



移动扫码阅读

施佳燕,徐靓靓,陈莹钧,等.金华市典型涂装细分行业 VOCs 污染态势与健康风险分析[J].能源环境保护,2021,35(1):67-72.

SHI Jiayan, XU Liangliang, CHEN Yingjun, et al. Pollution situation and health risk analysis of VOCs from subdivided coating industries in Jinhua[J]. Energy and Environmental Protection, 2021, 35(1):67-72.

金华市典型涂装细分行业 VOCs 污染态势与健康风险分析

施佳燕¹,徐靓靓¹,陈莹钧²,曾鲁翠²,赵景开^{1,*}

(1.浙江师范大学地理与环境科学学院,浙江金华 321004; 2.金华市萌源环境科技有限公司,浙江金华 321017)

摘要:基于气相-质谱联用技术获得了金华市典涂装工序废气中 VOCs 成分图谱,以甲苯、二甲苯、乙酸乙酯为特征污染物进行涂装废气臭氧污染态势研究,并评价其人体健康风险。结果表明:电动车、门、保温杯、厨具四个细分行业涂装废气特征 VOCs 排放浓度为 97.83~2 237.53 mg·m⁻³,对应的臭氧生成潜势为 336.22~6 725.63 mg·m⁻³,乙酸乙酯对臭氧生成潜力的贡献率最大;涂装废气经漆雾分离处理后,特征污染物非致癌风险可以得到有效控制。

关键词:涂装废气; VOCs; 排放特征; 污染态势; 风险评价

中图分类号: X511

文献标识码: A

文章编号: 1006-8759(2021)01-0067-06

Pollution situation and health risk analysis of VOCs from subdivided coating industries in Jinhua

SHI Jiayan¹, XU Liangliang¹, CHEN Yingjun², ZENG Lucui², ZHAO Jingkai^{1,*}

(1. College of Geography and Environmental Sciences, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China;

2. Jinhua Mengyuan Environmental Technology Co., Ltd., Jinhua 321017, China)

Abstract: The exhaust gases from different coating processes in Jinhua were analyzed by gas chromatography and mass spectrometry (GC-MS) to obtain the VOCs composition spectrum. Toluene, xylene and ethyl acetate were applied as the characteristic pollutants to study the ozone pollution situation of different coating waste gases and evaluate their health risks. The results showed that the concentrations of VOCs emitted were 97.83~2 237.53 mg·m⁻³. The corresponding ozone formation potentials were 336.22~6 725.63 mg·m⁻³, while ethyl acetate was the largest contributor. After the paint mist separation process, the non-carcinogenic risk of the characteristic pollutants can be effectively controlled.

Key Words: Coating waste gas; VOCs; Emission characteristics; Pollution situation; Risk analysis

0 引言

挥发性有机物(VOCs)是环境空气中细颗粒物(PM_{2.5})和臭氧(O₃)的重要前体物,是打赢“蓝天保卫战”的关键污染物之一^[1-2]。近年来,我国O₃污染问题日趋严重,例如浙江省金华市O₃作为环境空气首要污染物的超标天数逐年上升,在

2018年已经成为金华市区首要空气污染物^[3-4]。此外,作为一次污染物,VOCs也易对人体心和肺和神经系统等产生危害,甚至是致癌和致突变等不良后果^[5]。因此,VOCs排放控制对于大气复合污染控制、人居环境优化至关重要。

工业涂装是产品表面制造工艺中的一个重要环节,涂料及稀释剂的使用、涂装前清洗脱脂、涂

收稿日期:2021-01-28;责任编辑:金丽丽

基金项目:金华市科技计划项目(2019-4-161)

第一作者简介:施佳燕(1998-),女,浙江杭州人,硕士研究生,主要研究方向为城市环境空气质量分析与预测研究。

E-mail: 1370624937@qq.com

通讯作者简介:赵景开(1992-),男,江西九江人,博士,副研究员,主要研究方向为大气污染控制技术。E-mail: jingkaizhao@zjnu.cn

装后设备清洁及换色清洗等过程消耗了大量的有机溶剂,易导致芳香烃等光化学反应活性大、毒性高的 VOCs 组分排放^[6]。浙江省涉及工业涂装的主要行业中,2014 年规模以上工业企业 14 168 家,排列全国第二^[7]。同时,涂装行业呈现比较明显的产业集群现象,例如金华五金、汽车等行业。《金华市挥发性有机物深化治理与减排工作方案(2018-2020 年)》要求,到 2020 年底,全市工业涂装 VOCs 排放量比 2015 年减少 50% 以上,该地区涂装废气控制需要持续开展。

目前常见的涂装及后续废气处理工艺如图 1 所示,涂装工艺污染主要来源于喷漆、烘干、设备

清洗过程中有机溶剂挥发^[8]。涂装废气控制目前常见的初步控制手段是漆雾分离及喷淋,后续耦合吸附、催化氧化等工艺可实现 VOCs 的高效控制^[9-11]。工业涂装不同细分行业生产工艺的区别、漆种的差异导致 VOCs 排放特征复杂,且 VOCs 高效控制技术普及率不足,形成了工业涂装 VOCs 严格控制的困难局面。本研究选取浙江金华电动车、门业、杯具、厨具四个典型细分行业作为研究对象,结合其生产工艺,在不同排放节点监测 VOCs 排放特征,并分析其臭氧污染态势和人体健康风险,旨在涂装工艺选择及废气控制技术角度为 VOCs 减排提供基础信息与对策。

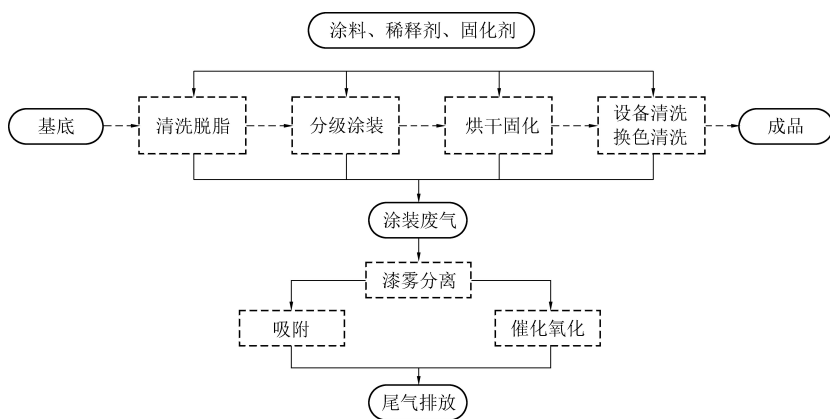


图 1 涂装工艺及废气排放节点

Fig.1 Production processes and pollution dischargepoints in the coating industry

1 实验部分

1.1 调查对象与方法

以浙江金华为调查区域,选取电动车、门、保温杯、厨具四个典型细分行业的 5 家规模企业为研究对象,分别记为 A、B、C、D 和 E。表 1 列举了五家企业生产公益及采样点废气前处理工艺现

状,1、3、5、7、10 号样品为经过漆雾分离前处理的喷漆废气,2、4 为无前处理的涂装废气,6、8 号为经漆雾分离及二级喷淋处理的喷漆废气,9、11 号为烘道气直接采样。本研究中首先对 5 家企业 VOCs 废气成分谱进行分析,并筛选典型组分进行定量分析,考察其污染态势及健康风险。

表 1 VOCs 源样品采集清单

Table 1 Positions and operating conditions of the sampling sources

编号	企业	所属地区	企业类型	生产工艺	气量/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	废气前处理情况
1	A	金华市婺城区	电动车	空气喷枪	15 000	漆雾分离
2	A	金华市婺城区	电动车	空气喷枪	15 000	无
3	A	金华市婺城区	电动车	空气喷枪	15 000	漆雾分离
4	B	金华市婺城区	木门	油漆辊涂	60 000	无
5	C	金华市武义县	杯具	空气喷枪	30 000	漆雾分离
6	C	金华市武义县	杯具	空气喷枪	30 000	漆雾分离+二级喷淋
7	D	金华市武义县	杯具	空气喷枪	15 000	漆雾分离
8	D	金华市武义县	杯具	空气喷枪	15 000	漆雾分离+二级喷淋
9	D	金华市武义县	杯具	热力烘干	/	烘道气
10	E	金华市磐安县	厨具	空气喷枪	6 000	漆雾分离
11	E	金华市磐安县	厨具	热力烘干	/	烘道气

1.2 样品采集及分析方法

1.2.1 采样方法

利用便携式恒流大气采样器 (SP-300), 依据《固定污染源废气挥发性有机物的采样-气袋法 (HJ 732—2014)》, 使用聚四氟乙烯采样袋采集 VOCs 废气。采样流量为 $200 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$, 采集样品体积 250 mL 。

1.2.2 气相-质谱联用 (GC-MS) 分析

分析仪器: 安捷伦 7890B 型气相色谱仪, 联用安捷伦 5977B 型质谱仪; 进样采用 Unity Xr 热脱附仪、Tenax-TA 热脱附管。热脱附条件: 传输线温度为 $150 \text{ }^\circ\text{C}$, 预脱附时间为 1 min , 脱附温度为 $250 \text{ }^\circ\text{C}$, 脱附时间为 10 min , 冷却阱捕集温度为 $-10 \text{ }^\circ\text{C}$, 升温速率为 $20 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$, 脱附温度为 $300 \text{ }^\circ\text{C}$, 保持 3 min 。色谱条件: 采用 HP-5MS 色谱柱 (规格: $30 \text{ m} \times 0.25 \text{ mm} \times 0.25 \text{ } \mu\text{m}$) 对样品进行分离。质谱条件: 离子源温度 $230 \text{ }^\circ\text{C}$, 四级杆温度 $150 \text{ }^\circ\text{C}$, 传输线温度 $250 \text{ }^\circ\text{C}$ 。采用全扫描模式, 扫描范围为 $10 \sim 350 \text{ m} \cdot \text{z}^{-1}$ 。

1.2.3 气相色谱 (GC) 分析

分析仪器: 福立 GC9790II 气相色谱仪, 配氢离子火焰 (FID) 检测器及 WAX 毛细色谱柱。分析条件: 进样口温度 $200 \text{ }^\circ\text{C}$, 柱箱温度 $150 \text{ }^\circ\text{C}$, FID 检测器温度 $250 \text{ }^\circ\text{C}$, 载气为 N_2 , 流速 $30 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 。每个样品浓度分析 3 次取平均值。

1.3 污染态势及健康风险评价方法

VOCs 能通过与 NO_x 发生过光化学反应而产生臭氧污染^[12], 本文采用最大反应活性因子 (MIR) 表征 VOCs 最大臭氧产生浓度, 分析其臭氧生成潜力 (OFP) 来评价 VOCs 对臭氧污染生成的贡献, 计算方法为^[13-14]:

$$c_i^{\text{MIR}} = \text{MIR}_i \times c_i \times \mu_i / \mu_{\text{Ozone}} \quad (1)$$

$$\text{OFP}_{\text{MIR}} = \sum c_i^{\text{MIR}} \quad (2)$$

式中, c_i^{MIR} 为某种 VOC 能够产生的最大臭氧浓度; MIR_i 为某种 VOC 的最大反应活性因子 (O_3 / i , $\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$), 取值参考文献^[15]; c_i 为某种 VOC 的质量浓度 ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$); μ_i 和 μ_{Ozone} 分别表示某种 VOC 和臭氧的相对分子质量, OFP_{MIR} 为总 VOCs 能产生的最大臭氧浓度 ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)。

VOCs 风险评价是以风险度为评价标准用以定量或定性分析污染物影响人类健康的风险。根据国际癌症研究机构 (IARC) 规定的分类系统, 即污染物是否具有致癌性可分为: 致癌性和非致癌性^[16]。本研究中, 由于国内涂装用料中苯、甲醛

等强致癌物已基本被替代, 因此仅对涂装废气的非致癌风险进行评价。

首先计算某一 VOC 污染物的人体摄入量 (CDI)^[17-18]:

$$\text{CDI}_i = \frac{C_i \times \text{IR} \times \text{ED} \times \text{EF}}{\text{BW} \times \text{AL}} \quad (3)$$

式中, CDI_i 为某 VOC 的摄入量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$; C_i 为该 VOC 的质量浓度, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$; IR 为吸入空气量, $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$; ED 为暴露时间, $\text{d} \cdot \text{a}^{-1}$; EF 为暴露频率, a ; BW 为平均体重, kg ; AL 为平均寿命, a 。接触 VOCs 的人群主要为企业员工, 老人、小孩不在评价范围内, 因此部分参数估计如下^[19]: 暴露频率取 30 a ; 暴露时间 $250 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$; 吸入空气量为 $19 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ (按 $8 \text{ h} \cdot \text{d}^{-1}$ 计); 平均体重取 60 kg (WHO 推荐的男女平均值); 平均寿命 70 a ; 人对 VOCs 的吸收率为 0.63 。

应用 USEPA 健康风险评价模型表征污染物摄入引起的非致癌风险, 将由于暴露造成的长期摄入量与参考剂量的比值定义为危害指数 (HI), 其中参考剂量取参考美国 EPA 综合风险信息数据库 (IRIS) 数据库中推荐数据, 计算公式如下^[20]:

$$\text{HI}_g = \text{CDI}_g / \text{RfD}_g \times 10^{-6} \quad (4)$$

式中, CDI_g 为某种 VOCs 的长期日摄入量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$; RfD_g 为某种 VOCs 的参考剂量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$; $\times 10^{-6}$ 为与 RfD_g 相对应的假设可接受的危险度水平。

2 结果与讨论

2.1 VOCs 废气成分谱

涂装废气成分谱如表 2 所示, 同一行业涂装废气中的 VOCs 组分都大致相同, 主要污染物包括乙酸乙酯、苯甲酸、苯甲醛、苯乙酮、甲苯、二甲苯等, 其中乙酸乙酯出现频率达到了 100% 。受油漆成分及废气处理工艺的影响, 不同行业产生的 VOCs 存在差异, 电动车、门类生产企业废气中 VOCs 的成分相较于保温杯和厨具生产企业更为复杂。

污染物中苯甲酸、苯甲醛、邻二苯甲酸等不仅会是喷漆原有组分, 亦可能是甲苯、二甲苯的氧化产物。综合油漆组分、涂装废气成分谱、污染物环境影响程度因素, 以乙酸乙酯、甲苯和二甲苯为特征污染物对涂装废气进行排放强度分析。气相分析结果如表 3 所示, 保温杯行业部分样品 GC-MS 及 GC 的检测结果中甲苯或二甲苯有差异, 原因有二: 一是 GC 谱图出峰位置可能出现偏移; 二

是 GC-MS 检测晚于 GC 检测,部分组分发生转化。由表中数据可知,四个行业特征 VOCs 浓度平均值为 $97.83 \sim 2\,237.53 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 电动车生产行业排放的特征 VOCs 最多,厨具生产行业特征 VOCs 排放浓度最低。不同工序产生的 VOCs 组

分及浓度有较大区别,烘道气浓度高于喷漆废气。经过二级喷淋后,废气中乙酸乙酯浓度反而上升,结合现场工艺运行状况,原因可能在于喷淋循环水长期未更换,其中的有机物再挥发导致。

表 2 不同细分行业 VOCs 废气成分

Table 2 VOCs waste gas composition in different subsectors

行业	采样点	废气主要组分
电动车	采样点 1	乙酸乙酯、甲苯、二甲苯、异丁醇、苯甲醛、苯酚、苯乙醛、苯乙酮、苯甲酸、苯乙酸、邻二苯甲酸、苯基顺酐、1,2-二苯基乙酮、二苯基乙二酮、1-苯基-2-乙酰基乙酮
	采样点 2	乙酸乙酯、甲苯、二甲苯、乙苯、苯甲醛、苯乙酮、苯甲酸、苯基顺酐、丙酮、5-甲氧基-2-戊酮、正己烷、异丙醇、甲基环戊烷、2-甲基己烷、3-乙基戊烷、正庚烷、甲基环己烷
	采样点 3	乙酸乙酯、甲苯、二甲苯、乙苯、正丁醇、异丁醇、苯甲醛、苯乙酮、苯甲酸、苯基顺酐、异丙醇、甲基环戊烷、2-甲基己烷、3-乙基戊烷、甲基环己烷、2,3,4-三甲基戊烷
门业	采样点 4	乙酸乙酯、甲苯、二甲苯、正丁醇、异丁醇、苯甲醛、苯乙醛、苯乙酮、苯甲酸、苯基顺酐、丙酮、正庚烷、甲基环己烷、甲缩醛
	采样点 5	乙酸乙酯、甲苯、二甲苯、苯甲醛、苯乙酮、苯甲酸、苯基顺酐、甲缩醛
	采样点 6	乙酸乙酯、甲苯、苯甲醛、苯乙酮、苯甲酸、苯基顺酐、甲缩醛
保温杯生产	采样点 7	乙酸乙酯、甲苯、二甲苯、苯甲酸、正丁醇
	采样点 8	乙酸乙酯、甲苯、异丁醇、丙酮
	采样点 9	乙酸乙酯、丙酮、甲缩醛
厨具生产	采样点 10	乙酸乙酯、甲苯、二甲苯、丙酮、甲缩醛、二氯甲烷
	采样点 11	乙酸乙酯、甲苯、二甲苯、丙酮、甲缩醛、二氯甲烷

不同采样点中,以乙酸乙酯为主要污染物的样品有 10 个,占总样品数 91%,甲苯占 1 个。乙酸乙酯、甲苯、二甲苯等 VOCs 主要来源于油漆稀释剂,喷涂过程中油漆雾化成微粒,随气流弥散形成漆雾进入废气。空气喷枪是本研究中普遍的涂装工艺,其

作业时得漆率通常在 40% 以下^[21],因此涂装行业 VOCs 的控制需要改进生产工艺降低漆雾产生量。经漆雾分离后的废气中污染物以乙酸乙酯为主,一方面是乙酸乙酯挥发性高,一方面是随着环保要求趋于严格,甲苯、二甲苯的使用量低于乙酸乙酯。

表 3 废气特征 VOCs 排放浓度及其反应活性、致癌毒性和毒性因子*

Table 3 Concentrations of exhaust gas and their reactivity, carcinogenicity and toxic factor*

细分行业	采样点	乙酸乙酯浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)	甲苯浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)	二甲苯浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)	总特征 VOCs 浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)	总特征 VOCs 浓度平均值/ ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)
电动车	采样点 1	56.01	495.98	166.64	718.63	1 303.88
	采样点 2	2 188.39	47.76	1.39	2 237.53	
	采样点 3	914.28	25.24	15.96	955.48	
门业	采样点 4	578.88	16.30	13.20	608.38	608.38
	采样点 5	482.34	12.27	22.28	516.89	
保温杯生产行业	采样点 6	679.56	26.65	7.30	713.51	
	采样点 7	74.42	15.96	7.46	97.83	411.19
	采样点 8	297.59	9.99	8.24	315.82	
	采样点 9	376.48	9.69	25.75	411.92	
厨具生产行业	采样点 10	202.66	3.03	5.00	210.70	244.26
	采样点 11	256.10	13.26	8.46	277.82	
/	MIR/($\text{gO}_3 \cdot \text{g}^{-1}$)	0.63	4.00	7.74	/	/
	RfD/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)	9×10^{-1}	8×10^{-2}	2×10^{-1}	/	/
	IARC	/	3 类	3 类	/	/

注:排放浓度单位为 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。排放限值依据《大气污染物综合排放标准》(GB 16298—1996)确定,加框数值表示超过最高允许排放浓度。时间加权平均容许浓度根据《中华人民共和国国家职业卫生标准》(GBZ 2.1—2007)确定,加下划线的数值表示超过时间加权平均容许浓度。IARC 3 类表示对人体致癌性尚未归类的物质或混合物。

2.2 典型污染物臭氧生成潜势分析

四个细分行业的 11 个采样点中 VOC 产生总 OFP 值计算结果如表 4 所示, 11 个采样点废气的 OFP 值介于 $336.22 \sim 6\,725.63 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 之间, 保温杯生产企业的 7 号点最低, 电动车生产企业的 1 号点最高, 且差异明显。从细分行业来看, 电动车生产行业的 OFP 值明显高于门业和厨具生产企业,

表 4 排放 VOCs 产生的总 OFP_{MR} 值

Table 4 OFP_{MR} values of each sampling point's VOCs

$\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$

采样点	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
OFP_{MR}	6 725.6	2 921.2	1 524.3	1 020.6	1 033.4	1 115.4	336.2	561.9	950.6	343.3	542.9

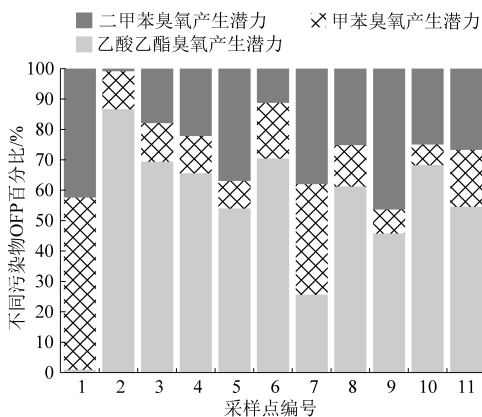


图 2 11 个采样点废气不同 VOCs 臭氧产生潜力百分比

Fig.2 Ozone formation potential percentages of different VOC compounds in 11 sampling points

表 5 排放 VOCs 产生的总 HI 值

Table 5 HI values of each sampling point's VOCs

a^{-3}

采样点	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
HI 值	0.240 7	0.103 0	0.047 9	0.031 0	0.027 2	0.038 2	0.010 8	0.016 9	0.022 7	0.009 8	0.016 7

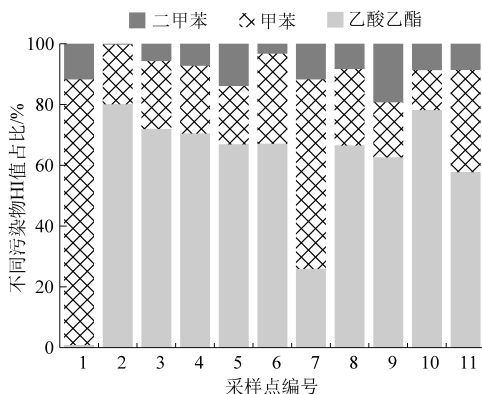


图 3 11 个采样点废气 VOCs 的 HI 值百分比

Fig.3 Hazard index percentages of different VOC compounds in 11 sampling points

3 结论

(1) 四个细分行业喷漆废气中总特征 VOCs

造成此差异的主要原因在于企业所使用原材料的差异。图 2 列举了乙酸乙酯、甲苯、二甲苯的废气 OFP 贡献率, 其中乙酸乙酯在 2-6、8-11 号采样点均排名第一, 各占 87%、69%、66%、54%、70%、61%、46%、68% 和 55%; 甲苯则在 1 号采样点排名第一, 占比 57%; 7 号采样点中二甲苯排名第一, 占比 38%。

2.3 VOCs 废气健康风险评价

表 5 为 11 个采样点产生 VOCs 的非致癌风险总评估值。从中可以看出采样点的非致癌风险指数介于 $0.009\,8 \sim 0.240\,7 \text{ a}^{-1}$ 之间, 其中电动车企业 1 号采样点的总 HI 值最高, 厨具生产企业 10 号点的最低。在四个细分行业中, 电动车生产行业的 HI 最高。当非致癌风险小于等于 1 时, 认为不存在非致癌风险^[22], 因此本研究中采样点废气均不存在非致癌风险。图 3 为乙酸乙酯、甲苯、二甲苯的废气 HI 贡献率, 其中乙酸乙酯在 2-6、8-11 号采样点均排名第一; 甲苯则在 1 号采样点排名第一, 占比 87%; 7 号采样点中二甲苯排名第一, 占比 62%。

浓度介于 $97.83 \sim 2\,237.53 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 之间, 浓度最高的为电动车生产行业, 且根据《大气污染物综合排放标准》(GB 16298—1996), 该行业废气中甲苯、二甲苯存在超标现象。

(2) 在实际生产过程中, 企业职工暴露于未经处理的废气中, 根据《中华人民共和国国家职业卫生标准》(GBZ 2.1—2007), 电动车、门、保温杯、厨具生产四个行业中均出现了乙酸乙酯超标现象。

(3) 目前采用了漆雾分离、喷淋等处置设施的生产线比例较大, 且能够有效降低 VOCs 浓度; 以甲苯、邻二甲苯等污染大为溶剂的油漆使用变少, 源头控制效果得到提升。

参考文献

- [1] HUANG R, ZHANG Y, BOZZETTI C, et al. High secondary aerosol contribution to particulate pollution during haze events in

- China [J]. *Nature*, 2014, 514 (7521): 218-222.
- [2] 王俏丽,董敏丽,李素静,等.舟山市臭氧污染分布特征及来源解析[J].*环境科学*,2019,3:1-12.
- [3] 金华市生态环境局.关于征求《金华市大气环境质量限期达标规划(公开征求意见稿)》和《金华市打赢蓝天保卫战三年行动计划(公开征求意见稿)》意见的通知[EB/OL].(2018-08-17)[2020-12-05]http://sthjj.jinhua.gov.cn/art/2018/8/17/art_1229168483_2827033.html.
- [4] 金华生态环境局.2018年金华市环境状况公报[EB/OL].(2019-06-06)[2020-12-05].http://sthjj.jinhua.gov.cn/art/2019/6/6/art_1229168483_2827086.html.
- [5] ZHOU J, YOU Y, BAI Z, et al. Health risk assessment of personal inhalation exposure to volatile organic compounds in Tianjin, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2011, 409 (3): 452-459.
- [6] CHUANG F J, CHOU M S. Biotrickling filtration of volatile organic compounds in vented gases from surface-coating operations [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2020, 146 (6): 06020001.
- [7] 陆建海,董事壁,李文娟,等.浙江省工业涂装VOCs治理现状[J].*环境保护科学*,2018,44(1):113-117.
- [8] 韩忠峰.喷涂废气的全过程控制[J].*现代涂料与涂装*,2007,10:14-16.
- [9] 刘楠,滕富华,陆建海,等.光催化-吸收法处理家具涂装废气中试试验[J].*浙江大学学报(工学版)*,2017,51(2):393-398.
- [10] 潘辰.VOC沸石浓缩转轮净化系统在汽车涂装废气治理上的技术应用[J].*汽车实用技术*,2017(12):170-173.
- [11] 林宣乐.汽车涂装喷漆室有机废气净化技术方案及应用[J].*现代涂料与涂装*,2017,20(5):41-46.
- [12] 李源,孔君,徐虹,等.天津市臭氧污染特征及来源解析研究[J].*环境污染与防治*,2019,41:647-651.
- [13] 李瑞芑,吕建华,付飞,等.青岛市重点工业行业挥发性有机物对二次污染物生成的贡献及健康风险研究[J].*环境污染与防治*,2020,42(2):212-217.
- [14] XIONG Y, DU K. Source-resolved attribution of ground-level ozone formation potential from VOC emissions in Metropolitan Vancouver, BC [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 721: 137698.
- [15] CARTER W. Updated maximum incremental reactivity scale and hydrocarbon bin reactivities for regulatory applications [R]. California: University of California, Riverside, 2010: 7-339.
- [16] 黄烯茜,廖浩祥,周勇,等.上海城郊大气挥发性有机物污染特征、活性组分及风险评估[J].*环境污染与防治*,2020,42(2):194-198.
- [17] CHANG E E, WANG W C, ZENG L X, et al. Health risk assessment of exposure to selected volatile organic compounds emitted from an integrated iron and steel plant [J]. *Inhalation Toxicology*, 2010, 22: 117-125.
- [18] NIE E, ZHENG G, SHAO Z, et al. Emission characteristics and health risk assessment of volatile organic compounds produced during municipal solid waste composting [J]. *Waste Management*, 2018, 79: 188-195.
- [19] 段小丽,黄楠,王贝贝,等.国内外环境健康风险评价中的暴露参数比较[J].*环境与健康杂志*,2012,29(2):99-104.
- [20] ROY D, SINGH G, SEO Y C. Coal mine fire effects on carcinogenicity and non-carcinogenicity human health risks [J]. *Environmental Pollution*, 2019, 254: 113091.
- [21] 宁淼,刘伟,刘桐坤.工业涂装VOCs排放管控途径研究[J].*环境保护*,2017(15):54-56.
- [22] GHOOCHANI M, DEGHANI M H, MEHRABI F, et al. Determining additional risk of carcinogenicity and non-carcinogenicity of heavy metals (lead and arsenic) in raw and as-consumed samples of imported rice in Tehran, Iran [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26 (23): 24190-24197.