北京市典型电子工业企业(半导体器件、显示器及光电子器件、印制电路板、电子终端产品)开展 VOCs 排放特征和健康影响研究,分析和比较不同电子工业子行业间的 VOCs 浓度和化学组分差异,整合各子行业 VOCs 排放成分谱。通过两种方式对电子工业企业工人暴露于排放的 VOCs 健康风险进行评估,健康风险评价包括非致癌和致癌风险(US EPA 方法)以及职业暴露风险评价(ACGIH 方法)。本研究结果可为更好地理解电子工业 VOCs 排放特征,以及在公众健康方面的政策制定提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域产业概况

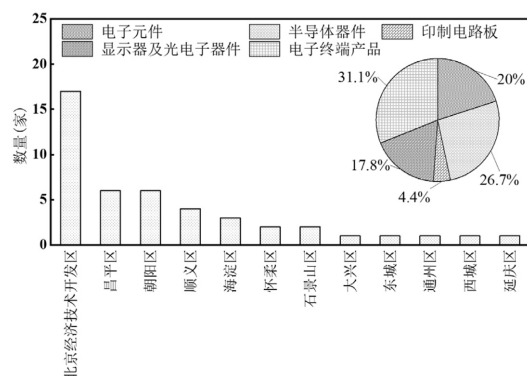


图1 北京市电子工业企业数量及分布情况

Fig.1 The number and distribution of electronics-manufacturing industry enterprises in Beijing

目前,北京市电子行业规模以上企业 269 家,多以设计与研发为主的总部企业或产品组装等非排污企业.根据环境统计数据,全市正常生产且涉气排放的电子工业企业有 45 家(图 1),由电子元件(20.0%)、半导体器件(26.7%)、印制电路板(4.4%)、显示器及光电子器件(17.8%)、电子终端产品(31.1%)

五大行业组成.此外,北京市电子工业企业主要集中在北京经济技术开发区,这是由于该区产业配套设施齐全,聚集高精尖技术人才,有利于产业发展.

### 1.2 VOCs 采样方法

综合考虑生产规模、产品类型、废气处理工艺等,本研究对北京市半导体器件、显示器及光电子器件、印制电路板、电子终端产品四大电子工业子行业的 10 家典型企业开展研究,企业具体信息见表 1.

按照《固定污染源废气 挥发性有机物的采样气袋法》(HJ 732-2014)<sup>[24]</sup>进行采样.排气筒废气样品经过硅烷化处理后的过滤头伸入排气筒,采用纯氮气抽真空清洗的 10L 聚四氟乙烯采样袋,流量为 500mL/min,采样时间为 10min.采样泵为北京市劳动保护科学研究所生产的 QC-2 型空气采样器,采样系统中所有连接管道均采用聚四氟乙烯材料,避免采样误差.采集样品时,企业正常生产,废气处理设施正常运行,烟气排放稳定.采样结束后,将聚四氟乙烯采样袋避光保存,随后导入预先清洗并抽至真空的 SUMMA (3.2L)中保存.考虑单个样品带来的不确定性,每个采样点采集 3 个平行样品,采样间隔为 1h.

表 1 北京市电子工业企业信息

Table 1 Electronics-manufacturing industry enterprise information in Beijing

企业编号	行业类别	主要产品	采样位置	废气处理设施	样品数量
A 企业	半导体器件	集成电路	排气筒	沸石转轮浓缩+RTO	3
B 企业	半导体器件	集成电路	排气筒	沸石转轮浓缩+RTO	3
C 企业	显示器及光电子器件	液晶面板	排气筒	沸石转轮浓缩+TO	3
D 企业	显示器及光电子器件	液晶面板	排气筒	沸石转轮浓缩+TO	3
E 企业	印制电路板制造	印制电路板	排气筒	活性炭吸附	3
F 企业	印制电路板制造	印制电路板	排气筒	活性炭吸附	3
G 企业	电子终端产品	控制板	排气筒	活性炭吸附脱附+RCO	3
H 企业	电子终端产品	音箱	排气筒	活性炭吸附	3
I 企业	电子终端产品	显示器	排气筒	活性炭吸附	3
J 企业	电子终端产品	医疗产品	排气筒	活性炭+UV 光解	3

### 1.3 化学组分分析

样品组分分析采用美国 EPA 推荐的 TO-15 的方法,并采用三级冷阱预浓缩-二维 GC-MS/FID 系统进行定性与定量分析.气体样品首先经自动进样系统,通过快速接头抽取 400mL 进入 Entech 7100A 预浓缩仪进行前处理.冷阱 Module1 为多孔玻璃微珠,能够去除水、N<sub>2</sub> 和 O<sub>2</sub>;冷阱 Module2 装有 Tenax 吸附剂,去除 Ar、CH<sub>4</sub>、CO<sub>2</sub> 和微量水分;冷阱

Module3(空管)冷冻聚焦,将 VOCs 组分富集.聚焦冷冻完毕后,Module3 快速升温使冷冻在毛细柱头的 VOCs 迅速汽化,在氦载气的推动下,解吸进入 GC-MS/FID 系统(Agilent 7890A/5975C)进行分离和定量.色谱柱信息:色谱柱包括总烃柱和甲烷柱,甲烷柱:3m×3mm 的不锈钢柱,管内装有 60 目 GDX104 高分子多孔微球载体,总烃柱:1m×3mm 的不锈钢柱,内装有 60 目的硅烷化玻璃微珠.GC-MS/FID 系统的

升温程序为:GC 柱箱以 35℃的初始温度保持 5min;然后以 5℃/min 升温至 160℃,保持 2min;接着以 20℃/min 升温至 220℃并保持 5min,全程运行 40min.载气为高纯氮气(纯度>99.999%),传输线温度为 250℃.质谱条件:质谱检测器的离子源类型为电子轰击电离(EI),电离能量为 70eV,离子源温度 230℃,全扫描方式,扫描范围为 20~200u.定量分析使用的外标气体为 TO-15(Scott Gases,美国)和 PAMS (Spectra gases,美国),前者包含 63 种化合物,后者包含 56 种 VOCs.内标气体含有 4 种化合物,分别为溴氯甲烷、1,4-二氯苯、D5-氯苯、1-溴-4-氟苯(Spectra gases,美国).

#### 1.4 质量控制和质量保证

按照美国 EPA 推荐的 TO-15 方法对 SUMMA 罐进行清洗.所有 SUMMA 罐均采用纯度>99.99%的氮气反复清洗 3~4 次,清洗后加压至 6Pa 以下,在实验室中保存 24h,以避免罐内任何污染.同时,所有与烟气接触的管道均采用纯空气反复吹扫,以除去其表面存在的杂质.由于 VOCs 可以在一定温度下发生反应,因此避免太阳光的照射和保持房间温度必不可少.

为保证数据的有效性和可靠性,分别在样品采集过程与分析过程设置了全程序空白(同批次采样取 1 个气袋,在实验室注满氮气带到现场但不进行采样)与实验室空白(同批次采样取 1 个气袋,在实验室注满氮气).每 10 个样品分析 1 个全程序空白、1 个实验室空白和 1 个平行样品,全程序空白和实验室空白样品中目标化合物的浓度应不高于方法检出限,平行样品中 VOCs 含量相对偏差在±25%以内.此外,仪器分析前绘制校准曲线,目标化合物相对响应因子的相对标准偏差在 30%以内或曲线方程的相关系数不低于 0.990,且每 24h 分析 1 次校准曲线中间浓度点,测定结果与初始浓度值得相对误差在±30%以内.

#### 1.5 相似性分析

本研究采用分歧系数定量研究不同电子企业排气筒 VOCs 成分谱的相似程度,具体计算公式如下<sup>[25]</sup>:

$$CD_{jk} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{c_{ij} - c_{ik}}{c_{ij} + c_{ik}} \right)^2} \quad (1)$$

式中:CD<sub>jk</sub> 表示两个源谱的分歧系数;n 为参与计算的化学组分的总个数;c<sub>ij</sub>、c<sub>ik</sub> 分别为两个企业排气筒

源成分谱中第 i 种化学组分的平均质量浓度,%.

### 1.6 健康风险评估

1.6.1 基于美国 EPA 方法的非致癌与致癌风险评估  
本研究根据电子工业工人实际工作情况,评估可能导致癌症或非致癌(即指除癌症以外)的健康风险效应的 VOCs 慢性暴露的健康风险.

基于美国 EPA 方法,采用每日的环境浓度与各自的慢性非致癌吸入参考水平评估非致癌风险(HR),计算公式如下<sup>[26]</sup>:

$$HR_i = \frac{C_i}{R_f C_i} \quad (2)$$

$$C_i = (CA_i \cdot ET \cdot EF \cdot ED) / (AT \cdot 365 \cdot 24) \quad (3)$$

式中:HR<sub>i</sub> 表示物种 i 的非致癌风险;C<sub>i</sub> 为物种 i 的暴露浓度,mg/m<sup>3</sup>;RfC<sub>i</sub> 表示物种 i 通过慢性日均摄入量与参考浓度,mg/m<sup>3</sup>;CA 为采样点中化合物 i 的环境浓度,mg/m<sup>3</sup>;ET 代表暴露时间,h/d,本文依据工人实际工作时间,取 8h/d 进行计算;EF 为暴露频率,d/a,根据企业实际生产情况,取值为 300d/a;ED 为持续暴露时间 a,本研究取 30a;AT 为平均时间,a,非致癌风险和致癌风险的值分别取 30a 和 70a<sup>[27]</sup>.

本研究的 RfC 值主要来自综合风险信息系系统(IRIS)与美国毒物与疾病登记署(ATSDR),对于这两个机构无法获得的 RfC 值,采用美国 EPA 健康影响评估汇总表(HEAST),美国 EPA 暂行同行评议毒性值(PPRTV),美国加利福尼亚州环保署(Cal EPA),或 X 附录(X Appendix PPRTV Screen),具体见表 2.

此外,本研究基于美国 EPA 方法评估了终生致癌风险(LCR),即由于暴露导致终生患癌的概率增加,计算公式如下<sup>[26]</sup>:

$$LCR_i = C_i \cdot UR_i \quad (4)$$

式中:LCR<sub>i</sub> 表示物种 i 的终生致癌风险;UR<sub>i</sub> 代表物种 i 的单位吸入致癌风险,mg/m<sup>3</sup>,本研究 UR 值主要来自 IRIS 与加州环境健康危害评估办公室(OEHHA),取值参考表 2.

1.6.2 基于美国政府工业卫生学家委员会(ACGIH)方法的职业暴露致癌风险评估  
采用 ACGIH 方法评估了电子工业企业 VOCs 排放对作业工人的致癌风险.职业暴露指数可以由下式计算<sup>[28]</sup>:

$$E_i = \sum_i^n \frac{c_i}{TLV - TWA_i} \quad (5)$$

式中: $E_i$ 为职业暴露指数;TLV-TWA<sub>i</sub>(Threshold limit values-Time weighted average)值为假设工人每天

工作 8h,一周工作 5d 的时间加权平均浓度,  $10^{-6}$ ,本研究中取值来自 ACGIH,具体见表 2.

表 2 健康风险评估参数  
Table 2 Health Risk Assessment Parameters

类别	物种	CAS	Rfc(mg/m <sup>3</sup> )	来源	UR[(mg/m <sup>3</sup> ) <sup>-1</sup> ]	来源	TLV-TWA(10 <sup>-6</sup> )
烷烃	正戊烷	109-66-0	1	IRIS			1000
	异戊烷	78-78-4					1000
	正己烷	110-54-3	0.7	IRIS			50
	环己烷	110-82-7	6	IRIS			100
	庚烷	142-82-5	0.4	PPRTV			400
	2,2-二甲基丁烷	75-83-2					500
	2,3-二甲基丁烷	79-29-8					500
	2-甲基戊烷	73513-42-5					500
	3-甲基戊烷	96-14-0					500
	2-甲基庚烷	592-27-8					300
	2-甲基己烷	591-76-4					400
3-甲基己烷	589-34-4					400	
甲基环己烷	108-87-2	3	HEAST			400	
烯烃	1,3-丁二烯	106-99-0	0.002	IRIS	0.03	IRIS	2
	1-丁烯	106-98-9					250
	丙烯	115-07-1	3	Cal EPA			500
芳香烃	苯	71-43-2	0.03	IRIS	0.0078	IRIS	0.5
	甲苯	108-88-3	5	IRIS			20
	乙苯	100-41-4	1	IRIS	0.0025	OEHHA	20
	间、对二甲苯	108-38-3/ 1330-20-7	0.217	ATSDR			100
	邻二甲苯	95-47-6	0.217	ATSDR			100
	异丙苯	98-82-8	0.4	IRIS			
	正丙苯	103-65-1	1	X			50
	1,2,3-三甲基苯	526-73-8	0.005	PPRTV			25
	1,2,4-三甲基苯	95-63-6	0.007	PPRTV			25
	1,3,5-三甲基苯	108-67-8	0.006	PPRTV			25
OVOCs	丙酮	67-64-1	31	ATSDR			500
	异丙醇	67-63-0					200
	丙烯醛	107-02-8	0.00002	IRIS			
	乙酸乙烯酯	108-05-4	0.2	IRIS			10
	甲基丙烯酸甲酯	80-62-6	0.7	IRIS			50
	丁醇	35296-72-1					20
	2-丁酮	591-78-6	0.02	IRIS			200
	乙酸丁酯	123-86-4					200
乙酸乙酯	141-78-6					400	
卤代烃	氯甲烷	74-87-3	0.09	IRIS			50
	氯仿	67-66-3	0.098	ATSDR	0.023	IRIS	10
	二氯甲烷	75-09-2	0.6	IRIS	0.47	IRIS	50
	三氯乙烯	79-01-6	0.0019	IRIS	0.0041	IRIS	10
	1,2-二氯丙烷	78-87-5	0.004	IRIS			10
	1,2-二氯乙烷	107-06-2	0.007	PPRTV	0.026	IRIS	10

## 2 结果与讨论

### 2.1 VOCs 排放特征

2.1.1 VOCs 浓度水平 对电子工业典型企业开展排气筒 VOCs 排放浓度测试,如图 2 所示.从行业角度分析,企业 A 和 B 排气筒来自半导体器件,其

VOCs 浓度为 13.63,13.41mg/m<sup>3</sup>,这与武汉<sup>[29]</sup>半导体行业 VOCs 总浓度小于 20mg/m<sup>3</sup>相一致.企业 C 和 D 排气筒来自显示器及光电子器件,其 VOCs 浓度为 7.86,9.75mg/m<sup>3</sup>,与台湾<sup>[30]</sup>相关研究结果类似.E 和 F 排气筒来自印制电路板制造,其 VOCs 浓度为 4.67 和 4.31mg/m<sup>3</sup>,略低于肖景方等<sup>[31]</sup>的研究,其排气筒 VOCs 浓度为 6.08~11.36mg/m<sup>3</sup>,这可能是由于使用的油墨有机成分及含量不同有关.企业 G~J 排气筒来自电子终端产品,其 VOCs 浓度为 3.34~86.11mg/m<sup>3</sup>,低于广东省<sup>[32]</sup>的相关研究(43.01~322.34mg/m<sup>3</sup>),这主要是由于所用原辅材料及末端治理设施不同导致的.半导体器件与电子终端产品 VOCs 浓度相对高于其他两个行业,主要是行业间原辅料使用、生产工艺、废气处理设施不同,导致其 VOCs 浓度存在一定差异.从企业角度来看,除电子终端产品外,其他 3 个行业内企业原辅材料使用与生产工艺相似、废气治理设施相同,因此 VOC 浓度差异不大;电子终端产品行业内企业 VOCs 浓度存在较大差异,主要是由于原辅材料使用不同与废气处理设施 VOCs 去除效率差异导致.E、F、H 和 I 企业采用相同的废气治理设施(活性炭吸附),所以 4 家企业 VOCs 排放浓度主要受原辅材料影响,H 企业为电子终端产品,VOCs 浓度为 15.19mg/m<sup>3</sup>,高于印制电路板企业 E 与 F 和同为电子终端产品企业 I(3.34~4.67mg/m<sup>3</sup>),说明电子工业 VOCs 排放不能只关注末端控制,而是应该将末端控制为主转化为全过程控制(包括:原辅料使用、生产工艺等),全过程减少 VOCs 排放.

**2.1.2 排气筒 VOCs 浓度水平达标分析** 随着电子工业的发展,除国家层面外,北京、天津、上海、广东和江苏共 5 个省市发布与电子工业相关的 VOCs 排放标准,各标准中排气筒大气污染物排放浓度限值对非甲烷总烃的要求不同,其中最严格的排放限值为北京市地方标准<sup>[33]</sup>(I 时段:20mg/m<sup>3</sup>,II 时段:10mg/m<sup>3</sup>).如图 2 所示,与 I 时段的 20mg/m<sup>3</sup>的标准限值相比,仅电子终端产品企业 G 排气筒 VOCs 排放浓度超标,即电子终端产品排气筒浓度达标率为 75.00%,其他 3 个行业排气筒 VOCs 排放浓度达标率均为 100.00%.与 II 时段的 10mg/m<sup>3</sup>标准限值相比,半导体器件排气筒 VOCs 浓度均超标;显示器及光电子器件、印制电路板排气筒 VOCs

排放浓度达标率均为 100.00%;电子终端产品排气筒达标率较低,仅为 25.00%.整体来看,电子终端产品排气筒 VOCs 浓度超标严重,其次为半导体器件,而显示器及光电子器件、印制电路板排气筒均可达标排放.本研究中,电子终端产品企业废气处理设施采用的是活性炭吸附、活性炭+UV 光解或活性炭吸附脱附+RCO,以上废气处理设施 VOCs 去除效率较低,需要选择其他高效的 VOCs 废气处理设施.根据现场调研,参考《浙江省挥发性有机物污染防治可行技术指南 电子工业》,对于中、低浓度 VOCs 废气,建议优先采用吸附浓缩-燃烧技术处理,因此,根据企业实际情况,建议排气筒浓度超标企业采用沸石转轮吸附浓缩+催化燃烧工艺.半导体器件企业废气处理虽为沸石转轮浓缩+RTO,但是其排气筒浓度仍高于 10mg/m<sup>3</sup>,考虑是由于废气处理设施未定期进行维护更新,建议企业定期对沸石进行高温或水洗再生,并按照生产情况,定时更换沸石,确保废气处理设施处理效率,使排气筒 VOCs 排放浓度达标.

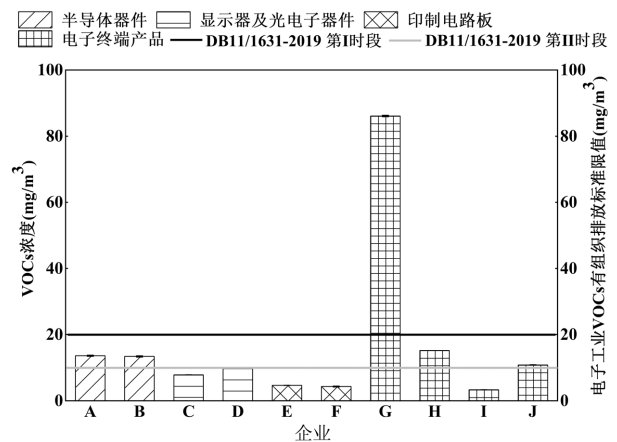


图 2 不同电子企业排气筒 VOCs 排放浓度  
Fig.2 VOCs emission concentration of exhaust gas in different electronic enterprises

## 2.2 VOCs 组分特征

**2.2.1 不同电子行业 VOCs 组分总体特征** 本研究 VOCs 源成分谱共检测出 51 种组分,其中烷烃 15 种,烯烃 6 种,芳香烃 14 种,OVOCs 10 种,卤代烃 6 种,不同电子行业排气筒 VOCs 组分特征如图 3 所示.半导体器件 A 与 B 企业排气筒 VOCs 中,烷烃质量分数最高(70.78%和 70.56%),其次为卤代烃(24.61%和 24.60%),芳香烃(4.08%和 4.30%)与 OVOCs

(0.54%和 0.56%)占比较小,未检测出烯烃.这与徐捷等<sup>[34]</sup>和 Shen 等<sup>[29]</sup>的研究结果不一致,这两个研究中均为 OVOCs 的质量占比最高(91.29%~97.56%与 61.60%~98.50%),且其质量分数远高于本研究,而烷烃与卤代烃质量分数较小.这可能是因为随着人们对环境与身体健康更加关注,碳氢清洗剂已经取代了传统溶剂型清洗剂,所以本研究中 OVOCs 质量分数较低.

针对显示器及光电子器件,企业 C 和 D 排放的 VOCs 以 OVOCs 为主,其质量分数为 93.48%和 95.87%,其次为芳香烃(6.06%和 4.08%).这与 Wang 等<sup>[30]</sup>的研究结果较为相似,Wang 等<sup>[30]</sup>发现陈列工程、彩膜工程与成盒工程中 OVOCs 质量分数最大(89.40%~ 98.93%),其次为芳香烃(0.31%~3.18%).乙醇和丙酮等作为清洗剂被广泛使用,因此本研究 OVOCs 质量分数较高.

印制电路板企业 E、F 排放的 VOCs 中,OVOCs 质量分数最大(92.27%和 93.05%),其次为芳香烃(7.62%和 6.67%),烷烃最小(0.11%和 0.11%).印制电路板 VOCs 组成与显示器及光电子器件较为相似,均以 OVOCs 为首要 VOCs 组分,芳香烃质量分数略高于显示器及光电子器件.这与马英歌等<sup>[35]</sup>的研究结果相似,其 OVOCs 质量分数为 62.22%,芳香烃为 31.82%;Shen 等<sup>[29]</sup>研究结果表明,OVOCs (8.46%~67.28%)、烷烃(19.12%~74.63%)与卤代烃(7.35%~27.57%)为主要 VOCs 组分,与本研究结果存在一定差异;肖景方等<sup>[31]</sup>的研究中芳香烃占比(91.81%~95.39%)远高于本研究,这与该研究使用的原辅材料的有机成分及含量有关.

电子终端产品各企业排气筒 VOCs 组分排放特征存在差异,企业 G 排气筒废气中 VOCs 质量分数最高的是 OVOCs(96.18%),其次为芳香烃(1.85%)与烷烃(1.42%).该结果与何梦林等<sup>[32]</sup>的研究结果相似,其 OVOCs 质量分数低于本研究(58.00%~65.00%),芳香烃(10.00%~40.00%)和烷烃(2.00%~31.00%)质量分数高于本研究.与企业 G 不同,企业 H 与 J 排气筒 VOCs 的特征组分主要为芳香烃(88.30%和 76.40%),其次为 OVOCs(10.12%和 23.51%).这与马英歌等<sup>[35]</sup>研究结果中芳香烃占比最高(99.86%)相似.而企业 I 排气筒废气中烷烃占比最高(72.17%),其次为卤代烃(18.06%)和 OVOCs(8.17%).该 VOCs 特征

组分与 Zhang 等<sup>[36]</sup>研究结果较为相似,烷烃质量分数最高(68.95%),其次为 OVOCs(19.63%)和卤代烃(5.02%),但质量分数存在一定差异.

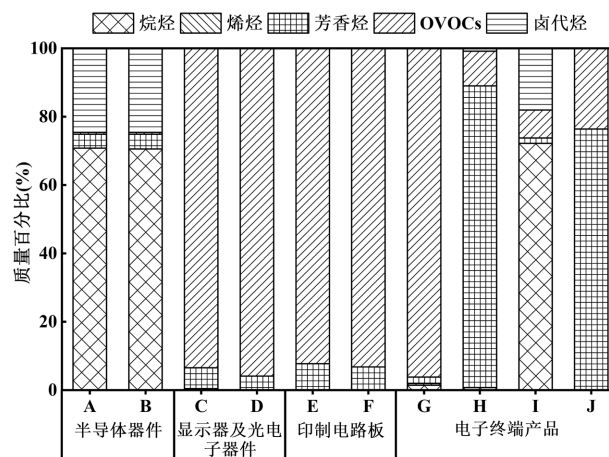


图3 各电子企业 VOCs 排放组成

Fig.3 VOCs emission composition of electronic enterprises

2.2.2 不同电子行业 VOCs 特征组分 表3展示了不同电子行业排气筒废气中 VOCs 质量分数位于前5的特征组分.对于半导体器件企业,质量分数最高的为二甲基戊烷,其次为三氯乙烯、三甲基戊烷、正戊烷和 2,3-二甲基丁烷,其质量分数之和超过 88%.二甲基戊烷为半导体器件企业排气筒排放的主要污染物,质量分数为 32.03%和 33.60%,主要是由于本研究中企业采用了碳氢清洗剂替代传统溶剂型清洗剂.该特征与徐捷等<sup>[34]</sup>和 Shen 等<sup>[29]</sup>研究结果不同,二者的研究结果中异丙醇(56.4%~98.3%与 66.00%~89.79%)质量分数最高,主要是因为两者研究的企业仍使用以异丙醇为主要原料的溶剂型清洗剂对晶片表面进行清洗.

显示器及光电子器件企业排气筒废气中 VOCs 质量分数最高的是丙酮,其质量分数为 91.89%和 94.99%,这与 Wang 等<sup>[30]</sup>研究结果中乙醇(15.51%~74.73%)和丙酮(4.12%~42.38%)质量分数最高较为相似,主要是因为显示器及光电子器件的光刻环节中使用了清洗剂,而清洗剂中常用丙酮和乙醇作为溶剂使用.此外,间/对二甲苯、乙酸丁酯、乙苯和 1,3,5-三甲基苯也是显示器及光电子器件企业排气筒废气中主要的 VOCs 组分,上述 5 种物质质量分数之和为 97.36%和 98.40%.

印制电路板企业排气筒废气中 VOCs 质量分数

最高的前 5 个物种依次为异丙醇、乙醇、丙酮、间/对二甲苯和乙苯,其质量分数之和为 96.13%和 96.70%,与印制电路板行业常用的清洗剂主要组分相同.马英歌等<sup>[35]</sup>指出印制电路板企业 VOCs 质量分数前 5 种为丙酮(60.80%)、甲苯(14.20%)、间/对二甲苯(6.53%)、乙苯(3.98%)、邻二甲苯(1.99%),与本研究质量分数排名前 5 的物种有 3 种相同,但各物种质量分数存在差异.Shen 等<sup>[29]</sup>研究发现丙酮为首要污染物(13.3%~62.4%),其质量分数高于本研究.而肖景方等<sup>[31]</sup>研究发现印制电路板排名前 3 的 VOCs 物种是二甲基己基苯(32.22%和 36.18%)、异丙基甲基苯(18.26%和 25.26%)与四甲苯(14.70%和 20.72%),与本研究结果不同,主要是因为该研究只考虑了印制电路板中的防焊环节,因此其结果与使用的防焊油墨有机成分及含量有关.

电子终端产品企业 G 排气筒废气中,乙醇质量分数最大,其次为异丙醇、乙酸丁酯、间/对二甲苯和环己烷,其中乙醇和异丙醇来自电路板清洗,酯类、二甲苯等来自喷漆与烘干.这与何梦林等<sup>[32]</sup>研究结果中的手机喷漆有组织废气以乙酸乙酯为主

(43.18%)、相机(26.15%)和笔记本电脑(40.36%)喷漆有组织废气以甲苯为主不同,但本研究前 5 的 VOCs 物种中除乙醇外,均在何梦林等<sup>[35]</sup>研究中检测出.电子终端产品企业 H 废气排气筒 VOCs 中质量分数最高的为甲苯,其次为 2-丁酮、甲基丙烯酸甲酯、乙苯、间/对二甲苯;企业 J 废气排气筒 VOCs 中乙苯质量分数最高,其次为乙酸丁酯、间/对二甲苯、邻二甲苯与甲苯.与马英歌等<sup>[35]</sup>研究中甲苯(38.87%和 14.75%)、乙苯(10.70%和 13.55%)、间/对二甲苯(8.31%和 19.81%)质量分数高的结果相似,主要是由于企业喷涂过程中使用的有机溶剂以苯系物溶剂为主.电子终端产品企业 I 排气筒废气 VOCs 质量分数最高的前 5 个物种为二甲基戊烷、三氯乙烯、三甲基戊烷、异丙醇与正戊烷,从原辅料 VOCs 组分来看,烷烃主要来自碳氢清洗剂.该排放特征与 Zhang 等<sup>[36]</sup>研究结果中乙醇(37.00%)、2,3-二甲基戊烷(20.00%)、环己烷(7.70%)、异丙醇(7.20%)、正十一烷(5.90%)存在相似性.综上,由于地域不同、产品不同,使用的原辅材料不同,其 VOCs 排放特征也各不相同,因此建立本地化电子行业源成分谱十分必要.

表 3 各企业 VOCs 质量分数前 5 位物种

Table 3 The top five species of VOCs mass fraction in each enterprise

企业	特征 VOCs
A	二甲基戊烷(33.60%)、三氯乙烯(24.61%)、三甲基戊烷(16.87%)、正戊烷(8.14%)、2,3-二甲基丁烷(5.58%)
B	二甲基戊烷(32.03%)、三氯乙烯(24.60%)、三甲基戊烷(17.17%)、正戊烷(8.63%)、2,3-二甲基丁烷(5.71%)
C	丙酮(91.89%)、间/对二甲苯(2.43%)、乙酸丁酯(1.16%)、乙苯(0.95%)、1,3,5-三甲苯(0.93%)
D	丙酮(94.99%)、间/对二甲苯(1.82%)、1,3,5-三甲苯(0.57%)、乙酸丁酯(0.56%)、乙苯(0.45%)
E	异丙醇(80.36%)、乙醇(10.02%)、间/对二甲苯(3.37%)、丙酮(1.27%)、乙苯(1.11%)
F	异丙醇(83.07%)、乙醇(6.40%)、丙酮(3.16%)、间/对二甲苯(3.06%)、乙苯(1.01%)
G	乙醇(67.31%)、异丙醇(22.45%)、乙酸丁酯(5.74%)、间/对二甲苯(0.62%)、环己烷(0.62%)
H	甲苯(82.08%)、2-丁酮(4.40%)、甲基丙烯酸甲酯(2.78%)、乙苯(2.25%)、间/对二甲苯(1.89%)
I	二甲基戊烷(46.55%)、三氯乙烯(18.06%)、三甲基戊烷(9.7%)、异丙醇(7.85%)、正戊烷(5.82%)
J	乙苯(46.42%)、乙酸丁酯(20.47%)、间/对二甲苯(14.29%)、邻二甲苯(10.37%)、甲苯(1.36%)

2.2.3 不同电子行业成分谱相似性分析 采用分歧系数定量评估电子行业成分谱的相似程度.有研究表明<sup>[37]</sup>,当分歧系数介于 0~0.2,则两个源成分谱必定相似;若介于 0.2~0.5,则可能相似;若介于 0.5~1.0,则源成分谱必然不相似.如图 4 所示,从行业角度分析,半导体器件企业 A 与 B 的分歧系数为 0.03,介于 0~0.2 之间,说明 2 个企业的 VOCs 成分谱必定相似,可见 2 个企业工艺流程、VOCs 原辅料使用等接近;显示器及光电子器件企业 C 与 D、印制

电路板企业 E 与 F 的分歧系数分别为 0.40 和 0.36,介于 0.2~0.5 之间,说明其 VOCs 源成分谱可能相似;电子终端产品企业 G~J 之间的分歧系数为 0.82~0.98,接近 1.0,说明电子终端产品企业 VOCs 源成分谱必定不相似.从企业角度分析,排除行业内部企业间的源成分谱相似性,不同企业间分歧系数为 0.67~0.91,即 VOCs 源成分谱必不相似.综上,除了半导体器件、显示器及光电子器件和印制电路板企业间排气筒 VOCs 源成分谱相似度较高,其

他各企业间 VOCs 源成分谱相似度不高,一方面,电子终端产品企业受生产产品不同影响,其原辅材料使用不同,因此 VOCs 源成分谱相似度不高;另一方面,不同企业由于所属电子子行业不同,生产工艺、原辅材料、废气处理设施均不同,导致 VOCs 源成分谱不相似。

**2.2.4 不同电子行业 VOCs 源成分谱** 本研究,基于实测获得不同电子子行业 VOCs 排放数据,综合相似性分析结果,对除电子终端产品外的相同子行业 VOCs 组分检测结果进行算数平均和归一化处理,获得了电子行业 VOCs 成分谱,如图 5 所示,各电子行业 VOCs 质量百分比的标准偏差均较小,说明数据波动性小,差异较小。整体来看,电子终端产品企业由于其 VOCs 特征组分差异较大,后续讨论依然按照企业讨论。

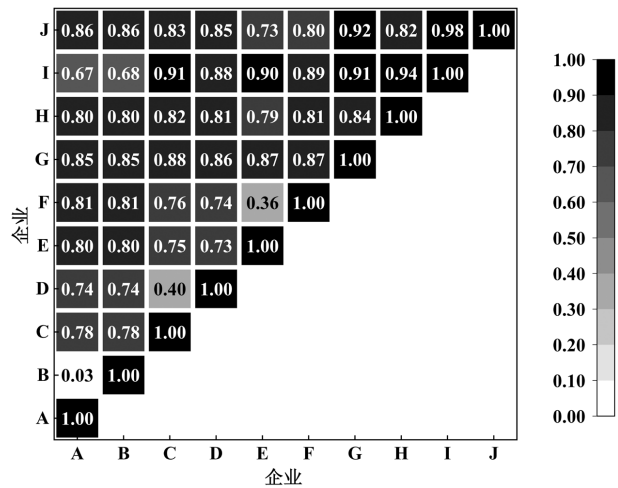


图 4 不同电子企业 VOCs 成分谱分歧系数

Fig.4 Coefficient of divergence of VOCs source profiles in different electronic enterprises

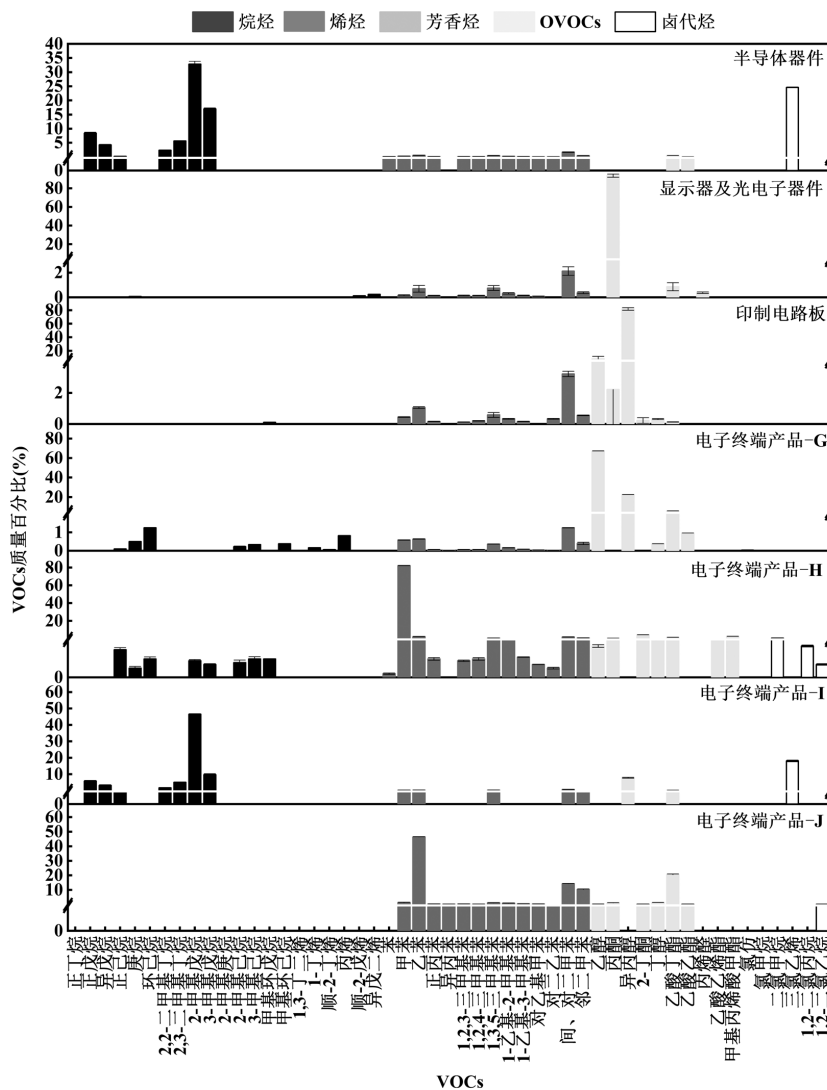


图 5 不同电子行业 VOCs 成分谱

Fig.5 VOCs source profiles of different electronics-manufacturing industries

### 2.3 健康风险评估

**2.3.1 非致癌风险** 利用美国 EPA 方法评估通过吸入途径暴露 VOCs 的潜在慢性健康效应(非致癌和致癌风险).本研究有 28 种 VOCs 用来评估非致癌风险,有研究表明<sup>[38]</sup>,当非致癌风险  $HR < 1$  时,非致癌风险的可能性很低;当非致癌风险  $HR > 1$  时,长期暴露会造成非致癌健康危害.

如图 6 所示,半导体器件的非致癌风险 HR 最高(484.35),为其他行业的 1.08~215.27 倍.半导体器件行业中,有 4 种 VOCs 风险值 HR 为 0.1~1,表明对人体的非致癌风险不大,2 种 VOCs 风险值  $HR > 1$ ,会危害人体健康.半导体器件行业中,卤代烃的总 HR 值远高于其他子行业,其中三氯乙烯的 HR 值最高(479.57),占了行业总 HR 的 99.01%.因此,应该特别关注半导体行业中三氯乙烯的排放.显示器及光电子器件行业的非致癌风险 HR 次高(447.46),其中有 3

种 VOCs 风险值 HR 为 0.1~1,2 种 VOCs 风险值  $HR > 1$ ,表明有 5 种 VOCs 可能对人体产生非致癌风险.显示器及光电子器件子行业中,丙烯醛最值得关注,其 HR 值最大(443.03),占该行业总 HR 的 99.01%.针对印制电路板行业,其 HR 较低,仅为 2.25,可能是其相对较低的 VOCs 浓度导致.该行业中,有 4 种 VOCs 风险值 HR 为 0.1~1,1 种 VOCs 风险值  $HR > 1$ ,为 1,3,5-三甲基苯(1.23),占总 HR 的 54.67%.对于电子终端产品行业的 G~J 企业来说,风险值 HR 为 0.1~1 的 VOCs 分别有 4 种、7 种、1 种和 3 种;风险值  $HR > 1$  的 VOCs 物种分别有 3 种、3 种、1 种和 5 种.各企业 HR 值最大的分别是 1,3,5-三甲基苯(企业 G 和 J)、2-丁酮和三氯乙烯,占总 HR 的 60.56%和 41.25%、50.44%、99.47%.整体来看,各行业总 HR 均大于 1,即均会危害人体健康,因此开展电子行业 VOCs 排放管控工作十分必要.

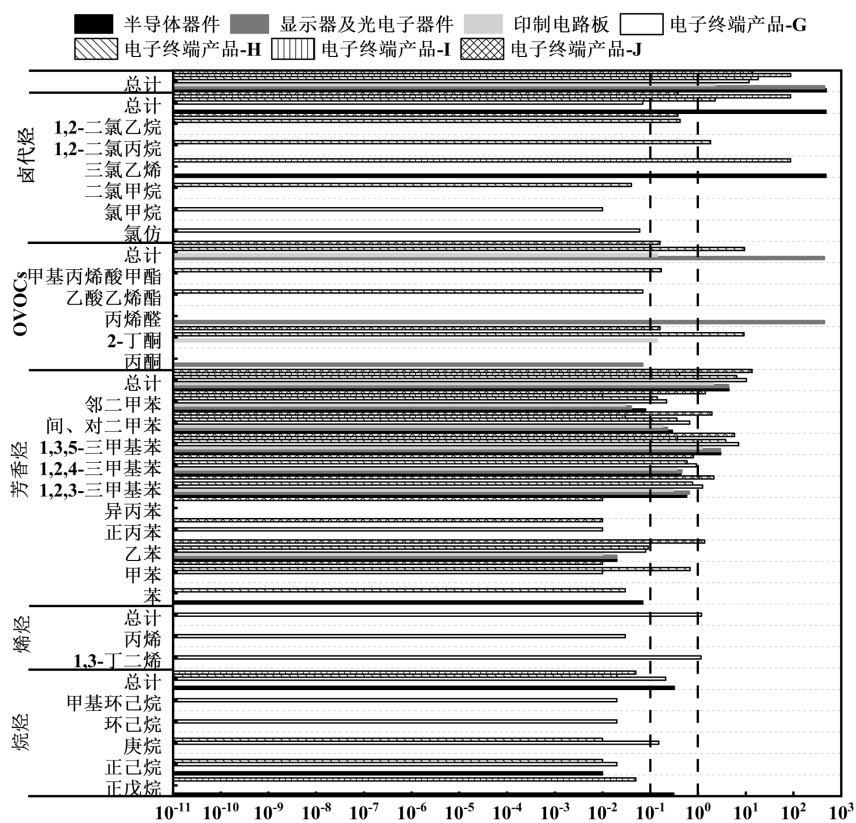


图 6 不同电子行业 VOCs 的非致癌风险

Fig.6 Non-cancer risks of VOCs in different electronics-manufacturing industries

**2.3.2 终生致癌风险** 本研究用 7 种 VOCs 用来评估终生致癌风险.按照 Zhang 等<sup>[28]</sup>研究结果,将致癌风险对人类健康影响程度分为 4 个等级:可忽略风

险( $< 1 \times 10^{-6}$ )、小概率风险( $1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-5}$ )、大概率风险( $1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-4}$ )和确定的风险( $> 1 \times 10^{-4}$ ).如图 7 所示,显示器及光电子器件、印制电路板行业总 LCR

值最小,为  $1.74 \times 10^{-5}$  和  $1.40 \times 10^{-5}$ ,对人体有大概率致癌风险;半导体器件( $1.63 \times 10^{-3}$ )、电子终端产品( $1.64 \times 10^{-4} \sim 5.16 \times 10^{-3}$ )行业 LCR 值较大,会对人体产生确定的致癌风险.整体来看,现有电子行业导致人体终生致癌风险较大.

半导体器件行业中,三氯乙烯( $1.60 \times 10^{-3}$ )的 LCR 值大于  $1 \times 10^{-4}$ ,表明三氯乙烯有确定的致癌风险;乙苯的 LCR 值介于  $1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-4}$ ,即乙苯有大概率风险致癌;苯的 LCR 值最小( $7.26 \times 10^{-6}$ ),介于  $1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-5}$ ,具有小概率致癌风险.对于显示器及光电子器件行业与印制电路板行业,只有乙苯被用来评估终生致癌风险,其 LCR 值分别为  $1.74 \times 10^{-5}$  和  $1.40 \times 10^{-5}$ ,均在  $1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-4}$  范围内,被认为大概率具有致癌风险.电子终端产品行业中,企业 G 的 1,3-丁二

烯、乙苯和氯仿 LCR 值分别为  $2.99 \times 10^{-5}$ 、 $8.08 \times 10^{-5}$  和  $5.36 \times 10^{-5}$ ,其值介于  $1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-4}$ ,说明这三种组分致癌风险概率大;企业 H 检测出了最多的致癌 VOCs 物种,其中二氯甲烷( $5.03 \times 10^{-3}$ )与乙苯( $1.00 \times 10^{-4}$ )对致癌具有确定的风险,LCR 值  $> 1 \times 10^{-4}$ .而 1,2-二氯乙烷( $3.28 \times 10^{-5}$ )与苯( $3.45 \times 10^{-6}$ )LCR 值介于  $1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-4}$  和  $1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-5}$ ,即它们分别为对人体致癌有大概率风险和小概率风险;企业 I 中三氯乙烯 LCR 值大于  $1 \times 10^{-4}$ ,认为其对人体致癌有确定的风险,而乙苯的 LCR 值较小,介于  $1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-5}$ ,被认为对人体致癌有小概率风险;企业 J 不同企业 I,乙苯的 LCR 值较高( $1.47 \times 10^{-3}$ ),对人体致癌有确定的风险,1,2-二氯乙烷的 LCR 值为  $2.99 \times 10^{-5}$ ,介于  $1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-4}$ ,对人体致癌有大概率风险.

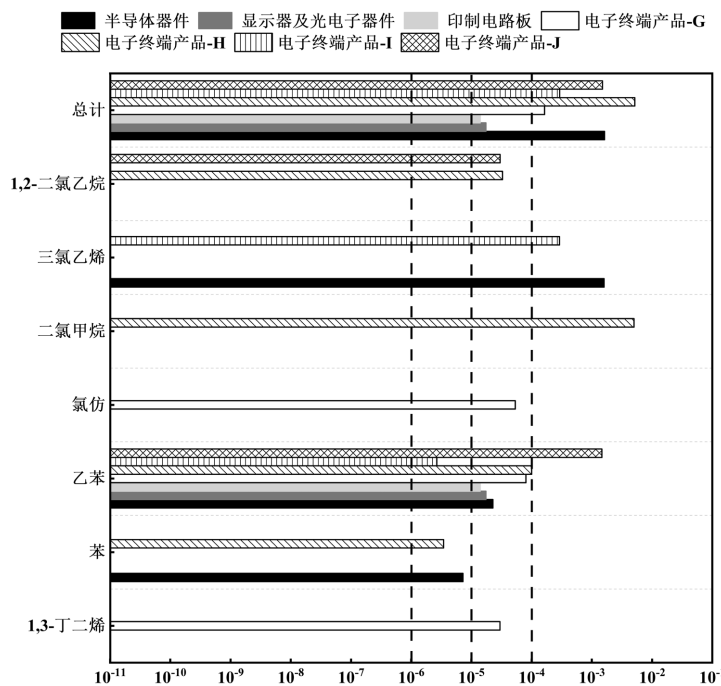


图 7 不同电子行业 VOCs 的终生癌风险

Fig.7 Lifetime cancer risks of VOCs in different electronics-manufacturing industries

2.3.3 职业暴露致癌风险 本研究有 39 种 VOCs 被检测用来评估职业暴露致癌风险.如图 8 所示,各电子行业总  $E_i$  值为  $9.79 \times 10^{-4} \sim 1.95 \times 10^{-2}$ ,其中电子终端产品子行业(企业 H)的总  $E_i$  值最大,是其他子行业的 2.42~19.92 倍,显示器及光电子器件行业的总  $E_i$  值最小,这与终生致癌风险研究结果类似.Zhang<sup>[28]</sup>等研究结果显示,当  $E_i$  值大于 1 时,认为 VOCs 排放会对工人产生潜在的健康风险.本研究中,所有子行

业的  $E_i$  值均低于 0.1,表明该地区排放的 VOCs 可能不会对工人产生有害影响.

进一步分析,半导体器件、电子终端产品(企业 I)行业中卤代烃的  $E_i$  值最大,为  $6.68 \times 10^{-3}$  和  $1.21 \times 10^{-3}$ ;显示器及光电子器件、印制电路板、电子终端产品(企业 G)行业中  $E_i$  值最大的为 OVOCs,其值为  $7.56 \times 10^{-4} \sim 5.11 \times 10^{-3}$ ;电子终端产品行业(企业 H 和 J)中芳香烃的  $E_i$  值高于其他 VOCs,分别为  $1.87 \times 10^{-2}$

和  $7.27 \times 10^{-3}$ . 上述  $E_i$  值虽低于 1, 但是仍然应该重点关注.

综上, 利用美国 EPA 和 ACGIH 方法评估健康风险的结果差异较大. US EPA 方法在所有电子子行业均确认了 VOCs 暴露对工人的非致癌风险和致癌风险, 但 ACGIH 方法结果显示, 所有电子子行业均不存

在职业暴露致癌风险. 出现这种差异性的原因可能是因为两种方法对 VOCs 物种暴露参考浓度的限定指标不同. 尽管这两种方法存在差异, 但电子终端企业产品及半导体器件行业排放的 VOCs 健康风险远高于其他两个子行业, 因此, 为保证这两个行业的工作人员健康, 应加强 VOCs 排放的管控.

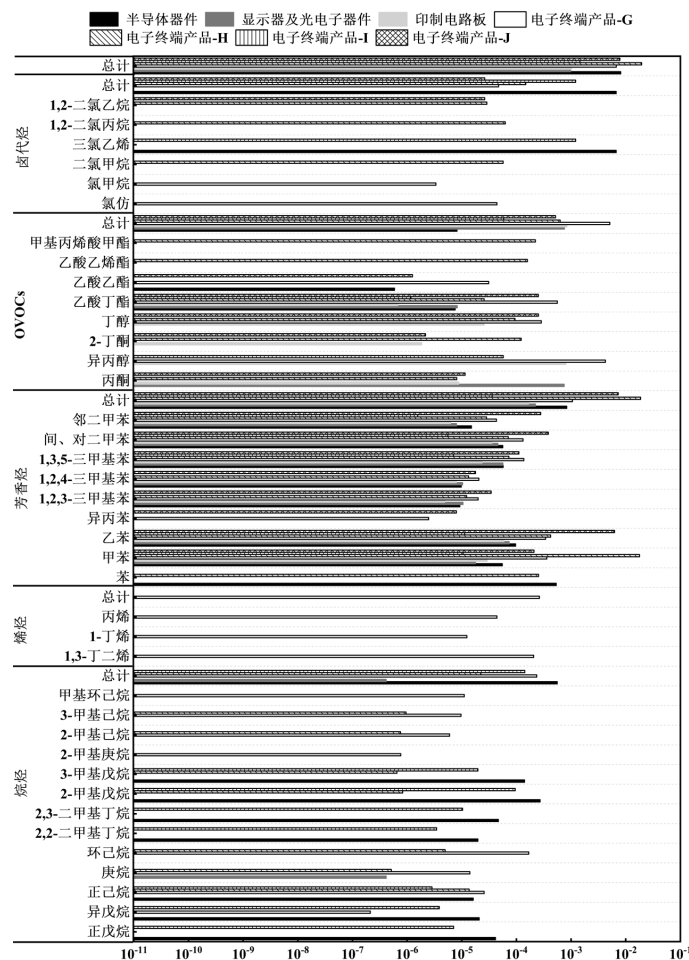


图 8 不同电子行业职业暴露指数

Fig.8 Occupational exposure indexes of VOCs in different electronics-manufacturing industries

### 3 结论

3.1 不同电子工业有组织废气 VOCs 排放浓度由于原辅材料、生产工艺、产品不同, 存在较大差异. 半导体器件 ( $13.41 \sim 13.63 \text{ mg/m}^3$ ) 与电子终端产品行业 ( $3.34 \sim 86.11 \text{ mg/m}^3$ ) VOCs 浓度相对高于显示器及光电子器件 ( $7.86 \sim 9.75 \text{ mg/m}^3$ ) 与印制电路板行业 ( $4.31 \sim 4.67 \text{ mg/m}^3$ ). 与北京市电子工业标准中 VOCs 排放限值相比, 电子终端产品排气筒 VOCs 排放超标严重, 其次为半导体器件, 显示器及光电子器件、印制电路板排气筒均可达标排放.

3.2 不同电子子行业排气筒废气中 VOCs 组分差异较大, 半导体器件排气筒废气中 VOCs 以烷烃类为主, 首要物种为二甲基戊烷; 显示器即光电子器件和印制电路板企业排气筒废气中 VOCs 均以 OVOCs 为主, 质量分数最高的物种分别为丙酮与异丙醇; 电子终端产品 VOCs 组分存在差异, 以 OVOCs、芳香烃和烷烃为主.

3.3 除电子终端产品企业, 其他 3 个电子子行业间分歧系数均小于 0.5, 即 VOCs 源成分谱相似; 不同企业间分歧系数为 0.67~0.91, 即 VOCs 源成分谱必不相似, 这主要是由于不同企业生产工艺、原辅材料、

废气处理设施均不同,导致 VOCs 源成分谱不相似。

**3.4** 半导体器件和显示器及光电子器件行业的非致癌风险较高,总 HR 分别为 484.35 和 447.46,电子终端产品和印制电路板总 HR 较小,分别为 11.74~87.35 与 2.25,但整体看,各电子企业长期暴露均会造成非致癌健康危害。

**3.5** 半导体器件和电子终端产品行业  $LCR > 1 \times 10^{-4}$ ,即会对人体产生确定的致癌风险;显示器及光电子器件、印制电路板行业 LCR 值介于  $1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-4}$  之间,对人体有大概率致癌风险。

**3.6** 4 个电子子行业的总  $E_i$  值为  $9.79 \times 10^{-4} \sim 1.95 \times 10^{-2}$ ,均小于 0.1,表明 VOCs 排放不会对工人产生潜在的健康风险。

**3.7** 通过 EPA 和 ACGIH 方法评估的健康风险结果差异较大,这主要是由于不同方法对 VOCs 物种暴露参考浓度的限定指标存在差异。但整体来看,电子终端企业产品及半导体器件行业排放的 VOCs 健康风险远高于其他两个子行业。因此,加强控制这两个电子子行业 VOCs 排放十分必要。

#### 参考文献:

- [1] 张恺乐,褚晰晰,储王辉,等.我国城市地区  $PM_{2.5}$  和  $O_3$  污染相关性:2017~2022 年时空演变特征与协同防控启示 [J]. 中国环境科学, 2024,44(6):3004-3011.  
Zhang K L, Chu Y X, Chu W H, et al. The correlation between  $PM_{2.5}$  and  $O_3$  pollution in urban areas of China: spatiotemporal variation from 2017 to 2022 and implication for synergistic prevention and control [J]. China Environmental Science, 2024,44(6):3004-3011.
- [2] 李飞,董珑,孔少杰,等.我国省域  $CO_2$ - $PM_{2.5}$ - $O_3$  时空关联效应与协同管控对策 [J]. 中国环境科学, 2023,43(12):6246-6260.  
Li F, Dong L, Kong S J, et al. Spatial-temporal correlation effects of  $CO_2$ - $PM_{2.5}$ - $O_3$  and synergistic control countermeasures in China's provincial area [J]. China Environmental Science, 2023,43(12): 6246-6260.
- [3] 罗悦函,赵天良,孟凯,等.华北平原和山区城市  $PM_{2.5}$  和  $O_3$  变化关系比较分析 [J]. 中国环境科学, 2021,41(9):3981-3989.  
Luo Y H, Zhao T L, Meng K, et al. Comparative analysis of the relationship between  $PM_{2.5}$  and  $O_3$  in plain and mountainous cities in North China [J]. China Environmental Sciences, 2021,41(9):3981-3989.
- [4] 中华人民共和国国务院.关于印发大气污染防治行动计划的通知 [EB/OL]. [https://www.gov.cn/zwqk/2013-09/12/content\\_2486773.htm](https://www.gov.cn/zwqk/2013-09/12/content_2486773.htm), 2013-09-12.  
State Council of the People's Republic of China. Notice on issuing the atmospheric pollution prevention and control action plan [EB/OL]. [https://www.gov.cn/zwqk/2013-09/12/content\\_2486773.htm](https://www.gov.cn/zwqk/2013-09/12/content_2486773.htm), 2013-09-12.
- [5] 中华人民共和国国务院.国务院关于印发打赢蓝天保卫战三年行动计划的公告 [EB/OL]. [https://www.gov.cn/gongbao/content/2018/content\\_5306820.htm](https://www.gov.cn/gongbao/content/2018/content_5306820.htm), 2018-06-27.  
State Council of the People's Republic of China. Notice of the state council on issuing the Three-Year Action Plan to win the Battle for Clean Air [EB/OL]. [https://www.gov.cn/gongbao/content/2018/content\\_5306820.htm](https://www.gov.cn/gongbao/content/2018/content_5306820.htm), 2018-06-27.
- [6] 中华人民共和国国务院.国务院关于印发《空气质量持续改善行动计划》的通知 [EB/OL]. [https://www.gov.cn/gongbao/2023/issue\\_10886/202312/content\\_6921385.html](https://www.gov.cn/gongbao/2023/issue_10886/202312/content_6921385.html), 2023-11-30.
- [7] 中华人民共和国生态环境部.2022 中国生态环境状况公报 [EB/OL]. [https://www.gov.cn/lianbo/bumen/202305/content\\_6883708.htm](https://www.gov.cn/lianbo/bumen/202305/content_6883708.htm), 2023-05-30.  
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. 2022 Report on the State of the Ecology and Environment in China [EB/OL]. [https://www.gov.cn/lianbo/bumen/202305/content\\_6883708.htm](https://www.gov.cn/lianbo/bumen/202305/content_6883708.htm), 2023-05-30.
- [8] 中华人民共和国生态环境部.环境空气质量标准 [EB/OL]. [https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bz/bzwb/dqjhb/dqjzlbz/201203/t20120302\\_224165.htm](https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bz/bzwb/dqjhb/dqjzlbz/201203/t20120302_224165.htm), 2016-01-01.  
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Ambient air quality standard [EB/OL]. [https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bz/bzwb/dqjhb/dqjzlbz/201203/t20120302\\_224165.htm](https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bz/bzwb/dqjhb/dqjzlbz/201203/t20120302_224165.htm), 2016-01-01.
- [9] Lv D Q, Lu S H, Tan X, et al. Source profiles, emission factors and associated contributions to secondary pollution of volatile organic compounds (VOCs) emitted from a local petroleum refinery in Shandong [J]. Environmental Pollution, 2021,274:116589.
- [10] Teng W, Liu W W, Shao X, et al. Emission characteristics, environmental impact assessment and priority control strategies derived from VOCs speciation sourced through measurement for wooden furniture-manufacturing industry in China [J]. Science of the Total Environment, 2023,877:162287.
- [11] Tan Z F, Lu K D, Jiang M Q, et al. Exploring ozone pollution in Chengdu, southwestern China: a case study from radical chemistry to  $O_3$ -VOC-NOx sensitivity [J]. Science of Total Environment, 2018,636:775.
- [12] Richard F, Stephan B, Michael B, et al. Pollution and health: A progress update [J]. The Lancet Planetary Health Review, 2023,6(6):1-13.
- [13] Lv Z, Liu X Y, Bai H H, et al. Process-specific volatile organic compounds emission characteristics, environmental impacts and health risk assessments of the petrochemical industry in the Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2024,31:3938-3950.
- [14] 崔阳阳,周震,闫静,等.北京市电子工业 VOCs 排放特征及行业排放强度对比 [J]. 环境科学研究, 2021,34(6):1287-1294.  
Cui Y Y, Zhou Z, Yan J, et al. VOCs emission characteristics of electronics industry in Beijing and emission intensity comparison with industries [J]. Research of Environmental Sciences, 2021,34(6):1287-1294.
- [15] Lv Z, Liu X Y, Wang G, et al. Sector-based volatile organic compounds emission characteristics from the electronics manufacturing industry in China [J]. Atmospheric Pollution Research, 2021,12(7):101097.
- [16] 张世豪,李雪梅,丁淮剑,等.中国显示器行业 VOCs 排放特征及控制对策 [J]. 环境科学研究, 2018,31(11):1827-1834.

- Zhang S H, Li X M, Ding H J, et al. VOCs emission characteristics and control strategy for display industry in China [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2018,31(11):1827-1834.
- [17] 崔阳阳,刘艳梅,迟文涛,等.中国集成电路制造行业 VOCs 排放特征及控制对策 [J]. *环境科学学报*, 2020,40(9):3174-3179.
- Cui Y Y, Liu Y M, Chi W T, et al. VOCs emission characteristics and control measures for integrated circuit manufacturing industry in China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020,40(9):3174-3179.
- [18] 黄鹤雯,沙青娥,朱妮妮,等.珠三角 2010~2017 年主要工业源 VOCs 排放结构与组分变化 [J]. *中国环境科学*, 2020,40(11):4641-4651.
- Huang H W, Sha Q E, Zhu M N, et al. Evolution of emission characteristics and species of industrial VOCs emission in Pearl River Delta Region, 2010-2017 [J]. *China Environmental Sciences*, 2020, 40(11):4641-4651.
- [19] Chiu K H, Wu B Z, Chang C C, et al. Distribution of volatile organic compounds over a semiconductor industrial park in Taiwan [J]. *Environmental Science and Technology*, 2005,39(4):973-983.
- [20] 黄慧峰,邓毅宏,周英豪,等.典型电子企业挥发性有机物排放特征及健康评价 [J]. *中国沼气*, 2024,42(2):55-60.
- Huang H F, Deng Y H, Zhou Y H, et al. Emission characteristics and health evaluation of volatile organic compounds in typical electronic enterprises [J]. *China Biogas*, 2024,42(2):55-60.
- [21] 梁永锡,刘可平,陈 浩,等.广东省某市 202 家电子企业职业病危害因素现状调查 [J]. *职业卫生与应急救援*, 2024,42(1):45-48,62.
- Liang Y X, Liu K P, Chen H, et al. Investigation on occupational hazards of 202 electronic enterprises in a city in Guangdong Province [J]. *Occupational Health and Emergency Rescue*, 2024,42(1):45-48,62.
- [22] 郭笑笑,封琳敏,张慧庆,等.天津市某电子元件制造企业职业病危害因素现状调查 [J]. *职业与健康*, 2023,39(22):3050-3054.
- Guo X X, Feng L M, Zhang H Q, et al. Investigation on current situation of occupational hazard factors in an electronic component manufacturing enterprise in Tianjin [J]. *Occupation and Health*, 2023,39(22):3050-3054.
- [23] Babar Z B, Shareefdeen Z. Management and control of air emissions from electronic industries [J]. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2013,16(1):69-77.
- [24] HJ732-2014 固定污染源废气挥发性有机物的采样气袋法 [S]. HJ732-2014 Emission from stationary sources-Sampling of volatile organic compounds-Bags method [S].
- [25] 李 陵,胡 伟,吕江平,等.工业园区挥发性有机物及其致臭物质污染特征和来源解析 [J]. *环境科学*, 2024,45(9):5168-5178.
- Li L, Hu W, Lv J P, et al. Pollution characterization and source apportionment of volatile organic compounds and their odor-causing species in industrial parks [J]. *Environmental Science*, 2024,45(9): 5168-5178.
- [26] EPA USA. Integrated risk information system (IRIS) [DB/OL]. 2009.<http://www.epa.gov/iris/index.html>.
- [27] Jia H H, Gao S, Duan Y S, et al. Investigation of health risk assessment and odor pollution of volatile organic compounds from industrial activities in the Yangtze River Delta region, China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021,208:111474.
- [28] Zhang Z J, Yan X Y, Gao F L, et al. Emission and health risk assessment of volatile organic compounds in various processes of a petroleum refinery in the Pearl River Delta, China [J]. *Environmental Pollution*, 2018,238:452-461.
- [29] Shen L J, Xiang P, Liang S W, et al. Sources profiles of volatile organic compounds (VOCs) measured in a typical industrial process in Wuhan, central China [J]. *Atmosphere*, 2018,9(8):297.
- [30] Wang Y F, Wang S M, Kuo Y C, et al. Long-term multiplechemical exposure assessment for a thin film transistor liquid crystal display (TFT-LCD) industry [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2017, 17(11):2891-2900.
- [31] 肖景方,叶代启,刘 巧,等.消费电子产品生产过程中挥发性有机物(VOCs)排放特征的研究 [J]. *环境科学学报*, 2015,35(6):1612-1619.
- Xiao J F, Ye D Q, Liu Q, et al. Emission characteristics of volatile organic compounds (VOCs) from the manufacturing process of consumer electronic products [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015,35(6):1612-1619.
- [32] 何梦林,王 旒,陈扬达,等.广东省典型电子工业企业挥发性有机物排放特征研究 [J]. *环境科学学报*, 2016,36(5):1581-1588.
- He M L, Wang N, Cheng Y D, et al. Emission characteristics of volatile organic compounds (VOCs) from electronic manufacturing factory of Guangdong Province [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016,36(5):1581-1588.
- [33] DB11/1631-2019 电子工业大气污染物排放标准 [S]. DB11/1631-2019 Emission standards for air pollutants in the electronic industry [S].
- [34] 徐 捷,魏海萍,修光利,等.半导体行业挥发性有机物(VOCs)排放特征研究 [J]. *环境科学与管理*, 2007,32(10):37-41,44.
- Xu J, Wei H P, Xiu G L, et al. Study on the emission of volatile organic compounds (VOCs) from semiconductor manufacture industry [J]. *Environmental Science and Management*, 2007,32(10):37-41,44.
- [35] 马英歌.印制电路板(PCB)厂挥发性有机物(VOCs)排放指示物筛选 [J]. *环境科学*, 2012,33(9):2967-2972.
- Ma Y G. Composition and characteristics of volatile organic chemicals emission from printed circuit board factories [J]. *Environmental Science*, 2012,33(9):2967-2972.
- [36] Zhang Y S, Li C, Yan Q S, et al. Typical industrial sector-based volatile organic compounds source profiles and ozone formation potentials in Zhengzhou, China. *Atmospheric Pollution Research*, 2020,11(5):841-850.
- [37] 张 伟,姬亚芹,张 军,等.辽宁省典型城市道路尘 PM<sub>2.5</sub> 成分谱研究 [J]. *中国环境科学*, 2018,38(2):412-417.
- Zhang W, Ji Y Q, Zhang J, et al. Study on the road dust source profile of PM<sub>2.5</sub> in Liaoning Province typical cities [J]. *China Environmental Science*, 2018,38(2):412-417.
- [38] 冯 旸,刘锐源,刘雷璐,等.广州典型印刷企业 VOCs 排放特征及环境影响和健康风险评价 [J]. *中国环境科学*, 2020,40(9):3791-3800.
- Feng Y, Liu R Y, Liu L L, et al. VOCs emission characteristics, environmental impact and health risk assessment of typical printing enterprises in Guangzhou [J]. *China Environmental Science*, 2020,40 (9):3791-3800.

作者简介: 吕 喆(1992-),女,北京人,副研究员,博士,主要研究方向为大气污染防治.发表论文 18 篇.lyuzhe@cee.cn.