

西安市典型行业 VOCs 源成分谱及环境影响

陈妙¹, 薛兴钊¹, 李顺姬¹, 曹泽磊¹, 孟小兰¹, 党小庆², 黄宇广¹

(1. 西安市环境保护科学研究院, 陕西 西安 710061; 2. 西安建筑科技大学, 陕西 西安 710200)

摘要: 采用苏玛罐采样-GC/MS 法分析西安市家具制造、表面涂装、汽车整车制造和印刷行业 VOCs 成分谱, 计算不同工序 VOCs 对 O₃ 和二次有机气溶胶 (SOA) 的生成贡献。结果表明: 西安市不同行业 TVOC 排放值为 0.332 mg/m³ ~ 45.7 mg/m³, 涂装行业最高, 其次是印刷工序和木质家具制造, 汽车软装和印刷覆膜工序较低。木质家具 VOCs 主要为芳香烃、含氧类有机物和烷烃, 随着油性漆替换为水性漆, 芳香烃占比下降, 含氧类有机物占比上升。汽车喷涂 VOCs 主要为芳香烃和含氧类有机物, 印刷行业 VOCs 中含氧类有机物占比高。表面涂装排放 VOCs 对生成 O₃ 和 SOA 贡献最高, 印刷行业 R_{OF} 最小, 汽车软装工序 R_{SOA} 最小。

关键词: 挥发性有机物; 典型工业; 谱库; 环境影响; 西安市

中图分类号: X511

文献标志码: B

文章编号: 1006-2009(2024)03-0073-05

Source Profiles and Environmental Impact of VOCs in Typical Industries in Xi'an

CHEN Miao¹, XUE Xingzhao¹, LI Shunji¹, CAO Zelei¹, MENG Xiaolan¹, DANG Xiaoqing², HUANG Yuguang¹

(1. Xi'an Academy of Environmental Protection Sciences, Xi'an, Shaanxi 710061, China;

2. Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi 710200, China)

Abstract: The source profile of VOCs in furniture manufacturing, surface coating, automobile manufacturing and printing industries in Xi'an were analyzed by Suma canister collecting-GC/MS. The contribution of VOCs from different processes to the generation of O₃ and secondary organic aerosol (SOA) was calculated. The results showed that TVOC mass concentration from different industries in Xi'an was from 0.332 mg/m³ to 45.7 mg/m³, with the highest in painting industry, followed by printing process and furniture manufacturing, and the lowest in automobile decoration and laminating process. VOCs from furniture manufacturing were mainly aromatic hydrocarbons, oxygen-containing organic matter and alkane. With the substitution of oil-based paint for water-based paint, the proportion of aromatic hydrocarbons decreased and the proportion of oxygen-containing organic matter increased. VOCs from automobile spray were mainly aromatic hydrocarbons and oxygen-containing organic matter. The proportion of oxygen-containing organic matter in VOCs from printing industry was high. VOCs from surface coating contributed the most to the generation of O₃ and SOA. R_{OF} of VOCs from printing industry was the smallest. R_{SOA} of VOCs from automobile decoration process was the smallest.

Key words: VOCs; Typical industry; Source profile; Environmental impact; Xi'an

源清单^[1]和源解析表明,挥发性有机物(VOCs)主要排放源为溶剂使用源、移动源^[2]、工艺过程源。不同行业排放VOCs组分不同^[3-4],不同组分VOCs生成臭氧(O₃)和二次有机气溶胶(SOA)潜势不同^[5-6]。掌握典型行业VOCs源成分

收稿日期:2023-05-15;修订日期:2024-03-17

基金项目:国家重点研发计划基金资助项目(2017YFC0212200);陕西省重点研发计划基金资助项目(2024SF-YBXM-569)

作者简介:陈妙(1987—),女,陕西西安人,工程师,硕士,主要从事大气污染防治工作。

谱既可以补充、验证西安市源清单,也可以用来支撑环境管理部门制定 VOCs 管控措施。

国内 VOCs 源谱库研究主要集中在经济较发达的珠三角^[7]、京津冀^[8]、长三角^[9]和成渝^[10]地区,而西安市典型行业 VOCs 排放谱库研究则较少,其他城市报道过家具制造^[11-13]、整车制造^[14]和汽修行业^[15]的 VOCs 源成分谱。西安市印发《挥发性有机物专项行动方案》后,积极推进 VOCs 源头替代工作,典型行业 VOCs 源谱已发生变化,开展典型行业 VOCs 谱库研究对 VOCs 污染防治具有一定意义。今筛选西安市 VOCs 排放量大的木质家具制造、表面涂装、汽车整车制造和印刷4个典型行业,对有机废气处理设施进口、出口开展监测,分析西安市典型行业 VOCs 源成分谱,使用归一化 O₃ 反应性 (R_{OF}) 和归一化二次有机气溶胶反应性 (R_{SOA}) 评估典型行业排放 VOCs 的环境影响。

1 材料与方法

1.1 样品采集与分析

选择典型行业排放量较大的8家企业开展监测,包括3家木质家具制造(企业1—3)、3家表面涂装(企业4—6)、1家汽车整车制造(企业7)和1家印刷(企业8)。VOCs 定量方法参照《2018年重点地区环境空气挥发性有机物监测方案》中的 VOCs 组分,一共117种,分为烷烃29种、烯烃11种、芳香烃18种、含氧类有机物22种、卤代烃35种和其他(二硫化碳和乙炔),由于间-二甲苯和对-二甲苯无法分开,按间/对-二甲苯一起讨论。使用苏玛罐采样,VOCs 经预浓缩仪(美国 Entech 7200型)和浓缩进样器(Entech 7016D型)进入气质联用仪(安捷伦 7890B-5977B型)分析。

1.2 成分谱建立

不同企业污染物排放强度不同,同一企业不同工序由于原辅材料不同,其 VOCs 排放浓度和组分均可能存在差异。为了表示典型行业不同工序 VOCs 排放特征,将 VOCs 源成分谱库表示为各种 VOCs 组分对于测得 VOCs 总质量浓度(TVOC)的质量分数^[16]。将同一行业相同工序排放 VOCs 的质量浓度进行平均,获得该行业该工序的 VOCs 排放谱库。

1.3 环境影响分析

采用最大增量反应活性法(MIR)计算 R_{OF} , 评估排放源 VOCs 的 O₃ 生成潜势,见式(1)^[17]。采

用甲苯当量气溶胶生成系数方法来计算 R_{SOA} , 评估不同工序 VOCs 对二次有机气溶胶生成潜势(SOAP)的贡献,见式(2)—(3)^[18]。

$$R_{OF} = \sum_{i=0}^n C_i \times \text{MIR}_i \quad (1)$$

$$\text{SOAP} = \sum_{i=0}^n \text{SOAP}_i \times C_i \quad (2)$$

$$R_{SOA} = \frac{\text{SOAP}}{100} \times \text{FAC}_{\text{toluene}} \quad (3)$$

式中: R_{OF} 为源排放 1 g VOCs 时估算的最大 O₃ 生成量, g/g; C_i 为物种 i 的质量分数; MIR_i 为第 i 种 VOCs 的最大增量反应活性(数据来源于 Venecek 等^[19]更新的 MIR 值),以 O₃ 和 VOCs 的质量比计, g/g; SOAP_i 为物种 i 相对甲苯的 SOA 生成潜势系数; n 为 VOCs 物种数; R_{SOA} 为源排放 1 g VOCs 时估算的 SOA 生成量, g/g; $\text{FAC}_{\text{toluene}}$ 为甲苯的气溶胶生成系数,取值 0.054 g/g^[20]。

2 结果与讨论

2.1 VOCs 排放特征

企业 TVOC 质量浓度和组分占比监测结果见表1。西安市不同企业产生有组织 TVOC 为 1.27 mg/m³ ~ 139 mg/m³, 均值为 (32.2 ± 43.6) mg/m³, 经有机废气处理设施后, TVOC 排放值为 0.332 mg/m³ ~ 45.7 mg/m³, 均值为 (11.5 ± 14.4) mg/m³。从工序看, 涂装工序(企业4—7) TVOC 值较高, 其次是印刷工序(企业8)和使用油性漆的木质家具制造(企业3), 汽车软装工序(企业7)和印刷覆膜工序(企业8) TVOC 值较低。两家木质家具制造企业无组织 TVOC 值接近, 分别为 0.118 mg/m³ 和 0.114 mg/m³。有机废气处理效率为 24.0% ~ 87.8%, 蓄热燃烧(企业5)和催化燃烧(企业6)的处理效率相对较高, 分别为 86.9% 和 67.2%。活性炭吸附工艺的处理效率差异较大, 企业4、企业7和企业8印刷工序处理效率较高, 约为 80%, 企业3和企业8覆膜工序的出口浓度高于进口浓度。活性炭吸附的处理效率与设计参数息息相关, 碘值、孔隙率、填充量和活性炭箱布局等均对处理效率有较大影响。组合工艺“等离子体+UV光氧”处理效率总体不高, 均值为 48.1%。

2.1.1 木质家具制造行业

木质家具制造行业 VOCs 主要来自涂料、稀释剂、胶粘剂, 涉 VOCs 工序为调漆、喷漆和干燥。调研发现喷漆间一般为密闭式喷漆房, 底漆、面漆共

表 1 各企业 TVOC 质量浓度及组分占比

Table 1 TVOC mass concentration and proportion of VOCs components in each enterprise

企业	TVOC $\rho/$ ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)	占比/%						处理效率 /%	
		卤代烃	烯烃	芳香烃	烷烃	含氧类有机物	其他		
企业 1	底漆进口	16.6	0.1	0.1	38.9	0.4	60.5	0	72.8
	底漆出口	4.52	0.2	0.2	58.4	1.5	39.4	0.3	
	面漆进口	9.21	0.3	0.1	46.6	1.1	51.8	0.1	24.0
	面漆出口	7.00	0.3	0.1	50.1	0.7	48.7	0.1	
	厂区内	0.118	4.6	20.0	9.2	25.7	34.1	6.4	
企业 2	喷漆出口	1.06	1.5	0.7	49.6	26.1	21.9	0.2	
	厂区内	0.114	10.3	4.4	38.9	28.0	15.8	2.6	
企业 3	喷漆进口	14.9	1.9	0	83.8	1.3	13.0	0	
	喷漆出口	15.8	1.5	0	83.3	1.8	13.4	0	
企业 4	涂装进口	7.22	0.2	0.4	86.1	7.7	5.5	0.1	87.8
	涂装出口	0.878	1.6	2.0	72.9	8.9	13.9	0.7	
企业 5	涂装进口	76.9	0.2	0	95.3	3.2	1.3	0	86.9
	涂装出口	10.1	1.0	0.6	67.9	6.5	23.8	0.2	
企业 6	涂装进口	139	0.1	6.2	71.2	2.0	20.5	0	67.1
	涂装出口	45.7	0	1.6	94.4	0.3	3.7	0	
企业 7	软装进口	1.27	1.4	0.7	42.4	30.9	24.4	0.2	73.9
	软装出口	0.332	2.8	1.5	4.6	15.9	74.8	0.4	
	整车喷涂出口	34.5	0.1	1.6	54.7	19.0	24.4	0.2	
企业 8	印刷进口	23.8	0.1	0.4	6.6	14.8	78.1	0	79.8
	印刷出口	4.81	0.3	0.2	16.9	34.9	47.7	0	
	覆膜进口	1.40	3.4	0.4	35.2	6.3	54.6	0.1	
	覆膜出口	1.81	3.7	1.4	9.1	4.7	81.0	0.1	

用,调漆间设在其中,产生废气经收集后处理。干燥工序分为常温晾干和加热烘干,干燥室通常与喷漆室连通,共用有机废气处理设施。由于木材和原辅材料差异,木质家具制造企业排放 VOCs 种类不同。企业 1 为实木家具制造,使用水性漆,VOCs 种类为含氧类有机物和芳香烃,占比均为 50%左右。企业 2 为板式家具制造,使用水性漆,由于贴皮工序使用胶粘剂,VOCs 前三的种类为芳香烃(49.6%)、烷烃(26.1%)和含氧类有机物(21.9%)。企业 3 使用溶剂型涂料,其 VOCs 中芳香烃明显上升,占比 83.3%,其次为含氧类有机物(13.4%)。从 VOCs 组分看,企业 1 和企业 3 前三的组分均为乙酸乙酯、间/对-二甲苯和邻-二甲苯,是涂料的主要成分。企业 1 使用水性漆,乙酸乙酯占比最高(37.6%),企业 3 使用油性漆,间/对-二甲苯占比最高(41.4%)。企业 2 前三的组分为正壬烷(17.4%)、异丙基苯(16.8%)和乙醇(6.3%),正壬烷是刨花板板材 VOCs 占比最高的组分^[21],异丙基苯是喷漆稀释剂。与张嘉妮等^[13]、王海林等^[15]、Derwent 等^[18]、Venecek 等^[19]、Grosjean^[20]、李世杰等^[21]的结论相同,乙酸乙酯、

间/对-二甲苯和邻-二甲苯均为家具制造行业的关键组分,西安市与邢台市^[22]木质家具企业排放特征类似,均为芳香烃最高。西安市木质家具企业厂区内无组织 VOCs 中烷烃、含氧类有机物和芳香烃占比分别为 26.9%、25.0%和 24.1%。乙醇占比最高(12.5%),乙醇是常见的清洗剂和分散剂,可能来源于拼接、贴皮等胶粘工序;其次是苯乙烯、甲苯、正壬烷,占比为 4.2%~8.9%。

2.1.2 表面涂装行业

根据《挥发性有机物排放控制标准》(DB 61/T 1061—2017),表面涂装行业指除汽车整车制造、木质家具制造之外的涂装行业。调研的 3 家表面涂装企业产品分别为变压器箱体、钢结构和风电设备,由于产品使用环境对漆面要求较高,均使用油性漆喷涂。表面涂装排放 VOCs 前三的种类为芳香烃、含氧类有机物和烷烃,占比分别为 67.9%~94.4%、3.7%~23.8%和 0.3%~8.9%。前十的组分中乙苯(25.9%)、间/对-二甲苯(24.6%)和邻-二甲苯(21.4%)占比高。由于使用油性漆,表面涂装行业 VOCs 排放组分与溶剂型涂料成分类似。

2.1.3 整车制造行业

西安市整车制造企业数量虽不多,但单个企业 VOCs 排放量大,其 VOCs 主要来源于涂装车间的电泳、电泳烘干、中涂烘干、面漆喷涂及面漆烘干等环节。此外,软装车间的搪塑、发泡及烘干也产生有机废气。涂装车间涉 VOCs 原辅料为电泳底漆、车底涂料、密封胶、中涂漆、面漆、罩光漆和稀释剂等,排放 VOCs 种类为芳香烃(54.7%)、含氧类有机物(24.4%)和烷烃(19.0%)。与使用溶剂型的汽车制造企业相比,西安市涂装工序排放 VOCs 虽然种类类似,但芳香烃占比下降,烷烃占比上升。这是由于西安市开展源头替代工作,部分涂装已经替换为水性漆。汽车涂装排放 VOCs 前三的组分为邻-乙基甲苯(21.8%)、正癸烷(11.3%)和正丙基苯(8.1%),邻-乙基甲苯和正丙基苯来源于涂料,正癸烷是汽车整体制造行业混合漆在使用 RTO 处理后排放的特征组分^[23]。软装车间产生 VOCs 种类为芳香烃(42.4%)、烷烃(30.9%)和含氧类有机物(24.4%),特征组分为乙苯(10.4%)、乙醇(8.0%)和间/对-二甲苯(7.6%)。经“UV 光解+活性炭吸附”设施处理后,排放 VOCs 种类为含氧类有机物(74.8%)、烷烃(15.9%)和芳香烃(4.6%),特征组分为乙醇(32.0%)、甲醛(15.2%)和邻甲基苯甲醛(8.9%)。这是由于软装工序原料为异氰酸酯和聚醚组合料,加热时释放乙醇、甲醛。

2.1.4 印刷行业

印刷根据工艺分为平版印刷、凸版印刷、凹版印刷和塑料薄膜印刷。除塑料薄膜印刷外,西安市其他印刷工艺大多完成了低挥发性原料替代。上述调研监测的印刷企业产品为药品包装盒,涉 VOCs 工序为平版印刷和覆膜,印刷油墨为水性双面高光 UV 油墨。印刷工序产生 VOCs 种类为含氧类有机物(78.1%)、烷烃(14.8%)和芳香烃(6.6%),经“干式过滤+活性炭吸附”设施处理后,排放 VOCs 种类前三为含氧类有机物(47.7%)、烷烃(34.9%)和芳香烃(16.9%)。2-丙醇、乙醇和正十一烷是印刷工序有机废气占比前三的组分。与已有研究对比,西安市印刷行业 VOCs 中芳香烃和烷烃明显减少,含氧类有机物占比上升,与方莉等^[8]在北京市的研究结果类似,这与西安市大力推广低 VOCs 油墨有关。正十一烷和 2-丙醇是印刷行业典型 VOCs 组分,乙醇被其他研究报道得不多,而在上述研究中则占比高,这与 UV 油墨中二

丙二醇甲醚占比 70%~100%,UV 润版液主要组分为乙二醇二烷基醚、1,2-丙二醇和乙二醇二烷溶剂有关。覆膜工序产生 VOCs 种类前三为含氧类有机物(54.6%)、芳香烃(35.2%)和烷烃(6.3%),经“干式过滤+UV 光解+活性炭吸附”设施处理后含氧类有机物占比上升为 81.0%,芳香烃占比下降为 9.1%,烷烃占比变化不大,为 4.7%。乙醇、2-丙醇、丙醛和间/对-二甲苯是覆膜工序的特征 VOCs 组分。

2.2 典型行业 VOCs 环境影响

同样排放量的 VOCs,组分不同对生成 O₃ 和 SOA 的贡献不同。表 2 为西安市典型行业不同工序 VOCs 的 R_{OF} 和 R_{SOA} 计算结果。由表 2 可知,西安市典型行业不同工序 R_{OF} 为 2.2 g/g~5.9 g/g,表面涂装行业最高,印刷行业最低,与齐一谨等^[11]对郑州市的研究结果一致。从 R_{OF} 的种类看,涂装类(家具喷涂、表面涂装和汽车喷涂)芳香烃占比高,与其他研究结果一致,间/对-二甲苯、邻-二甲苯、邻-乙基甲苯是涂装类 R_{OF} 占比前三的组分。西安市印刷行业含氧类有机物虽在 TVOC 中占比最高,但芳香烃有较大的 MIR 值,在 R_{OF} 中占比最高。R_{OF} 占比前三的组分为 1,2,4-三甲苯、乙醇和丙醛。北京市印刷行业 VOCs 排放浓度、谱库与西安市一致,郑州市印刷行业 VOCs 浓度和 R_{OF} 均为含氧有机物占比最高,这是由于郑州市印刷行业含氧类有机物在 TVOC 中占比为 95.0%。汽车软装工序和印刷覆膜工序含氧类有机物 R_{OF} 贡献高,占比前三的组分为甲醛、乙醛和乙醇。为控制 O₃ 污染,涂装企业应优先减排间/对-二甲苯、邻-二甲苯、邻-乙基甲苯等苯系物,汽车软装工序和印刷行业优先减排甲醛、乙醛、乙醇等含氧类有机物。

西安市典型行业 R_{SOA} 为 0.26 g/g~4.34 g/g。表面涂装行业排放 1 g VOCs 对 O₃ 和 SOA 的贡献均最高,其次为家具制造行业,汽车软装工序排放 1 g VOCs 对 SOA 的贡献最小,仅为表面涂装行业的 6.0%。从 VOCs 种类看,芳香烃对生成 SOA 的贡献占比最高。从组分看,苯系物在 R_{SOA} 前十的组分数量最多,超过 7 个,主要为间/对-二甲苯、邻-二甲苯、乙苯、甲苯、邻-乙基甲苯、间-乙基甲苯、正丙基苯。除芳香烃外,汽车软装工序 R_{SOA} 前十的组分还包括含氧类有机物,特征组分为乙醇、甲醛和丙醛;汽车喷涂和印刷行业的烷烃也有一些贡献,特征组分为正十一烷、正十二烷和正癸烷。

表2 各工序排放 VOCs 的 R_{OF} 和 R_{SOA}
Table 2 R_{OF} and R_{SOA} of VOCs from each process

工序	$R_{OF}/(g \cdot g^{-1})$						$R_{SOA}/(g \cdot g^{-1})$					
	卤代烃	烯烃	芳香烃	烷烃	含氧有机物	其他	卤代烃	烯烃	芳香烃	烷烃	含氧有机物	其他
家具喷涂	0	0.01	5.38	0.02	0.25	0	0	0	3.43	0	0	0
表面涂装	0	0.14	5.58	0.02	0.16	0	0	0	4.34	0	0	0
汽车喷涂	0	0.17	3.18	0.13	1.12	0	0	0	2.39	0.13	0	0
汽车软装	0	0.15	0.26	0.20	2.68	0	0	0	0.24	0	0.02	0
印刷	0	0.02	1.23	0.21	0.74	0	0	0	0.51	0.29	0.01	0
印刷覆膜	0.01	0.14	0.51	0.04	2.40	0	0	0	0.44	0.03	0.02	0

3 结语

监测了西安市典型行业 TVOC 的产生质量浓度 $[(32.2 \pm 43.6) \text{ mg/m}^3]$ 和排放值 $[(11.5 \pm 14.4) \text{ mg/m}^3]$, 分析了典型行业 VOCs 谱库对 O_3 和 SOA 的生成贡献。在国内大力推广 VOCs 原辅材料源头替代工作后, 上述研究更新了西安市典型行业 VOCs 谱库, 补充完善了国内典型行业 VOCs 谱库研究内容。筛选出 O_3 和 SOA 污染贡献高的 VOCs 组分和行业, 为西安市进一步开展 VOCs 减排工作提供了数据支持。此外, 监测了西安市典型行业常见有机废气处理设施的处理效率 (24.0% ~ 87.8%), 为西安市开展低效有机废气处理设施监管工作提供了依据。

[参考文献]

- [1] 李琦, 桂丽, 刘明, 等. 西安人为源 VOCs 排放特征及其对 O_3 和 SOA 生成潜势的影响[J]. 环境科学研究, 2019, 32(2): 253-262.
- [2] 张秀丽, 夏士勇, 谭余, 等. 烟台市夏季挥发性有机物污染特征及来源解析[J]. 环境监测管理与技术, 2023, 35(3): 23-28.
- [3] 叶露, 邵菁菁, 俞华明. 汽车工业区大气挥发性有机物 (VOCs) 变化特征及来源解析[J]. 环境科学, 2021, 42(2): 624-633.
- [4] 王亚琪, 常甜, 陈庆彩. 餐饮源 VOCs 组成特征及处理技术研究进展[J]. 环境工程, 2021, 39(6): 90-98.
- [5] 鲁晓哈, 王丽涛, 马笑, 等. 邯郸市 VOCs 变化特征及 O_3 和 SOA 生成潜势[J]. 环境科学与技术, 2016, 42(3): 30-37.
- [6] 张凤菊, 张保良, 曹方方, 等. 山东省传输通道城市大气中 VOCs 污染特征及化学活性研究[J]. 环境监测管理与技术, 2022, 34(3): 21-24.
- [7] 苏伟健, 龙淼, 陈涛, 等. 珠江三角洲某工业城镇环境空气中挥发性有机物污染特征[J]. 环境工程, 2018, 36(12): 135-139.
- [8] 方莉, 刘文文, 陈丹妮, 等. 北京市典型溶剂使用行业 VOCs 成分谱[J]. 环境科学, 2019, 40(10): 4395-4403.
- [9] 杨盛, 王其龙, 郑东, 等. 绍兴市柯桥区工业园区挥发性有机物污染特征研究[J]. 环境污染与防治, 2022, 44(1): 67-71.
- [10] 徐晨曦, 陈军辉, 韩丽, 等. 四川省典型行业挥发性有机物源成分谱[J]. 环境科学, 2020, 41(7): 3032-3040.
- [11] 齐一谨, 倪经纬, 赵东旭, 等. 郑州市典型工业企业 VOCs 排放特征及风险评估[J]. 环境科学, 2020, 41(7): 3056-3065.
- [12] 秦华, 谢建辉, 杜天君, 等. 济南市典型家具企业 VOCs 排放特征及 O_3 生成贡献分析[J]. 环境保护科学, 2021, 47(3): 138-145.
- [13] 张嘉妮, 曾春玲, 刘锐源, 等. 家具企业挥发性有机物排放特征及其环境影响[J]. 环境科学, 2019, 40(12): 5240-5249.
- [14] 谷欣, 陈凯涛, 翟瑞晓, 等. 某整车制造企业挥发性有机物排放特征及反应活性研究[J]. 环境科学学报, 2023, 43(3): 377-386.
- [15] 王海林, 杨涛, 聂磊, 等. 汽修行业挥发性有机物排放与控制现状及对策[J]. 环境科学, 2021, 42(12): 5574-5584.
- [16] WATSON J G, CHOW J C, FUJITA E M. Review of volatile organic compound source apportionment by chemical mass balance[J]. Atmospheric Environment, 2001, 35(9): 1567-1584.
- [17] ZHANG Y L, WANG X M, ZHANG Z, et al. Species profiles and normalized reactivity of volatile organic compounds from gasoline evaporation in China[J]. Atmospheric Environment, 2013, 79: 110-118.
- [18] DERWENT R G, JENKIN M E, UTEMBE S R, et al. Secondary organic aerosol formation from a large number of reactive man-made organic compounds[J]. Science of the Total Environment, 2010, 408: 3374-3381.
- [19] VENECEK M A, CARTER W P L, KLEEMAN M J. Updating the SAPRC Maximum Incremental Reactivity (MIR) scale for the United States from 1998 to 2010[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2018, 68(12): 1301-1316.
- [20] GROSJEAN D. In situ organic aerosol formation during a smog episode; estimated production and chemical functionality[J]. Atmospheric Environment Part A General Topics, 1992, 26(6): 953-963.
- [21] 李世杰, 殷宝辉, 赵雪艳, 等. 家具板材排放 VOCs 成分谱及排放因子研究[J]. 环境科学研究, 2020, 33(4): 859-867.
- [22] 齐一谨, 倪经纬, 赵东旭, 等. 邢台市典型行业 VOCs 排放特征研究[J]. 环境科学研究, 2021, 34(10): 2339-2349.
- [23] 钱珍余, 余家燕, 李瀚青, 等. 重庆市汽车整车制造业涂装工序 VOCs 排放特征[J]. 重庆大学学报, 2022, 45(4): 122-133.