环境工程学报
CHINESE JOURNAL OF ENVIROMENTAL ENGINEERING
第 18 卷 第 2 期 2024 年 2 月
Vol. 18, No.2 Feb. 2024
http://www.cjee.ac.cn E-mail: cjee@rcees.ac.cn (010) 62941074
DOI 10.12030/j.cjee.202305040 中图分类号 X511 文献标识码 A

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

徐遵主[1,2], 熊红红[3], 张宇威[2], 金小贤[2], 刘东[2], 王艺博[4], 周飞[1,✉]

1. 江苏省环境工程重点实验室，南京 210036；2. 南大恩洁优环境技术 (江苏) 股份公司，南京 210036；3. 郑州升达经贸管理学院，郑州 4511004；4. 中国环境科学研究院，国家环境保护生态工业重点实验室，北京 100012

摘　要　VOCs 是臭氧和二次有机气溶胶等复合型污染的前驱体。基于原辅料和生产工艺的角度，构建江苏省内人造板、印刷、电子、橡胶和塑料、制药、化工、喷涂为代表的典型工业行业 VOCs 成分谱。通过最大增量反应活性系数 (MIR) 、气溶胶生成系数 (FAC)，依据原辅料、产品和工艺的区别，分析各行业、企业 VOCs 组分区别与臭氧生成潜势和二次颗粒物生成潜势。结果表明：橡胶和塑料行业单位 OFP 最高，约为 4.09 $g \cdot g^{-1}$；SOA 较高的印刷、制药、涂装、橡胶和塑料行业，其值约为 1.5 $g \cdot g^{-1}$；通过 MIR 和 FAC 系数模型可知，橡胶和塑料行业是 O_3 污染管控重点，印刷、制药、涂装、橡胶和塑料行业是二次气溶胶的管控重点。基于江苏省典型工业行业 VOCs 特征，分析我国现行 VOCs 治理技术指南推荐工艺与现存低效治理工艺的差异，以估算全国典型工业行业 VOCs 年产污量和污染特性减排潜力，可为 VOCs 管理相关法规政策制定提供依据。

关键词　挥发性有机物 (VOCs)；排污特征；减排潜力；复合型污染；典型工业行业

挥发性有机物 (volatile organic compounds, VOCs) 的排放总量逐年递增。VOCs 有大气化学反应活性，通过与大气中的氮氧化合物 (NO_x) 等发生化学反应形成臭氧 (O_3) 和二次有机气溶胶 (secondary organic aerosol，SOA) 污染，在复合型大气污染的形成过程中具有重要作用[1]，对人群健康产生威胁。我国相继发布了《空气质量持续改善行动计划》、《关于推进大气污染联防联控工作改善区域空气质量的指导意见》等文件，将 VOCs 列为我国重点防控的污染物[2-3]，并通过编制 VOCs 排放清单，以明确我国 VOCs 污染源排放特征，评价不同组分 VOCs 的复合型污染物生成潜势，为制定 VOCs 控制策略提供参考。VOCs 是指沸点在 50~260 ℃ 的有机物，通常分为烷烃、芳香族、烯烃、含氧 VOCs(oxygenated volatile organic compounds, OVOCs)、卤代烃，其来源主要分为自然源和人为源。2020 年，中国年均 VOCs 自然源排放量达到 1 090×10^4 t，人为源排放量达到 1 510×10^4 t[4-5]。其中，工业源排放量占人为源总排放量的 50%，VOCs 工业溶剂源排放量占人为源排放总量的 20%，是实现 VOCs 污染防治的重中之重。其中，人造板、印刷、电子、橡胶和塑料、制药、化工、喷涂所排放的 VOCs 分别约占我国工业源 VOCs 年排放总量的 3.21 %、8.64 %、3.34 %、2.94%、7.36 %、10.83 % 和 15.36%，为 VOCs 排放的重点监管行业。

溶剂使用行业原料种类繁多、产污特征复杂，导致溶剂行业 VOCs 治理难度较大[6-8]。本课题组基于江苏省产业结构布局，结合《江苏省重点行业挥发性有机污染物控制指南》，选取江苏省内溶剂使用为主的人造板、印刷、电子、橡胶、塑料、喷涂和溶剂反应为核心的制药、化工等工业作为 VOCs 排放典型溶剂重点行业。通过构建行业代表企业的 VOCs 成分谱，研究不同企业、行业 VOCs 的组成差异、成分比例和排放特性，分析 VOCs 的行业和地区分布规律。基于不同行业 VOCs 的成分谱，分别使用最大增量反应活性 (maximum incremental reactivity coefficient，MIR) 和气溶胶转化系数法 (fractional aerosol coefficients,

收稿日期：2023-05-12；**录用日期**：2023-10-25

基金项目：江苏省环境工程重点实验室开放课题 (ZX2022006)；中国环境科学研究院国家环境保护生态工业重点实验室开放基金资助 (2022KFF-05)；中央级公益性科研院所基本科研业务费专项 (2022YSKY-09)

第一作者：徐遵主 (1987—)，男，博士研究生，zzxu@njuae.cn；**✉通信作者**：周飞 (1967—)，男，博士，高级工程师，1494131147@qq.com

FAC) 系数法分析得出臭氧生成潜势 (ozone formation potential, OFP)、二次溶胶生成潜势 (secondary organic aerosol, SOA)。最后，通过汇总各行业 VOCs 治理技术推荐指南，对比高、低效治理工艺特性，分析各行业减排潜力，为典型溶剂使用行业 VOCs 的污染防控提供参考。

通过对上述典型工业源挥发性有机物排污特征与减排潜力分析可知，印刷、人造板、橡胶、电子和塑料行业的 VOCs 以 OVOCs 为主，涂装行业以烷烃和芳香族为主。而制药和化工行业 VOCs 组分随着产品、工艺的不同而改变。通过 MIR 和 FAC 模型可知，橡胶和塑料行业是 O_3 污染管控重点，印刷、制药、涂装、橡胶和塑料行业是二次气溶胶的管控重点。

1 典型行业 VOCs 源成分谱分析

本研究对企业的工艺、原辅料、产品全面调查，从而分析不同工艺/原料下各行业的产污节点和污染特性，从而选取江苏省内人造板、印刷、电子、橡胶和塑料、制药、化工、喷涂的典型行业中 5 家代表性企业构建 VOCs 成分谱，从而代表典型行业的 VOCs 排放特性。相关信息来自于各家企业的环评、VOCs 治理一企一策、监测报告，以及权威第三方监测机构与环评机构可靠的监测数据与物料平衡[9-11]。若采用现场采样，会收集 2~3 组平行样品以减小采样误差。江苏省典型行业 VOCs 成分谱数据库如表 1 所示。

表 1 江苏省典型行业 VOCs 的主要成分谱及质量分数

Table 1 Main component spectrum and mass fraction of VOCs in typical industries in Jiangsu Province

行业	企业信息	主要成分及其质量分数
印刷行业	溶剂企业1	异丙醇(45.95%)、甲基环己烷(39.56%)、乙酸乙酯(9.84%)、甲乙酮(1.6%)、乙醛(0.79%)
	溶剂企业2	异丙醇(91.94%)、甲基己烷(6.27%)、正庚烷(1.84%)、四氯乙烯(1.22%)
	水性溶剂企业3	乙醇(37.3%)、乙酸乙酯(12.6%)、异丙醇(10.2%)、邻二甲苯(9.2%)、对二甲苯(5.4%)、间二甲苯(5.6%)、丙酮(6.4%)
	UV油墨企业4	对叔丁酚(19.78 %)、丁醇(14.23 %)、苯乙烯(13.84 %)、2-丁氧基乙醇(7.79 %)、1-甲氧基-2-丙醇(6.43 %)、乙二醇单丁醚(6.43 %)、甲氧基乙酸乙酯(6.43 %)、三甲苯(2.01 %)
	植物油企业5	异丙醇(44.86%)、2-甲基己烷(10%)、3-甲基己烷(9.5%)、庚烷(6.7%)、甲基环己烷(6.3%)、正十一烷(6.2%)、二甲苯(4.84%)、甲基环戊烷(3.9%)
人造板行业	企业1	苯酚(62.43%)、乙醇(22.08%)、丙酮(5.02%)、癸烷(2.94%)、异丙醇(2.37%)、丙烯醛(1.65%)、二甲基丁烷(0.65%)、二恶烷(0.33%)
	企业2	正己醛(12.57%)、二氯甲烷(10.63%)、丙烷(6.28%)、异丁烷(5.08%)、甲苯(4.69%)、间/对-二甲苯(4.45%)、正丁烷(4.27%)、丙醛(4.15%)、苯乙烯(3.45%)、正戊醛(3.08%)
	企业3	丙酮(43.4%) 、二甲苯(25.8%) 、乙酸乙烯酯(8.1%) 、甲苯(8%) 、三氯甲烷(5.5%)、甲基乙基酮(4.8%)
	企业4	二甲基戊烷(27.5%)、乙酸仲丁酯(17.31%)、丙酮(16.81%)、邻乙基甲苯(9.82%)、 1 ─丁烯(8.0%)、正十一烷(7.42%)、正十二烷(6.31%)、苯乙烯(2.52%)
	企业5	乙酸丁酯(19.65%) 、对/间 ─ 二甲苯(14.41%) 、邻二甲苯(13.75%) 、乙酸乙酯(11.92%) 、乙苯(6.55%) 、环己酮(4.58%) 、乙醇(36.70%) 、丙酮(7. 77%)
橡胶和塑料	橡胶企业1	己烷(41.00%)、二甲苯(11.69%)、甲苯(11、46%)、苯(11.46%)、对苯二酚(9.29%)、二氯甲烷(8.74%)、4-甲基-2-戊酸(6.78%)、乙苯(4.22%)、邻二甲苯(4.18%)、苯胺(1.82%)、丁二烯(0.23%)
	橡胶企业2	乙醇(62.36%)、二甲苯(29.67%)、乙苯(6.86%)、丁二烯(0.36%)、异丁烯(0.34%)、苯乙烯(0.33%)
	塑料企业3	甲苯(41.7%)、乙酸乙酯(25.53%)、正己烷(10.61%)、乙苯(9.12%)、二甲苯(8.72%)、异戊烷(4.43%)
	塑料企业4	甲基叔丁基酮 (29.12%) 、丙酮 (27.43%) 、异戊烷 (23.36%) 、丙醛 (9.28%) 、环己烷 (5.67%)
	塑料企业5	正己烷(28.15%)、苯(25.08%)、二氯甲烷(9.57%)、二甲苯(8.32%)、三氯乙烯(8.12%)、乙醇(6.78%)、甲苯(4.14%)、苯乙烯(3.39%)、异丙醇(2.14%)、环己烷(1.64%)、丙烯醛(1.10%)
电子制造	电子企业1	丁酮(36.59%)、丙酮(22.35%)、二甲苯(19.88%)、苯酚(19.76%)、乙酸乙酯(9.29%)、甲苯(3.32%)、环氧丙烷(2.62%)
	电子企业2	二氯甲烷(61.8%)、异丙醇(14.08%)、乙酸丁酯(11.14%)、环己烷(6.92%)、二甲苯(3.95%)、乙苯(1.24%)、萘(0.74%)

续表 1

行业	企业信息	主要成分及其质量分数
电子制造	电子企业3	1,2-二氯乙烷(45.9%)、烷烃(20.9%)、三氯乙烯(8.0%)、乙苯(5.8%)、间，对-二甲苯(3.7%)
	电子企业4	甲苯(38.4%)、丙酮(10.8%)、1,2,4-三甲基苯(6.9%)、苯乙烯(6.1%)、对二乙苯(3.6%)
	电子企业5	异丙醇(97.26%)、丙酮(2.07%)、丙烯(0.40%)、苯(0.03%)、二氯乙烷(0.02%)、甲基特二丁醚(0.01%)
涂装	油性涂装企业1	醋酸丁酯(22.61%)、二甲苯(18.60%)、乙二醇(13.81%)、丙二醇(13.81%)、丁醇(7.02%)、正丁烷(5.07%)、三甲苯(3.51%)
	油性涂装企业2	二甲苯(72.86%)、甲基己烷(8.48%)、庚烷(6.10%)、乙苯(4.28%)、三甲苯(2.03%)、烷基苯(1.96%)、正丁醇(1.69%)、苯甲醇(1.08%)
	油性涂装企业3	甲基己烷(25.18%)、二甲苯(13.98%)、苯乙烯(10.01%)、异戊烷(7.51%)、甲苯(5.89%)、甲基庚烷(4.12%)、乙苯(3.24%)、正戊烷(2.94%)
	水性涂装企业4	间/对-二甲苯(46.26%)、甲苯(17.86%)、乙苯(14.00%)、邻二甲苯(10.35%)、醋酸仲丁酯(3.04%)、正丁醇(2.03%)、丙烷(1.62%)、正丁烷(1.42%)
	水性涂装企业5	苯乙烯(92.88%)、乙苯(1.73%)、二甲苯(2.22%)、三甲苯(0.52%)、正丁醇(0.38%)
化工	化工企业1	对氯甲苯(31.26%)、硫酸二甲酯(17.06%)、环氧乙烷(15.88%)、异戊烯(13.32%)、三氮唑(9.29%)、甲酰胺(6.39%)、甲苯(0.21%)
	化工企业2	乳酸乙酯(51.69%)、甲苯(21.70%)、乙醇(19.44%)、DMF(2.58%)
	化工企业3	丙酮(63.22%)、甲苯(30.08%)、二氯乙烷(5.54%)、二氯甲烷(1.15%)
	化工企业4	环氧丙烷(91.07%)、环氧乙烷(8.08%)、叔丁醇(0.83%)
	化工企业5	丁二烯(13.31%)、正己烷(11.79%)、乙醇(9.26%)、正辛烷(4.85%)、正十二烷(5.34%)、甲基戊烷(3.58%)、乙基甲苯(3.24%)、丙烷(2.37%)
制药	化学合成药企业1	甲醇(25.13%)、乙酸乙酯(24.21%)、二氯乙烷(22.77%)、丙酮(7.52%)、甲苯(6.54%)、环己烷(4.21%)、乙腈(4.13%)
	化学合成药企业2	异丙醇(42.2%)、甲苯(23.6%)、正己烷(10.3%)、二氯甲烷(9.1%)、丙酮(8.9%)、乙酸乙酯(6.5%)
	化学合成药企业3	一氯甲烷(27.41%)、4-甲基-2-戊酮(18.49%)、三甲苯(11.2%)、丙酮(10.54%)、二氯甲烷(9.11%)、甲苯(5.60%)、三氯甲烷(2.21%)
	化学合成药企业4	甲苯(90.54%)、丙酮(4.67%)、丁酮(1.41%)、乙酸乙酯(1.41%)、二氯丙烯(1.95%)
	发酵企业5	甲醇(54.54%)、甲酰胺(21.12 %)、二甲苯(15.15%)、丙酮(5.68%)、乙腈(3.39%)、乙醇(0.11%)

1.1　典型行业 VOCs 成分谱分析

1) 印刷行业。图 1 为印刷行业产生 VOCs 组分，而包装印刷行业典型工艺如图 2 所示。VOCs 组份随原料、溶剂不同而产生差异。VOCs 排放节点主要在油墨、胶黏剂、稀释剂等溶剂的使用过程。平版印刷产生的 VOCs 主要来自润版和清洗，凹版和凹板印刷的 VOCs 主要来自于涉及溶剂的油墨、上光、烘干等工序[12-14]。基于工艺特点，包装印刷行业排放 VOCs 以 OVOC 和烷烃为主，溶剂型企业以排放 OVOC 为主，占比均高达 80% 以上。这与溶剂型企业所使用的油性油墨有关。其中，醇醚类 OVOC 的异丙醇作为包装印刷行业的油性油墨主要溶剂，为溶剂型企业 VOCs 主要组分。水基溶剂企业通过采用水性油墨，以水 (45%~50%) 为溶剂，估排放 VOCs(质量分数<30%) 极低，能实现源头治理。但水基油墨通常以乙醇为稀释剂，导致水基企业的 OVOC 排放占比仍较高，约为 66.5%。

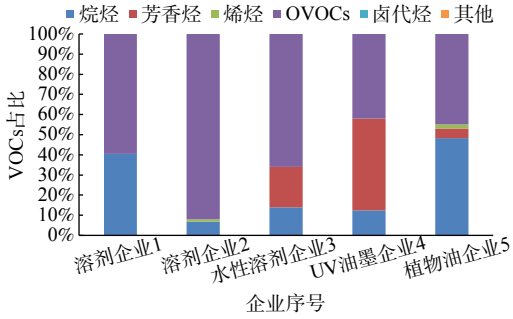

图 1　印刷行业 VOCs 组分

Fig. 1　VOCs components in the Printing industry

植物油油墨、UV 油墨等环保油墨型企业排放 OVOC 占比大幅下降，降至 50% 以下，但烷烃和芳香族占比有所提升。其中，植物油油墨排放的烷烃占比为 48.3%，UV 油墨排放的芳香族为 45.11%。OVOC 是光化学反应的中间产物，其反应活性强，会影响大气对流层的氧化潜势。因此，通过降低 VOCs 排放质量分数，减少 OVOCs 占比是实现包装印刷 VOCs 综合管控的关键。

2) 人造板行业。人造板产品是通过将木材/纤维材料通过添加 (或不添加) 粘合剂等材料后，再压制成型板材。典型人造板行业排放情况如图 3 所示，其典型工艺如图 4 所示[15]。人造板行业的 VOCs 排放分两类。首先，木材原料自身含有 VOCs 组分，如木材中的树脂酸会产生醛类。其次，在使用粘合剂和压制成型过程中，酚醛胶、三胺胶、脲醛胶等粘合剂中残留大量甲醛和少量甲醇、苯酚等有机物，在热压和涂胶等环节释放而出[16-17]。

图 4 表明，人造板行业排放 VOCs 以甲醛、丙酮、乙醇等 OVOCs 为主，OVOC 约占各企业 VOCs 总排放量的 50%~60%。这是由于人造板胶粘、压制之前需进行制胶、调胶，其涉及 OVOCs 溶剂的使用；另一方面，有机溶剂含有二甲苯等芳香族 VOCs。芳香族 VOCs 与环境中·OH、O_3 等氧化物反应，生成 OVOC，进而提升 OVOC 占比[18-20]。因此，采用绿色清洁原材料，并实现 VOCs 的高效管控是人造板行业减排关键。

3) 橡胶和塑料行业。橡胶和塑料是由橡胶与树脂等高分子材料通过一定的物理/化学工艺加工而成的工业制品[21]。橡胶和塑料行业产生的 VOCs 组分如图 5 所示，其生产工艺如图 6 所示。

橡胶生产会经过炼胶、浸胶、烘干、压延、压出、成型及硫化等流程，VOCs 排放节点主要在聚合和后处理环节。一方面，在炼制设备中，VOCs 伴随闪蒸汽排放而排出；另一方面，在烘干环节中，热风流动会释放大量 VOCs。橡胶企业 1 主要排放烷烃和芳香族 VOCs，其中，己烷、二甲苯的排放量大，分别为 41.00%、15.87%；企业 2 主要排放 OVOC 和芳香族，其中，乙醇、二甲苯的排放量最多，分别为 62.36 % 和 29.67%。橡胶行业排放 VOCs 主要来自于试剂中的芳香族、OVOCs 和烷烃，以及橡胶加热过程中释放的烯烃类物质。此外，除了 VOCs 外，橡胶行业还会产生大量恶臭气体，如硫化物、氨化物等。实现 VOCs 管控与高效除臭是橡胶行业治理重点。

塑料行业的工艺一般分为备料、造粒、成型、装配[22]。涉及高温高压的造粒、成型环节会产生大量 VOCs。塑料企业 3 和塑料企业 5 主要排放芳香族，两家企业的主要污染物分别为甲苯和苯，各占其企业总 VOCs 的 41.7% 和 33.08%。塑料企业 4 为挤出工艺，主要污染物为 OVOC。其中，甲基叔丁基酮和丙酮的排放量占比较大，分为为 29.12% 和 27.43%。塑料行业的成型工艺以热成型、热造粒工艺为主，其在加工原料的热处理过程中，会挥发大量 VOCs。冷延压、冷压等低温成型工艺能通过减少对原料的加热，削减塑料

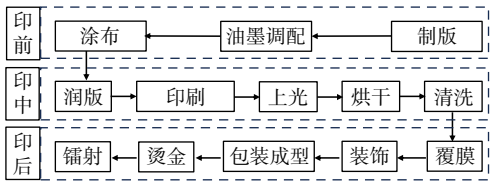

图 2 印刷行业典型工艺

Fig. 2 Typical processes in Printing industry

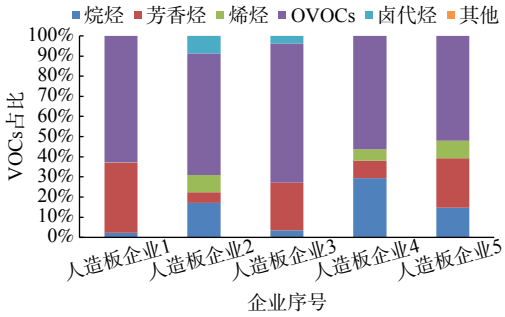

图 3 人造板行业 VOCs 组分

Fig. 3 VOCs components in the Wood-based panel industry

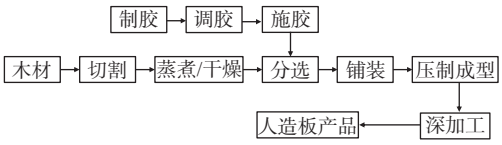

图 4 人造板行业典型工艺

Fig. 4 Typical processes in Wood-based panel industry

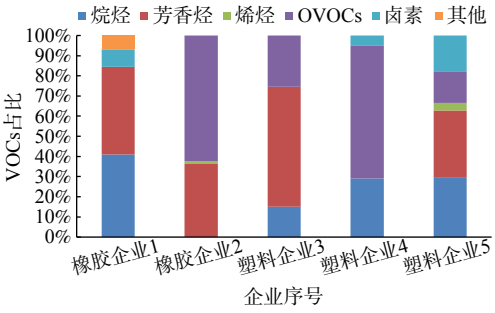

图 5 橡胶和塑料行业 VOCs 组分

Fig. 5 VOCs components in the Rubber and Plastic industry

行业的生产能耗和 VOCs 产生量，同时提升塑料产品精度。但由于低温成型工艺的生产特性导致其产量小、生产效率低，仍需优化其工艺体系。因此，发展低温成型工艺为塑料行业的 VOCs 管控关键。

4) 电子行业。电子行业产品种类繁多，不同原料和产品生产线排放 VOCs 组分差别很大[23]。图 7 表明，企业 1 为电路板生产企业，其排放 OVOC 占总排放 VOCs 的比例高达 62.5%，主要贡献来自丁酮；企业 2 为半导体晶圆片生产企业，其排放卤代烃占比高达 61.8%，均来自二氯甲烷；企业 3 为电路板生产企业，其排放卤代烃占比高达 73.42 %，二氯乙烷为主要污染物，贡献值约为 63.93 %；企业 4 为电子光刻行业，其排放 VOCs 主要为芳香烃，占比 82.63 %，主要污染物为甲苯。企业 5 为液晶半导体生产企业，其排放 VOCs 中 99.75% 为 OVOC，异丙醇贡献值超 97.26 %。电子行业所使用的清洁剂、光刻胶中含有的二氯甲烷、异丙醇、甲苯为电子行业的主要污染来源。

电子行业排放废气中 VOCs 质量分数较低，且组分复杂。同时，电子工艺涉及酸性蚀刻、碱洗等步骤，使得废气中还含有酸、碱气体。选取稳定、合适的净化工艺是电子行业废气中 VOCs 管控的关键。

5) 涂装行业。图 8 表明，涂装行业 VOCs 污染源为典型溶剂。其排放污染物类型与生产中使用的有机溶剂息息相关[24-25]。涂装行业常见工艺流程如图 9 所示。VOCs 主要来自于喷漆室、流平室、烘干室和固化室等车间的喷涂漆雾、溶剂蒸发等。

本研究中企业 1~3 为溶剂型涂料涂装企业，4~5 为水性涂装企业。企业 1 为车身涂装企业，其排放 VOCs 种类有芳香族和 OVOCs，主要污染物为二甲苯和醇醚溶剂中的乙二醇和丙二醇，占比分别为 21.2%、15.7% 和 11.8%。企业 2 为工程机械涂装企业，其排放 VOCs 种类为芳香族，主要污染物为二甲苯，约占 72.86%。企业 3 为家具涂装企业，芳香族高达 98.14%，其中甲苯和二甲苯为主要污染物，占比为 31.7% 和 43.4%。企业 4 为铝材涂装企业，其排放 VOCs 主要为芳香族的苯乙烯，占比高达 92.88%。企业 5 为家具涂装企业，其排放 OVOC 占比最高，为 70.33%，主要污染物为乙酸乙酯，占比高达 58.26 %。溶剂型和水性涂装企业排放 VOCs 均来自苯、酮、酯等稀释剂，但水性涂料生产工艺排放的 VOCs 相比溶

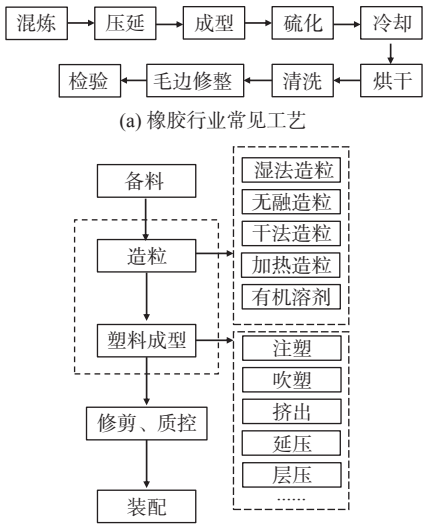

图 6　橡胶和塑料行业典型工艺

Fig. 6　Typical process in the Rubber and Plastic industry

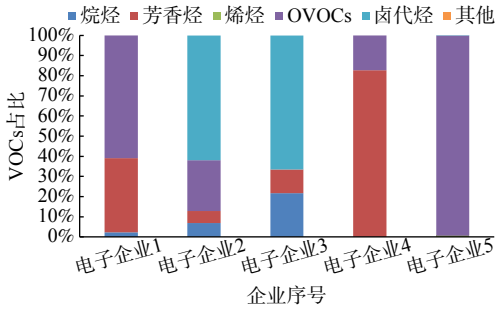

图 7　电子行业 VOCs 组分

Fig. 7　VOCs components in Electron industry

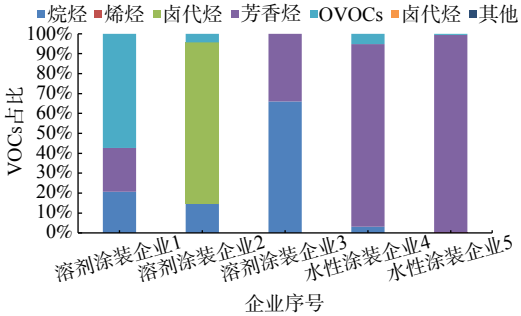

图 8　涂装行业 VOCs 组分

Fig. 8　VOCs components in Painting industry

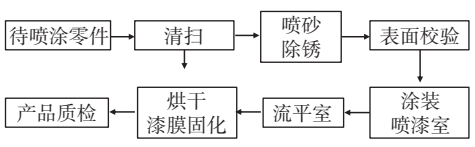

图 9　涂装行业典型工艺及产 VOCs 节点

Fig. 9　Typical processes in Painting industry

剂型工艺大幅降低[26]。

6) 化工行业。化工企业排放 VOCs 质量分数较低、风量大，且成份复杂 (图 10)。由于化工种类繁多、工艺复杂，不同产品、工艺的企业产生 VOCs 差异较大[27]。企业 1 主要产品为戊唑醇，其排放 VOCs 主要为卤代烃，主要污染物为对氯甲苯，占比约为 31.26 %。企业 2 的主要产品为精喹禾灵，其排放 VOCs 以 OVOC 为主，乳酸乙酯占比为 51.69%。企业 3 的主要产品为嘧磺隆，其排放 VOCs 主要为卤代烃，主要污染物为丙酮，占比约为 63.22%。企业 4 为聚氨酯生产企业，其主要产品为双金属催化剂和特种聚醚等，排放 VOCs 以 OVOC 为主，主要污染物为环氧丙烷，约占 91.3%。企业 5 为石油化工企业，其排放 VOCs 以烷烃为主，约占 37.01%。石油化工生产装置差异较大，本研究取石油化工厂各采样点的 VOCs 平均值。

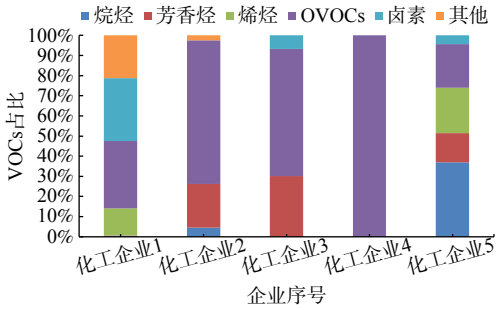

图 10 化工行业 VOCs 组分

Fig. 10 VOCs components in Chemical industry

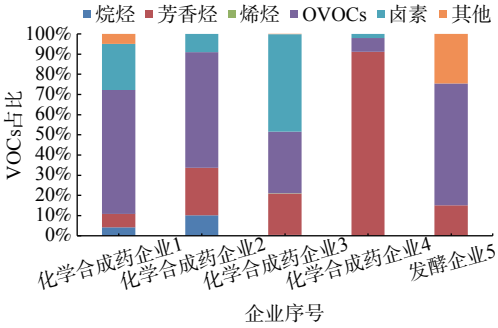

图 11 制药行业 VOCs 组分

Fig. 11 VOCs components in Pharmaceutical industry

7) 制药行业。制药行业属于精细化工行业。根据国民经济行业分类 (GB/T 4 754—2017)，医药化工可被分为中药类、发酵类、混装制剂类、化学合成类、提取类和生物类。其中，发酵类和化学合成类为排放 VOCs 中的主要污染物[28]。本课题组调研医药行业的 VOCs 排放情况 (图 11)，其中企业 1~4 均为化学合成类企业，企业 5 为发酵类企业。

企业 1 的主要产品是美罗培南，主要污染物是甲醇和乙酸乙酯等 OVOC，约占 25.13% 和 24.21%。企业 2 的主要产品是胺化物，其排放 VOCs 种类主要为 OVOC，污染物有异丙醇，约占 42.2%。企业 3 的主要产品是苯甘氨酸，其排放 VOCs 种类主要是卤代烃和 OVOCs，分别约为 48.2%、30.64%，主要污染物是三甲苯和一氯甲烷，约占 11.20% 和 27.41%。企业 4 的主要产品是环丙羧酸，其排放 VOCs 种类为芳香烃，主要污染物是甲苯，约占 90.54%。企业 5 的主要生产工艺为霉菌、秸秆脱氢发酵，其排放 VOCs 种类主要为 OVOC，主要污染物是甲醇，约占 54.54%。综上所述，化学合成类企业排放的 VOC 主要来自生产反应介质、溶剂和原料，特征污染物为一氯甲烷、异丙醇等。发酵类企业排放的 VOCs 主要来自于发酵过程产生少量 VOCs 和提取产品所用的提取剂，如甲醇、乙醇等。

2 典型行业单位 VOCs 排放的 O_3 及 SOA 生成潜势

2.1 计算模型

1) 单位臭氧生成潜势 (OFP)。VOCs 作为二次污染物 O_3 的重要前驱物，在不同化合物间 O_3 生成潜势差异较大。最大反应增量活性 (maximum incremental reactivity coefficient，MIR) 可通过 VOCs 在大气环境下的 O_3 生成量来表征，即为臭氧生成潜势 (ozone formation potential,OFP)。本研究采用 MIR 法来估算 OFP，计算式为式 (1) 。

$$\mathrm{OFP}_i = \sum_{j=1}^{n} \omega_{ij}\mathrm{MIR}_j \tag{1}$$

式中：OFP_i 表示从源 i 中排放 1 g VOCs 的 OFP 估算值，$\mathrm{g\cdot g^{-1}}$；ω_{ij} 表示源 i 中组分 j 的质量分数；MIR_i 表示组分 j 的最大增量反应活性，$\mathrm{g\cdot g^{-1}}$。本研究中涉及 MIR 数值如表 2 所示[29-31]。

2) 单位二次气溶胶生成潜势 (secondary organic aerosol, SOA)。本研究中，SOA 采用气溶胶生成系数法 (fractional aerosol coefficients, FAC) 估算 VOCs 在大气环境中产生的气溶胶生成量，其计算式见式 (2)[32-34]。

表 2 MIR 数值表

Table 2 Table of MIR values

g·g^{-1}

有机物种类	名称	MIR	有机物种类	名称	MIR	有机物种类	名称	MIR	有机物种类	名称	MIR
烷烃	环己烷	7.49	芳香族化合物	甲苯	8.9	烯烃	异戊二烯	9.1	OVOC	2-己酮	3.14
	正己烷	5.61		乙苯	6.45		丁二烯	12.6		乙醛	5.5
	正庚烷	7.15		苯	2		乙炔	1		丙醛	6.5
	丙烯	11.7		邻二甲苯	7.64		苯乙烯	1.73		四氢呋喃	/
	戊烷	3.94		间/对二甲苯	7.8		异丁烯	10.9		异丙醇	0.61
	甲基环己烷	10.4		乙苯	6.45		异戊烯	10.6		正丁醇	5.76
	正十一烷	12.3		4-乙基甲苯	/		四氯乙烯	0.03		乙醇	1.53
	甲基己烷	1.6		1,2,4-三甲苯	10.1		乙烯	7.4		异丙醇	0.61
	正十二烷	0.38		苯乙烯	1.73		丙烯	9.4		丁二酸二甲酯	1.09
	二恶烷	2.62		萘	3.34		丁烯	10.9		乙酸乙烯酯	3.2
	乙烷	0.26		苯胺	/	卤代烃	二氯乙烷	0.21			
	甲基环戊烷	2.2		酚	2.76		二氯甲烷	0.04			
	甲基戊烷	5.6		对苯二酚	2.76		三氯乙烯	0.64			
	正辛烷	8.68		对叔丁酚	/		二氯乙烷	0.21			
	正壬烷	0.54		正丙苯	2.2		氯甲烷	0.04			
	二甲基丁烷	6.3		间-乙基甲苯	7.2		二氯丙烯	5.03			
	正癸烷	11.6		邻-乙基甲苯	7.2	OVOC	丙酮	0.56			
	二甲基戊烷	4.77		1,2,3-三甲基苯	10.1		丁酮	1.18			

$$SOA_i = \sum_{j=1}^{n} \omega_{ij} FAC_j \tag{2}$$

式中：SOA_i 表示从源 i 中排放 1 g VOCs 的 SOA 生成潜势的估算值，g·g^{-1}；ω_{ij} 表示源 i 中组分 j 的质量分数；FAC_j 表示组分 j 的气溶胶生成系数，g·g^{-1}。本研究 FAC 数值如表 3 所示。

2.2 典型行业 VOCs 排放 OFP 分析

本研究涉及人造板企业 OFP 均值为 5.10 g·g^{-1}。芳香族 VOCs 的 OFP 贡献最大，其次为 OVOC 和烷烃 (表 4 和表 5)。人造板行业甲醛排放量占总污染物的 30%~50%，甲醛 MIR 较高，为 7.2，导致人造板行业的总 OFP 较高。橡胶企业 1 和 2 的 OFP 分别为 5.86 g·g^{-1} 和 3.75 g·g^{-1}。橡胶企业 1 的 OFP 主要来自烷烃和芳香烃，其中环己烷和甲苯的贡献值为 64% 和 17%。橡胶企业 2 的 OFP 主要贡献于芳香烃中的二甲苯，贡献值为 62%。塑料企业 3~5 的 OFP 分别为 5.76、2.10 和 2.98 g·g^{-1}。其中二甲苯、甲苯、己烷、丙酮为 OFP 贡献有机物种类。电子企业 1~5 的 OFP 分别为 2.51、1.03、2.81、6.50 和 0.64 g·g^{-1}。电子企业产品众多，其 OFP 贡献也因有机物种类不同各异。整体来看，OFP 主要来自于芳香族、烷烃和 OVOC，贡献有机物种类主要为环己烷、二甲苯、丙酮、异丙醇、乙苯等。由于企业 5 中甲苯排放量较大，甲苯作为高 MIR 值物质，OFP 贡献占比约为 79.8%。二氯甲烷等卤代烃作为清洁剂在电子企业中广泛应用，但是其 MIR 值较小，故卤代烃在电子企业中 OFP 占比较小。涂装企业中溶剂型企业 1~3 平均 OFP 值为 3.45 和水性溶剂企业 4~5 的平均 OFP 值为 0.68。溶剂型涂装企业的 OFP 值大于水性涂装企业，但涂装行业 OFP 值均来自于芳香族化合物，贡献占比均大于 60%。化工和医药均属于化工行业，其 VOCs 的种类和特征也差距较大。但从组分信息来看，OFP 与芳香族类的甲苯、烷烃类的己烷等 MIR 值较大的物质呈正相关。

由 VOCs 源成分谱可知，OVOCs 和烷烃类的排放量相比芳香族略高，但芳香族的 MIR 系数普遍较大，且应用广泛，故成为各行业 OFP 值的主要贡献有机物种类。烯烃的 MIR 系数较大，但其质量分数较小，故其对 OFP 值贡献较小。虽然 OVOC 和烷烃的排放量较大，但是其不同有机物种类之间的 OFP 值浮动大，因此不同企业排放的 VOCs 有机物种类占比差异较大。

表 3 FAC 数值表

Table 3 Table of FAC values

$g \cdot g^{-1}$

有机物种类	名称	FAC	有机物种类	名称	FAC	有机物种类	名称	FAC
烷烃	正己烷	0.17	芳香族化合物	甲苯	5.4	烯烃	异戊二烯	0.007 9
	正庚烷	0.024		乙苯	5.4		丁二烯	0.027 5
	丙烯	3.54		烷基苯	0.037 7		苯乙烯	0.054
	戊烷	0.024		苯甲醇	0.037 7		异丁烯	0.027 5
	甲基环己烷	2.7		苯	2		异戊烯	0.027 5
	正十一烷	0.024		邻二甲苯	5		四氯乙烯	0.02
	甲基己烷	0.024		间/对二甲苯	4.7		乙烯	0.027 5
	正十二烷	0.024		乙苯	5.4		丙烯	0.027 5
	二恶烷	0.024		4-乙基甲苯	2.5		丁烯	0.027 5
	乙烷	0.024		1,2,4-三甲苯	2	OVOC	正丁醛	0.002 4
	甲基环戊烷	0.17		苯乙烯	0.054		正戊醛	0.002 4
	甲基庚烷	0.5		正丙苯	1.6		正丁醛	0.002 4
	甲基戊烷	0.17		间-乙基甲苯	2.5		正己醛	0.002 4
	正辛烷	0.024		1,2,3-三甲基苯	2.9		丙烯醛	0.002 4
	正壬烷	0.024		对二乙苯	6.3		丙醛	0.002 4

表 4 典型行业各类 VOCs 的 OFP 占比

Table 4 OFP ratio of VOCs components in typical industries

典型行业	企业序号	烷烃	芳香烃	烯烃	OVOCs	卤代烃	其他
印刷行业	溶剂企业1	92.71%	0	0	7.29%	0	0
	溶剂企业2	58.27%	0	0.03%	41.7%	0	0
	水性溶剂企业3	32.16%	47.33%	0	20.51%	0	0
	UV油墨企业4	42.43%	57.54%	0	0.02%	0	0
	植物油企业5	74.86%	11.63%	4.89%	8.61%	0.02%	0
人造板行业	人造板企业1	15.27%	68.65%	0.98%	15.1%	0	0
	人造板企业2	33.58%	35.38%	5.33%	15.39%	0.32%	0
	人造板企业3	0.4%	84.1%	0	15.5%	0	0
	人造板企业4	56.7%	18.93%	21.99%	2.37%	0	0
	人造板企业5	0	86.76%	0	13.24%	0	0
塑料和橡胶行业	橡胶企业1	52.33%	47.61%	0	0	0.06%	0
	橡胶企业2	0	72.37%	2.2%	25.43%	0	0
	塑料企业3	13.34%	86.08%	0	0	0.58%	0
	塑料企业4	63.99%	0	0	36.01%	0	0
	塑料企业5	57.11%	35.64%	0.87%	4.52%	1.87%	0
电子行业	电子企业1	0	80.34%	0	19.57%	0	0
	电子企业2	50.05%	39.28%	0	8.28%	2.38%	0
	电子企业3	65.89%	27.89%	0	0	6.21%	0
	电子企业4	0	98.59%	0	1.41%	0	0
	电子企业5	0	0.59%	5.83%	93.57%	0.01%	0

续表 4

典型行业	企业序号	烷烃	芳香烃	烯烃	OVOCs	卤代烃	其他
涂装行业	溶剂涂装企业1	39.43%	60.57%	0	0	0	0
	溶剂涂装企业2	15.02%	83.33%	0	1.65%	0	0
	溶剂涂装企业3	8.94%	91.06%	0	0	0	0
	水性涂装企业4	0	100%	0	0	0	0
	水性涂装企业5	0	89.29%	0	10.71%	0	0
化工行业	化工企业1	2.56%	1.3%	96.14%	0	0	0
	化工企业2	8.9%	78.94%	0	12.16%	0	0
	化工企业3	0	87.97%	0	11.63%	0.4%	0
	化工企业4	0	100%	0	0	0	0
	化工企业5	29.88%	11.64%	52.89%	5.52%	0.06%	0
制药行业	化学合成药企业1	31.92%	58.83%	0.16%	4.25%	4.83%	0
	化学合成药企业2	19.33%	70.27%	0	10.28%	0.12%	0
	化学合成药企业3	1.85%	94.1%	0	3.66%	0.24%	0.15%
	化学合成药企业4	0	98.28%	0	0.52%	1.2%	0
	发酵企业5	0	97.19%	0	2.81%	0	0

表 5 典型行业 OFP 汇总

Table 5 Summary of OFP values of typical industries　　$g \cdot g^{-1}$

企业编号及项目	OFP	企业编号及项目	OFP	企业编号及项目	OFP	企业编号及项目	OFP	企业编号及项目	OFP	企业编号及项目	OFP	企业编号及项目	OFP
印刷企业1	4.44	人造板企业1	4.56	橡胶和塑料企业1	5.87	电子企业1	2.52	涂装企业1	2.93	化工企业1	1.47	制药企业1	0.99
印刷企业2	1.34	人造板企业2	4.14	橡胶和塑料企业2	3.75	电子企业2	1.04	涂装企业2	5.9	化工企业2	2.45	制药企业2	2.99
印刷企业3	3.26	人造板企业3	5.24	橡胶和塑料企业3	5.77	电子企业3	2.82	涂装企业3	1.53	化工企业3	3.04	制药企业3	1.86
印刷企业4	2.17	人造板企业4	6.14	橡胶和塑料企业4	2.1	电子企业4	6.51	涂装企业4	1.19	化工企业4	1	制药企业4	8.2
印刷企业5	3.18	人造板企业5	4.99	橡胶和塑料企业5	2.98	电子企业5	0.65	涂装企业5	0.17	化工企业5	4.89	制药企业5	1.19
均值	2.88	均值	5.1	均值	4.09	均值	2.7	均值	2.35	均值	2.57	均值	3.05

2.3 典型行业 VOCs 排放 SOA 分析

表 6 列出了典型行业排放 VOCs 的 SOA 值，表明其主要贡献来自于烷烃、芳香烃、烯烃和醛酮类 OVOC。其中，芳香烃具有 SOA 高、涉及原料范围大等特点，且易促进二次颗粒物形成，为重点管控对象。印刷、橡胶和塑料、电子、涂装、制药行业的平均 SOA 较高，分别为 1.58、1.55、1.13、1.42 和 1.58 $g \cdot g^{-1}$。人造板行业和化工行业的 SOA 较低，约为上述行业的 1/2，分别为 0.79 和 0.6 $g \cdot g^{-1}$。化工行业涉及产品、工艺繁多。尽管本研究涉及化工企业到 SOA 较低，但若其生产原料中涉及大量高 SOA 物质 (如精细化工的制药行业)，仍存在 SOA 较高的风险。因此，减少会产生高 SOA 值 VOCs 排放的原料使用是有效控制相关行业 VOCs 排放，进而控制二次颗粒物污染的关键。

3 典型行业减排潜力分析

上文通过研究典型行业 VOCs 成分谱的区别，分析了原料、工艺对 VOCs 组分的影响。受限于技术发展和企业情况，原料替代和技术提升等源头控制措施并不能完全控制 VOCs 的排放，与废气特性相匹配的末端治理技术是实现 VOCs 高效防控的关键。因此，各省市已陆续颁发相关行业 VOCs 治理技术指南，如《江苏省重点行业挥发性有机物污染控制指南》、《江苏省重点行业挥发性有机物污染整治方案》和《江苏省

表 6 典型行业的 SOA

Table 6 Summary of OFP values of typical industries

$g \cdot g^{-1}$

企业编号及项目	总值	SOA主要贡献	企业编号及项目	总值	SOA主要贡献	企业编号及项目	总值	SOA主要贡献	企业编号及项目	总值	SOA主要贡献
印刷企业1	0.35	甲苯、苯、三甲苯、正己烷	人造板企业1	0.02	甲苯、二甲苯、苯乙烯	橡胶和塑料企业1	1.61	甲苯、乙苯、二甲苯	电子企业1	1.01	甲苯、二甲苯、三甲苯、丙烯
印刷企业2	1.29		人造板企业2	0.57		橡胶和塑料企业2	1.85		电子企业2	0.26	
印刷企业3	0.62		人造板企业3	1.65		橡胶和塑料企业3	3.2		电子企业3	0.58	
印刷企业4	4.89		人造板企业4	0.01		橡胶和塑料企业4	0.01		电子企业4	3.81	
印刷企业5	0.76		人造板企业5	1.72		橡胶和塑料企业5	1.1		电子企业5	0	
均值	1.58		均值	0.79		均值	1.55		均值	1.13	

企业编号及项目	总值	SOA主要贡献	企业编号及项目	总值	SOA主要贡献	企业编号及项目	总值	SOA主要贡献
涂装企业1	1.04	甲苯、二甲苯、丙酮	化工企业1	0.02	甲苯、正丙苯、二甲苯、甲基环己烷	制药行业企业1	0.35	甲苯、二甲苯、乙基甲苯
涂装企业2	3.18		化工企业2	1.18		制药行业企业2	1.29	
涂装企业3	1.53		化工企业3	1.62		制药行业企业3	0.62	
涂装企业4	1.19		化工企业4	0		制药行业企业4	4.89	
涂装企业5	0.17		化工企业5	0.18		制药行业企业5	0.76	
均值	1.42		均值	0.6		均值	1.58	

263 行动实施方案》等。依据各行业 VOCs 的排放特点及治理技术的适用性，推荐了各行业 VOCs 治理技术，具体如表 7 所示。

企业现行低效处理技术与推荐技术的污染物去除率差异较大。各行业匹配的 VOCs 高效治理技术可实现 90% 以上的减排量，而在低效治理技术下，减排量仅约为 20%。目前，由于技术更新滞后性、企业发展等因素，仍有大量企业采用低效治理工艺[35-36]。

本研究收集上述典型行业 VOCs 的全国年排放量，结合相关行业的 VOCs 成分谱，计算对比全面推广低效和高效治理技术下，分别可达到的 VOCs 产污量和污染特性削减的减排潜力，结果如图 12 所示[37]。

表 7 VOCs 治理技术指南及适用性汇总表

Table 7 Summary of VOCs governance technical guidelines and applicability

技术类别	净化原理	工艺	适用行业							净化效率
高效技术	回收	吸附再生+冷凝回收	印刷	—	—	化工	—	制药	—	70%~80%
		膜分离	—	—	—	化工	—	—	—	
		精馏回收	—	橡胶和塑料	—	—	—	—	—	
	燃烧	吸附浓缩+RTO	印刷	橡胶和塑料	—	—	喷涂	制药	电子	99%
		吸附浓缩+RCO	印刷	橡胶和塑料	人造板	化工	喷涂	制药	电子	97%
	氧化	常温催化氧化	—	橡胶和塑料(恶臭气体)	人造板	—	—	—	—	90%
		化学氧化	—	—	—	化工	—	—	—	70%
	吸附	活性炭吸附	印刷	橡胶和塑料	—	—	喷涂	制药	电子	70%
低效技术	氧化	低温等离子体	上述行业的低效工艺							10%
		光催化								10%
		臭氧氧化								10%
	喷淋吸收	针对水溶性 VOCs废气								10%
		针对非水溶性 VOCs 废气								50%
	生物法	微生物法								30%

图 12 表明，国内的典型工业行业具有较大的减排潜力。通过普及高效治理工艺，可使得电子、塑料和橡胶、印刷、医药、化工、涂装、人造板的 VOCs、臭氧生成潜势、二次颗粒物生成潜势均得以大幅削减。

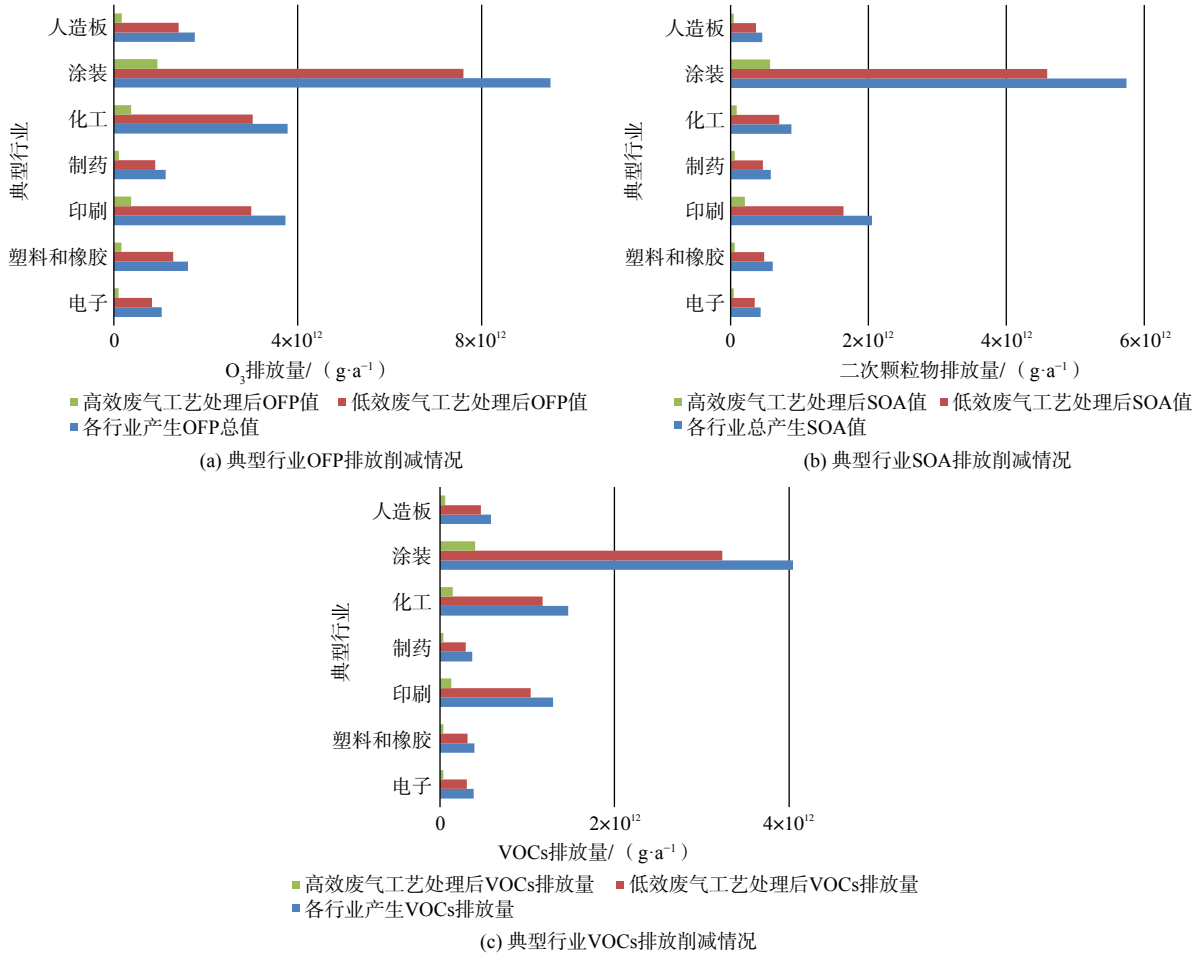

图 12　减排潜力预测

Fig. 12　Emission reduction potential prediction

4　结论

1) 不同典型行业排放的 VOCs 组成各不相同，同一行业不同企业 VOCs 排放组成也各不相同，这与各个企业之间的生产工艺、产品种类、原辅料使用有关。印刷行业以 OVOCs 和烷烃为主，人造板、橡胶和塑料、电子行业的 OVOC 和芳香族占比较高、涂装行业以烷烃和芳香族为主。制药和化工行业的 VOCs 组分受产品影响较大，但整体 OVOC 的组分含量较高，且卤族化合物的占比相较其他行业比略大。2) OFP 主要来自于芳香族、烷烃和部分烯烃；SOA 主要来自于芳香族、烷烃。3) 橡胶和塑料行业单位 OFP 最高，为 4.09 $g \cdot g^{-1}$; 人造板、制药行业、印刷、电子行业单位 OFP 相差不大，基本维持在 3 $g \cdot g^{-1}$ 左右。4) 印刷、制药、涂装、橡胶和塑料行业的 SOA 值稳定在 1.5 $g \cdot g^{-1}$；化工和人造板行业的 SOA 值较低，约为 0.7 $g \cdot g^{-1}$ 左右。5) 本研究选取化工企业 VOCs 组分复杂，导致芳香族、烷烃等物质占比较少，导致其单位 VOCs 的 SOA 和 OFP 值较低。但化工行业仍是 VOCs 管控重点对象。VOCs 成分谱反映了 O_3 和 SOA 生成潜势，在制定 O_3 和 SOA 污染控制法律法规时，重点关注 OFP 和 SOA 潜势高的行业，为环境主管部门建立相关的标准提供理论依据和全面支持各城市空气质量改善提供参考。

参 考 文 献

[1] HUANG R J, 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] 潘昕, 张巍, 黄银芝, 等. 典型涂料制造企业 VOCs 排放量核算与排放特征分析[J]. 环境工程学报, 2021, 15(3): 1049-1059.

[3] WANG T, XUE L K, BRIMBLECOMBE P, et al. Ozone pollution in China: A review of concentrations, meteorological influences, chemical precursors, and effects[J]. Science of the Total Environment, 2016, 575: 1582-1596.

[4] 黄鹤雯, 沙青娥, 朱曼妮, 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.

[5] 吴亚君, 胡君, 张鹤丰, 等. 兰州市典型企业 VOCs 排放特征及反应活性分析[J]. 环境科学研究, 2019, 32(5): 802-812.

[6] 徐遵主, 陆朝阳, 张纪文, 等. 长三角典型城市工业 VOCs 处理技术应用状况分析[J]. 环境工程, 2020, 38(01): 54-59.

[7] 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): 297-314.

[8] 余宇帆, 卢清, 郑君瑜, 等. 珠江三角洲地区重点 VOC 排放行业的排放清单[J]. 中国环境科学, 2011, 31(2): 195-201.

[9] 田亮, 魏巍, 程水源, 等. 典型有机溶剂使用行业 VOCs 成分谱及臭氧生成潜势[J]. 安全与环境学报, 2017, 17(1): 314-320.

[10] 刘芮伶, 李礼, 余家燕, 等. 重庆市夏秋季 VOCs 对臭氧和二次有机气溶胶生成潜势的估算[J]. 环境科学研究, 2017, 30(8): 1193-1200.

[11] 顾鑫生, 修光利. 基于 SPECIATE 数据库的典型行业挥发性有机恶臭物质筛选[J]. 环境工程学报, 2019, 13(3): 716-724.

[12] 谢轶嵩, 郑新梅, 刘春蕾. 南京市印刷行业 VOCs 成分谱及臭氧生成潜势[J]. 环境科技, 2018, 31(5): 64-67.

[13] 冯旸. 广州典型印刷企业挥发性有机物排放特征研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.

[14] 袁超. 上海市典型印刷企业 VOCs 排放特征分析[J]. 化工管理, 2022(6): 41-49.

[15] 王继钦, 熊超, 陈军辉, 等. 典型人造板制造企业 VOCs 排放特征及成分谱研究[J]. 四川环境, 2019, 38(4): 1-8.

[16] 李丹丹. 人造板释放污染物的识别与控制研究[D]. 北京: 清华大学, 2016.

[17] 孙世静. 人造板 VOC 释放影响因子的评价研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2011.

[18] HUANG M, ZHANG W, HAO L, et al. Experimental study of photooxidation products of ethylbenzene[J]. Journal of Environmental Sciences, 2010, 22(10): 1570-1575.

[19] 徐俊, 黄明强. 无机气体对苯系物二次有机气溶胶形成和化学组成影响的研究进展[J]. 分析化学, 2020, 48(4): 449-462.

[20] 孙婷, 刘凤娟. 室内甲醛污染治理方法研究进展[J]. 环境生态学, 2021, 3(8): 91-95.

[21] 刘冀鹏. 橡胶行业挥发性有机化合物的治理措施[J]. 橡塑技术与装备, 2016, 42(4): 72-73.

[22] 王瑞文, 张春林, 丁航, 等. 电子制造业塑料件生产过程的挥发性有机物排放特征分析[J]. 环境科学学报, 2019, 39(01): 4-12.

[23] 柳承强. 苏州市电子产品制造行业挥发性有机污染物处理对策研究[D]. 苏州: 苏州科技大学, 2017.

[24] 洪沁, 常宏宏. 家具涂装行业 VOCs 污染特征分析[J]. 环境工程, 2017, 35(5): 82-86.

[25] 吴应. 上海市重点工业涂装行业 VOCs 排放特征与控制标准体系研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2020.

[26] 于文璐, 张舸. 家具厂水性漆涂装过程 VOC 散发特征研究[J]. 暖通空调, 2022, 52(11): 134-137.

[27] 曹卫东, 朱玉标, 李勇. 典型化工企业挥发性有机物排放特征及其二次有机气溶胶生成潜势[J]. 中国资源综合利用, 2018, 36(7): 10-12.

[28] 邵弈欣, 陆燕, 楼振纲, 等. 制药行业 VOCs 排放组分特征及其排放因子研究[J]. 环境科学学报, 2020, 40(11): 4145-4155.

[29] CARTER WILLIAM P L. Development of ozone reactivity scales for volatile organic compounds[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 1994, 44(7): 881-899.

[30] ZHANG Y , XUE L , CARTER W , et al. Development of ozone reactivity scales for volatile organic compounds in a Chinese megacity[J]. Atmosphere Chemistry and Physics, 2021. https://doi.org/10.5194/acp-2021-44.

[31] BOWMAN F M, SEINFELD J H. Fundamental basis of incremental reactivities of organics in ozone formation in VOC/NOx mixtures[J]. Atmospheric Environment, 1994, 28(20): 3359-3368.

[32] 周燕芳, 陈梦霞, 丁佳锋, 等. 彩钢行业 VOCs 排放特征及 O_3 和 SOA 生成潜势[J]. 中国环境科学, 2019, 39(4): 1365-1370.

[33] KANSAL A. Sources and reactivity of NMHCs and VOCs in the atmosphere: A review[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 166(1): 17-26.

[34] GROSJEAN D. In situ organic aerosol formation during a smog episode: Estimated production and chemical functionality[J]. Atmospheric Environment, 1992, 26(6): 953-963.

[35] LI C , LIU Y , CHENG B , et al. A comprehensive investigation on volatile organic compounds (VOCs) in 2018 in Beijing, China: Characteristics, sources and behaviours in response to O3 formation[J]. Science of the Total Environment, 2022, 806: 150247.

[36] DUAN W , WANG X , CHENG S , et al. Regional division and influencing mechanisms for the collaborative control of $PM_{2.5}$ and O_3 in China: A joint application of multiple mathematic models and data mining technologies[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 337: 130607.

[37] 上海市环境科学研究院. 我国工业源 VOCs 排放特征研究分享[R/OL]. (2022-08-16) [2023-10-12]. https://mp.weixin.qq.com/s?__biz=MzIwNjc2OTY4Mg==&mid=2247639581&idx=3&sn=41a728175953f81c804d59e18d00c0d0&chksm=97107960a067f0765629dbbf13f52101a6b31db2eeffa2f10f43adaab645f2ab654e4634e1f0&scene=27.

(责任编辑: 靳炜)

Emission characteristics and emission reduction potential of volatile organic compounds from typical industrial sources in Jiangsu Province

XU Zunzhu[1,2], XIONG Honghong[3], ZHANG Yuwei[2], JIN Xiaoxian[2], LIU Dong[2], WANG Yibo[4], ZHOU Fei[1,*]

1. Jiangsu Provincial Key Laboratory of Environmental Engineering, Nanjing 210036, China; 2. NJU environmental technologies of Nanjing University Jiangsu co, Nanjing 210036, China; 3. Zhengzhou Shengda College of Economic and Trade Management, Zhengzhou 451104, China; 4. State Key Laboratory of Environmental Protection and Ecological Industry, Chinese Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

*Corresponding author, E-mail：1494131147@qq.com

Abstract　VOCs is the precursor of ozone and secondary organic aerosol combined pollution. In this study, from the perspective of raw materials and production process, the composition spectrum of VOCs in Jiangsu Province was constructed for the typical industries such as wood-based panel, printing, electronics, rubber and plastics, pharmaceutical, chemical and spraying. Through MIR(maximum incremental reactivity coefficient) and FAC(fractional generation coefficient), the differences of VOCs components in various industries and enterprises, ozone generation potential and secondary particulate matter generation potential were analyzed according to the differences of raw materials, products and processes. The unit OFP of rubber and plastics industry is the highest, which is about 4.09 $g \cdot g^{-1}$. Printing, pharmaceutical, painting, rubber and plastics industries with high SOA value have SOA value of about 1.5 $g \cdot g^{-1}$. According to MIR and FAC, rubber and plastic industry is the focus of O_3 pollution control, and printing, pharmaceutical, painting, rubber and plastic industry is the focus of secondary aerosol control. Based on the characteristics of VOCs of typical industry in Jiangsu Province, the differences between the current domestic VOCs treatment technology guidelines recommended processes and existing inefficient treatment processes were analyzed, and the annual pollution volume and emission reduction potential of pollution characteristics of VOCs of typical industry in China were estimated, as the key basis for the formulation of relevant regulations and policies of VOCs management.

Keywords　volatile organic compounds (VOCs); emission characteristics; emission reduction potential; compound pollution; typical industry