

DOI:10.7524/j.issn.0254-6108.2023110902

张达标, 杨俊超, 穆奕君, 等. 广西典型行业 VOCs 排放源成分谱特征[J]. 环境化学, 2024, 43(5): 1732-1742.

ZHANG Dabiao, YANG Junchao, MU Yijun, et al. Spectral characteristics of VOCs emission sources from typical industries in Guangxi[J]. Environmental Chemistry, 2024, 43 (5): 1732-1742.

## 广西典型行业 VOCs 排放源成分谱特征\*

张达标<sup>1</sup> 杨俊超<sup>1</sup> 穆奕君<sup>1</sup> 毛敬英<sup>1\*\*</sup> 董慧峪<sup>2</sup> 章纹<sup>1</sup> 黄喜寿<sup>1</sup>  
莫招育<sup>1</sup> 粟少丽<sup>1</sup> 黄炯丽<sup>1</sup> 刘绍刚<sup>2,3\*\*</sup>

(1. 广西壮族自治区环境保护科学研究院, 南宁, 530022; 2. 中国科学院生态环境研究中心, 中国科学院饮用水科学与技术重点实验室, 北京, 100085; 3. 广西民族大学化学化工学院, 林产化学与工程国家民委重点实验室, 广西高校应用分析化学重点实验室, 南宁, 530006)

**摘要** 挥发性有机物 (VOCs) 作为臭氧生成的重要前体物, 摸清其排放源成分谱特征, 是破解臭氧污染防治难题的关键所在. 当前, 广西臭氧污染日益凸显, 然而 VOCs 排放底数仍模糊不清. 针对此问题, 本研究对广西包装印刷、家具制造、汽车维修、岗石制造、人造板制造等 5 个典型行业 VOCs 排放进行采样, 分析 115 种 VOCs 组分, 探究其 VOCs 排放浓度水平、源成分谱特征及臭氧生成潜势. 结果表明, 包装印刷行业 VOCs 的浓度相对最高 (12.98 mg·m<sup>-3</sup>), 是其余 4 个行业的 2—86 倍, 其次分别为家具制造 (5.72 mg·m<sup>-3</sup>)、汽车维修 (1.34 mg·m<sup>-3</sup>)、岗石制造 (0.84 mg·m<sup>-3</sup>)、人造板制造 (0.15 mg·m<sup>-3</sup>) 行业, 其中, 包装印刷行业排放以烷烃 (55.37%) 为主, 其次是 OVOCs (27.51%); 家具制造行业以 OVOCs (50.98%) 排放为主, 其次是芳香烃 (31.05%); 汽车维修行业以芳香烃 (32.25%) 为主, 其次是 OVOCs (23.76%); 岗石制造行业组成以烷烃 (42.43%) 排放为主, 其次是芳香烃 (23.76%); 人造板制造行业以 OVOCs (52.05%) 排放为主, 其次是芳香烃 (14.32%). 臭氧生成潜势计算结果显示, 臭氧生成潜势大小依次为家具制造 (22.62 mg·m<sup>-3</sup>)>包装印刷 (17.24 mg·m<sup>-3</sup>)>汽车维修 (4.29 mg·m<sup>-3</sup>)>岗石制造 (1.44 mg·m<sup>-3</sup>)>人造板制造 (0.50 mg·m<sup>-3</sup>) 行业, 5 个行业中对臭氧生成潜势贡献最大的关键物种依次分别为己醛 (44.21%)、2-甲基己烷 (9.76%)、间/对-二甲苯 (24.61%)、苯乙烯 (29.27%)、乙醛 (23.86%). 针对家具制造、汽车维修、岗石制造、人造板制造行业的 VOCs 治理及其引起的臭氧污染防治应重点关注臭氧生成潜势贡献率大的关键 VOCs 物种.

**关键词** 典型行业, 挥发性有机物, 源谱特征, 广西.

中图分类号 X-1; O6 文献标识码 A

## Spectral characteristics of VOCs emission sources from typical industries in Guangxi

2023 年 11 月 9 日收稿(Received: November 9, 2023).

\* 国家自然科学基金 (42205121), 广西自然科学基金 (2023GXNSFBA026358), 国家自然科学基金 (21976040, 22166008), 广西自然科学基金 (2023GXNSFBA026357), 广西高等学校高水平创新团队及卓越学者资助计划 (桂教人 [2020]6 号), 广西环科院科研创新基金项目 (HKY-HT-2023275) 和广西大气污染源解析及预报预警工程技术中心资助.

**Supported by** the National Natural Science Foundation Project (42205121), Guangxi Natural Science Foundation Project (2023GXNSFBA026358), the National Natural Science Foundation Project (21976040, 22166008), Guangxi Natural Science Foundation Project (2023GXNSFBA026357), Guangxi Higher Education High level Innovation Team and Outstanding Scholar Funding Program (Guijiaoren [2020] No. 6), the Research and Innovation Fund of Guangxi Academy of Environmental Sciences (HKY-HT-2023275) and the Guangxi Air Pollution Source Analysis, Forecasting and Early Warning Engineering Technology Center.

\*\* 通信联系人 **Corresponding author**, E-mail: 13978185061@163.com; liushaogang2005@163.com

ZHANG Dabiao<sup>1</sup> YANG Junchao<sup>1</sup> MU Yijun<sup>1</sup> MAO Jingying<sup>1\*\*</sup> DONG Huiyu<sup>2</sup>  
QIN Wen<sup>1</sup> HUANG Xishou<sup>1</sup> MO Zhaoyu<sup>1</sup> SU Shaoli<sup>1</sup>  
HUANG Jiongli<sup>1</sup> LIU Shaogang<sup>2,3\*\*</sup>

(1. Guangxi Zhuang Autonomous Region Environmental Protection Science Research Institute, Nanning, 530022, China; 2. Key Laboratory of Drinking Water Science and Technology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100085, China; 3. Key Laboratory of Chemistry and Engineering of Forest Products, State Ethnic Affairs Commission, Key Laboratory of Applied Analytical Chemistry (Guangxi Minzu University), Guangxi Minzu University, Nanning, 530006, China)

**Abstract** Volatile organic compounds (VOCs) are important precursors for ozone generation, and characterising the compositional profile of their emission sources is the key to solving the problem of ozone pollution prevention. Currently, ozone pollution in Guangxi is becoming more and more prominent, but the emission of VOCs is still ambiguous. In order to address this problem, this study sampled VOCs emissions from five typical industries in Guangxi, namely packaging and printing, furniture manufacturing, automobile maintenance, granite manufacturing, and man-made board manufacturing, and analysed 115 VOCs components to investigate their VOCs emission concentration levels, source spectral characteristics, and Ozone Formation Potential (OFP). The results showed that the packaging and printing industry had the relatively highest concentration of VOCs ( $12.98 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ), which was 2—86 times higher than that of the remaining four industries, followed by furniture manufacturing ( $5.72 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ), automotive servicing ( $1.34 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ), granite manufacturing ( $0.84 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ), and wood-based panel manufacturing ( $0.15 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) industries, respectively. Among them, emissions from the packaging and printing industry were dominated by alkanes (55.37%), followed by oxygenated OVOCs (27.51%); emissions from the furniture manufacturing industry were dominated by OVOCs (50.98%), followed by aromatic hydrocarbons (31.05%); the automotive repair industry was dominated by aromatic hydrocarbons (32.25%), followed by OVOCs (23.76%); the composition of the granite manufacturing sector is dominated by alkanes (42.43%), followed by aromatic hydrocarbons (23.76%); and the wood-based panel manufacturing sector is dominated by OVOCs (52.05%), followed by aromatic hydrocarbons (14.32%). The results of OFP calculations show that the size of the OFP is in the order of furniture manufacturing ( $22.62 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) > packaging and printing ( $17.24 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) > automotive servicing ( $4.29 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) > granite manufacturing ( $1.44 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) > wood-based panel manufacturing ( $0.50 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) industries, and the key species that make the largest contribution to the OFP in the five industries are, in order of magnitude, hexanal (44.0%), and aromatic hydrocarbons (23.76%). The key species contributing most to the ozone generation potential in the five sectors were hexanal (44.21%), 2-methylhexane (9.76%), m/p-xylene (24.61%), styrene (29.27%), and acetaldehyde (23.86%), in that order, respectively. VOCs management for furniture manufacturing, automotive repair, granite manufacturing, and artificial board manufacturing industries and the prevention and control of ozone pollution caused by them should focus on high contribution rate key VOCs species.

**Keywords** typical industries, volatile organic compounds, source spectrum characteristics, Guangxi.

挥发性有机物(volatile organic compounds, VOCs)是臭氧(O<sub>3</sub>)生成的重要前体物<sup>[1-7]</sup>,是我国“十四五”期间防治的重点污染物。当前,我国大气中VOCs的来源类别多、排放组分复杂,其中工业源排放VOCs占人为源排放总量的60%<sup>[8]</sup>,且不同VOCs排放源会排放不同类型的VOCs物种,进而对O<sub>3</sub>的形成具有不同程度的影响效应<sup>[9-13]</sup>。欧美等发达国家和地区较早开展了大量的VOCs源成分谱特征研究<sup>[14-16]</sup>,建立了本地化的源成分谱,为深入推进VOCs的研究奠定了扎实的基础数据。近年来,国内

学者围绕不同行业、不同工艺 VOCs 排放源成分谱开展了广泛的研究,区域主要集中在珠三角<sup>[17-18]</sup>、北京<sup>[19-21]</sup>、长三角<sup>[22-24]</sup>、成渝地区<sup>[25-27]</sup>等地,结果显示,受不同 VOCs 原辅材料、生产工艺流程、末端治理方式之间差异的影响,各项研究结果体现的 VOCs 排放特征及特征因子并不完全相同<sup>[28]</sup>,对指导城市 VOCs 的精准管控具有一定的局限性.因此,建立本地化的 VOCs 排放源成分谱,不仅有利于掌握 VOCs 排放特征及特征因子,更有利于识别和量化不同污染源的污染贡献,这对实施城市 VOCs 的精细化管控具有十分重要的意义<sup>[29]</sup>.

近年来,广西 O<sub>3</sub> 浓度不降反升,大气首要污染物的结构也发生了显著变化,以 PM<sub>2.5</sub> 为首要污染物的污染天占比由 2015 年的 93.8% 下降至 2022 年的 24.0%,而以 O<sub>3</sub> 为首要污染物的污染天占比由 2015 年的 6.2% 显著上升至 2022 年的 76.0%,O<sub>3</sub> 污染已演变成为制约广西环境空气质量持续改善的关键因素.当前,国内对 O<sub>3</sub> 生成重要前体物 VOCs 排放源成分谱特征的研究,主要集中在经济发达地区,然而广西属于经济相对欠发达地区,对 VOCs 的认识尚不足、排放底数不清、无组织排放突出、治理正处于瓶颈期.

本研究选取了 VOCs 无组织排放突出、分布数量多、排放比重大的家具制造、人造板制造、包装印刷、岗石制造、汽车维修等 5 个重点行业作为典型行业进行研究.旨在通过对典型行业 VOCs 浓度水平、源成分谱特征及其臭氧生成潜势进行深入探究,建立典型行业本地化的 VOCs 源成分谱,填补广西研究空白,以期推进 VOCs 的精细化管控、深入打好 O<sub>3</sub> 污染防治攻坚战提供科技支撑.

## 1 材料与方法(Materials and methods)

### 1.1 样品采集

2023 年 7—9 月期间,于玉林、贺州、河池等城市选取典型涉 VOCs 排放行业企业进行样品采集,主要包括家具制造、人造板制造、包装印刷、岗石制造、汽车维修等 5 个典型行业,每个典型行业选取 4 家企业,共采集样品 20 组,主要针对企业涉 VOCs 无组织排放突出环节开展样品采集,详见表 1.

表 1 各行业企业 VOCs 采集信息

Table 1 VOCs collection information of enterprises in various industries

行业 Industry	企业编号 Enterprise ID	排放环节 Emission process	采样点位 Sampling points	治理设施情况 Situation of governance facilities
家具制造	1#	喷漆	喷漆车间	无设施,无组织排放.
	2#	喷漆	喷漆车间	水帘,无组织排放.
	3#	晾干	晾干车间	水帘,无组织排放.
	4#	晾干	晾干车间	无设施,无组织排放.
人造板制造	5#	施胶	施胶车间	无设施,无组织排放.
	6#	施胶	施胶车间	无设施,无组织排放.
	7#	热压	热压车间	无设施,无组织排放.
	8#	热压	热压车间	无设施,无组织排放.
包装印刷	9#	印刷	印刷车间	无设施,无组织排放.
	10#	印刷	印刷车间	RTO,部分印刷设备无集气罩,无组织排放.
	11#	印刷	印刷车间	光氧活性炭,印刷设备无集气罩,无组织排放.
	12#	印刷	印刷车间	无设施,无组织排放.
岗石制造	13#	配料	配料车间	喷淋塔,无组织排放.
	14#	配料	配料车间	喷淋塔,无组织排放.
	15#	固化	配料车间	喷淋塔,无组织排放.
	16#	固化	配料车间	喷淋塔,无组织排放.
汽车维修	17#	喷漆	喷漆车间	光氧活性炭,无组织排放.
	18#	喷漆	喷漆车间	无设施,无组织排放.
	19#	喷漆	喷漆车间	光氧活性炭,无组织排放.
	20#	喷漆	喷漆车间	光氧活性炭,无组织排放.

采样前,参考 USEPA 推荐的 TO-15 方法<sup>[30]</sup>清洗苏玛罐,清洗气体为高纯氮气,使用 Entech300A 清罐仪对苏玛罐进行清洗、抽真空,并进行气密性检查和抽样空白实验。采样过程中,使用 3.2 L 苏玛罐(Entech Instruments Inc.,USA)进行负压真空采样,将采样口放置在生产车间无组织排放旁,逐步打开采样阀,待苏玛罐内外气压相等时可完成采样,采样时长约 5 min。采样后,拧紧采样阀、贴好标签,将苏玛罐进行常温保存,送回实验室进行分析。

## 1.2 分析方法

所采集的苏玛罐样品,采用气相色谱/质谱相结合的方法进行检测。利用电制冷超低温富集浓缩技术对 VOCs 进行冷冻捕集,通过双色谱柱分离后分别进入氢离子化火焰检测器(FID)和质谱(MS)进行检测,其中,13 种 C<sub>2</sub>—C<sub>5</sub> 化合物,通过 PLOT-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 色谱柱(15 m×0.32 mmID×3 μm, J&W Scientific, USA)分离后,使用氢火焰离子化检测器进行检测。其余 85 种化合物(间-二甲苯和对-二甲苯未能分开,标记为“间/对-二甲苯”)通过 DB624 色谱柱(60 m×0.25 mmID×1.4 μm, J&W Scientific, USA)分离后使用单四极杆质谱在选择性离子扫描模式下检测(EI 源, 70 eV)<sup>[31]</sup>,共检测 VOCs 物种 115 种,包括含氧 VOC(OVOCs)21 种,芳香烃 17 种,卤代烃 35 种,烷烃 29 种,烯烃 11 种,其他 2 种。完整的分析过程包括:样品采集、冷冻捕集、加热解析、GC-MS/FID 分析、仪器加热反吹。

## 1.3 质量控制与保障

为保障分析数据质量,采样前对苏玛罐进行清洗,检验合格后再进行样品采集。正式分析前,基于 PAMS 混合标气(Linde Co.,Germany)、EPATO-15OVOCs 和卤代烃混合标气(Spectra Gases Inc.,USA)对仪器进行多点校正,同时使用内标物质对质谱检测部分进行质控,确保校正曲线  $R^2 \geq 0.995$ 。分析时,采用电制冷机制冷,温度可达-150 ℃ 以下,可浓缩富集 C<sub>2</sub>—C<sub>12</sub> 碳氢化合物、卤代烃及含氧有机物等,保证目标化合物有效捕集,满足高挥发性化合物的捕集需要,并且进行实验室空白分析,确保仪器运行平稳,检测数据准确。

## 1.4 源成分谱的建立

样品分析后,得到不同行业企业 VOCs 浓度水平,在建立 VOCs 源成分谱时,采用各 VOCs 组分质量浓度占总 VOCs 质量浓度的百分数来表征各源样品的 VOCs 成分谱<sup>[27]</sup>,并对相同行业的企业进行归一化求平均值处理,得出不同行业 VOCs 排放源成分谱。

## 1.5 臭氧生成潜势计算

本研究参考 Carter 等<sup>[32-34]</sup>研究的 MIR 系数,采用臭氧生成潜势(ozone formation potential,OFP)的方法,定量评估各行业排放 VOCs 对 O<sub>3</sub> 生成的潜在贡献。OFP 为某 VOCs 化合物环境浓度与该 VOCs 的最大反应增量系数(maximum incremental reactivity,MIR)的乘积,计算公式为:

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

式中,  $\text{OFP}_{ij}$  表示计算得到的第  $j$  个源排放的第  $i$  个 VOCs 组分的臭氧生成潜势;  $[\text{VOCs}]_{ij}$  表示第  $j$  个行业排放的第  $i$  个 VOCs 物种的质量浓度( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ );  $\text{MIR}_i$  表示该 VOCs 在 O<sub>3</sub> 最大增量反应中 O<sub>3</sub> 的形成系数(无量纲),而各行业对臭氧的总生成潜势如下:

$$\text{OFP}_j = \sum \text{OFP}_{ij} \quad (2)$$

式中,  $\text{OFP}_j$  表示最终计算得到的第  $j$  种行业所排放 VOCs 的总生成潜势。

# 2 结果与讨论(Results and discussion)

## 2.1 VOCs 浓度排放水平

不同行业企业各环节 VOCs 浓度及组成如图 1 所示,包装印刷行业 VOCs 的浓度相对最高( $12.98 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ),是其余 4 个行业的 2—86 倍,其次分别为家具制造( $5.72 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ )、汽车维修( $1.34 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ )、岗石制造( $0.84 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ )、人造板制造( $0.15 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ )行业。但由于采样是在无组织排放的源头进行,VOCs 浓度与生产规模的大小、车间工艺、原辅料种类等因素密切相关,因此该处浓度水平仅作为内部横项比较参考,与实际大气浓度有所区别,更有价值的是不同典型行业 VOCs 组成的相对量的比较。



从不同行业企业的排放环节和 VOCs 组成来看,家具制造行业排放主要集中在喷漆、晾干环节,企业 1#—4#均以 OVOCs 和芳香烃为主,占比分别为 44.13%、48.75%、55.01%、53.69% 和 30.59%、34.99%、27.17%、29.20%,组成较为一致;人造板制造行业排放主要集中在施胶、热压环节,企业 5#—8#均以 OVOCs 为主,占比分别为 59.92%、51.04%、53.40%、40.10%,组成较为一致;包装印刷行业排放主要集中在印刷环节,企业 9#、10#均以烷烃为主,占比分别为 73.24%、91.07%,企业 10#—11#均以 OVOCs 为主,占比分别为 92.99%、62.68%;岗石制造行业排放主要集中在配料、固化环节,企业 13#—15#均以烷烃为主,占比分别为 73.08%、68.99%、62.96%,企业 16#的 VOCs 组成有所差异,以芳香烃为主,占比为 63.61%;汽车维修行业排放主要集中在喷漆环节,各企业 VOCs 组成略有所差异,企业 17#以 OVOCs、卤代烃为主,占比分别为 28.18%、44.63%,企业 18#、19#均以 OVOCs 和烷烃为主,占比分别为 31.17%、36.41% 和 17.58% 和 54.08%,企业 20#均以芳香烃为主,占比为 80.45%。可见,相同行业中各企业在 VOCs 的组成上总体较为一致,但由于受原辅材料、生产工艺、废气处理方式等因素的影响,不同企业在 VOCs 的构成比率上略有差异。

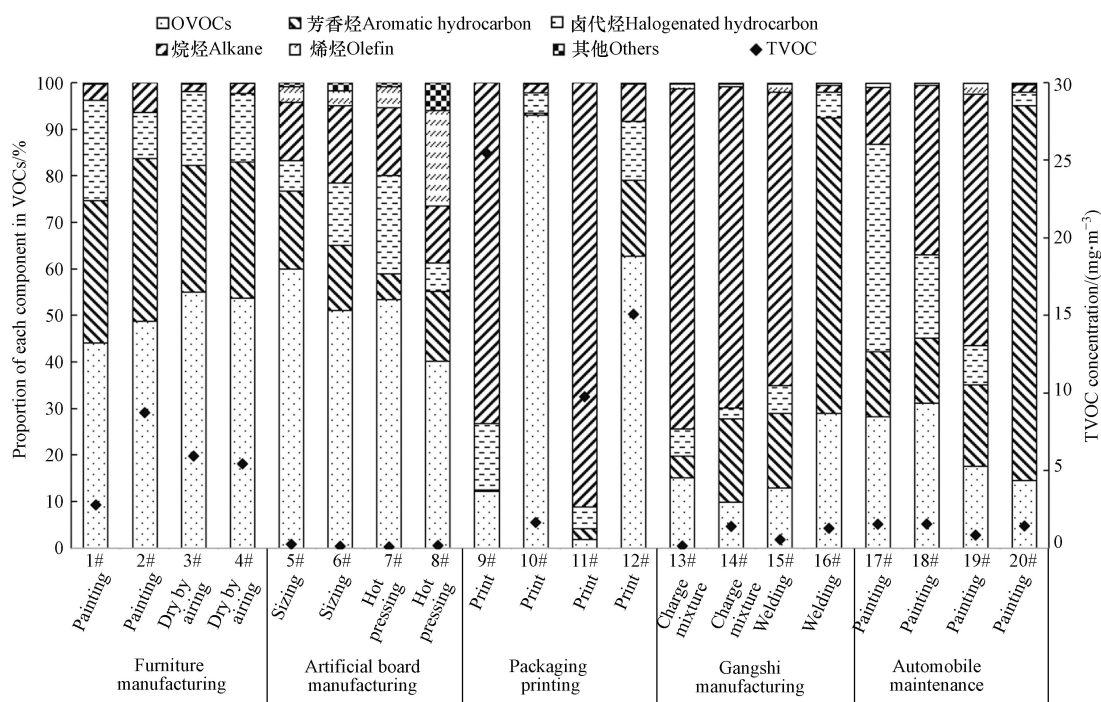


图 1 不同行业企业各环节 VOCs 浓度及组成

Fig.1 Concentration and composition of VOCs in various links of enterprises in different industries

## 2.2 VOCs 源成分谱特征

### 2.2.1 不同行业 VOCs 排放源成分谱分析

通过相同行业企业 VOCs 组成进行归一化处理,得出不同行业本地化的 VOCs 排放源成分谱,如图 2 所示.对比不同行业 VOCs 组成发现,不同行业 VOCs 组成存在明显差异.其中,家具制造行业以 OVOCs(50.98%)、芳香烃(31.05%)为主,其次为卤代烃(13.97%),烷烃(3.83%)、烯烃(0.14%)、其他(0.03%)占比相对最低;人造板制造行业以 OVOCs(52.05%)为主,其次为芳香烃(14.32%)、烷烃(13.53%)、卤代烃(9.64%)、烯烃(8.07%),其他(2.39%)占比相对最低;包装印刷行业以烷烃(55.37%)、OVOCs(27.51%)为主,其次为卤代烃(11.63%)、芳香烃(5.35%)、烯烃(0.12%),其他(0.02%)占比相对最低;岗石制造行业以烷烃(42.43%)、芳香烃(34.46%)为主,其次为 OVOCs(17.82%)、卤代烃(4.30%)、烯烃(0.76%),其他(0.23%)占比相对最低;汽车维修行业以芳香烃(32.25%)、OVOCs(23.76%)、烷烃(22.95%)、卤代烃(20.09%)为主,其次为烯烃(0.85%)、其他(0.10%)占比相对最低.

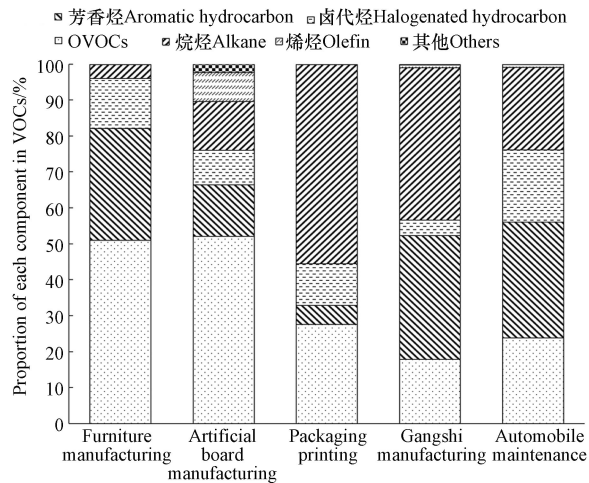


图 2 不同行业排放 VOCs 组成

Fig.2 Composition of VOCs emitted by different industries

### 2.2.2 不同行业 VOCs 排放源成分谱对比

不同行业 VOCs 排放源成分谱对比如见表 2 所示, 通过对比同一行业国内不同地区的 VOCs 组成发现, 本研究中, 家具制造行业与成都市<sup>[26]</sup>VOCs 主要种类相近, 均以 OVOCs (50.98% 和 38.00%)、芳香烃 (31.05% 和 50.00%) 为主, 但构成比率上差异明显, 这可能与油漆品种、生产工艺的差异有关. 人造板制造行业与广西<sup>[35]</sup>VOCs 主要种类相近, OVOCs (52.05% 和 89.04%) 占比均为最高, 以醛类物质为主, 与生产过程中使用脲醛树脂作为胶粘合剂的实际情况相吻合. 包装印刷行业与长沙市<sup>[36]</sup>VOCs 主要种类相近, 本研究以 OVOCs (27.51%)、烷烃 (55.37%) 为主, 参考文献以 OVOCs (74.10%)、烷烃 (10.50%) 为主, 但构成比率上差异明显, 这可能是由于油墨种类、印刷工艺、治理水平等差异所导致. 岗石制造行业与广东<sup>[37]</sup>VOCs 主要种类相近, 本研究以芳香烃 (34.46%)、OVOCs (17.82%)、烷烃 (42.43%) 为主, 参考文献以芳香烃 (78.90%)、OVOCs (13.39%) 为主, 但构成比率上差异明显, 这可能由于生产工艺的差异所导致. 汽车维修行业与荆州市<sup>[29]</sup>VOCs 主要种类相近, 本研究以 OVOCs (23.76%)、芳香烃 (32.25%)、卤代烃 (20.09%)、烷烃 (22.95%) 为主, 参考文献汽车制造行业以芳香烃 (11.00%)、卤代烃 (70.20%)、烷烃 (17.00%) 为主, 但构成比率上差异明显, 这可能由于所使用的油漆和生产工艺不同所导致. 通过对比发现, 相同行业在国内不同地区 VOCs 的主要种类相近, 但构成比率上差异明显.

表 2 不同行业 VOCs 排放源成分谱对比 (%)

Table 2 Comparison of VOCs emission source composition spectra in different industries (%)

行业类型 Industry type	OVOCs Oxygen containing volatile organic compounds	芳香烃 Aromatic hydrocarbon	卤代烃 Halogenated hydrocarbon	烷烃 Alkane	烯烃 Olefin	其他 Other	数据来源 Data sources
家具制造	50.98	31.05	13.97	3.83	0.14	0.03	本研究
人造板制造	52.05	14.32	9.64	13.53	8.07	2.39	本研究
包装印刷	27.51	5.35	11.63	55.37	0.12	0.02	本研究
岗石制造	17.82	34.46	4.30	42.43	0.76	0.23	本研究
汽车维修	23.76	32.25	20.09	22.95	0.85	0.10	本研究
家具制造	38.00	50.00	—	—	—	—	成都市 <sup>[26]</sup>
汽车制造	—	11.00	70.20	17.00	0.30	0.10	荆州市 <sup>[29]</sup>
人造板制造	89.04	0.61	9.94	0.35	0.03	0.03	广西 <sup>[35]</sup>
包装印刷	74.10	—	—	10.50	14.40	—	长沙市 <sup>[36]</sup>
岗石制造	13.39	78.90	5.37	1.51	0.67	0.15	广东 <sup>[37]</sup>
表面涂装	17.90	38.90	—	26.70	—	—	大连市 <sup>[38]</sup>
制药行业	—	11.60	63.70	15.50	—	—	大连市 <sup>[38]</sup>

### 2.2.3 不同行业 VOCs 排放特征物种分析

不同行业 VOCs 排放源成分谱以及占比排名前十的物种, 分别如图 3、表 3 所示, 通过占比分析, 提出不同行业排放优势物种. 其中, 家具制造行业以己醛(39.62%)、乙酸乙酯(8.03%)、1,2-二氯丙烷(7.42%)、1,2-二氯乙烷(6.91%)、邻-二甲苯(6.21%)、间/对-二甲苯(5.95%)为主, 合计占比 74.13%, 其中己醛、乙酸乙酯、邻-二甲苯、间/对-二甲苯等为涂料和稀释剂的典型组分, 表明家具制造行业排放特征与所使用的原辅料高度相关. 人造板制造行业以丙酮(11.95%)、乙醛(10.93%)、异丙苯(5.66%)、二氯甲烷(5.29%)、己醛(5.22%)、乙烯(4.79%)、乙酸乙酯(4.52%)为主, 合计占比为 57.42%, 主要为 OVOCs. 本研究人造板制造行业与覃海丽等<sup>[35]</sup>对广西人造板制造行业无组织排放的结果相近, 主要特征物种同为二氯甲烷、丙酮等物种. 包装印刷行业以乙酸乙酯(26.02%)、异丙醇(11.38%)、2-甲基己烷(7.53%)、2,3-二甲基戊烷(5.40%)、3-甲基己烷(4.40%)、二氯甲烷(4.31%)为主, 合计占比为 59.03%, 主要为 OVOCs、烷烃. 岗石制造行业以正戊烷(21.49%)、苯乙烯(20.82%)、异戊烷(10.43%)、丙烷(4.61%)为主, 合计占比为 57.34%, 特别是苯乙烯, 是生产过程中使用到的主要原辅料, 与周咪<sup>[37]</sup>等研究结果高度一致, 可见特征物种与原辅料的种类密切相关. 汽车维修行业喷漆环节排放的 VOCs 物种以己醛(13.94%)、1,2-二氯乙烷(10.09%)、间/对-二甲苯(9.84%)、丙烷(8.32%)、邻-二甲苯(7.29%)、二氯甲烷(7.09%)为主, 合计占比为 56.58%.

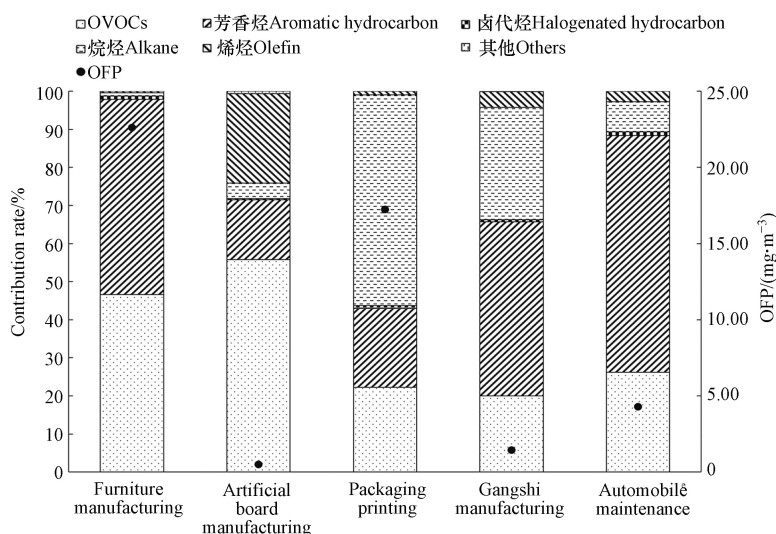


图 3 不同行业各类 VOCs 臭氧生成潜势及贡献率

Fig.3 Ozone generation potential and contribution rate of various VOCs in different industries

表 3 各行业 VOCs 源成分谱占比排名前十物种比较

Table 3 Comparison of top ten species in VOCs source composition spectra by industry

行业 Industry	VOCs 主要排放物种 Main species of VOCs emissions
家具制造	己醛(39.62%)、乙酸乙酯(8.03%)、1,2-二氯丙烷(7.42%)、1,2-二氯乙烷(6.91%)、邻-二甲苯(6.21%)、间/对-二甲苯(5.95%)、乙苯(4.57%)、3-乙基甲苯(2.76%)、正辛烷(2.73%)、1,2,4-三甲苯(2.09%)
人造板制造	丙酮(11.95%)、乙醛(10.93%)、异丙苯(5.66%)、二氯甲烷(5.29%)、己醛(5.22%)、乙烯(4.79%)、乙酸乙酯(4.52%)、丙烯醛(3.65%)、苯甲醛(2.78%)、丙醛(2.64%)
包装印刷	乙酸乙酯(26.02%)、异丙醇(11.38%)、2-甲基己烷(7.53%)、2,3-二甲基戊烷(5.40%)、3-甲基己烷(4.40%)、二氯甲烷(4.31%)、正己烷(3.79%)、甲基环己烷(3.60%)、正庚烷(3.41%)、1,2-二氯乙烷(2.82%)
岗石制造	正戊烷(21.49%)、苯乙烯(20.82%)、异戊烷(10.43%)、丙烷(4.61%)、正癸烷(3.70%)、苯甲醛(3.39%)、丁酮(3.37%)、正十二烷(2.62%)、异丁烷(2.59%)、丙酮(2.27%)
汽车维修	己醛(13.94%)、1,2-二氯乙烷(10.09%)、间/对-二甲苯(9.84%)、丙烷(8.32%)、邻-二甲苯(7.29%)、二氯甲烷(7.09%)、乙苯(5.45%)、正丁烷(4.22%)、甲苯(4.08%)、异丁烷(2.66%)

## 2.3 臭氧生成潜势分析

### 2.3.1 不同行业各类 VOCs 臭氧生成潜势分析

由于不同 VOCs 物种化学活性各异, 因此生成臭氧的潜能也不尽相同<sup>[33-34, 39]</sup>, 其对臭氧的潜在影响效应不一致. 为此, 在前文分析不同行业 VOCs 排放源成分谱及优势物种的基础上, 采用最大增量



反应活性法(MIR), 基于公式(1)和(2)估算了 5 个典型行业各种类 VOCs 的臭氧生成潜势及贡献率, 如图 4 所示. 结果表明, 从行业总臭氧生成潜势来看, 家具制造 ( $22.62 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ )>包装印刷 ( $17.24 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ )>汽车维修( $4.29 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ )>岗石制造( $1.44 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ )>人造板制造( $0.50 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ), 家具制造行业 TVOC 浓度虽然不是最高, 但由于其排放的物种活性强, 致使 OFP 值最高, 家具制造行业是未来需重点推进治理的行业. 从不同行业各类 VOCs 的臭氧生成贡献率来看, 本研究调查的 5 个行业中, 家具制造行业贡献以 OVOCs(46.64%)、芳香烃(51.29%)为主; 人造板制造行业贡献以 OVOCs(55.77%)、烯烃(23.55%)为主; 包装印刷行业贡献以 OVOCs(22.21%)、芳香烃(20.73%)、烷烃(55.34%)为主; 岗石制造行业贡献以 OVOCs(19.96%)、芳香烃(45.81%)、烷烃(29.52%)为主; 汽车维修行业贡献以 OVOCs(26.15%)、芳香烃(62.24%)为主, 是今后  $\text{O}_3$  污染防治中需重点防控的 VOCs 种类.

### 2.3.2 不同行业 VOCs 物种臭氧生成潜势分析

通过分析不同行业对 OFP 贡献排名前十的 VOCs 物种及贡献率, 详见表 4, 提出各行业本地化的  $\text{O}_3$  污染防治关键物种. 结果显示, 家具制造行业贡献以己醛(44.21%)、邻-二甲苯(12.89%)、间/对-二甲苯(12.37%)为主, 己醛贡献率最高; 人造板制造行业贡献以乙醛(23.86%)、乙烯(13.92%)、己醛(7.63%)、丙烯醛(7.46%)为主; 包装印刷行业贡献以 2-甲基己烷(9.76%)、甲苯(9.18%)、2,3-二甲基戊烷(7.71%)、异丙醇(6.09%)、甲基环己(5.59%)为主; 岗石制造行业贡献以苯乙烯(29.27%)、异戊烷(14.19%)、正戊烷(6.92%)、乙醛(6.79%)、间/对-二甲苯(5.43%)为主, 特别是苯乙烯, 是岗石制造行业 OFP 贡献率最高的物种; 汽车维修行业贡献以间/对-二甲苯(24.61%)、己醛(19.48%)、邻-二甲苯(18.18%)为主; 以上物种是今后  $\text{O}_3$  污染防治中需重点防控的 VOCs 关键物种.

表 4 不同行业对 OFP 贡献排名前十的 VOCs 物种及贡献率(%)

Table 4 Top 10 VOCs species and contribution rates in different industries contributing to OFP(%)

家具制造 Furniture manufacturing		人造板制造 Artificial board manufacturing		包装印刷 Packaging printing		岗石制造 Gangshi manufacturing		汽车维修 Automobile maintenance	
VOCs物种	贡献率/%	VOCs物种	贡献率/%	VOCs物种	贡献率/%	VOCs物种	贡献率/%	VOCs物种	贡献率/%
己醛	44.21	乙醛	23.86	2-甲基己烷	9.76	苯乙烯	29.27	间/对-二甲苯	24.61
邻-二甲苯	12.89	乙烯	13.92	甲苯	9.18	异戊烷	14.19	己醛	19.48
间/对-二甲苯	12.37	己醛	7.63	2,3-二甲基戊烷	7.71	正戊烷	6.92	邻-二甲苯	18.18
1,2,4-三甲苯	5.44	丙烯醛	7.46	异丙醇	6.09	乙醛	6.79	乙苯	5.44
3-乙基甲苯	4.48	丙醛	5.94	甲基环己烷	5.59	间/对-二甲苯	5.43	甲苯	4.88
1,3,5-三甲苯	3.78	异丙苯	4.72	3-甲基己烷	5.20	丁酮	3.92	四氢呋喃	2.94
乙苯	3.78	间/对-二甲苯	4.50	正己烷	4.91	甲苯	3.10	1,2,4-三甲苯	2.82
1,2,3-三甲苯	2.46	丙烯	3.78	己醛	4.64	异丁烷	2.44	3-乙基甲苯	1.82
2-乙基甲苯	1.98	异戊二烯	3.28	甲基环戊烷	4.05	邻-二甲苯	2.26	异戊二烯	1.39
4-乙基甲苯	1.51	四氢呋喃	2.77	乙酸乙酯	3.89	乙苯	1.85	甲基环己烷	1.19

## 3 结论(Conclusion)

1) 包装印刷行业 VOCs 的浓度相对最高( $12.98 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ), 是其余 4 个行业的 2—86 倍, 其次分别为家具制造( $5.72 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ )、汽车维修( $1.34 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ )、岗石制造( $0.84 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ )、人造板制造( $0.15 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ )行业. 各行业中 VOCs 分别来源于印刷、喷漆和晾干、喷漆、配料和固化、施胶和热压环节的排放, 无组织排放均较为突出. 相同行业中各企业在 VOCs 的组成上总体较为一致, 但由于受原辅材料、生产工艺、废气处理方式等因素的影响, 不同企业在 VOCs 的构成比率上略有所差异.

2) 从 VOCs 源成分谱来看, 包装印刷行业排放以烷烃(55.37%)为主, 其次是 OVOCs(27.51%); 家具制造行业以 OVOCs(50.98%)排放为主, 其次是芳香烃(31.05%); 汽车维修行业以芳香烃(32.25%)为主, 其次是 OVOCs(23.76%); 岗石制造行业组成以烷烃(42.43%)排放为主, 其次是芳香烃(23.76%); 人造板制造行业以 OVOCs(52.05%)排放为主, 其次是芳香烃(14.32%). 相比于国内其他地区, VOCs 主



要种类相近,但由于原辅料、生产工艺等因素的影响,在构成比率上差异明显。

3) 臭氧生成潜势计算结果显示,臭氧生成潜势大小依次为家具制造( $22.62 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ )>包装印刷( $17.24 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ )>汽车维修( $4.29 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ )>岗石制造( $1.44 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ )>人造板制造( $0.50 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ )行业,5个行业中对臭氧生成潜势贡献最大的关键物种依次分别为己醛(44.21%)、2-甲基己烷(9.76%)、间/对-二甲苯(24.61%)、苯乙烯(29.27%)、乙醛(23.86%)。包装行业 VOCs 关键物种对臭氧生成潜势贡献比较均衡,其 VOCs 排放治理要全面控制,针对家具制造、汽车维修、岗石制造、人造板制造行业的 VOCs 治理及其引起的臭氧污染防治应重点关注臭氧生成潜势贡献率大的关键 VOCs 物种。

当前,广西推进 VOCs 的研究和治理以人为源为主,而广西森林覆盖率达 62.55%,位居全国第三<sup>[40]</sup>,植被排放的生物源 VOCs(BVOCs)对臭氧生成的贡献不容忽视,未来需加强 BVOCs 组分的测定分析,有效遏制广西臭氧污染日益严重的趋势。此外,广西石化、化工、制药、塑料制造、汽车制造等行业也是涉 VOCs 排放的典型行业,未来亟待进一步推进其他典型行业、不同 VOCs 治理工艺 VOCs 排放源成分谱特征的研究,以及参考马陈焜<sup>[41]</sup>等、黄海凤<sup>[42]</sup>等的研究方法,开展 VOCs 对健康风险评估、VOCs 金属催化材料的研究。

#### 参考文献 (References)

- [1] 曹娟,毋振海,鲍捷萌,等. 美国人为源 VOCs 管控经验及其对我国的启示 [J]. 环境科学研究, 2022, 35(3): 633-649.  
CAO J, WU Z H, BAO J M, et al. Processes and experience of anthropogenic VOCs management and control in the USA and enlightenment to China[J]. Research of Environmental Sciences, 2022, 35(3): 633-649 (in Chinese)
- [2] 谢文晶,邢巧,谢东海,等. 海南省背景区域臭氧及其前体物污染特征 [J]. 环境科学, 2022, 43(12): 5407-5420.  
XIE W J, XING Q, XIE D H, et al. Pollution characteristics of ozone and its precursors in background region of Hainan Province[J]. Environmental Science, 2022, 43(12): 5407-5420 (in Chinese).
- [3] AHAMAD F, LATIF M T, TANG R, et al. Variation of surface ozoneexce edance around Klang Valley, Malaysia[J]. *Atmospheric Research*, 2014, 139: 116-127.
- [4] ASSAREH N, PRABAMROONG T, MANOMAIPHIBOON K, et al. Analysis of observed surface ozone in the dry season over Eastern Thailand during 1997-2012[J]. *Atmospheric Research*, 2016, 178/179: 17-30.
- [5] 朱家贤,王晓琦,欧盛菊,等. 2019年7月石家庄市 O<sub>3</sub> 生成敏感性 & 控制策略解析 [J]. 环境科学, 2022, 43(7): 3473-3482.  
ZHU J X, WANG X Q, OU S J, et al. Ozone sensitivity analysis and control strategy in Shijiazhuang city in July 2019[J]. Environmental Science, 2022, 43(7): 3473-3482 (in Chinese).
- [6] FU J S, DONG X Y, GAO Y, et al. Sensitivity and linearity analysis of ozone in East Asia: the effects of domestic emission and intercontinental transport[J]. *Journal of the Air & Waste Management Association* (1995), 2012, 62(9): 1102-1114.
- [7] LIN W L, XU X B, ZHENG X D, et al. Two-year measurements of surface ozone at Dangxiong, a remote highland site in the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2015, 31: 133-145.
- [8] 黄沛荣,朱波,张月,等. PM<sub>2.5</sub> 与 O<sub>3</sub> 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.  
HUANG P R, ZHU B, ZHANG Y, et al. Source spectral characteristics of industrial VOCs in Shenzhen from the perspective of collaborative control of PM<sub>2.5</sub> and O<sub>3</sub> [J] *China Environmental Science*, 2022, 42(8): 3473-3482 (in Chinese).
- [9] 杨燕萍,陈强,孟宪红,等. 兰州市夏季挥发性有机物污染特征及来源解析 [J]. 环境科学, 2022, 43(12): 5442-5452.  
YANG Y P, CHEN Q, MENG X H, et al. Summer pollution characteristics and sources of volatile organic compounds in Lanzhou[J]. Environmental Science, 2022, 43(12): 5442-5452 (in Chinese).
- [10] 王红丽. 上海市光化学污染期间挥发性有机物的组成特征及其对臭氧生成的影响研究 [J]. 环境科学学报, 2015, 35(6): 1603-1611.  
WANG H L. Characterization of volatile organic compounds(VOCs) and the impact on ozone formation during the photochemical smog episode in Shanghai, China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(6): 1603-1611 (in Chinese).
- [11] 金丹. 上海城郊夏季大气 VOCs 在臭氧生成中的作用 [J]. 环境科学, 2022, 43(1): 132-139.  
JIN D. Role of atmospheric VOCs in ozone formation in summer in shanghai suburb.[J]. *Environmental Science*, 2022, 43(1): 132-139 (in Chinese).
- [12] WANG H L, CHEN C H, WANG Q, et al. Chemical loss of volatile organic compounds and its impact on the source analysis through a two-year continuous measurement[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 80: 488-498.
- [13] 乔月珍,陈凤,李慧鹏,等. 连云港不同功能区挥发性有机物污染特征及臭氧生成潜势 [J]. 环境科学, 2020, 41(2): 630-637.  
QIAO Y Z, CHEN F, LI H P, et al. Pollution characteristics and ozone formation potential of ambient volatile organic compounds(VOCs)in summer and autumn in different functional zones of Lianyungang, China[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(2): 630-637 (in Chinese).

- [14] WADDEN R A, UNO I, WAKAMATSU S. Source discrimination of short-term hydrocarbon samples measured aloft[J]. *Environmental Science & Technology*, 1986, 20(5): 473-483.
- [15] SCHEFF P A, WADDEN R A. Receptor modeling of volatile organic compounds. 1. Emission inventory and validation[J]. *Environmental Science & Technology*, 1993, 27(4): 617-625.
- [16] FUJITA E M, WATSON J G, CHOW J C, et al. Receptor model and emissions inventory source apportionments of nonmethane organic gases in California's San Joaquin valley and San Francisco bay area[J]. *Atmospheric Environment*, 1995, 29(21): 3019-3035.
- [17] 于广河, 朱乔, 夏士勇, 等. 深圳市典型工业行业 VOCs 排放谱特征研究 [J]. *环境科学与技术*, 2018, 41(Sup1): 232-236.  
YU G H, ZHU Q, XIA S Y, et al. Study on the Characteristics of VOCs Emission Spectra of Typical Industrial Industries in Shenzhen[J]. *Environmental Science and Technology*, 2018, 41(Sup1): 232-236 (in Chinese).
- [18] 邓思欣, 刘永林, 司徒淑婷, 等. 珠三角产业重镇大气 VOCs 污染特征及来源解析 [J]. *中国环境科学*, 2021, 41(7): 2993-3003.  
DENG S X, LIU Y L, SI T S P, et al. Characteristics and source apportionment of volatile organic compounds in an industrial town of Pearl River Delta[J]. *China Environmental Science*, 2021, 41(7): 2993-3003 (in Chinese).
- [19] YUAN B, SHAO M, LU S H, et al. Source profiles of volatile organic compounds associated with solvent use in Beijing, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2010, 44(15): 1919-1926.
- [20] 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.  
FANG Li, LIU W W, CHEN D N, et al. Source profiles of volatile organic compounds(VOCs)from typical solvent-based industries in Beijing[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(10): 4395-4403 (in Chinese).
- [21] 李斌, 张鑫, 李娜, 等. 北京市春夏挥发性有机物的污染特征及源解析 [J]. *环境化学*, 2018, 37(11): 2410-2418.  
LI B, ZHANG X, LI N, et al. Pollution characteristics and source apportionment of volatile organic compounds in spring and summer in Beijing [J]. *Environmental Chemistry*, 2018, 37(11): 2410-2418 (in Chinese).
- [22] 何华飞, 王浙明, 许明珠, 等. 制药行业 VOCs 排放特征及控制对策研究以浙江为例 [J]. *中国环境科学*, 2012, 32(12): 2271-2277.  
HE H F, WANG Z M, XU M Z, et al. Studies on the emission characteristics and countermeasures of VOCs from pharmaceutical industry: —Based on Zhejiang Province[J]. *China Environmental Science*, 2012, 32(12): 2271-2277 (in Chinese).
- [23] 莫梓伟, 牛贺, 陆思华, 等. 长江三角洲地区基于喷涂工艺的溶剂源 VOCs 排放特征 [J]. *环境科学*, 2015, 36(6): 1944-1951.  
MO Z W, NIU H, LU S H, et al. Emission characteristics of solvent source VOCs based on spraying technology in the Yangtze River Delta region[J]. *Environmental Science*, 2015, 36(6): 1944-1951 (in Chinese).
- [24] 鲁君, 王红丽, 陈长虹, 等. 上海市机动车尾气 VOCs 组成及其化学反应活性 [J]. *环境污染与防治*, 2010, 32(6): 19-26.  
Lu J, Wang H L, Chen C H, et al. The composition and chemical reactivity of volatile organic compounds (VOCs) from vehicle exhaust in Shanghai, China[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2010, 32(6): 19-26 (in Chinese).
- [25] 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): 3031-3041.  
XU C X, CHEN J H, HAN L, et al. Source composition spectrum of volatile organic compounds in typical industries in Sichuan[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(7): 3031-3041 (in Chinese).
- [26] 周子航, 邓也, 周小玲, 等. 成都市工业挥发性有机物排源成分谱 [J]. *环境科学*, 2020, 41(7): 3042-3055.  
ZHOU Z H, DENG Y, ZHOU X L, et al. Source profiles of industrial emission-based VOCs in Chengdu[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(7): 3042-3055 (in Chinese).
- [27] 周子航, 邓也, 吴柯颖, 等. 成都市典型工艺过程源挥发性有机物源成分谱 [J]. *环境科学*, 2019, 40(9): 3949-3961.  
ZHOU Z H, DENG Y, WU K Y, et al. Source profiles of VOCs associated with typical industrial processes in Chengdu[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(9): 3949-3961 (in Chinese).
- [28] 王红丽, 杨肇勋, 景盛翱. 工艺过程源和溶剂使用源挥发性有机物排放成分谱研究进展 [J]. *环境科学*, 2017, 38(6): 2617-2628.  
WANG H L, YANG Z X, JING S G. Research progress on emission spectra of volatile organic compounds from process sources and solvent use sources[J]. *Environmental Science*, 2017, 38(6): 2617-2628 (in Chinese).
- [29] 黄凡, 王盼, 刘巍, 等. 工业园区典型行业 VOCs 源成分谱及其环境影响 [J]. *环境科学与技术*, 2023, 46(6): 158-165.  
HUANG F, WANG P, LIU W, et al. Source composition of volatile organic in typical industries of an industrial park and its environmental impact [J]. *Environmental Science & Technology*, 2023, 46(6): 158-165 (in Chinese).
- [30] United States Environmental Protection Agency. Compendium method TO-15 determination of volatile organic compounds(VOCs)in air collected in specially prepared canisters and analyzed by GC MS [R]. Washington DC: Office of Research and Development, 1999: 1428.
- [31] 郭淑政, 叶春翔, 林伟立, 等. 高原城市拉萨典型 VOCs 排放源成分谱特征 [J]. *环境科学*, 2024, 45(4): 2011-2018.  
GUO S H, YE C X, LIN W L, et al. Spectral characteristics of typical VOCs emission sources in the plateau city of Lhasa[J]. *Environmental Science*, 2024, 45(4): 2011-2018(in Chinese).
- [32] CARTER W P. Development of ozone reactivity scales for volatile organic compounds[J]. *Air & Waste*, 1994, 44(7): 881-899.
- [33] CARTER W P. Development of the SAPRC-07 chemical mechanism[J]. *Atmospheric Environment*, 2010, 44(40): 5324-5335.
- [34] ZOU Y, DENG X J, ZHU D, et al. Characteristics of 1 year of observational data of VOCs, NO<sub>x</sub> and O<sub>3</sub> at a suburban site in

- Guangzhou, China[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, 15(12): 6625-6636.
- [35] 覃海丽, 黄浩, 陈香颖, 等. 广西人造板行业 VOCs 排放特征及成分谱研究 [J]. 资源节约与环保, 2023(5): 143-148.  
QIN H L, HUANG H, CHRN X Y, et al. Study on VOCs Emission Characteristics and Composition Spectra of Guangxi Artificial Panel Industry[J] *Resource Conservation and Environmental Protection*, 2023(5): 143-148 (in Chinese).
- [36] 李清雅, 李晟, 王蕾, 等. 长沙市汽车制造和包装印刷企业有组织挥发性有机物源成分谱 [J]. 环境污染与防治, 2023, 45(08): 1132-1137.  
LI Q Y, LI S, WANG L, et al. Source profile of organized volatile organic compounds from automobile manufacturing and packaging and printing enterprises in Changsha [J] *Environmental Pollution and Prevention*, 2023, 45 (8): 1132-1137 (in Chinese).
- [37] 周咪, 朱迪, 庄延娟, 等. 人造石制造工艺过程中挥发性有机物 (VOCs) 的排放特征研究 [J]. 环境科技, 2019, 32(3): 34-38.  
ZHOU M, ZHU D, ZHUANG Y J, et al. Study on the Emission Characteristics of Volatile Organic Compounds (VOCs) in Artificial Stone Manufacturing Process [J] *Environmental Technology*, 2019, 32(03): 34-38 (in Chinese).
- [38] 赵辉, 李强, 宫福强. 大连市工业源 VOCs 排放现状及成分谱研究 [J]. 河北环境工程学院学报, 2023, 33(4): 85-89.  
ZHAO H, LI Q, GONG F Q. Research on the emission status and composition spectrum of VOCs from industrial sources in Dalian[J]. *Journal of Hebei University of Environmental Engineering*, 2023, 33(4): 85-89 (in Chinese).
- [39] 张雪驰, 沙青娥, 陆梦华, 等. 珠三角某石化园区 VOCs 排放特征及影响评价 [J]. 环境科学, 2022, 43(4): 1766-1776.  
ZHANG X C, SHA Q E, LU M H, et al. Volatile organic compounds emission characteristics and influences assessment of a petrochemical industrial park in the Pearl River Delta Region[J]. *Environmental Science*, 2022, 43(4): 1766-1776 (in Chinese).
- [40] 周映. 广西森林覆盖率居全国第三 [N/OL]. 南宁: 广西日报, [2023-12-06].
- [41] 马陈焯, 王建成, 张翔等. 城市商业建筑地下车库挥发性有机物 (VOCs) 污染特征及健康风险评估 [J/OL]. 环境化学. [2024-01-01]. doi: 10.7524/j.issn.0254-6108.2022111401  
MA C J, WANG J C, ZHANG X, et al. Pollution characteristics and health risk assessment of volatile organic compounds (VOCs) in underground garages of urban commercial buildings [J/OL] *Environmental Chemistry*, [2024-01-01]. doi: 10.7524/j.issn.0254-6108.2022111401 (in Chinese).
- [42] 黄海凤, 徐琴琪, 陈晓等. 整体式 Mn 基复合金属氧化物催化燃烧 VOCs 性能研究 [J]. 环境化学, 2018, 37(7): 1583-1590.  
HUANG H F, XU Q Q, CHEN X, et al. Study on the catalytic combustion performance of VOCs using integral Mn based composite metal oxides [J] *Environmental Chemistry*, 2018, 37 (7): 1583-1590 (in Chinese).