

# 云南省汽修行业挥发性有机物治理技术研究现状

钟敏<sup>1</sup>, 谢容生<sup>1,2\*</sup>, 秦宏萍<sup>1</sup>, 李红灿<sup>1</sup>, 刘红梅<sup>1</sup>

<sup>1</sup>云南省环境科学学会, 云南 昆明

<sup>2</sup>云南新世纪环境保护科学研究院, 云南 昆明

收稿日期: 2022年2月23日; 录用日期: 2022年3月24日; 发布日期: 2022年3月31日

## 摘要

本文结合国家及行业管理要求, 对云南省汽修行业挥发性有机物产排污工艺环节、治理技术现状进行了系统梳理, 并对不同治理技术特点进行对比分析, 对云南省VOCs治理技术现状进行总结, 研究成果为云南省制定汽修行业挥发性有机物排放标准提供基础理论和参考借鉴。

## 关键词

云南, 汽修行业, 挥发性有机物, 治理技术

# Status of Technology of Volatile Organic Compounds Treated in Yunnan Automobile Maintenance Industry

Min Zhong<sup>1</sup>, Rongsheng Xie<sup>1,2\*</sup>, Hongping Qin<sup>1</sup>, Hongcan Li<sup>1</sup>, Hongmei Liu<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Yunnan Environmental Science Society, Kunming Yunnan

<sup>2</sup>Yunnan New Century Environmental Protection Science Research Institute, Kunming Yunnan

Received: Feb. 23<sup>rd</sup>, 2022; accepted: Mar. 24<sup>th</sup>, 2022; published: Mar. 31<sup>st</sup>, 2022

## Abstract

Combined with the national and industry management requirements, this paper systematically combs the status quo of volatile organic products emission process and treatment technology in

\*通讯作者。

文章引用: 钟敏, 谢容生, 秦宏萍, 李红灿, 刘红梅. 云南省汽修行业挥发性有机物治理技术研究现状[J]. 环境保护前沿, 2022, 12(2): 150-157. DOI: 10.12677/aep.2022.122020

**Yunnan automobile maintenance industry, makes a comparative analysis of the characteristics of different treatment technologies, and summarizes the status quo of VOCs treatment technology in Yunnan Province. The research results provide basic theory and reference for Yunnan province to formulate VOC emission standards in automobile maintenance industry.**

## Keywords

**Yunnan, Automobile Maintenance Industry, VOCs, Treatment Technology**

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

VOCs 来源广泛, 主要分为自然源及人为源, 其中人为源主要包括工业源、农业源、交通源和生活源 4 类[1]。汽车维修业 VOCs 排放是生活源 VOCs 排放中重要部分, 目前汽车维修行业多使用溶剂型油漆, 产生的废气主要污染物为 VOCs, 溶剂型油漆产生的 VOCs 主要成分有甲苯、二甲苯、芳香烃、酯、醇、醚、酮等。挥发性有机物(VOCs)是对流层中臭氧(O<sub>3</sub>)和二次有机气溶胶(SOA)的重要前体物[2] [3], 也是造成大气中臭氧污染的主要原因[4] [5]。

据云南省国民经济和社会发展统计公报, 从 2014 年到 2020 年底, 全省民用汽车保有量从 431.98 万辆增长至 743.44 万辆, 呈逐年增加的趋势, 汽车保有量的快速增长, 使得云南省汽车维修业也快速发展。汽车维修涂装过程中涉及油墨、清洗剂、稀释剂等大量含 VOCs 原辅材料的使用, 有机溶剂极易挥发到环境中, 造成大气环境污染的同时危害人体健康[6] [7], 日益受到人们的关注[8] [9] [10] [11]。我国学者多以区域为研究对象, 采用排放因子法对工业源 VOCs 排放量、空间分布特征进行研究[12] [13] [14], 对生活源 VOCs 排放量核算鲜有涉及。

本文结合国家及行业管理要求, 对云南省汽修行业挥发性有机物产排污工艺环节、治理技术现状进行了系统梳理, 并对不同治理技术特点进行对比分析, 对云南省 VOCs 治理技术现状进行总结, 为云南省制定汽修行业挥发性有机物排放标准提供基础理论和参考借鉴。

## 2. 有机挥发性化合物管理要求

“十三五”期间全面推进 VOCs 污染防治工作, 2018 年 6 月 27 日, 国务院印发《打赢蓝天保卫战三年行动计划的通知》, 提出大幅减少主要大气污染物排放总量; 在“打赢蓝天保卫战三年行动计划”实施的关键阶段, 生态环境部对各个重点行业挥发性有机物(VOCs)的治理提出明确要求, VOCs 综合治理工作在重点行业全面展开。由于在汽车维修作业, 尤其是在喷涂作业中会产生 VOCs, 并且普遍存在 VOCs 的无组织排放、低效治理、敷衍应付治理等问题, 因此, 汽车维修行业已经成为国家 VOCs 治理的重点行业之一。涉及的政策文件和控制要求如下: 2019 年 6 月 26 日, 生态环境部印发《重点行业挥发性有机物综合治理方案》(以下简称《方案》)。《方案》要求完善标准体系, 加快涉 VOCs 行业排放标准制修订工作, 并鼓励地方制定更加严格的地方排放标准。国家《“十三五”VOCs 污染防治工作方案》要求: 推广采用静电喷涂等高涂着效率的涂装工艺, 喷漆、流平和烘干等工艺操作应置于喷烤漆房内, 使用溶剂型涂料的喷枪应密闭清洗, 产生的 VOCs 废气应集中收集并导入治理设施, 实现达标排放。开展露天喷涂汽车维修作业清理整顿工作; 推进政府绿色采购, 要求汽车维修等政府定点招标采购企业使

用低挥发性原辅材料。

2018年9月11日,云南省人民政府印发的《云南省打赢蓝天保卫战三年行动实施方案》要求:制定石化、化工、工业涂装、包装印刷、汽车维修等VOCs排放重点行业综合整治方案。并提出研究制定汽修行业挥发性有机物(VOCs)排放地方标准。云南省生态环境厅印发的《关于推进挥发性有机物污染防治工作的通知》要求,以工业涂装、汽车维修为切入点,稳步推进VOCs污染防治。2019年9月4日,云南省生态环境厅印发的《云南省重点行业挥发性有机物综合治理实施方案》要求:加大汽车、家具、集装箱、电子产品、工程机械等行业VOCs治理力度。

### 3. 汽修行业挥发性有机物产排污环节

据云南省历年统计年鉴和省交通运输厅数据,2020年全省汽车维修企业共31,511户。其中,一类汽车维修企业299户,二类汽车维修企业2289户,三类汽车维修企业22,782户。危险品车辆维修企业45户,摩托车维修企业6141户。

汽车维修生产工艺环节中,排放的挥发性有机化合物主要来自于预处理清洗剂与调漆过程VOCs的挥发、打腻子的溶剂挥发、喷烤漆(喷底漆、喷面漆、罩光漆)等过程的VOCs挥发及喷枪清洗产生的挥发性有机物等环节[15][16],具体产排污情况为:

#### 1) 预处理清洗剂等溶剂挥发

涂装前金属的表面处理,在车身上进行彻底的清洁和去油污以消除车身上所有的污渍,使工件便于施行后续喷涂,一般不产生VOCs,但如果前处理使用含VOCs的清洗剂,则也易挥发释放VOCs,另外,前处理的打磨等工序可能会产生颗粒物。

#### 2) 调漆、调色及储存过程油漆溶剂的挥发

将涂料、稀释剂、固化剂等进行调配的过程,调漆过程中如未进行密闭操作,有机溶剂易挥发。喷涂前的储存以及调配也会产生有机物挥发。储存过程中,一经开盖的涂料(含固化剂和稀释剂)VOCs就会挥发至环境中,未盖盖和密封不严的涂料挥发量会增加;调配、取用过程中也会有VOCs挥发至空气中;操作过程中遗撒到桌面、地面的涂料VOCs也会完全挥发至空气中。只有增强操作管理,减少遗撒、减少涂料暴露时间才可以降低储存及调配过程中VOCs的排放。

3) 打腻子:腻子中含有以二甲苯为主的挥发性有机物,在使用过程中也会挥发到空气中。腻子调配时通过估算待修补部位用量,取用相应量的原子灰(以原子灰为例)与固化剂至调配板上,利用涂抹板将其混合均匀,成为待用修补腻子。修补时用涂抹版取适量腻子均匀涂抹在经过表面处理后的待修补位置,涂抹完成后晾干,采用打磨机或手工将不够平整的地方打磨平整。

汽车修理过程中打腻子是在车间中露天进行的,调配以及涂抹过程中腻子中的挥发性有机物会直接挥发到车间环境中,依照每辆车修补面积和腻子用量不同,挥发量有所不同。

4) 喷涂与烘干:汽车漆包括底中涂、面漆、罩光清漆,按照修补工艺流程依次在涂装车间或者喷烤漆房中施用于汽车待修补表面。一般来说,大部分企业的底中涂在涂装车间中操作,面漆与罩光清漆的喷涂和烘干在喷烤漆房中操作。喷漆过程中部分原料漆以漆雾的形式飞散在喷烤漆房中,并随着喷烤漆房内气流向抽气方向移动,通过处理设备处理,排放至空气中。

喷涂时所采用的喷枪转移效率越高,到达汽车表面的漆量越多,反之飞散到空气中的漆雾越多,产生的挥发性有机物也越多。喷到汽车表面的漆料中的挥发性有机物也会逐渐挥发至空气中,剩余的固体份形成漆膜,烘干工序可以加速漆膜形成过程中挥发性有机物的挥发转移,挥发至空气中的有机物也随着气流经过地棉过滤进入处理设备并排放至空气中。

通过采用高转移效率的喷枪、使用低挥发性有机物含量的涂料、采用高效处理设备可以减少喷烤漆

房的 VOCs 排放量。

5) 喷枪清洗: 在完成任务量的喷涂作业以及需要更换颜色时, 需要对喷枪进行清洗, 防止残留涂料污染喷枪, 清洗剂中含有大量挥发性有机物, 在清洗过程中挥发到空气中。大部分汽车维修企业喷枪清洗都是露天清洗, 虽然对清洗用的清洗剂有回收, 但是在清洗过程中清洗剂中溶剂大量挥发, 并且直接进入环境空气中。

综上可知, 汽修厂在所有可能产生 VOCs 的工序中, 底漆、面漆、罩光漆的喷涂操作都在喷烤漆房内完成, 废气经过处理设备集中从排气筒有组织排放; 预处理、抹腻子 and 涂料储存及调配都没有收集处理设备, 会产生无组织排放。

主要产排污节点如图 1 所示。

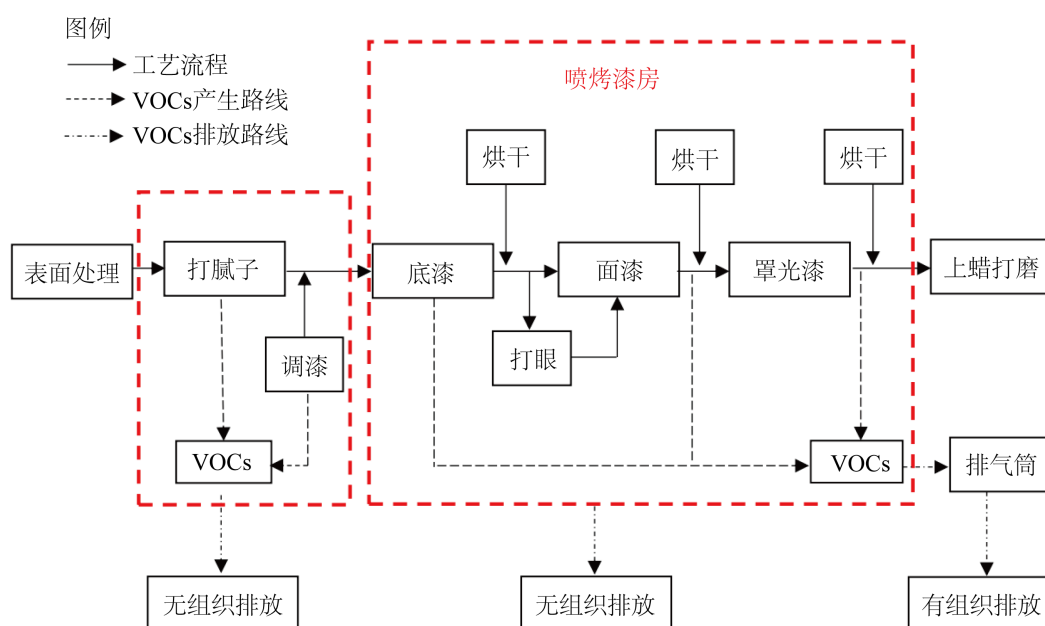


Figure 1. Pollution production link of VOCs in automobile maintenance industry

图 1. 汽修行业 VOCs 产排污环节

汽车维修行业 VOCs 的产生主要来自于喷烤漆工序中使用的油漆、固化剂及稀释剂中有机溶剂的挥发。在喷涂工序前, 将油漆及各类辅料按照一定比例要求进行调配, 调配好的即用油漆直接于喷烤漆房内通过喷枪进行喷涂修补作业。所有可能产生 VOCs 的工序中, 喷烤漆工序产生了汽车维修过程中高达 95% 的 VOCs [17]。废气经过处理设备集中从排气筒有组织排放。抹腻子和漆料储存及调配都没有收集处理设备, 会产生无组织排放。具体 VOCs 排放环节主要有以下 4 个方面: ① 打腻子环节的无组织排放; ② 漆料储存及调配时调漆间的无组织排放; ③ 喷烤漆房密封不严造成的无组织排放; ④ 喷烤漆房排气筒的有组织排放。

#### 4. 云南省汽修行业挥发性有机物治理技术

根据调研, 云南省汽修行业挥发性有机污染物治理技术主要包括源头控制、过程管理和末端治理。源头控制是指采用低挥发性有机物含量的原辅材料, 过程管理主要通过控制无组织排放达到减少挥发性有机物的排放总量; 末端治理设施是指采用收集装置收集所产生的废气, 并通过治理技术进行处理, 减少排放废气中的挥发性有机物浓度, 达标排放。

#### 4.1. 治理技术注意事项

末端治理设施是指采用收集装置收集所产生的废气，并通过治理技术进行处理，减少排放废气中的挥发性有机物浓度，达标排放。汽车维修行业末端治理需要考虑的因素包括：

1) 风量大，温度范围大，单个喷烤漆房风量在 1.5 万~2.5 万立方米/时之间，因此喷烤漆工序的废气风量在几万至十几万立方米/时不等；温度一般在 100 摄氏度以下；2) 含颗粒物，喷涂车间通常含有一定粘性漆雾和粉尘等杂质；3) 浓度低，喷烤漆房的浓度一般来说较低，一般在 60~150 mg/Nm<sup>3</sup> 之间；4) 成分复杂，由于涂料类型不同，其中 VOCs 物质差异较大，包括醇类、醚类、芳香烃、酯类等，目前很多企业是水性 and 溶剂型涂料混合使用；5) 间歇性排放，由于涂装企业间歇或连续性作业，排放废气时间不定；6) 在考虑安装 VOC 净化设备时要尽可能考虑老喷漆房场地有限、供电量不足等因素。

#### 4.2. 治理技术及其适用性分析

汽车维修行业油漆中产生的 VOCs 组分主要为甲苯、乙苯、二甲苯和三甲苯等苯系物[18]，常见 VOCs 末端治理技术[19]及其适用性如下：

##### 1) 吸附法

利用吸附剂吸附有机废气，适用于处理低浓度有机废气。喷涂行业一般采用活性炭作为吸附剂，对醇类、苯、醋酸及有机烃类具有较好的吸附效果。选用吸附容量更大、效率更高的蜂窝活性炭、活性炭纤维等吸附剂净化效率较高，但目前对吸附处理技术运行效果的监管较为困难。

##### 2) 低温等离子体技术

介质阻挡放电过程中，等离子体内部产生富含极高化学活性的粒子，如电子、离子、自由基和激发态分子等。废气中的污染物质与这些具有较高能量的活性基团发生反应，最终转化为 CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O 等物质，从而达到净化废气的目的。适用范围广，净化效率高。电子能量高，几乎可以和所有的气体分子作用；运行费用低；反应快，设备启动、停止十分迅速，随用随开。缺点是一次性投资较高、安全隐患。

##### 3) 光催化氧化

光催化处理技术是利用特种紫外线波段(C 波段)，在特种催化氧化剂的作用下，将废气分子破碎并进一步氧化还原的一种特殊处理方式。废气分子先经过特殊波段高能紫外光波破碎有机分子，打断其分子链；同时，通过分解空气中的氧和水，得到高浓度臭氧，臭氧进一步吸收能量，形成氧化性能更高的自由羟基，氧化废气分子。同时根据不同的废气成分配置多种复合惰性催化剂，大大提高废气处理的速度和效率，从而达到废气净化的目的。

##### 4) 热力燃烧法

在高温下有机废气与燃料气充分混和，实现完全燃烧。适用于处理高浓度、小气量的可燃性气体，净化效率高，有机废气被彻底氧化分解，缺点：设备易腐蚀，安装与运行成本高，易形成二次污染。

##### 5) 催化燃烧法

在催化剂的作用下，使有机废气中的碳氢化合物在温度较低条件下迅速氧化成水和二氧化碳，达到治理的目的。缺点：催化剂易中毒，投入成本高。

##### 6) 蓄热燃烧法

蓄热式燃烧技术采用了热量回收系统，回收燃烧后高温气体的热量用于预热进入系统的废气。与传统的催化燃烧、直燃式热氧化炉(TO)相比，具有热效率高、运行成本低、能处理大风量低浓度废气等特点，浓度稍高时，还可进行二次余热回收，大大降低生产运营成本。RTO 适用于绝大部分的有机废气，能够处理大风量、低浓度废气，同时对废气流量弹性很大，能够适应废气中污染物的组成和浓度的变化、波动。

##### 7) 生物法



利用微生物的生命过程把废气中的气态污染物分解转化成少或甚至无害物质。自然界中存在各种各样的微生物，几乎所有无机的和有机的污染物都能转化。生物处理不需要再生和其他高级处理过程，与其他净化法相比，具有设备简单、能耗低、安全可靠、无二次污染等优点，但不能回收利用污染物质。

#### 8) 吸附脱附 + 催化氧化

活性炭吸附脱附 + 催化氧化的工艺使用中，将喷漆和烤漆的 VOCs 废气吸附于装填有活性炭的吸附床上，干净空气被排出；活性炭吸附饱和后，热空气送入吸附床对活性炭进行脱附再生；脱附产生的高浓度 VOCs 气体，进入催化氧化床分解，干净的热空气用于活性炭脱附再生。

#### 9) 吸附浓缩 + 燃烧

吸附浓缩 + 燃烧是国内外低浓度、大风量 VOCs 治理的主流技术之一，将吸附技术和催化燃烧技术有机地结合起来的一种组合技术。将一次设备投资和运维费用较高，适合规模大，废气风量大、浓度高或不稳定、排放量高，经济效益好的维修企业选用。气体通过活性炭吸附装置后，将饱和的活性炭解析出来的有机气体通过脱附引风机作用送入净化装置，在较低温度下，在催化剂的作用下使废气中的可燃组分彻底氧化分解，从而使气体得到净化处理的一种废气处理方法。该项技术更为先进的装置是沸石转轮吸附浓缩+催化燃烧，采用优质的疏水性石分子筛作为吸附介质，取代活性炭，具有良好的吸附选择性和吸附容量大等特点，原位再生后可重复使用，而无须经常更换介质。但投资费用较高，难以在汽修行业推广。

不同 VOCs 治理技术适用范围与特点见表 1。由于实际工业生产处在不同实际情况的行业企业所排放 VOCs 气体的组成和特性等方面存在较大差异，因此在目前各个同类企业中的技术水平上很难用一个标准覆盖所有的情形。此外，单一方式处理 VOCs 工艺难以满足排放要求，各类不同排放物往往特性不同，很难采用共性进行处理，需要在相应主体工艺前加入预处理控制单元或进行不同处理工艺的组合，这样才能全面有效处理好污染物[20]。

然而，活性炭吸附脱附 + 固定式焚烧系统的一次性投资成本较大，市场上催生了一套活性炭吸附+移动式小型脱附焚烧炉，该套系统也是将含 VOCs 废气流经装填有活性炭的吸附床，活性炭吸附饱和后，将已经吸附饱和的活性炭装入脱附舱，由经燃烧室预热的空气对活性炭进行脱附，将脱附下来的废气进入燃烧室进行焚烧。该套系统只需要企业一次性投入活性炭装置的成本，不需要购买固定式的脱附设备。当活性炭吸附饱和后，以租用的形式由厂家携带脱附设备上门进行脱附，收取比较适中的脱附费用。该系统适用于处理风量中等、浓度不高的 VOCs 废气，一次性投资成本不高，日常运行成本也较低。但目前实际操作的案例较少。

**Table 1.** Applicable scope and characteristics of VOCs governance technology

**表 1.** 不同 VOCs 治理技术适用范围与特点

技术类别	适用范围	优点	缺点
吸附法	中低浓度的 VOCs 的净化，一般废气浓度 < 1500 mg/m <sup>3</sup>	去除效率高，能耗低，工艺成熟，设备简单，易于自动化控制	不适用于高浓度、高温的有机废气，定期更换吸附材料，吸附剂再生、运行费用高
低温等离子体	适用于低浓度 VOCs，室内空气净化	能耗低、实现 VOCs 低温去除	一次性投资高，有安全隐患
光催化氧化	风量大、浓度低的 VOCs，但各项参数设施要求较高	条件温和，常温常压；设备简单、维护方便；减少甚至无二次污染	技术尚不完全成熟；对于成分复杂的废气效果差；工况变化影响大；反应速度慢；产生臭氧

## Continued

热力燃烧	适用于中高浓度且无回收利用价值的有机废气治理，其中催化燃烧技术不适用于废气中含催化剂中毒的 VOCs 物种。	投资低，无二次污染	反应温度高，能耗高，运行费用较高
催化燃烧		反应温度低，运行费用低	催化剂的费用较高且只有一定的寿命
蓄热燃烧		热利用效率高，设备运行费用低	费用较高，对间歇式排放处理不经济
吸附脱附 + 催化氧化	适用于中低浓度、大风量 VOCs 排放，直接进行燃烧处理运行成本过高的情况	VOCs 去除效率高，一次投入相对较低	不适用于高沸点有机物的净化；对高湿度有机废气的去除效率较低
吸附浓缩 + 燃烧	适用于低浓度、大风量 VOCs 排放，直接进行燃烧处理运行成本过高的情况	安全性高，VOCs 去除效率高且稳定	一次性投资高

## 5. 结论与展望

汽车维修行业 VOCs 的产生主要来自喷烤漆工序中使用的油漆、固化剂及稀释剂中有机溶剂的挥发，其 VOCs 组分主要为甲苯、乙苯、二甲苯和三甲苯等苯系物等。

VOCs 末端治理技术较多，其中吸附浓缩、催化转化燃烧、生物工程处理、热力催化燃烧、等离子体处理等工艺在汽车维修行业应用较为广泛。催化转化燃烧、强力吸附等方面的处理工艺对所处理的 VOCs 种类表现出强效性和完全性，具有较好的应用性。光催化氧化设备处理喷漆废气比安装活性炭吸附设备费用高，而废活性炭的更换、收储、转移，会增加很多管理成本和处置转移费用，且如果废活性炭收储不好会使吸附的 VOCs 再次挥发，产生二次污染。综合对比经济和环境效益，使用光催化氧化设备进行处理汽车维修喷漆废气综合效果比使用活性炭吸附设备更好更稳定。

单一方式处理 VOCs 工艺难以满足排放要求，在实际应用中，应综合考虑 VOCs 气体特性、VOCs 处理技术经济性能、排放标准等因素进行技术的优化选择。

## 参考文献

- [1] US EPA (2011) National Volatile Organic Compounds Emission by Source Sector in 2005.
- [2] Hatfield, M.L. and Huff Hartz, K.E. (2011) Secondary Organic Aerosol from Biogenic Volatile Organic Compound Mixtures. *Atmospheric Environment*, **45**, 2211-2219. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.01.065>
- [3] 王文秀, 王永敏, 郑幸成, 等. 天津市汽修行业 VOCs 排放清单与排放特征研究[J]. 广州化工, 2017, 45(22): 123-126.
- [4] 魏巍, 王书肖, 郝吉明. 中国涂料应用过程挥发性有机物的排放计算及未来发展趋势预测[J]. 环境科学, 2019, 30(10): 2809-2815.
- [5] 卢滨, 黄成, 卢清, 等. 杭州市工业源 VOCs 排放清单及排放特征[J]. 环境科学, 2018, 39(2): 533-542.
- [6] Huss-Marp, J., Eberlein-Koenig, B., Darsow, U., et al. (2004) Short-Term Exposure to Volatile Organic Compounds Enhances Atopy Patch Test Re-Action. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, **113**, S56-S57. <https://doi.org/10.1016/j.jaci.2003.12.169>
- [7] Atkinson, R. (2000) Atmospheric Chemistry of VOCs and NO<sub>x</sub>. *Atmospheric Environment*, **34**, 2063-2101. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(99\)00460-4](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00460-4)
- [8] 徐建芬, 唐访良, 阮东德. 汽车修理养护企业挥发性有机物排放控制标准探讨[J]. 环境监测管理与技术, 2012, 24(4): 1-5.
- [9] 马战火. 汽车维修行业喷漆废气 VOCs 治理现状对比分析[J]. 绿色科技, 2018(14): 54-56.
- [10] 夏思佳, 刘倩, 赵秋月. 江苏省人为源 VOCs 排放清单及其对臭氧生成贡献[J]. 环境科学, 2018, 39(2): 592-599.

- 
- [11] 杨阳. 汽修企业 VOCs 的污染防治措施和建议[J]. 科技创新导报, 2017, 14(13): 117-118, 120.
- [12] 郝苗青, 史凯, 张时佳, 等. 天津市工业源挥发性有机物排放清单及区域分布研究[J]. 环境污染与防治, 2017, 39(1): 35-39.
- [13] 徐琬莹, 付飞, 吕建华, 等. 基于 LHS-MC 青岛市工业源 VOCs 排放清单及不确定性[J]. 环境科学, 2021, 42(11): 5180-5192.
- [14] 范西彩, 张新民, 张晓红, 等. 鹤壁市大气挥发性有机物源排放清单研究[J]. 中国环境科学, 2021, 41(2): 558-565.
- [15] 曾培源, 李建军, 廖东奇, 等. 汽车涂料生产环节 VOCs 的排放特征及安全评价[J]. 环境科学, 2013, 34(12): 4592-4598.
- [16] 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.
- [17] Rivera, J.L. and Reyes-Carrillo, T. (2014) A Framework for Environmental and Energy Analysis of the Automobile Painting Process. *Procedia CIRP*, **15**, 171-175. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.06.022>
- [18] 陈鹏, 张月, 张梁, 等. 汽车维修行业挥发性有机物排放特征及大气化学反应活性[J]. 环境科学, 2021, 42(8): 3604-3614.
- [19] 邵振华, 魏博伦, 叶志平, 等. 等离子体联合光催化治理喷漆废气[J]. 浙江大学学报(工学版), 2014, 48(6): 1127-1131.
- [20] 刘春晖. 浅谈挥发性有机物(VOCs)污染控制技术[J]. 汽车实用技术, 2020(20): 244-246.