

油烟净化器对餐饮 VOCs 排放和光化学特征的影响

蒋 宝,孙成一,白画画,陈 雪,何万清,聂 磊,石爱军,李国傲* (北京市环境保护科学研究院,国家城市环境污染控制工程技术研究中心,城市大气挥发性有机物污染防治技术与应用北京市重点实验室,北京 100037)

摘要: 选取了北京市 21 家餐饮企业,检测了净化器前端和后端的挥发性有机污染物(VOCs)的浓度水平,经油烟净化器净化后,烷烃类、烯烃类、含氧 VOCs 类和苯系物类污染物的排放平均浓度分别为 (714.62 ± 212.17) , (264.88 ± 94.58) , (374.72 ± 57.48) 和 $(174.93 \pm 55.19)\mu\text{g}/\text{m}^3$,烯烃类污染物中仅对四氯乙烯有明显的浓度降低效果.根据净化器对 VOCs 污染物的去除效果,有 35.7%的净化器净化效率为负值.烯烃类污染物是餐饮油烟污染中臭氧生成的最重要的前体物,占总臭氧生成潜势的 48.2%~50.7%.苯系物成为餐饮业排放污染物中二次有机气溶胶(SOA)的主要前体物,占总 SOA 生成潜势的 95% 以上.

关键词: 餐饮业; 挥发性有机污染物; 臭氧生成潜势; 二次有机气溶胶

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2021)05-2040-08

Influence of fume purifier on VOCs emission characteristics and photochemical reaction of catering. JIANG Bao, SUN Cheng-yi, BAI Hua-hua, CHEN Xue, HE Wan-qing, NIE Lei, SHI Ai-jun, LI Guo-ao* (National Urban Environmental Pollution Control Engineering Research Center, Beijing Key Laboratory of Urban Atmospheric Volatile Organic Compounds Pollution Control and Application, Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection, Beijing 100037, China). *China Environmental Science*, 2021,41(5): 2040~2047

Abstract: 21 restaurants in Beijing were selected to examine the concentrations of VOCs before and after fume purifiers. The results showed that the average concentrations of alkane, alkene, oxygenated volatile organic compounds (OVOCs) and benzene series were (714.62 ± 212.17) , (264.88 ± 94.58) , (374.72 ± 57.48) and $(174.93 \pm 55.19)\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectively. Among alkene compounds, only the concentration of tetrachloroethylene significantly decreased after fume purifying. Interestingly, the VOC-removal efficiency for 35.7% of fume purifiers was negative. As the most important precursors of ozone, ozone formation potential (OFP) of alkene compounds counted for 48.2%~50.7% of total OFP. Benzene series had become the most important precursor of secondary organic aerosol (SOA) in the restaurant emissions, accounting for more than 95% of the total SOA potential.

Key words: catering; volatile organic compounds (VOCs); ozone formation potential (OFP); secondary organic aerosol (SOA)

挥发性有机污染物(VOCs)是常温下以蒸汽形式存在于空气中的一类有机物,包括有毒有害有机物,同时包含了多种光化学臭氧生成和二次有机气溶胶(SOA)生成的重要前体物.有研究者相继在北京^[1]、上海^[2]、深圳^[3]、南京^[4-5]、成都^[6]等多地区开展了大气挥发性有机污染物的研究工作.VOCs 中的烷烃、烯烃、芳香烃等由于其氧化蒸汽压比还原蒸汽压低,可与大气中 OH 自由基、NO₃ 自由基和 O₃ 发生氧化反应,在城市光化学烟雾形成过程中起着重要作用^[7].

餐饮业大气污染物主要来自于烹饪过程中油脂、有机质的挥发、热氧化和热裂解^[8],是一种气、液、固混合物,成分复杂,由于烹饪方式和条件导致其成分组成变异性较大.作为城市重要的低空排放

污染源,餐饮源已经成为城市中有有机颗粒物的重要来源^[9],并且是大气中挥发性有机物和城市气溶胶的重要来源^[10-11].在对上海餐饮企业的调查^[12]中显示,烹饪过程中产生的 VOCs 主要以烷烃类($51.26 \pm 23.87\%$)和含氧 VOCs 类($24.33 \pm 11.69\%$)为主.Cheng 等^[10]比较了湘菜、鲁菜和家常菜的 VOCs 排放情况,发现烷烃分别占 VOCs 的 61.3%、62.6% 和 50.5%.有研究表明,餐饮业颗粒物与油烟排放浓度强相关,但是与 VOCs 的排放浓度弱相关,因此,油烟与颗粒物能够达到协同净化达标,但是 VOCs 需

收稿日期: 2020-09-24

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0211504);北京市科技计划项目(Z171100004417029,Z181100005418015)

* 责任作者,助理研究员,liguoao@cce.cn

要进行单独分析研究^[13]。

因此,确定餐饮源中影响空气质量的关键活性组分及其对臭氧生成的贡献,是解决餐饮业大气污染的核心问题之一。为了引导餐饮业采取有效措施控制餐饮业颗粒物及 VOCs 的排放,促进餐饮企业改造更换高效净化器及加装 VOCs 去除装置,2018 年北京市发布的《餐饮业大气污染物排放标准》(DB 1488-2018)^[14]中对油烟、颗粒物和总烃(NMHC)这 3 项污染物排放限值进行了规定,其中“非甲烷总烃”是表征“挥发性有机物”的一种指标,但是,目前国内用于餐饮业的油烟净化器多针对其中的颗粒物和油烟进行净化,文献报道中对颗粒物和油烟的分析较多^[13,15-17],对 VOCs 的净化效果停留在实验室阶段,对现场调查数据鲜有分析。

本研究基于 2019 年 5 月针对 21 家餐饮企业的大气污染物排放特征和油烟净化器净化效果调查,对 VOCs 污染物浓度及其油烟器对 VOCs 的去除效率进行了分析,并根据 VOCs 的臭氧生成潜势(OFP)和气溶胶生成系数(FAC)对其臭氧和 SOA 前体物的生态风险进行了分析,以期为餐饮业净化器的总体效果提供现场数据支撑,为餐饮业大气污染评估提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 污染物样品采集

本研究选取 21 家餐饮企业进行样品采集分析,并结合城市居民外出就餐习惯,选取午间 11:30~13:30 和晚间 17:30~19:30 的用餐高峰时段进行样品采集。

VOCs 样品采集采用真空采样箱结合 QC-2 大气采样仪(北京市劳动保护科学研究所)进行采样,具体方法参考《固定污染源废气挥发性有机物的采样气袋法》(HJ 732-2014)^[18]标准方法。采集断面位于油烟净化器前后端的平直烟道,在餐饮企业工况平稳条件下采集。以高纯氮气作为全程序空白样品。

1.2 样品测定

样品分析方法依据 EPA TO-15^[19]的方法采集和分析。样品采用气相色谱-质谱联用仪(安捷伦 7890A-5975C)进行测定。标准气体:PAMS 标气(57 组分)、TO-15 标气(65 组分)和 VOCs 内标气(4 组分)(Lindae Gas North America LLC),共计测定 104

种 VOCs。大气冷阱预浓缩仪为 ENTECH 7200,色谱柱为 VF-624(60m×0.25mm×1.00μm),程序升温条件:离子源 EI 温度为 230℃,四极杆温度为 150℃,传输线温度为 250℃,扫描方式为全扫描,扫描范围为 30~300amu。冷阱预浓缩仪条件为:一级冷阱吸附温度:-40℃;二级冷阱吸附温度:-50℃;三级冷阱聚焦温度:-170℃;一级冷阱脱附温度:10℃;二级冷阱脱附温度:60℃;三级冷阱进样温度:80℃;进样时间:1.5min。以清洁采样袋中注入高纯氮气作为实验室空白,每 10 个样品或每批次(少于 10 个样品/批)分析 1 个平行样,平行样中 VOCs 含量相对偏差小于或等于 30%,每 24h 分析一次校准曲线中间浓度点或者次高点,其测定结果与初始浓度值相对偏差保持小于或等于 30%。

1.3 污染物 OFP 和 SOA 生成潜势估算

大气中 VOCs 是参与光氧化反应的重要化合物种类,也是对流层臭氧和 SOA 的重要前体物^[8]。随着化合物种类的不同,反应速率不同,对臭氧生成的影响也不同,本研究利用最大增量反应性(MIR)^[20]分析评估各组分对臭氧生成的贡献,具体计算公式如下:

$$\text{OFP} = c(\text{VOC}) \times \text{MIR} \quad (1)$$

式中:OFP 为臭氧生成潜势,用以表达各化合物组分对臭氧生成的贡献,μg/m³;c(VOC)表示挥发性有机污染物浓度,μg/m³;MIR 为最大增量反应性, g O₃/g VOC。

SOA 是指 VOCs 与大气中的主要氧化剂(如 OH 自由基、NO₃ 自由基和 O₃ 等)发生光化学反应后,经气-粒转化,凝结形成的亚微粒子,是细颗粒物的重要组成部分。本研究基于 Grosjean 等^[21]的烟雾箱实验,采用气溶胶生成系数估算大气中的 VOCs 的 SOA 生成潜势。

具体计算公式如下:

$$\text{SOA}_p = \text{VOCs}_0 \times \text{FAC} \quad (2)$$

$$\text{SOA}_t = \text{VOCs}_t \times \text{FAC} = \text{VOCs}_0 \times (1 - \text{FVOCs}) \times \text{FAC} \quad (3)$$

式中:SOA_p 表示 SOA 生成潜势, μg/m³;SOA_t 表示 SOA 生成量, μg/m³;VOCs₀ 表示 VOCs 排放的初始浓度, μg/m³;FAC 为 SOA 生成系数, g FAC/g VOC,由烟雾箱实验获得;VOCs_t 表示 VOCs 经过氧化后的浓度, μg/m³;FVOCs 表示 VOCs 中参与反应的百分比,%.具体数值如表 1 所示。

表 1 本文中所使用的化合物的 MIR、FAC 和 FVOCs 值
Table 1 The MIR, FAC, and FVOCs values in the study

化合物名称	MIR (g O ₃ /g VOC)	FAC (g FAC/g VOC)	FVOCs (%)	化合物名称	MIR (g O ₃ /g VOC)	FAC (g FAC/g VOC)	FVOCs (%)
丙烷	0.49	—	—	甲基丙烯酸甲酯	15.61	—	—
异丁烷	1.23	—	—	甲基叔丁基醚	0.73	—	—
正丁烷	1.15	—	—	4-甲基-2-戊酮	3.88	—	—
异戊烷	0.37	—	—	2-己酮	3.14	—	—
正戊烷	1.31	—	—	丙烯	11.66	—	—
环戊烷	1.96	—	—	丙烯醛	7.45	—	—
甲基环戊烷	1.70	0.17	10	1-丁烯	9.73	—	—
环己烷	1.25	0.17	14	1,3-丁二烯	12.61	—	—
2,2-二甲基丁烷	1.17	—	—	反-2-丁烯	16.16	—	—
2,3-二甲基丁烷	0.97	—	—	顺-2-丁烯	14.24	—	—
2-甲基戊烷	1.50	—	—	1-戊烯	7.21	—	—
3-甲基戊烷	1.80	—	—	反-2-戊烯	10.56	—	—
正己烷	1.24	—	—	异戊二烯	10.61	—	—
甲基环己烷	1.70	2.7	20	顺-2-戊烯	10.38	—	—
2,3-二甲基戊烷	1.34	—	—	1-己烯	5.49	—	—
3-甲基己烷	1.61	—	—	苯	0.72	2	10
正庚烷	1.07	—	—	甲苯	4.00	5.4	12
2-甲基庚烷	1.07	0.5	10	乙苯	3.04	5.4	15
3-甲基庚烷	1.24	0.5	10	邻二甲苯	7.64	5	26
正辛烷	0.90	0.06	17	苯乙烯	1.73	—	—
2,2,4-三甲基戊烷	1.26	—	—	正丙苯	2.03	1.6	12
正壬烷	0.78	1.5	20	异丙苯	2.52	4	13
癸烷	0.68	—	—	1,2,3-三甲苯	11.97	3.6	51
十一烷	0.61	—	—	1,2,4-三甲苯	8.87	2	58
十二烷	0.55	—	—	1,3,5-三甲苯	11.76	2.9	74
丙酮	0.36	—	—	3-乙基甲苯	7.39	—	—
异丙醇	0.61	—	—	4-乙基甲苯	4.44	—	—
乙酸乙烯酯	3.20	—	—	2-乙基甲苯	5.59	—	—
2-丁酮	1.48	—	—	1,3-二乙基苯	7.10	6.3	47
乙酸乙酯	0.63	—	—	1,4-二乙基苯	4.43	6.3	47
四氢呋喃	3.22	—	—	萘	3.30	—	—
1,4-二氧己环	2.62	—	—	甲基丙烯酸甲酯	15.61	—	—

注:“—”表示文章中没有相关数据,FVOCs表示VOCs物种参与反应的分数.

2 结果与讨论

2.1 油烟净化器对挥发性有机污染物浓度的影响

根据餐饮业排放污染物的化学组成,将主要的挥发性有机污染物分为烷烃类、烯烃类、含氧 VOCs 类和苯系物类 4 大类.21 家餐饮企业的油烟净化器处理前后的挥发性有机污染物的现场调查排放情况如图 1 所示,实际应用过程中,VOCs 的净化效果并不明显.经油烟净化器净化后,烷烃类、烯烃类、含氧 VOCs 类和苯系物类污染物的排放总浓度分别为 (714.62 ± 212.17), (264.88 ± 94.58), (374.72 ± 57.48) 和(174.93 ± 55.19) μg/m³,其中烷烃类污染然的占比高达 45%以上.

本研究涉及的餐饮业包括了川湘菜、家常菜、鲁菜和烧烤 4 大类,基本涵盖了本地餐饮业的主要类型,其中烧烤类餐饮企业由于食品制作过程中温度高,VOCs 的排放也较高^[13,22].如图 1 所示,在烷烃类污染物中,正己烷、环己烷、异丁烷、正戊烷、正丁烷和丙烷的排放浓度较高,在油烟净化器处理前平均浓度可达(442.72 ± 85.31) μg/m³,占烷烃类污染物总量的 68.2%,在油烟净化器处理后的浓度可达 (518.30 ± 205.98) μg/m³,其占比升至烷烃类污染物总量的 72.5%.在烯烃类污染物中,油烟净化器处理前四氯乙烯占烯烃类污染总量的 40.4%,经油烟净化器处理后,四氯乙烯的占比降至 21.6%,有明显的净化效果,除四氯乙烯外,占比较高(49.5%~66.7%)的

烯烃类污染物包括 1-戊烯、1-己烯、反-2-丁烯、1,3-丁二烯和 1-丁烯。在含氧 VOCs 类污染物中,乙酸乙酯、丙烯醛和丙酮 3 类的平均浓度可达到 $(284.09 \pm 45.86) \mu\text{g}/\text{m}^3$,占含氧 VOCs 类污染物总量的 75.8% ~ 86.7%。苯系物污染物中含量较高的是苯和甲苯,占苯系物总浓度的 63.3% ~ 63.4%,但是净化器对两者的净化效果差异显著,经过净化器后,甲苯

的浓度上升了 56.6%,苯的浓度降低了 38.1%。油烟净化器对大部分 VOCs 污染物浓度的影响不显著的主要原因可能是由于静电或高频静电去除技术占主导的净化器,在静电处理过程中产生的臭氧导致部分大分子化合物再次氧化断链成了“新增”的 VOCs 污染物。另外,采用吸附技术的净化器也会因长期吸附饱和,出现脱附现象,造成净化效率下降。

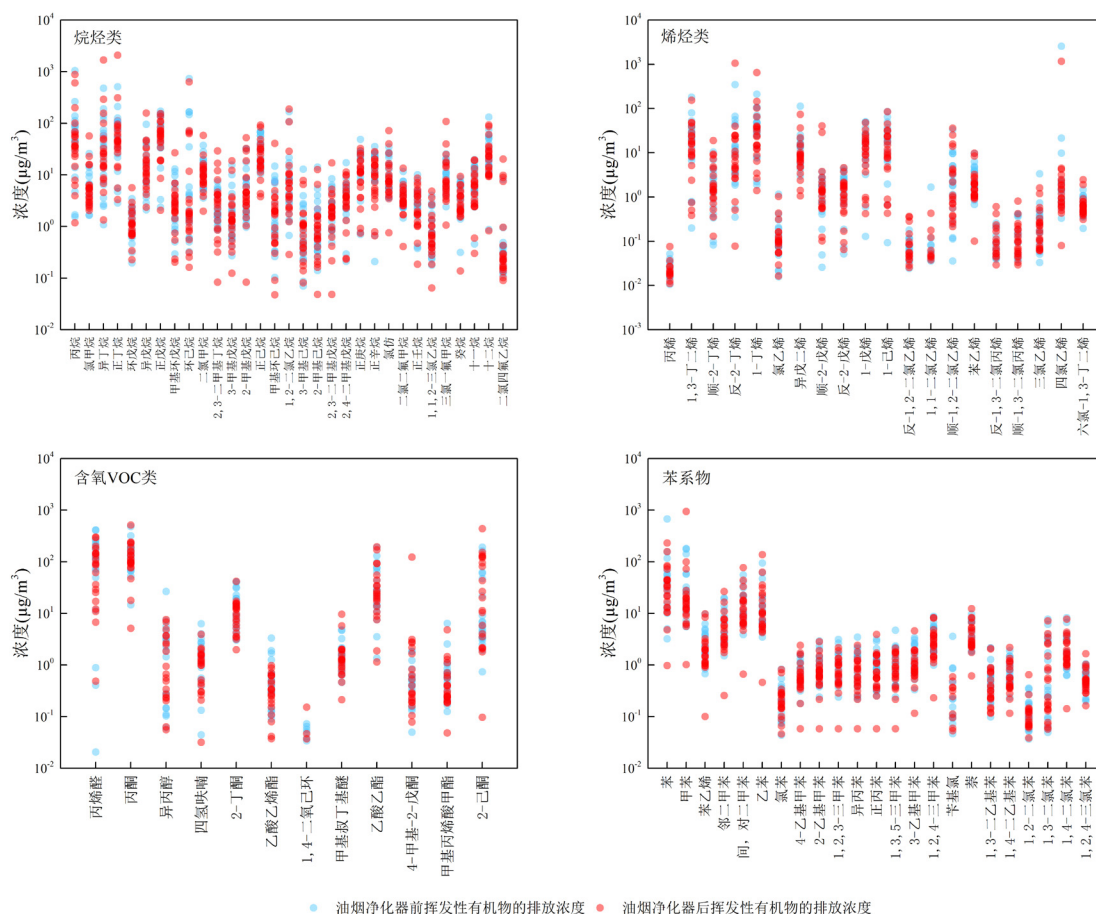


图 1 油烟净化器前后 4 类挥发性有机污染物的排放浓度

Fig.1 The concentration of VOCs before and after fume purifiers

2.2 油烟净化器的净化效率

挥发性有机污染物的排放与烹饪过程及其用品有密切关系,不同类型餐饮企业的污染物排放情况也有显著差异。且由于采样时段选择在餐饮业高峰时段,不同餐饮企业灶头数量不同,风机风量差异大,油烟在净化器中的停留时间也不同,另外,净化器的净化效率与净化器的使用周期和维护也有密切的关系,尤其是对高压静电的影响较大^[23-24],部分餐饮企业的油烟净化器安装时间长,部分污染物已经在净化器中有所累积,因此导致最后油烟净化器的净化效果不显著,与净化器的工作原理的相关性也不显著。

根据单因素方差分析的结果,4 类挥发性有机污染物在油烟净化器前后的排放浓度并无显著性降低 ($P < 0.05$)。对 21 家餐饮企业的烷烃类、烯烃类、含氧 VOCs 类和苯系物 4 类污染物的净化效果进行比较(图 2),烷烃类、烯烃类、含氧 VOCs 类和苯系物污染物净化效率为负值的企业分别有 9, 7, 7 和 7 家,有 30.1% 的污染物的被净化效率为负值。尤其是烷烃类污染物,有 42.9% 的净化器对烷烃的净化效率为负值,可能由于静电处理过程中产生的臭氧导致部分大分子化合物再次氧化断链,或采用吸附技术的净化器因长期吸附饱和,出现脱附现象,导致净化后烷烃类污染物不降反升。

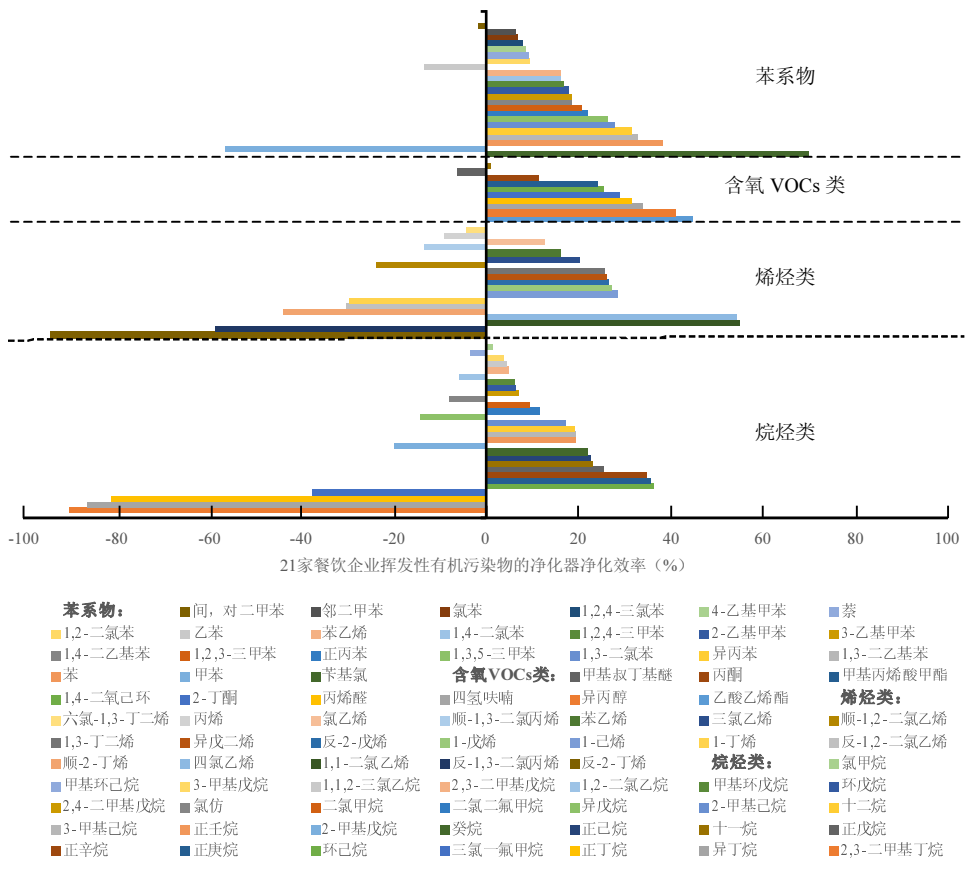
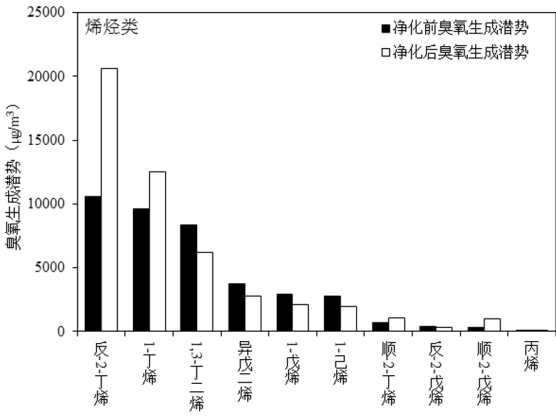
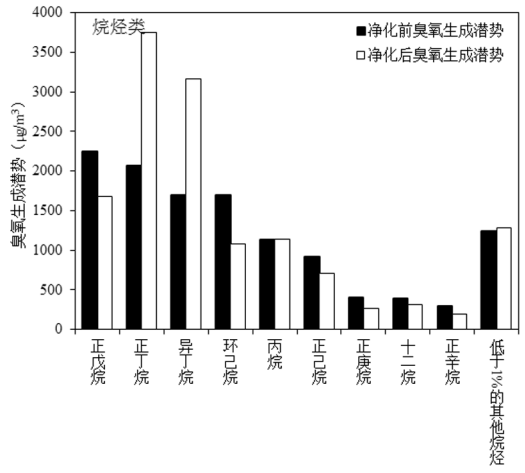


图2 21家餐饮企业4类挥发性有机污染物的净化器净化效率
Fig.2 Efficiency of fume purifiers for four kinds of VOCs from 21 catering

2.3 臭氧生成潜势分析

根据 Carter^[20]实验获得的最大增量反应性(MIR)分析评估各组分对臭氧生成的贡献,如图3所示,烷烃类、烯烃类、含氧 VOCs 类和苯系物污染物净化前的臭氧生成潜势分别为 12096.46, 39411.74, 7055.89 和 6972.29 $\mu\text{g}/\text{m}^3$;经过净化器后的臭氧生成潜势分别为 13591.02, 48515.00, 7869.02 和 10368.93 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,4类污染物在经过净化器后,臭氧生成潜势都有所上升,但并无显著性差异.其中,作为臭氧生成前体物的烯烃类污

染物总浓度(3685.50~4165.27 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)低于烷烃类污染物(12038.21~13290.98 $\mu\text{g}/\text{m}^3$),但是由于烯烃类物质的 MIR 较高(5.49~16.16),导致臭氧生成潜势较高,占总臭氧生成潜势的 48.2%~50.7%,说明烯烃类污染物是餐饮油烟污染中臭氧生成的重要前体物之一.这与崔虎雄^[25]和王倩等^[26]在上海市区 VOCs 的臭氧生成潜势研究中的发现相一致,这与烯烃的化学性质有关,烯烃属于不饱和烃,化学性质比烷烃活泼,因此减少烯烃的排放可以作为控制臭氧前提物的重要途径^[27].



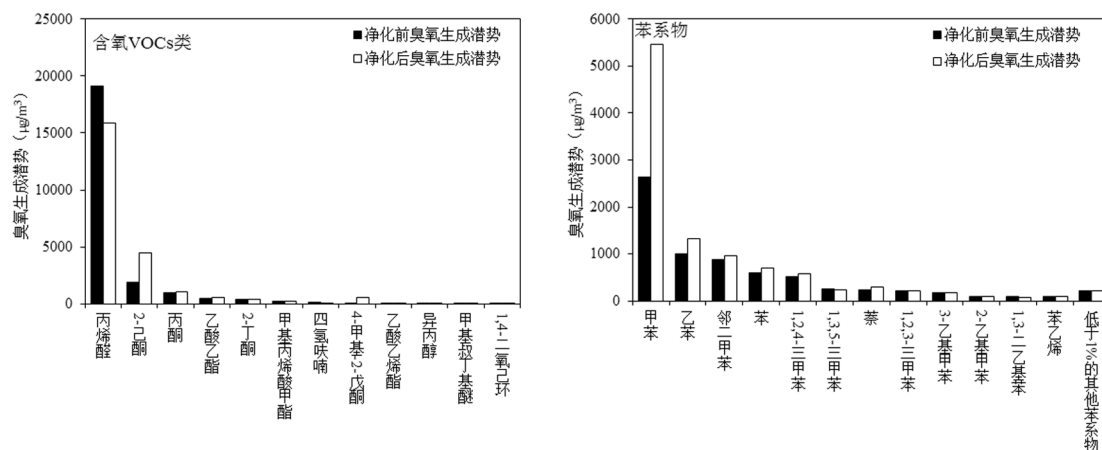


图3 净化前后4类挥发性有机污染物的臭氧生成潜势

Fig.3 The OFP of four kinds of VOCs before and after fume purifiers

内环表示净化前臭氧生成潜势;外环表示净化后臭氧生成潜势

烷烃中,污染浓度最高的正己烷、环己烷、异丁烷、正戊烷、正丁烷和丙烷是生成臭氧的重要物质,占烷烃臭氧生成潜势的 80.7%~84.9%;烯烃中,作为臭氧前体物的浓度最高的反-2-丁烯、1-丁烯和 1,3-丁二烯的臭氧生成潜势,占烯烃臭氧生成潜势的 72.5%~81.1%;含氧 VOCs 类中,仅丙烯醛的臭氧生成潜势占含氧 VOCs 类臭氧生成潜势的 68.4%~82.1%,且由于 4-甲基-2-戊酮经过净化器后,浓度升高了 $130.56\mu\text{g}/\text{m}^3$,因此其臭氧生成潜势占比也显著上升了 2%;在苯系物中,虽然苯的浓度($692.05\sim 817.88\mu\text{g}/\text{m}^3$)要显著高于甲苯浓度($657.85\sim 1365.06\mu\text{g}/\text{m}^3$),但是由于甲苯的 MIR 较高,成为苯系物中最主要的臭氧前体物,占苯系物臭氧生成潜势的 37.8%~52.7%。

2.4 SOA 生成潜势分析

虽然 SOA 的生成受温度、湿度、有机气溶胶质量等多种因素影响,用一个固定的 FAC 值来表示 SOA 的产率会出现较大的偏差,通过 FAC 计算得到的 SOA 生成潜势仍能给出大气有机物污染物形成 SOA 的趋势^[26]。由于在本研究中检测到的 VOCs 中仅有 17 种烷烃类和苯系物是 SOA 的前体物,因此,仅针对这 17 种化合物展开 SOA 生成潜势分析(图 4)。在 17 种 SOA 前体物中,有 76.5%的化合物(13 种)的 SOA 生成潜势经过净化器后有所下降,苯系物 SOA 生成潜势占总 SOA 生成潜势的 95%以上,其中甲苯、苯和乙苯的净化前 SOA 生成潜势分别为 4706.74 、 3106.70 和 $2061.38\mu\text{g}/\text{m}^3$,其中只有苯在净化后 SOA 生成潜势下降了 38.1%至 $1922.35\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。苯系物成为餐饮业排放污染物种 SOA 的主要前体

物,这之前刘俊等^[1]在北京 SOA 生成潜势的日变化规律研究中的结果一致。在宝鸡市秋冬季大气 VOCs 的研究结果中,同样发现,含有 3 个及以下甲基的苯系物是 SOA 贡献最大的 VOCs 成分^[27]。广州夏季 VOCs 的研究中,也发现甲苯、二甲苯、乙苯等苯系物对 SOA 的贡献最大^[28]。

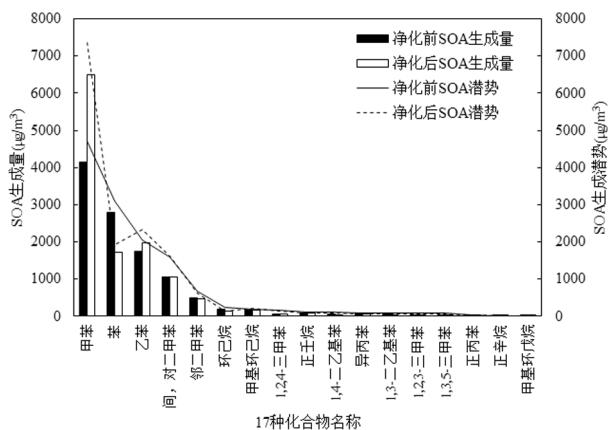


图4 净化前后17种化合物的SOA生成潜势及生成量变化

Fig.4 The SOA formation potential and concentration before and after fume purifiers

3 结论

3.1 餐饮业 VOCs 污染物排放浓度从大到小分别为烷烃类>含氧 VOCs 类>烯烃类>苯系物类,油烟净化器对烯烃类污染物占比最大的四氯乙烯有显著的净化效果,对苯系物中甲苯和苯的净化效果有显著性差异。

3.2 净化器对 VOCs 污染物的臭氧生成潜势都有所

上升,但并无显著性差异,烯烃类污染物是餐饮油烟污染中臭氧生成的重要前体物之一,占总臭氧生成潜势的 48.2%~50.7%。

3.3 苯系物成为餐饮业排放污染物种 SOA 的主要前体物,占总 SOA 生成潜势的 95%以上,其中甲苯、苯和乙苯的净化前 SOA 生成潜势分别为 4706.74, 3106.70 和 2061.38 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,且只有苯在净化后 SOA 生成潜势有所下降。

参考文献:

- [1] 刘俊,楚碧武,贺泓.北京市二次有机气溶胶生成潜势的日变化规律[J]. 环境科学, 2018,39(6):2505-2511.
Liu J, Chu B W, He H. Diurnal variation of SOA formation potential from ambient air at an urban site in Beijing [J]. Environmental Science, 2018,39(6):2505-2511.
- [2] 张珊,高松,崔虎雄,等.上海市典型化工园区 VOCs 特征及臭氧生成潜势分析[J]. 安徽农学通报, 2016,22(15):71-72,77.
Zhang S, Gao S, Cui H X, et al. Characteristics of ambient VOCs and their role in ozone formation in one typical industrial park in Shanghai [J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2016,22(15):71-72,77.
- [3] 王扶潘,朱乔,冯凝,等.深圳大气中 VOCs 的二次有机气溶胶生成潜势[J]. 中国环境科学, 2014,34(10):2449-2457.
Wang F F, Zhu Q, Feng N, et al. The generation potential of secondary organic aerosol of atmospheric VOCs in Shenzhen [J]. China Environmental Science, 2014,34(10):2449-2457.
- [4] 杨笑笑,汤莉莉,胡丙鑫,等.南京城区夏季大气 VOCs 的来源及对 SOA 的生成研究——以亚青和青奥期间为例[J]. 中国环境科学, 2016,36(10):2896-2902.
Yang X X, Tang L L, Hu B X, et al. Sources apportionment of volatile organic compounds VOCs in summertime Nanjing and their potential contribution to secondary organic aerosols (SOA). [J]. China Environmental Science, 2016,36(10):2896-2902.
- [5] 林旭.南京北郊 VOCs 变化特征及其对二次有机气溶胶和臭氧的贡献研究[D]. 南京:南京信息工程大学, 2016.
Lin X. The characteristics, potential contribution of secondary organic aerosols and ozone of VOCs in the northern suburb of Nanjing [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2016.
- [6] 徐晨曦,陈军辉,韩丽,等.成都市 2017 年夏季大气 VOCs 污染特征、臭氧生成潜势及来源分析[J]. 环境科学研究, 2019,32(4):619-626.
Xu C X, Chen J H, Han L, et al. Analyses of pollution characteristics, ozone formation potential and sources of VOCs atmosphere in chengdu city in summer 2017 [J]. Research of Environmental Sciences, 2019,32(4):619-626.
- [7] 叶文媛,吴琳,冯银厂,等.大气中二次有机气溶胶估算方法研究进展[J]. 安全与环境学报, 2011,11(1):127-131.
Ye W Y, Wu L, Feng Y C, et al. Advances in the estimation methods of secondary organic aerosol in atmospheric environment [J]. Journal of Safety and Environment, 2011,11(1):127-131.
- [8] 柴美彤,张润铎.餐饮油烟催化净化技术的研究进展[J]. 工业催化, 2018,26(5):12-19.
Chai M T, Zhang R. Progress on catalytic control techniques of cooking oil fumes [J]. Industrial Catalysis, 2018,26(5):12-19.
- [9] 温梦婷,胡敏.北京餐饮源排放细粒子理化特征及其对有机颗粒物的贡献[J]. 环境科学, 2007,28(11):2620-2625.
Wen M T, Hu M. Physical and chemical characteristics of fine particles emitted from cooking emissions and its contribution to particulate organic matter in Beijing [J]. Environmental Science, 2007,28(11):2620-2625.
- [10] Cheng S Y, Wang G, Lang J L, et al. Characterization of volatile organic compounds from different cooking emissions [J]. Atmospheric Environment, 2016,145:299-307.
- [11] Klein F, Platt S M, Farren N J, et al. Characterization of gas-phase organics using proton transfer reaction time-of-flight mass spectrometry: cooking emissions [J]. Environmental Science & Technology, 2016,50(3):1243-1250.
- [12] Wang H L, Xiang Z Y, Wang L N, et al. Emissions of volatile organic compounds (VOCs) from cooking and their speciation: A case study for Shanghai with implications for China [J]. Science of the Total Environment, 2018,24(621):1300-1309.
- [13] 何万清,王天意,邵霞,等.北京市典型餐饮企业大气污染物排放特征[J]. 环境科学, 2020,41(5):2050-2056.
He W Q, Wang T Y, Shao X, et al. Pollution characteristics of cooking fumes, particulates, and non-methane hydrocarbons in the exhaust of typical Beijing restaurants [J]. Environmental Science, 2020,41(5): 2050-2056.
- [14] DB11/1488-2018 餐饮业大气污染物排放标准[S].
DB11/1488-2018 Emission standards of air pollutants for catering industry [S].
- [15] 孙成一,白画画,陈雪,等.北京市餐饮业大气污染物排放特征[J]. 环境科学, 2020,41(6):2596-2601.
Sun C Y, Bai H H, Chen X, et al. Emission characteristics of the catering industry in Beijing [J]. Environmental Science, 2020,41(6): 2596-2601.
- [16] 张洋,支国瑞,薛志钢,等.餐饮行业活动水平调查及大气污染物排放清单编制研究[J]. 环境科学研究, 2019,32(6):929-937.
Zhang Y, Zhi G R, Xue Z G, et al. Investigation of activity levels of catering service industry and construction of air pollutant emission inventory [J]. Research of Environmental Sciences, 2019,32(6): 929-937.
- [17] 李源遑,吴爱华,童梦雪,等.餐饮源有机颗粒物排放特征[J]. 环境科学, 2020,8:3467-3474.
Li Y J, Wu A H, Tong M X, et al. Emission characteristics of particulate organic matter from cooking [J]. Environmental Science, 2020,8:3467-3474.
- [18] HJ 732-2014 固定污染源废气 挥发性有机物的采样 气袋法[S].
HJ 732-2014 Emission from stationary sources-Sampling of volatile organic compounds-Bags method [S].
- [19] U.S. Environmental Protection. Determination of volatile organic compounds in air collected in specially prepared canisters and analyzed by gas chromatography/mass spectrometry (GC/MS) [R]. Cincinnati: Center for Environmental Research Information Office of Research and Development, 1999.

- [20] Carter W P L. Development of the SAPRC-07chemical mechanism [J]. Atmospheric Environment, 2010,44(40):5324-5335.
- [21] Grosjean D. In situ organic aerosol formation during a smog episode: estimated production and chemical functionality [J]. Atmospheric Environment. Part A. General Topics, 1992,26(6):953-963.
- [22] 李兴华,王书肖,郝吉明.民用生物质燃烧挥发性有机化合物排放特征 [J]. 环境科学, 2011,32(12):3515-3521.
- Li X H, Wang S X, Hao J M. Characteristics of volatile organic compounds (VOCs) emitted from biofuel combustion in China [J]. Environmental Science, 2011,32(12):3515-3521.
- [23] 张秀东,刘有智,樊光友,等.餐饮业油烟净化技术发展及研究现状 [J]. 工业安全与环保, 2010,36(4):32-33,36.
- Zhang X D, Liu Y Z, Fan G Y, et al. The development and research on the cooking oil fume purification technology [J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2010,36(4):32-33,36.
- [24] 陈振辉,杨海平,杨 伟,等.生物质燃烧过程中颗粒物的形成机理及排放特性综述 [J]. 生物质化学工程, 2014,48(5):33-38.
- Chen Z H, Yang H P, Yang W, et al. A review of the formation mechanism and emission characteristics of particles in the biomass combustion process [J]. Biomass Chemical Engineering, 2014,48(5): 33-38.
- [25] 崔虎雄.上海市春季臭氧和二次有机气溶胶生成潜势的估算 [J]. 环境科学, 2013,34(12):4529-4534.
- Cur H X. Estimation of the formation potential of ozone and secondary aerosol in Shanghai in spring [J]. Environmental Science, 2013,34(12):4529-4534.
- [26] 王 倩,陈长虹,王红丽,等.上海市秋季大气 VOCs 对二次有机气溶胶的生成贡献及来源研究 [J]. 环境科学, 2013,34(2):424-433.
- Wang Q, Chen C H, Wang H L, et al. Forming potential of secondary organic aerosols and sources apportionment of VOCs in autumn of Shanghai, China [J]. Environmental Science, 2013,34(2):424-433.
- [27] 张瑞旭,刘焕武,邓顺熙,等.宝鸡市秋冬季大气 VOCs 浓度特征及其 O₃ 和 SOA 生成潜势 [J]. 中国环境科学, 2020,40(3):983-996.
- Zhang R X, Liu H W, Deng S X, et al. Characteristics of VOCs and formation potential of O₃ and SOA in autumn and winter in Baoji, China [J]. China Environmental Science, 2020,40(3):983-996.
- [28] 虞小芳,程 鹏,古颖纲,等.广州市夏季 VOCs 对臭氧及 SOA 生成潜势的研究 [J]. 中国环境科学, 2018,38(3):830-837.
- Yu X F, Cheng P, Gu Y G, et al. Formation potential of ozone and secondary organic aerosol from VOCs oxidation in summer in Guangzhou, China [J]. China Environmental Science, 2018,38(3):830-837.

作者简介: 蒋 宝(1988-),女,山东青州人,高级工程师,博士,主要从事环境污染风险评估与修复研究.发表论文 9 篇.

《中国环境科学》核心影响因子学科排名实现五连冠

根据中国科学技术信息研究所 2016 年 10 月 12 日发布的《2016 年版中国科技期刊引证报告(核心版)》,中国环境科学学会主办的《中国环境科学》2015 年核心影响因子 1.812,在环境科学技术及资源科学技术学科排名继续位居第一,在统计的 1985 种中国核心科技期刊中排名 38 位.自 2011 年以来,《中国环境科学》影响因子排名一直保持学科榜首.

《中国环境科学》编辑部