

董 静,李顺姬,党小庆,等.关中地区典型行业 VOCs 排放源成分谱及环境影响 [J]. 中国环境科学, 2025,45(2):619-628.

Dong J, Li S J, Dang X Q, et al. Source Composition Spectrum and Environmental Impact of VOCs Emission from Typical Industries in Guanzhong Region [J]. China Environmental Science, 2025,45(2):619-628.

关中地区典型行业 VOCs 排放源成分谱及环境影响

董 静¹,李顺姬^{1,2},党小庆^{1*},屈嘉鑫¹,王 赫¹,吉 硕¹ (1.西安建筑科技大学环境与市政工程学院,陕西 西安 710055; 2.西安市环境保护科学研究院,陕西 西安 710061)

摘要: 持续推进关中地区 VOCs 精细化管理,以西安市和咸阳市为代表,选取包装印刷、电子产品制造、工业涂装、涂料及油墨制造、家具制造和橡胶制品 6 个行业进行样品采集,研究关中地区典型行业 VOCs 排放源成分谱、臭氧生成潜势(OFP)和二次气溶胶生成潜势(SOAFP)。结果表明:包装印刷和工业涂装行业主要排放 VOCs 为含氧挥发性有机物(OVOCs)(53%~73%)和烷烃(17%~34%);电子产品制造行业为 OVOCs(68%)和烯烃(29%);涂料及油墨制造行业以 OVOCs(61%)和芳香烃(22%)为主;家具制造行业以芳香烃(78%)和 OVOCs(19%)为主;橡胶制品行业以烷烃(78%)为主。其中乙醇、丙酮、异丙醇、甲醛、乙酸乙酯、间/对-二甲苯为关中地区典型行业排放的主要特征物种。基于最大增量反应活性法(MIR)和气溶胶生成系数法(FAC),得出 OVOCs、芳香烃和烯烃是 OFP 的主要来源,芳香烃是 SOAFP 的主要来源,主要排放来源为涂料及油墨制造、工业涂装和家具制造行业应重点管控。

关键词: 关中地区; 典型行业; 挥发性有机物(VOCs); 源成分谱; 臭氧生成潜势(OFP); 二次气溶胶生成潜势(SOAFP)

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2025)02-0619-10

Source composition spectrum and environmental impact of VOCs emission from typical industries in Guanzhong Region.

DONG Jing¹, LI Shun-ji^{1,2}, DANG Xiao-qing^{1*}, QU Jia-xin¹, WANG He¹, JI Shuo¹ (1.School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2.Xi'an Academy of Environmental Protection Sciences, Xi'an 710061, China). *China Environmental Science*, 2025,45(2): 619-628

Abstract: PM_{2.5} control in the Guanzhong region has achieved significant progress, but the situation regarding ozone pollution remains severe. To continue advancing the fine management of VOCs (volatile organic compounds) in the Guanzhong region, with Xi'an and Xianyang as representatives, six industries—packaging printing, electronic product manufacturing, industrial coatings, paint and ink manufacturing, furniture manufacturing, and rubber products — were selected for sample collection. This study examines the VOC emission profiles, ozone formation potential (OFP), and secondary aerosol formation potential (SOAFP) of typical industries in the Guanzhong region. The results show that in the packaging printing and industrial coating industries, the primary VOCs emitted are oxygenated volatile organic compounds (OVOCs) (53%~73%) and alkanes (17%~34%); in the electronic product manufacturing industry, they are OVOCs (68%) and alkenes (29%); in the paint and ink manufacturing industry, the main VOCs are OVOCs (61%) and aromatic hydrocarbons (22%); in the furniture manufacturing industry, the primary VOCs are aromatic hydrocarbons (78%) and OVOCs (19%); and in the rubber products industry, alkanes (78%) dominate. Key characteristic species emitted by typical industries in the Guanzhong region include ethanol, acetone, isopropanol, formaldehyde, ethyl acetate, and m-/p-xylene. Based on the Maximum Incremental Reactivity (MIR) method and the Aerosol Formation Coefficient (FAC) method, it was found that OVOCs, aromatic hydrocarbons, and alkenes are the main contributors to OFP, while aromatic hydrocarbons are the primary source of SOAFP. The major emission sources are the paint and ink manufacturing, industrial coatings, and furniture manufacturing industries, which should be prioritized for control.

Key words: Guanzhong Region; typical industries; volatile organic compounds (VOCs); source profile; ozone formation potential (OFP); secondary organic aerosol formation potential (SOAFP)

继“大气十条”和“蓝天保卫战”两大计划颁布之后,2023 年底国务院新出台《空气质量持续改善行动计划》,指出对汾渭平原等重点区域大力推进挥发性有机物(VOCs)、氮氧化物(NO_x)等多污染物的协同减排,同时持续降低细颗粒物(PM_{2.5})浓度。VOCs 是

形成近地面臭氧(O₃)和 PM_{2.5} 的重要前体物^[1-4],有

收稿日期: 2024-08-01

基金项目: 陕西省重点研发计划项目(2024SF-ZDCYL-05-06);陕西省重点研发计划(2024SF-YBXM-569)

* 责任作者, 教授, dangxq@163.com

效控制 VOCs 排放对缓解 O₃ 和 PM_{2.5} 污染至关重要^[1-4].工业源是城市区域 VOCs 的主要排放源,其中印刷、电子、橡胶制品和塑料制品、工业涂装行业所排放的 VOCs 分别约占我国工业源 VOCs 年排放总量的 8.64%、3.34%、2.94%和 15.36%^[5-9],为 VOCs 排放的优先管控行业.近几年,各地区不断优化产业结构、强化源头控制,国内学者针对工业源 VOCs 排放源成分谱进行了大量研究,其中以京津冀^[10-11]、成渝地区^[12-13]和长江三角洲^[14-15]地区为代表.由于所用原辅料、生产工艺、末端处理方式等因素的不同,造成 VOCs 排放特性与环境影响特征因素不尽一致,在实现 VOCs 精细控制方面存在较大局限.构建本地 VOCs 排放源成分谱,是解析本地 VOCs 排放特性的关键步骤,对推动城市 VOCs 管控的精细化与科学化发展至关重要,为制定高效、精准的 VOCs 减排策略及实施有效管控措施提供了坚实的科学依据.

目前,关中地区 PM_{2.5} 治理取得阶段性成果,但 O₃ 防控形势严峻.依据生态环境部发布的 2023 年全国环境空气质量状况,关中地区中咸阳市、西安市和渭南市在 168 个重点城市空气质量排名中分别位列倒数第二、倒数第五和倒数第六.2018~2021 年,关中地区 O₃ 轻度污染天数达到 646d,占总监测天数的 8.84%^[16].王静晞等^[17]首次以我国西北部主要的城市群-关中地区为研究对象,建立了 2011 年关中地区人为源大气污染物排放清单,分析表明 VOCs 的主要排放源为炼焦、涂料等工业生产过程.Li 等^[18]2017 年研究了关中平原秋冬季 VOCs 空间特征及其臭氧和二次有机气溶胶形成潜势.卢立栋等^[19]2022 年分析了关中地区典型煤化工行业排放特征.以上研究均以关中地区为研究对象,探究了季节更迭与工业生产流程对空气质量的影响,关中地区重化产业聚集,缺少对典型行业 VOCs 排放源谱及 O₃ 和二次有机气溶胶(SOA)污染的研究.敖泽林等^[20]在西安市开展了 69 种 VOCs 的在线连续观测,结果表明化工企业排放的废气、交通源和溶剂使用是 VOCs 的主要排放源.Xue 等^[21]通过西安市典型居住-商业区域环境 VOCs 对 O₃ 产生的影响研究,发现溶剂使用源排放的 VOCs 对臭氧生成潜势的贡献高达 60%.溶剂使用源涵盖了多个行业,结合陕西省发布的《挥发性有机物排放控制标准》(DB61/T1061-2017)^[22],在关中地区包装印刷、家具制造、工业涂装、涂料及油墨制造和电子产品

制造行业都是溶剂使用源的重要组成部分.

鉴于此,本研究选择了包装印刷、电子产品制造、工业涂装、涂料及油墨制造、家具制造、橡胶制品 6 个典型行业作为研究对象,补充关中地区典型行业 VOCs 源成分谱,推动城市 VOCs 的精细化管控,并基于最大增量反应活性法(MIR)和气溶胶生成系数法(FAC)探究各行业排放 VOCs 的臭氧生成潜势(OFP)和二次有机气溶胶生成潜势(SOAFP),为 O₃ 和 PM_{2.5} 污染的协同控制提供理论支持.

1 材料与方法

1.1 采样与分析

1.1.1 采样地点 关中地区 2021 年人为源 VOCs 的排放总量为 228.644×10³t,西安和咸阳市的人为源 VOCs 的排放量分别为 95.351×10³t 和 50.758×10³t,约占关中地区人为源 VOCs 排放总量的 64.0%^[16].2023 年 9~10 月在西安市和咸阳市选取典型涉 VOCs 排放行业进行样品采集,主要包括包装印刷、电子产品制造、工业涂装、涂料及油墨制造、家具制造、橡胶制品 6 个重点行业.针对 6 个重点行业选取代表性企业中关键排放环节,共采集 20 个 VOCs 样品,具体采样信息如表 1 所示.

1.1.2 采样方法 参照《固定污染源排气中颗粒物测定与气态污染物采样方法》(GB/T16157-1996)^[23]中有组织废气采样位置、采样频次,在保障正常生产、有机废气处理设施开启的情况下,选择 3L 的苏玛罐,检查苏玛罐采样系统,包括不锈钢取样枪及节流阀连接是否完好.确保所有连接处紧密无泄漏.设置定时采样时间 45min,连接气路,将采样枪伸入烟道内部,入口尽量靠近烟道中心位置.开启采样罐的阀门开始采样,直到定时结束,关闭采样罐的阀门,用密封帽密封.每个企业出口各采集 1 个苏玛罐样品,共采集 20 个有效样品.24h 内预浓缩后,使用气相色谱质谱联用仪进行分析.

1.1.3 样品分析 本文参照《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,对 VOCs 进行定量分析,并将 117 种 VOCs 总和定义为 TVOC,如表 2 所示,分为烷烃 29 种、烯烃 11 种、芳香烃 18 种、含氧挥发性有机物(OVOCs)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-二甲苯物化性质相近,在气相色谱质谱联用

仪上响应时间相近,无法分开定性,所以合并为间/对-二甲苯组分一起讨论.根据《环境空气挥发性有机物的测定罐采样/气相色谱质谱法》(HJ759-2015)^[24]和美国环保署 TO-15 方法,用内壁惰性化处理的不锈钢罐采集样品,经三级冷阱浓缩(美国 Entech7200)和浓缩进样器(Entech7016D)后,进入气质联用仪(安捷伦 7890B+安捷伦 5977B)进行分离检测.每个样品分析前进行空白实验,保证分析的准确性.每个样品重复分析三次,保证分析结果误差 $\leq 10\%$.当样品进样量为 200mL 时,全扫描模式下,目标化合物的检出限为 $(2\sim 50)\times 10^{-12}$,体积分数,标准曲线的相关系数(R^2)均大于 ≥ 0.990 ,具体见表 2.通过与标准物质质谱图和保留时间比较定性,内标法定量.冷阱浓缩仪条件:取样体积 200mL,一级冷阱:捕集温度: -150°C ;捕集流

速:100mL/min;解析温度: 10°C ;阀温: 100°C ;烘烤温度: 150°C ;烘烤时间:15min.二级冷阱:捕集温度: -15°C ;捕集流速:10mL/min;捕集时间:5min;解析温度: 180°C ;解析时间:3.5min;烘烤温度: 190°C ;烘烤时间:15min.三级冷阱:捕集温度: -160°C ;解析时间:2.5min;烘烤温度: 200°C ;烘烤时间:5min.气相色谱分析条件:程序升温:初始温度 35°C ,保持 5min;以 $5^\circ\text{C}/\text{min}$ 速度升温至 150°C ,保持 7min;以 $10^\circ\text{C}/\text{min}$ 速度升温至 200°C ,保持 4min;进样口温度: 150°C ;溶剂延迟时间:5min.载气流速:1.0mL/min.FID 分析条件:FID 温度: 200°C ;氢气流量:30mL/min;空气流量:400mL/min.尾吹流量:25mL/min.质谱参考分析条件:接口温度: 250°C ;离子源温度: 260°C ;扫面方式:EI 全扫描;扫描范围:35~300amu.

表 1 子行业类型及企业采样信息

Table 1 Sub-industry type and sampling information of enterprises

企业编号	行业	子行业类型	排放环节	采样点位	有组织废气处理工艺
1	包装印刷	其他纸制品制造	印刷、发泡、涂胶	有机废气处理设施之后	活性炭吸附
2		书、报刊印刷/平板	印刷、胶装		电捕焦油器+活性炭吸附
3		金属包装容器制造/凹版	喷涂+烘干、油墨印刷+烘干		湿式水旋+干式过滤+活性炭吸附+紫外光(UV)光解+活性炭吸附
4	电子产品制造	集成电路制造	刷胶(含清洗)、烘烤、植球、回流焊、压膜	有机废气处理设施之后	活性炭吸附
5		锂离子电池制造	配料、搅拌制浆、涂覆、终端焊接、Can-cap 激光焊接、激光密封		活性炭吸附
6		集成电路制造	晶刻、蚀刻、网版印刷		沸石转轮吸附脱附+蓄热式燃烧
7	工业涂装	汽车零部件及配件制造	调漆喷漆	有机废气处理设施之后	水帘柜+干式过滤+UV 光解+活性炭吸附
8		安全、消防用金属制品制造	注胶、热压、喷塑+烘干		活性炭吸附
9		铝压延加工	天然气直燃固化炉		干式过滤+活性炭吸附
10		金属表面处理及热处理加工	喷漆、烘干		水帘柜+干式过滤+UV 光解+活性炭吸附
11	涂料及油墨制造	涂料制造	混合、分散搅拌、研磨、灌装	有机废气处理设施之后	干式过滤+活性炭吸附
12			挤出		布袋除尘+活性炭吸附
13			分散、研磨、搅拌		UV 光解+活性炭吸附
14			挤出、搅拌		活性炭吸附
15	家具制造	木制家具制造	喷漆、烘干	有机废气处理设施之后	水帘柜+干式过滤+UV 光解+活性炭吸附
16			喷漆、烘干		干式过滤+活性炭吸附
17			喷漆、贴皮、烘干		UV 光解+活性炭吸附
18			喷漆、烘干		活性炭吸附
19	橡胶制品	轮胎制造	硫化	有机废气处理设施之后	等离子体+活性炭吸附
20		橡胶零件制造	平板硫化、硫化、开炼		UV 光解+低温等离子体+活性炭吸附

1.1.4 质量控制与保证 采样前使用罐清洗装置对采样罐在 60°C 进行加温清洗,清洗时使用高纯度氮气(纯度 $\geq 99.999\%$)同时对采样罐进行加

湿,降低罐体活性吸附.清洗完毕后,将采样罐抽至真空并加湿,关闭阀门,用密封帽密封,待用.每清洗 10 个采样罐应至少取一只罐注入高纯氮气

分析,确定清洗过程是否清洁.每个被测高浓度样品的真空罐在清洗后,分析并检测罐中浓度,得到检测结果应低于检出限,确保罐内清洗达到采样要求.

表2 VOCs分析组分、方法检出限及标准曲线的相关系数汇总

Table 2 Summary of the correlation coefficients for analytical components, method detection limits, and standard curves of VOCs

VOCs 类别	序号	VOCs 物种	方法检出限 ($\times 10^{-12}$, 体积分数)	相关系数(R^2)	VOCs 类别	序号	VOCs 物种	方法检出限 ($\times 10^{-12}$, 体积分数)	相关系数(R^2)
烷烃	1	乙烷	40	0.997	OVOCs	60	异丙醇	8	0.999
	2	丙烷	19	0.998		61	甲基叔丁基醚	5	0.999
	3	异丁烷	24	0.999		62	乙酸乙烯酯	6	0.999
	4	正丁烷	17	0.999		63	乙酸乙酯	6	0.999
	5	异戊烷	13	0.999		64	四氢呋喃	7	0.999
	6	正戊烷	19	0.999		65	1,4-二氧六环	7	0.999
	7	2,2-二甲基丁烷	4	0.999		66	甲基丙烯酸甲酯	5	0.999
	8	环戊烷	13	0.999		67	4-甲基-2-戊酮	7	0.999
	9	2,3-二甲基丁烷	4	0.999		68	2-己酮	8	0.999
	10	2-甲基戊烷	24	0.999		69	甲醛	20	0.999
	11	3-甲基戊烷	6	0.999		70	乙醛	13	0.999
	12	正己烷	18	0.999		71	丙烯醛	19	0.999
	13	甲基环戊烷	8	0.999		72	丙醛	3	0.999
	14	2,4-二甲基戊烷	4	0.999		73	甲基丙烯醛	3	0.999
	15	环己烷	5	0.999		74	正丁醛	6	0.999
	16	2-甲基己烷	7	0.999		75	2-丁酮	8	0.999
	17	2,3-二甲基戊烷	7	0.999		76	丁烯醛	3	0.999
	18	3-甲基己烷	6	0.999		77	戊醛	48	0.999
	19	2,2,4-三甲基戊烷	10	0.999		78	正己醛	13	0.999
	20	正庚烷	7	0.999		79	邻甲基苯甲醛	6	0.999
	21	甲基环己烷	5	0.999		80	二氯二氟甲烷	2	0.999
	22	2,3,4-三甲基戊烷	7	0.999		81	一氯甲烷	8	0.999
	23	2-甲基庚烷	5	0.999		82	1,2-二氯四氟乙烷	12	0.999
	24	3-甲基庚烷	6	0.999		83	氯乙烯	5	0.999
	25	正辛烷	5	0.999		84	一溴甲烷	3	0.999
	26	正壬烷	4	0.999		85	氯乙烷	2	0.999
	27	正癸烷	2	0.999		86	一氟三氯甲烷	2	0.999
	28	正十一烷	4	0.999		87	1,1-二氯乙烯	3	0.999
	29	正十二烷	4	0.999		88	二氯甲烷	4	0.999
	30	乙烯	39	0.998		89	三氟氯甲烷	3	0.999
	31	丙烯	42	0.997		90	反-1,2-二氯乙烯	3	0.999
烯烃	32	正丁烯	17	0.999	91	1,1-二氯乙烷	3	0.999	
	33	反-2-丁烯	10	0.999	92	顺-1,2-二氯乙烯	5	0.999	
	34	顺-2-丁烯	6	0.999	93	氯仿/三氯甲烷	3	0.999	
	35	1-戊烯	13	0.999	94	1,2-二氯乙烷	2	0.999	
	36	异戊二烯	5	0.999	95	1,1,1-三氯乙烷	3	0.999	
	37	反-2-戊烯	12	0.999	96	四氯化碳	4	0.999	
	38	顺-2-戊烯	6	0.999	97	1,2-二氯丙烷	2	0.999	
	39	1-己烯	3	0.999	98	一溴二氯甲烷	3	0.999	
	40	1,3-丁二烯	29	0.999	99	三氯乙烯	2	0.999	
	芳香烃	41	苯	15	0.999	100	顺-1,3-二氯丙烯	4	0.999
42		甲苯	26	0.999	101	反-1,3-二氯丙烯	3	0.999	
43		乙苯	4	0.999	102	1,1,2-三氯乙烷	1	0.999	
44		间,对-二甲苯	8	0.999	103	二溴氯甲烷	1	0.999	
45		苯乙烯	6	0.999	104	1,2-二溴乙烷	2	0.999	
46		邻-二甲苯	3	0.999	105	四氯乙烯	4	0.999	

续表 2

VOCs 类别	序号	VOCs 物种	方法检出限 ($\times 10^{-12}$, 体积分数)	相关系数(R^2)	VOCs 类别	序号	VOCs 物种	方法检出限 ($\times 10^{-12}$, 体积分数)	相关系数(R^2)
	47	异丙基苯	4	0.999		106	氯苯	1	0.999
	48	正丙基苯	3	0.999		107	三溴甲烷	2	0.999
	49	间-乙基甲苯	2	0.999		108	1,1,2,2-四氯乙烷	8	0.999
	50	对-乙基甲苯	3	0.999		109	氯代甲苯	8	0.999
	51	1,3,5-三甲苯	1	0.999		110	1,3-二氯苯	8	0.999
	52	邻-乙基甲苯	3	0.999		111	对二氯苯	8	0.999
	53	1,2,4-三甲苯	2	0.999		112	邻二氯苯	8	0.999
	54	1,2,3-三甲苯	2	0.999		113	1,2,4-三氯苯	1	0.999
	55	间-二乙基苯	2	0.999		114	六氯-1,3-丁二烯	2	0.999
	56	对-二乙基苯	2	0.999	乙炔	115	乙炔	49	0.998
	57	萘	2	0.999	二硫化碳	116	二硫化碳	10	0.999
OVOCs	58	乙醇	2	0.999					
	59	丙酮	30	0.999					

样品采集过程中严格遵循《固定源废气监测技术规范》(HJ/T397-2007)^[20]和《固定污染源监测质量保证与质量控制技术规范(试行)》(HJ/T373-2007)^[26]等相关技术规范。每次进样时,同时进 50mL 内标使用气(溴氯甲烷、1,4-二氟苯、氯苯-d5、1-溴-4-氟苯)来指示仪器的稳定性。使用苏玛罐采样结束后关闭阀门,用密封帽密封防止样品泄漏,运输过程中避免光照,保证样品的有效性。

1.2 臭氧生成潜势计算方法

臭氧生成潜势(OFP)已被广泛用于量化并预测 VOCs 的光化学臭氧形成反应性。本研究使用最大增量反应活性法(MIR)估算 VOCs 组分的臭氧形成潜势,其计算式见:

$$\text{OFP}_i = [\text{VOCs}_i] \cdot \text{MIR}_i \quad (1)$$

式中:OFP_i 表示 VOCs 物种 *i* 排放的臭氧生成值, mg/m³; [VOCs]_i 表示废气处理设施出口 VOCs 物种 *i* 的浓度, mg/m³; MIR_i 表示 VOCs 物种 *i* 的 MIR 系数, 取值于广州地区以及 Cater 等的 MIR 值, 当不同研究中同一物种的 MIR 系数出现不同, 采用最新研究中的 MIR 系数^[27-29], 总计包含 102 种组分, 其中烷烃 29 种、烯烃 11 种、芳香烃 17 种、OVOCs 21 种、卤代烃 22 种、炔烃 1 种和二硫化碳 1 种。

1.3 二次有机气溶胶生成潜势计算方法

二次有机气溶胶生成潜势(SOAFP)采用气溶胶生成系数法(FAC)估算 VOCs 组分产生的二次气溶胶生成量, 计算式见:

$$\text{SOAFP}_j = \frac{[\text{VOCs}_i] \cdot \text{FAC}_i}{(1 - F_{\text{VOCr}})} \quad (2)$$

式中:SOAFP_i 表示 VOCs 物种 *i* 排放的二次有机气溶胶生成值, mg/m³; [VOCs]_i 表示废气处理设施出口 VOCs 物种 *i* 的浓度, mg/m³; FAC_i 表示 VOCs 物种 *i* 的气溶胶生成系数, F_{VOCr} 为 VOCs 物种参与反应的分数(%), FAC_i 和 F_{VOCr} 均取值于 Grosjean 的烟雾箱实验数据^[30-31], 总计包含 29 种组分, 其中烷烃 12 种、烯烃 1 种和芳香烃 16 种。

1.4 源反应活性计算方法

在不考虑 VOCs 排放强度的情况下, 采用源反应活性(SR)比较和分析 VOCs 组分产生的 OFP 和 SOAFP^[7-8], 其计算式见:

$$\text{SR}(\text{O}_3) = [f_i] \cdot \text{MIR}_i \quad (3)$$

$$\text{SR}(\text{SOA}) = \frac{[f_i] \cdot \text{FAC}_i}{(1 - F_{\text{VOCr}})} \quad (4)$$

式中:SR(O₃) 为 VOCs 物种 *i* 生成 O₃ 的源活性因子; [f]_i 为 VOCs 物种 *i* 的质量分数, %; SR(SOA) 为 VOCs 物种 *i* 生成 SOAFP 的源活性因子。

2 结果与分析

2.1 VOCs 排放特征

从图 1 可以看出, 不同子行业类型 VOCs 排放特征存在明显差异。包装印刷行业中企业 1 与企业 2 都属于纸质报刊类印刷, 排放以 OVOCs 为主(76%~96%), 而企业 3 金属包装印刷主要排放以烷烃(50%), 其次是 OVOCs(23%)。电子产品制造行业中企业 4 和企业 6 都属于集成电路, 但由于工序不同 VOCs 组成也不同, 企业 4 中 VOCs 主要组成为 OVOCs 和芳香烃, 而企业 6 中 VOCs 排放主要是烯烃(77%), 企业 5

属于锂离子电池制造子行业,其中 OVOCs(75%)占比最多.工业涂装行业中企业 7~企业 10 的 VOCs 排放一致,都是 OVOCs(45%~89%)最高,但企业 9 属于铝压延加工子行业,OVOCs 仅占 45%,烷烃(42%)占比较其他企业高.涂料及油墨制造行业中企业 11、企业 12 和企业 14 类似,均以 OVOCs(71%~78%)为主,企业 13 则以芳香烃(65%)为主.家具制造行业各企业排放组分均以芳香烃(47%~84%)为主,其次是 OVOCs(14%~41%).橡胶制品行业中轮胎制造和橡胶零件制造两个子行业排放特征一致,主要是烷烃(52%~80%)和 OVOCs(19%~44%).

本研究以行业内所有企业有组织排放 VOCs 的平均值,衡量该行业整体水平.不同行业的 TVOC 浓度及组成,如图 2 所示.橡胶制品($6.40\text{mg}/\text{m}^3$)和电子制造行业($6.30\text{mg}/\text{m}^3$)TVOC 的浓度相对最高,其次分别为家具制造 ($3.55\text{mg}/\text{m}^3$)、工业涂装 ($3.34\text{mg}/\text{m}^3$)、包装印刷($1.89\text{mg}/\text{m}^3$)和涂料及油墨制造($1.69\text{mg}/\text{m}^3$).

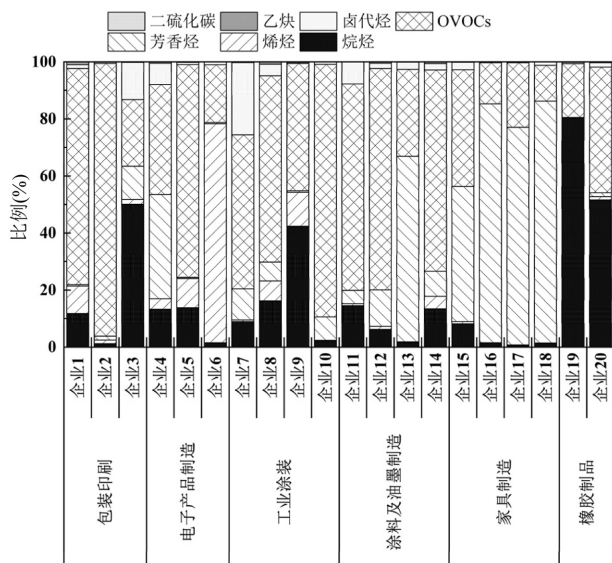


图 1 不同子行业 VOCs 浓度及组成

Fig.1 Concentration and composition of VOCs in different sub-sectors

总体看来,不同行业 VOCs 浓度占比排前三的为 OVOCs、烷烃和芳香烃.包装印刷行业 VOCs 主要组成为 OVOCs(73%),其次为烷烃(17%);电子产品制造行业 VOCs 主要组成为 OVOCs(68%),其次是烯烃(29%);工业涂装行业 VOCs 主要组成为 OVOCs(53%)、烷烃(34%)和烯烃(9%);涂料及油墨

制造行业中 OVOCs 占比(61%)最高,其次是芳香烃(22%)和烷烃(10%);家具制造行业 VOCs 排放主要为芳香烃(78%)和 OVOCs(19%);橡胶制品行 VOCs 主要组成为烷烃(78%),其次是 OVOCs(21%).

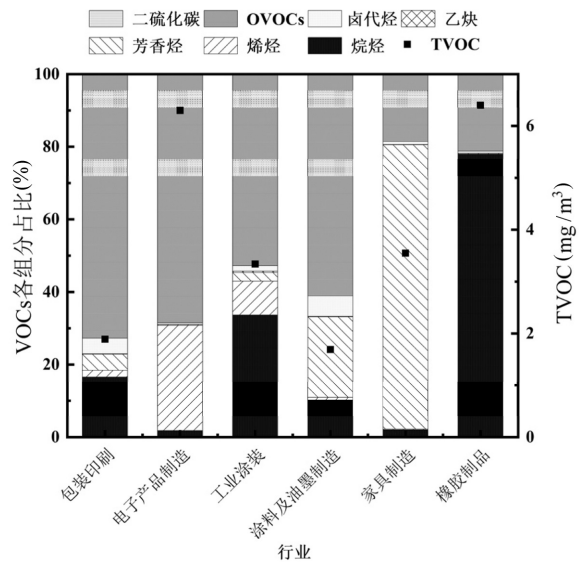


图 2 不同行业 VOCs 浓度及组成

Fig.2 Concentration and composition of VOCs in different industries

2.2 VOCs 排放源谱

各行业排放的 VOCs 源成分谱如图 3 所示.本研究将典型行业的 TVOC 排放总量中累积占比超过 60.0%的物种确定为特征物种.包装印刷行业排放以乙醇(15.35%)、2-丁酮(15.13%)、乙酸乙酯(11.93%)、异丙醇(7.27%)、甲醛(5.96%)和乙醛(5.18%)为主,这是由于凹版印刷中使用的水性 UV 油墨中含有 3%左右的无水乙醇作为稀释剂^[32],溶剂型油墨主要 VOCs 组分为乙酸乙酯、异丙醇等^[33],平版印刷过程中则多使用以异丙醇为主要组分的植物基油墨和润版液^[34].电子产品制造行业排放以丙酮(52.84%)与乙烯(27.13%)为主,丙酮主要源于电子产品制造所用清洁剂^[35-36],乙烯则源于蓄热式催化燃烧末端处理装置^[37].工业涂装排放以甲醛(29.92%)、乙烷(24.00%)为主,其次是丙酮(8.62%)、乙烯(8.03%)和丙烷(6.99%).涂料及油墨制造行业以乙酸乙酯(20.27%)、异丙醇(17.52%)、乙醇(8.86%)和间/对-二甲苯(8.73%)为主.家具制造行业涉 VOCs 排放的工艺为喷漆和烘干,排放以间/对-二甲苯(24.73%)、邻-二甲苯(23.63%)、乙苯(15.15%)和甲苯(13.19%)和乙酸乙酯(8.96%)为主,甲苯、间/对-二甲苯、乙酸乙酯、丙酮和 2-丁酮主

要是木器漆溶剂型涂料和聚氨酯胶黏剂的主要成分^[33,38]。由于酯类和醛酮类作为稀释剂很好地替代了苯系物,例如乙醇作为稀释剂,异丙醇和乙酸乙酯用于生产粘合剂和胶黏剂^[36,38-39]等,因此乙醇、异丙醇和乙酸乙酯在包装印刷的印刷工艺、工业涂装的喷涂工艺、家具制造的喷漆工艺及涂料生产过程中挥发较多。正庚烷(25.89%)、环己烷(19.79%)等为橡胶制品行业的主要排放物种,橡胶制品制造中使用的水性粘合剂会释放出复杂的正链烷烃和支链烷烃混合物^[40]。由上可知,关中地区典型行业 VOCs 排放的主要特征物种为丙酮、乙酸乙酯、甲醛、乙醇、间/对二甲苯和异丙醇。

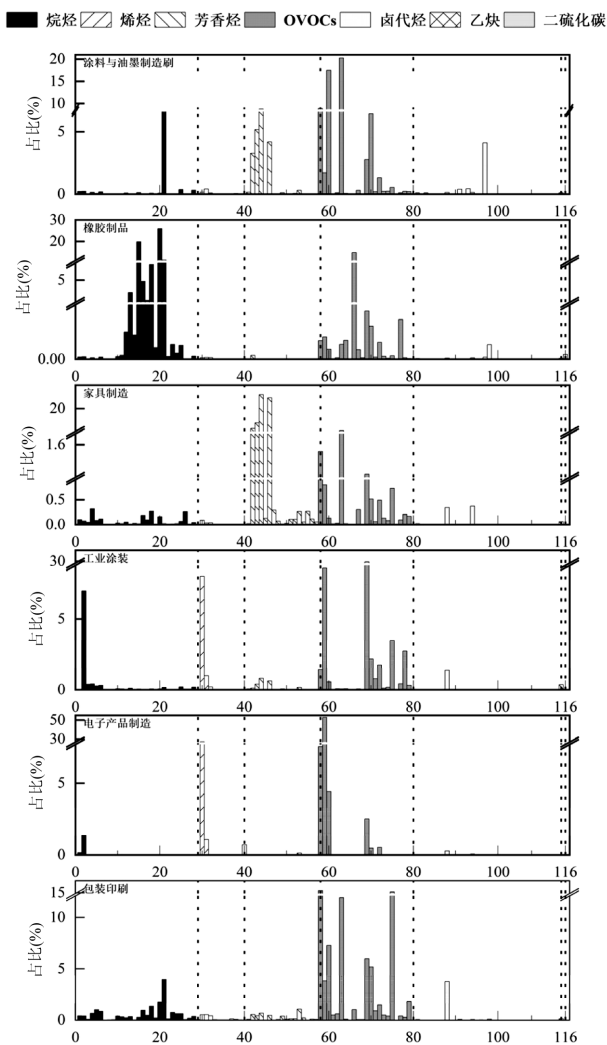


图 3 典型行业 VOCs 源谱结果

Fig.3 VOCs source spectrum results in typical industries

横坐标序号对应表 2 中 VOCs 组分

在包装印刷行业中 OVOCs 占主导地位,其特征物种为乙醇、乙酸乙酯、异丙醇,这与成都市^[39]、江苏省^[9]和京津冀^[34]的研究结果一致。由于企业 3 采用凹版印刷工艺,该工艺使用的溶剂主要包括醛酮类和酯类化合物^[41],所排放的 2-丁酮占包装印刷行业 TVOCs 的 15.02%,所以本研究中 2-丁酮较京津冀的研究结果偏高。

电子制造行业 VOCs 主要是 OVOCs 和烯烃,其特征物种为丙酮、乙烯,与北京市的研究结果相近^[37]。本研究中乙烯占比较高,原因是企业 6 使用燃烧装置作为废气处理设施,乙烯排放含量占电子制造行业 TVOCs 的 27.1%,这与北京市的研究结果一致。

工业涂装行业 VOCs 主要为 OVOCs,其特征物种为甲醛、乙烷、丙酮,这与深圳市^[42]的研究结果相近。由于企业 9 中 VOCs 排放环节中直燃固化炉助燃剂天然气中含有乙烷,因此本研究中乙烷组分较高。

涂料及油墨制造行业 VOCs 主要为 OVOCs 和芳香烃,其特征物种是乙酸乙酯、异丙醇、乙醇、间/对-二甲苯、甲基环己烷、乙醛、乙苯、邻-二甲苯,这与郑州市^[43]的研究结果相近,但本研究中乙醇(8.86%)占比高于郑州市。家具制造行业 VOCs 排放以芳香烃和 OVOCs 为主,特征物种为间/对二甲苯、邻二甲苯、乙苯、甲苯和乙酸乙酯,与郑州市^[43]和邢台市^[44]的研究结果相近。但本研究中间/对二甲苯(19.86%)较邢台市的间/对二甲苯(53.3%)低,原因在于政府大力推进低 VOCs 原辅材料替代,促使关中地区企业多采用低苯系物含量的原辅料,从源头上有效减少了芳香烃的排放,与此同时,也间接影响了典型工业 VOCs 排放源谱的变化,具体表现为 OVOCs 的排放量大幅上升。

橡胶制品行业 VOCs 排放以烷烃为主,与威海市⁰的研究结果一致,特征物种为正庚烷、环己烷、甲基环己烷、3-甲基己烷、2-甲基己烷、正庚烷、甲基环戊烷和 3-甲基庚烷,特征物种在 TVOCs 中占比超过 50%。本研究中芳香烃含量低于威海市,原因是威海市的研究中硫化工艺添加的溶剂为苯系物,而本研究所使用的溶剂为酯类和醛酮类。综上所述,关中地区典型行业源 VOCs 组分与京津冀、珠三角、山东、郑州等较发达地区相同,但 VOCs 特征物种各有不同,主要是由于企业所用原辅料及后处理设施具有差异,这也是建立关中地区 VOCs 排放成

2.3 与其他研究结果对比

分谱的必要性。

2.4 VOCs 环境影响

基于式(1)~(4)计算不同行业排放的 VOCs 对 O₃ 和 SOA 贡献及源反应活性如图 4 所示。从 SOAFP 中 VOCs 的种类分布来看,芳烃的贡献明显占主导地位。OVOCs 对包装印刷、工业涂装、橡胶制品行业 OFP 贡献较大,贡献率达 69%~76%;烯烃是电子产品制造行业 OFP 的主要贡献组分,贡献率为 79%;家具制造行业和涂料及油墨制造行业 OFP 的主要

贡献组分为芳香烃,贡献率达 47%~81%,其次是 OVOCs,贡献率达 18%~44%。由于烯烃类 VOCs (5.49~15.16)的 MIR 值普遍高于 OVOCs (0.36~15.61)和烷烃(0.28~2.39),尽管在电子制造行业中烯烃的浓度明显低于 OVOCs,但烯烃在 OFP 贡献中仍占主导地位;同理,工业涂装行业中烷烃浓度皆大于烯烃,但烯烃对 OFP 的贡献大于烷烃。因此,综合考虑 VOCs 的排放浓度及其化学反应性特征,是准确评估并有效控制大气 O₃ 污染的关键所在。

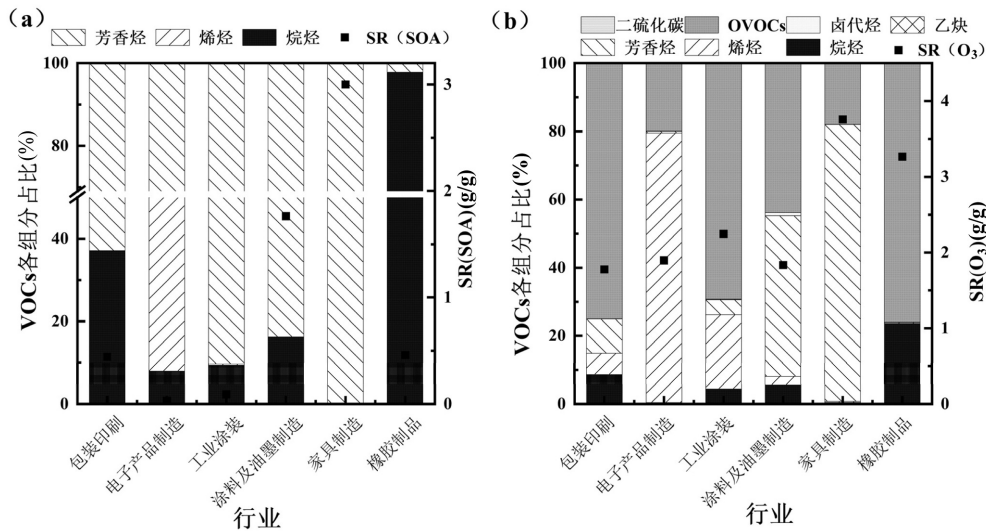


图 4 (a)典型行业 SOAFP 组成贡献和 SR(SOA)值及(b)OFP 组成贡献和 SR(O₃)值

Fig.4 (a)SOAFP compositional contributions and SR(SOA) values for typical industries,(b) OFP composition contribution and SR(O₃) value

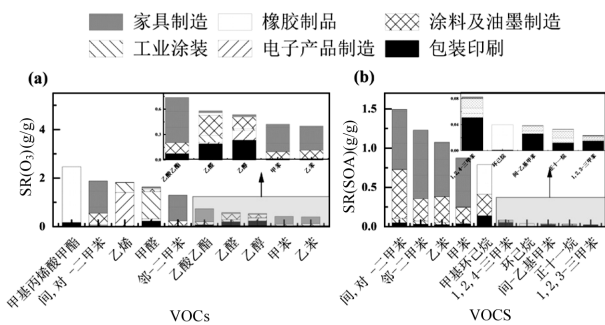


图 5 典型行业(a) SR(O₃)和(b) SR(SOA)中排名前 10 位 VOCs
Fig.5 Top 10VOCs in typical industries (a)SR(O₃) and (b) SR(SOA)

本研究采用 SR 值比较分析不同行业 VOCs 的相对排放活性。行业 SR(SOA)值依次为家具制造(3g/g)、涂料及油墨制造(1.76g/g)、橡胶制品(0.46g/g)和包装印刷(0.41g/g)行业,电子产品制造和工业涂装行业的 SR(SOA)均低于 0.02g/g。各行业 SR(O₃)值

依次为家具制造(3.76g/g)、橡胶制品行业(3.27g/g)、工业涂装(2.25g/g)、电子产品制造(1.90g/g)、涂料及油墨制造(1.84g/g)和包装印刷行业(1.78g/g)。

在典型行业中,对 SR(O₃)和 SR(SOA)贡献率排名前 10 的 VOCs 如图 5 所示。对 SR(O₃)贡献较大的 VOCs 为甲基丙烯酸甲酯、间,对-二甲苯、乙烯、甲醛和邻-二甲苯,主要来自工业涂装、家具制造和涂料及油墨制造行业。间/对二甲苯、邻二甲苯、乙苯、甲苯和甲基环己烷是 SR(SOA)的主要贡献组分,家具制造和涂料及油墨制造是对 SR(SOA)贡献最大的两个行业。因此,涂料及油墨制造、工业涂装和家具制造应为重点监管的行业。

3 结论

3.1 不同行业 VOCs 浓度占比排前三的为 OVOCs、烷烃和芳香烃。包装印刷和工业涂装行业

主要排放 VOCs 为 OVOCs(53%~73%)和烷烃(17%~34%);电子产品制造行业为 OVOCs(68%)和烯烃(29%);涂料及油墨制造行业以 OVOCs(61%)和芳香烃(22%)为主;家具制造行业以芳香烃(78%)和 OVOCs(19%)为主;橡胶制品行业以烷烃(78%)为主.

3.2 丙酮、乙酸乙酯、甲醛、乙醇、间/对二甲苯和异丙醇为关中地区典型行业排放的主要特征物种.包装印刷行业特征物种为乙醇、乙酸乙酯和异丙醇;电子制造行业特征物种为丙酮和乙烯;工业涂装行业主要是甲醛、乙烷和丙酮为特征物种;涂料及油墨制造行业特征物种为乙酸乙酯、异丙醇、乙醇和间/对-二甲苯;家具制造行业特征物种为间/对-二甲苯、邻-二甲苯、乙苯、甲苯和乙酸乙酯;橡胶制品行业特征物种为正庚烷、环己烷.

3.3 基于 MIR 法和 FAC 法,OVOCs、芳香烃和烯烃是 OFP 的主要来源,芳香烃是 SOAFP 的主要来源.芳香烃类的间/对二甲苯、邻二甲苯、乙苯和甲苯均为 SR(O₃)和 SR(SOA)的主要贡献组分,主要排放来源为涂料及油墨制造、工业涂装和家具制造行业.基于对 O₃ 和 PM_{2.5} 的协同管控,涂料及油墨制造、工业涂装和家具制造行业应为重点管控行业.

参考文献:

- [1] Cao X, Yi J, Li Y, et al. Characteristics and source apportionment of volatile organic compounds in an industrial area at the Zhejiang-Shanghai Boundary, China [J]. *Atmosphere*, 2024,15(2):237.
- [2] Xiang S, Liu J, Tao W, et al. Control of both PM_{2.5} and O₃ in Beijing-Tianjin-Hebei and the surrounding areas [J]. *Atmospheric Environment*, 2020,224:117259-117259.
- [3] Shao M, Lv S, Wei Y, et al. The various synergistic impacts of precursor emission reduction on PM_{2.5} and O₃ in a typical industrial city with complex distributions of emissions [J]. *The Science of the Total Environment*, 2024,940173497-173497.
- [4] Wang H, Sun S, Nie L, et al. A review of whole-process control of industrial volatile organic compounds in China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2023,123:127-139.
- [5] Wang R, Wang, L L, Li Y Y, et al. The reward and penalty for ozone pollution control caused by natural sources and regional transport: A case study in Guangdong province [J]. *Science of The Total Environment*, 2024,174984.
- [6] Liu Y, Lu X, Zhang X, et al. The newest emission inventory of anthropogenic full-volatility organic in Central China [J]. *Atmospheric Research*, 2024,300:107245.
- [7] Xin G, Kaitao C, Min C, et al. Study on the Fingerprint and Atmospheric Activity of Volatile Organic Compounds from Typical Industrial Emissions [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2023,20(4):3517-3517.
- [8] 黄沛荣,朱 波,张 月,等.PM_{2.5} 与 O₃ 协同控制视角下深圳市工业 VOCs 源谱特征 [J]. *中国环境科学*, 2022,42(8):3473-3482.
- [9] Huang P R, Zhu B, Zhang Y, et al. Source profile characteristics of industrial VOCs in Shenzhen from the perspective of PM_{2.5} and O₃ synergistic control [J]. *China Environmental Science*, 2022,42(8):3473-3482.
- [9] 徐遵主,熊红红,张宇威,等.江苏省典型工业源挥发性有机物排污特征与减排潜力分析 [J]. *环境工程学报*, 2024,18(2):547-559.
- [10] Xu Z Z, Xiong H H, Zhang Y W, et al. Emission characteristics and emission reduction potential of volatile organic compounds from typical industrial sources in Jiangsu Province [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2024,18(2):547-559.
- [10] Zhou B A, Hu J, Qi Y, et al. Atmospheric VOCs and their contribution to O₃ and SOA formation in summer of Huairou District, Beijing City [J]. *Journal of University of Chinese Academy of Sciences*, 2023, 40(1):39-49.
- [11] Wang H L, Xue S, Hao R, et al. Emission characteristics and ozone formation potential assessment of VOCs from typical metal packaging plants [J]. *Atmosphere*, 2021,13(1):57-57.
- [12] Tan Q, Liu H, Xie S, et al. Temporal and spatial distribution characteristics and source origins of volatile organic compounds in a megacity of Sichuan Basin, China [J]. *Environmental Research*, 2020, 185109478.
- [13] Zhou Z, Tan Q, Deng Y, et al. Compilation of emission inventory and source profile database for volatile organic compounds: A case study for Sichuan, China [J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2020,11(1):105-116.
- [14] Wang Q L, Li S J, Dong M L, et al. VOCs emission characteristics and priority control analysis based on VOCs emission inventories and ozone formation potentials in Zhoushan, Atmospheric Environment, 2018,18:234-241.
- [15] 王东方.工业园区典型 VOCs 污染过程精细化溯源 [J]. *中国环境科学*, 2022,42(2):585-592.
- [15] Wang D F, Fine source tracing of typical VOCs pollution episodes around industrial park. [J]. *China Environmental Science*, 2022,42(2):585-592.
- [16] 王 星,霍艾迪,吕继强,等.关中地区大气臭氧污染变化特征及其来源解析 [J]. *环境科学*, 2024,45(7):3789-3798.
- [16] Wang X, Huo A D, LV J Q, et al. Variation characteristics and source analysis of atmospheric ozone pollution in Guanzhong Region [J]. *Environmental Science*, 2024,45(7):3789-3798.
- [17] 王静晔,曹国良,韩 蕾,等.关中地区人为源大气污染物排放清单研究 [J]. *安全与环境学报*, 2015,15(5):282-287.
- [17] Wang J X, Cao G L, Han L, et al. Probe to the anthropogenic air pollutant emission inventory in Guanzhong Region, Shaanxi [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2015,15(5):282-287.
- [18] Li J H, D S X, T A, et al. Spatial characteristics of VOCs and their ozone and secondary organic aerosol formation potentials in autumn and winter in the Guanzhong Plain, China. [J]. *Environmental research*, 2022,211113036-113036.
- [19] 卢立栋,王 浩,李媛媛,等.关中地区典型煤化工行业 VOCs 排放系数与特征研究 [J]. *煤化工*, 2022,50(4):15-20.
- [19] Lu L D, Wang H, Li Y Y, et al. Research on property of jet fuel from direct coal liquefaction process and its airworthiness certification process [J]. *Coal Chemical Industry*, 2022,50(4):15-20.
- [20] 敖泽林,王红磊,徐 灿,等.西安大气挥发性有机物污染特征及臭氧生成潜势分析 [EB/OL]. *地球与环境*, (2024-07-04).<http://kns.cnki.net/kcms/detail/52.1139.p.20240702.1441.002.html>.
- [20] Ao Z L, Wang H L, Xu C, et al. Volatile Organic Compounds Pollution and Ozone Generation Potential in xi'an [EB/OL]. *Earth and*

- Environment. (2024-07-04).<http://kns.cnki.net/kcms/detail/52.1139.p.20240702.1441.002.html>.
- [21] Xue Y G, Wang L Q, Liu S X, et al. High impact of vehicle and solvent emission on the ambient volatile organic compounds in a major city of northwest China [J]. *Chinese Chemical Letters*, 2022,33(5):2753-2756.
- [22] DB 61/T 1061-2017 挥发性有机物排放控制标准 [S].
DB 61/T 1061-2017 Emission control standard of volatile organic compounds [S].
- [23] GB/T16157-1996 固定污染源排气中颗粒物测定与气态污染物采样方法 [S].
GB/T 16157-1996 The determination of particulates and sampling methods of gaseous pollutants from exhaust gas of stationary source [S].
- [24] HJ 759-2015 环境空气挥发性有机物的测定 罐采样/气相色谱-质谱法 [S].
HJ 759-2015 Ambient air-Determination of volatile organic compounds-Collected by specially-prepared canisters and analyzed by gas chromatography/mass spectrometry [S].
- [25] HJ/T 397-2007 固定源废气监测技术规范 [S].
HJ/T 397-2007 Technical specifications for emission monitoring of stationary source [S].
- [26] HJ/T 373-2007 固定污染源监测质量保证与质量控制技术规范(试行) [S].
HJ/T 373-2007 Technical specifications of quality assurance and quality control for monitoring of stationary pollution source(on trial) [S].
- [27] Zhang Y N, Xue L K, Carter W P L, et al. Development of ozone reactivity scales for volatile organic compounds in a Chinese megacity [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2021,21(14):11053-11068.
- [28] Zhang C, Song Y, Wang H, et al. Observation-based estimations of relative ozone impacts by using volatile organic compounds reactivities [J]. *Environmental Science & Technology Letters*, 2022, 9(1):10-15.
- [29] Carter P W, H G. Development of revised SAPRC aromatics mechanisms [J]. *Atmospheric Environment*, 2013,77:404-414.
- [30] GROSJEAN D. In situ organic aerosol formation during a smog episode: Estimated production and chemical functionality [J]. *Atmospheric Environment*, 1992,26(6):953-963.
- [31] GROSJEAN D, Seinfeld J H. Parameterization of the formation potential of secondary organic aerosols [J]. *Atmospheric Environment* (1967), 1989,23(8):1733-1747.
- [32] 汪世宁,崔江水,罗弘宇,等.印刷行业典型挥发性有机物的排放特征与管控措施综述 [J]. *环境工程*, 2023,41(S1):306-313,319.
Wang S N, Cui J S, Luo H Y, et al. A review of emission characteristics and control measures of typical volatile organic compounds in the printing industry [J]. *Environmental Engineering*, 2023,41(S1):306-313,319.
- [33] 梁小明,陈来国,孙西勃,等.基于原料类型及末端治理的典型溶剂使用源 VOCs 排放系数 [J]. *环境科学*, 2019,40(10):4382-4394.
Liang X M, Chen L G, Sun X B, et al. Raw materials and end treatment-based emission factors for Volatile Organic Compounds (VOCs) from typical solvent use sources [J]. *Environmental Science*, 2019,40(10):4382-4394.
- [34] 刘文文,方莉,郭秀锐,等.京津冀地区典型印刷企业 VOCs 排放特征及臭氧生成潜势分析 [J]. *环境科学*, 2019,40(9):3942-3948.
Liu W W, Fang L, Guo X R, et al. Emission characteristics and ozone formation potential of VOCs in printing enterprises in Beijing-Tianjin-Hebei [J]. *Environmental Science*, 2019,40(9):3942-3948.
- [35] 李巧萍,吴凯露,吕星安,等.东阳市工业园区大气污染物时空分布特征分析 [J]. *环境污染与防治*, 2023,45(12):1689-1694,1698.
Li Q P, Wu K L, Hua X H, et al. Spatiotemporal distribution characteristics of atmospheric pollutants in Dongyang industrial park [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2023,45(12):1689-1694,1698.
- [36] 刘瑞,姚震,化晓卉,等.北京市典型溶剂使用类园区 VOCs 污染特征及来源解析 [J]. *环境科学*, 2024,45(10):5661-5670.
Liu R, Yao Z, Hua X H, et al. Pollution characteristics and source apportionment of volatile Organic Compounds in Typical Solvent-used Industrial Parks in Beijing [J]. *Environmental Science*, 2024,45(10):5661-5670.
- [37] 莫梓伟,陆思华,李悦,等.北京市典型溶剂使用企业 VOCs 排放成分特征 [J]. *中国环境科学*, 2015,35(2):374-380.
Mo Z W, Lu S H, Li Y, et al. Emission characteristics of volatile organic compounds (VOCs) from typical solvent use factories in Beijing [J]. *China Environmental Science*, 2015,35(2):374-380.
- [38] Liang X M, Sun X B, Xu J T, et al. Improved emissions inventory and VOCs speciation for industrial OFP estimation in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2020,745:140838.
- [39] 包亦姝,王斌,邓也,等.成都市典型有机溶剂使用行业 VOCs 组成成分谱及臭氧生成潜势研究 [J]. *环境科学学报*, 2020,40(1):76-82.
Bao Y Z, Wang B, Deng Y, et al. Source profiles and ozone formation potential of VOCs emitted from typical industries using organic solvents in Chengdu [J]. *Journal of Environmental Science*, 2020, 40(1):76-82.
- [40] Huang H, Wang Z, Dai C, et al. Species profile and reactivity of volatile organic compounds emission in solvent uses, industry activities and from vehicular tunnels [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2024,135:546-559.
- [41] 杨杨,杨静,尹沙沙,等.珠江三角洲印刷行业 VOCs 组分排放清单及关键活性组分 [J]. *环境科学研究*, 2013,26(3):326-333.
Yang Y, Yang J, Yin S S, et al. Speciated VOCs emission inventory and key species from printing industry in the Pearl River Delta Region [J]. *Environmental Science Research*, 2013,26(3):326-333.
- [42] 黄俊霖,邱向阳,程义君,等.深圳市典型溶剂使用源 VOCs 排放特征、治理现状与减排对策 [J]. *环境工程技术学报*, 2022,12(5):1609-1617.
Huang J L, Qiu X Y, Cheng Y J, et al. Emission characteristics, treatment status and mitigation countermeasures of volatile organic compounds from typical solvent sources in Shenzhen City [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2022,12(5):1609-1617.
- [43] 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.
Qi Y J, Ni J W, Zhao D X, et al. Emission characteristics and risk assessment of volatile organic compounds from typical factories in Zhengzhou [J]. *Environmental Science*, 2020,41(7):3056-3065.
- [44] 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.
QI Y J, NI J W, ZHAO D X, et al. Emission characteristics of volatile organic compounds (VOCs) from typical industrial sectors in Xingtai City [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2021,34(10):2339-2349.
- [45] 刘厚凤,李明燕,许鹏举,等.某沿海城市典型行业 NMHCs 排放特征及对二次污染物生成潜势研究 [J]. *环境科学学报*, 2021,41(2):395-405.
Liu H F, Li M Y, Xu P J, et al. Emission characteristics and the formation potential for secondary pollutants of NMHCs from typical industries in a coastal city [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, 41(2):395-405.

作者简介:董静(1998-),女,陕西铜川人,西安建筑科技大学硕士研究生,主要研究方向为大气污染治理.发表论文1篇.dongj6078@163.com.