

DOI:10.7524/j.issn.0254-6108.2022041302

胡秋萍, 费怡, 陈耀, 等. 成都市餐饮源 VOCs 排放特征[J]. 环境化学, 2024, 43(2): 600-613.

HU Qiuping, FEI Yi, CHEN Yao, et al. Emission characteristics of VOCs from catering sources in Chengdu[J]. Environmental Chemistry, 2024, 43 (2): 600-613.

成都市餐饮源 VOCs 排放特征

胡秋萍¹ 费怡¹ 陈耀¹ 周子航² 张雷³
杨亮³ 王斌^{1*} 陈茁⁴

(1. 四川大学建筑与环境学院, 成都, 610065; 2. 成都市环境保护科学研究院, 成都, 610072; 3. 四川佳士特环境检测有限公司, 成都, 611700; 4. 成都市污染源监测中心成华区监测站, 成都, 610056)

摘要 为研究成都市餐饮源 VOCs 排放特征, 建立成都市餐饮源 114 种 VOCs 成分谱, 本研究选择 11 个监测对象进行 VOCs 组分分析, 并探索餐饮源 VOCs 全组分特征. 结果表明, 餐饮源 VOCs 中烷烃占比为 23.12%—30.29%, 烯烃占比为 8.61%—25.78%, 芳香烃占比为 0.16%—5.86%, 卤代烃占比为 0.86%—13.82%, OVOCs 占比为 28.02%—63.77%, 其他占比为 2.02%—8.26%. OVOCs、烷烃和烯烃 3 类占比最高, 3 类污染物累计质量浓度百分比在 75% 以上, 是餐饮源重要的污染物类型. 餐饮源排名前 10 的 VOCs 分别是丙烯醛 (11.12%)、乙烷 (9.87%)、乙醛 (9.51%)、丙酮 (9.34%)、乙烯 (7.86%)、正戊烷 (5.74%)、乙炔 (5.01%)、丁二烯 (4.64%)、顺式-1,3-二氯-1-丙烯 (3.40%) 和乙酸乙酯 (3.04%), 是餐饮源的特征污染物. 餐饮源全组分分析得到 OVOCs 的代表性物质为反式茴香脑和芳樟醇等, 烯烃代表性物质为长叶烯和柠檬烯等, 烷烃代表性物质为正十五烷和正庚烷等, 为完善餐饮源成分谱物种、探寻餐饮源特征污染物的研究提供参考. 采用 FAC 法计算餐饮源 VOCs 二次有机气溶胶生成潜势. 餐饮源 SOA 生成潜势为 1220.7 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 芳香烃 SOA 生成潜势贡献率为 93.1%, 烷烃 SOA 生成潜势贡献率为 6.9%.

关键词 餐饮源, 成分谱, 挥发性有机物 (VOCs), 成都市.

Emission characteristics of VOCs from catering sources in Chengdu

HU Qiuping¹ FEI Yi¹ CHEN Yao¹ ZHOU Zihang² ZHANG Lei³
YANG Liang³ WANG Bin^{1*} CHEN Zhuo⁴

(1. College of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu, 610065, China; 2. Chengdu Academy of Environmental Sciences, Chengdu, 610072, China; 3. Sichuan Jiashite Environmental Detection Co., Ltd., Chengdu, 611700, China; 4. Chengdu Pollution Source Monitoring Center Chenghua District Monitoring Station, Chengdu, 610056, China)

Abstract In order to study the emission characteristics of VOCs from catering sources and establish source profiles of 114 VOC species in Chengdu, we selected 11 different catering objects to sample and analysis VOC components and achieved to explore the feature of VOC emission from catering. The results from this work showed that the proportions of alkanes, olefins, aromatic hydrocarbons, halogenated hydrocarbons, OVOCs and others in VOC species from catering sources were 23.12%—30.29%, 8.61%—25.78%, 0.16%—5.86%, 0.86%—13.82%, 28.02%—63.77% and 2.02%—8.26%, respectively. OVOCs, alkanes and alkenes were the dominated categories and accounted for more than 75% of totally VOC emissions. The top 10 VOC species from catering sources were acrolein (11.12%), ethane (9.87%), acetaldehyde (9.51%), acetone (9.34%), ethylene (7.86%), *n*-pentane (5.74%), acetylene (5.01%), butadiene (4.64%), *cis*-1,3-dichloro-1-propene

2022 年 4 月 13 日收稿 (Received: April 13, 2022).

* 通信联系人 Corresponding author, E-mail: wangbin_scu@qq.com

(3.40%), and ethyl acetate (3.04%). They were the typical organic compounds from catering sources. The full-component characteristics of VOCs from catering sources showed that the representative substances of OVOCs, olefins and alkanes were *trans*-anisoole and linalool, long-leaf alkene and limonene, *n*-pentadecane and *n*-heptane, respectively. These results provided important information and references for characteristic investigation of catering sources. The FAC method was applied to estimate the potential amount of secondary organic aerosol (SOA) depending on VOC data from catering sources, the total SOA formation potential value was $1220.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Furthermore, aromatic hydrocarbons contributed 93.1% to this value and alkanes accounted for only 6.9%.

Keywords catering sources, source profile, volatile organic compounds(VOCs), Chengdu City.

餐饮源污染物成分复杂^[1-2], 它们是食物烹饪和加工过程中产生的挥发性油脂等有机物, 以及加热分解或开裂的产物等. 根据它们的形态, 一般可分为颗粒物和气态物质^[3-4]. 餐饮源污染物的排放多数属于低空排放, 排放后可冷凝形成颗粒物, 因此餐饮源是二次有机气溶胶 (SOA) 的重要前体物^[5]. 餐饮源排放的 $\text{PM}_{2.5}$ 可占到 PM_{10} 的 80% 及以上, $\text{PM}_{1.0}$ 可占到 $\text{PM}_{2.5}$ 的 50%—85%^[6]. 针对颗粒物的组分分析通常包括分析有机碳(OC)分析、元素碳(EC)分析、有无机离子组分分析、元素组分分析、多环芳烃(PAHs)分析等. 气体物质主要为 VOCs, 成分复杂多达上百种, 餐饮源 VOCs 主要分为烷烃、烯烃、芳香烃、卤代烃、醇类、醛酮类和其它等^[7-9]. VOCs 种类繁多, 可分为烷烃、烯烃、芳香烃、卤代烃、OVOCs 和其他类等, 污染源的 VOCs 成分谱是对污染源排放的污染物进行采样、分析并计算各物种污染物质量浓度百分比的过程, 对于后续的模式模拟研究、机理研究等存在重要的意义, 是不可或缺的基础数据^[10].

1980 年左右, 美国最早开展 VOCs 成分谱研究. EPA 开发了 SPECIATE 数据库, 是一个较为全面记录 VOCs 成分谱的数据库, 并且不断更新, 目前被广泛应用于大气污染研究^[11]. Wei^[12] 估算了 2005—2020 年中国人为源 VOCs 详细的化学特征, 计算了 7 个活性扇区的 VOCs 的化学分布情况, 计算了我国 VOCs 按照烷烃、烯烃/炔烃、芳香烃、醇、酮、醛、酯、醚和卤代烃的占比情况, 并预测了其 15 年内的占比变化情况. 此外还分析了东西部省份之间 VOCs 组分的差异和排放量, 是一份较为完善详细的成分谱. Lee 等^[13] 研究了烤肉类 VOCs 的排放特征, 通过实测法获取率烤肉店 VOCs 的排放特征及其排放因子, 苯、醋酸乙烯酯、己烯和丁烷是主要的 VOCs. 我国在 VOCs 源成分谱的上取得了一定的研究成果, 但在本地化源成分谱的研究、源谱物质统一性和基础数据的获取上均存在一定的不足^[10,14-16].

为获得成都市餐饮源 114 种 VOCs 排放特征, 建立餐饮源 VOCs 成分谱; 并探索餐饮源 VOCs 全组分特征, 故进行本研究.

1 材料与方法(Materials and methods)

1.1 监测对象选择依据

餐饮源具有一定的复杂性, 餐饮类型、餐饮规模、采样时间段等都会影响最终的采样结果. 为尽量全面、准确地评估成都市餐饮源的 VOCs 污染情况, 在采样前, 通过高德地图 POI 结合现场问卷调查的方式对于成都市餐饮源情况进行调查分析.

首先, 通过高德地图 POI 数据获取成都市餐饮源位置、数量及餐饮类型等情况, 得到成都市餐饮源中烧烤、中餐、快餐、火锅和其他类型的占比情况, 分别为 7.3%、44.5%、34.1%、10.0% 和 4.1%. 烧烤、中餐、快餐、火锅累计占比达 95% 以上.

其次, 通过问卷调查获得成都市不同餐饮类型的用油量、餐饮规模、燃料类型、用餐时间段及油烟净化设施情况等. 问卷调查范围包括 5 个主城区(锦江区、青羊区、成华区、高新区和天府新区)、2 个二圈层区县(郫都区和青白江区)、2 个三圈层县级市(彭州市和邛崃市), 共计收回有效问卷 716 份. 问卷调查结果表明, 中餐类中川菜占比最高; 在规模方面, 特大型及大型占比 31.0%, 中型占比

32.4%, 小型占比 36.6%; 家庭餐饮和食堂餐饮的人均用油量、燃料类型等差异不大。

综上所述, 餐饮源监测对象的选择上, 涵盖烧烤、川菜、商业综合体、快餐、火锅、家庭餐饮和食堂餐饮, 以及小型、中型、大型和特大型 4 种规模。在监测前还需要通过实地走访和现场调查, 综合考虑餐饮企业油烟排放口位置是否便于采样、采样时能否有电力保障等采样基础条件, 并在烹饪高峰期进行采样。本研究涵盖的餐饮类型与规模较为全面且具有本地特色, 具有一定的代表性。

1.2 监测对象信息

综合考虑餐饮企业餐饮类型、餐饮规模以及污染物的产生与排放情况等, 选择了 7 家典型餐饮企业作为社会餐饮监测对象, 涵盖烧烤、川菜、商业综合体、快餐和火锅 5 种类型和小型、中型、大型和特大型 4 种规模, 涵盖的餐饮类型与规模较为全面且具有成都市本地特色; 3 家家庭餐饮监测对象包含 25 年以上老旧低层住宅(家庭 1)、15 年以上高层住宅(家庭 2)和 5 年左右较新的高层住宅(家庭 3); 选择 1 家市级事业单位的中型规模食堂作为食堂餐饮监测对象; 11 个餐饮源监测对象基本信息见表 1。监测对象能一定程度地反映成都市餐饮源污染情况, 具有一定的代表性。

表 1 监测对象基本信息

Table 1 Monitoring objects' basic information

监测对象 Monitoring objects	采样时间/h Sampling time	排风量/(m ³ ·h ⁻¹) Exhaust air volume	用油量/kg Amount of oil used	就餐人数/人 Number of diners	灶头数量/个 Number of stoves	油烟净化设施 Fume purification facilities
中型烧烤	1	25788	2.5	70	4	静电式
小型烧烤	1	10443	1	35	4	静电式
中型川菜	1	16908	14.6	133	8	静电式
特大型川菜	1	44214	25	273	21	静电式
商业综合体	1	20457	18.65	158	26	静电式
大型快餐	1	3599	15.8	100	12	静电式
中型火锅	0.5	600	2.5	5	23	静电式
家庭1	0.5	600	0.25	8	2	家用油烟机
家庭2	0.5	600	0.15	5	2	家用油烟机
家庭3	0.5	960	0.2	7	2	家用油烟机
中型食堂	0.5	6800	7	100	3	静电式

根据问卷调查结果, 社会餐饮就餐高峰期集中在 11:30—12:30 和 18:00—19:00, 故选择在中午或晚上就餐高峰期采样, 采样时间设置为 1.0 h。家庭餐饮和食堂餐饮通常烹饪一餐的时间只有 0.5 h, 故采样时间设置为 0.5 h。火锅的监测时间覆盖包间内客人就餐全过程, 也为 0.5 h。

1.3 采样方法

根据《固定污染源排气中颗粒物测定与气态污染物采样方法》(GB/T 16157—1996)对社会餐饮和食堂餐饮进行采样。家庭餐饮采样点设置遵守《室内环境空气质量监测技术规范》(HJ/T 167—2004), 在关闭门窗及抽油烟机的情况下进行采样^[17-19]; 所有污染物均需采集现场空白样品。

1.4 监测方法及质控

监测方法根据《固定污染源废气挥发性有机物的采样气袋法》(HJ 732—2014), 采用 ZR3520 真空箱气袋采样器和聚氟乙烯(PVF)气袋进行采样。调节采样器的抽气速率, 每次采集时间为 5—10 min, 烹饪全过程采样, 并采集现场空白样, 样品采集后避光保存并在 8 h 内进行分析。根据《固定污染源废气总烃、甲烷和非甲烷总烃的测定气相色谱法》(HJ 38—2017)测定 NMHCs 浓度。

质控 样品采集后避光保存并在 8 h 内进行分析; 样品校准曲线相关系数均大于 0.995, 满足 HJ38—2017 的规定要求; 实验室空白样品的测定值小于检出限, 满足规定要求; 选取 10% 的样品, 作为实验室平行样进行分析, 相对偏差均小于 15%, 满足规定要求。

1.5 114 种 VOCs 组分分析

1.5.1 组分分析方法

采样方法同 1.2 节, 烹饪全过程采样, 并采集现场空白样。在 NMHCs 浓度分析完成后, 将

NMHCs 浓度最高的 1 个气袋中的气体进行 VOCs 组分分析,得到监测对象样品浓度.将现场空白样按照同样的方法进行 VOCs 组分分析,得到背景浓度.

按照《环境空气挥发性有机物的测定罐采样/气相色谱-质谱法》(HJ 759—2015),VOCs 气体样品在冷阱中浓缩,进行热解,进入气相色谱法分离,用质谱检测器检测,通过与标准物质质谱图以及保留时间进行比较,用内标法进行定量.气体样品首先通入自动预浓缩仪进行前处理.一级冷阱为空阱,去除水汽;二级冷阱装有 Tenax 吸附剂,去除 CO₂;三级冷阱(空管)冷冻聚焦,富集 VOCs 组分.经过三级冷阱中进行预浓缩后系统迅速升温,使冷阱中富集的 VOCs 组分进入 GC/MS-FID 系统,进行分离和定量.气相分析过程利用了冷柱箱装置,使柱温能达到 -50 °C. VOCs 组分通过 HP-1 色谱柱(60 m×0.32 mm×1.0 μm)进行分离,进入 MSD 进行检测.

1.5.2 仪器配置与标气

Entech7200 三级冷阱浓缩仪;安捷伦 7890B-5977B 气相色谱质谱联用仪.采用 PAMS、TO-15、13 种醛酮类 3 种标准气体(Linde, USA)和含有 4 种化合物(一溴一氯甲烷、1,4-二氟苯、氯苯-d5 和 4-溴氟苯)的内标标准气对仪器进行标定.

1.5.3 质量保证和质量控制

仪器分析前用 4-溴氟苯检查 GC/MS 的性能,符合标准要求;实验室空白和运输空白中目标物的浓度必须低于方法测定下限;每 24 h 对校准曲线的中间浓度点进行分析,测量值与初始浓度值的相对偏差在 30% 以下.

1.6 VOCs 全组分分析

1.6.1 全组分样品采集

采用吸附管(不锈钢材质,内径 5 mm)采集 VOCs 样品,采样流量为 50 mL·min⁻¹,采样持续时间为 1—3 h.采样前,吸附管需经过老化处理 24 h.吸附管采用 Tenax 为吸附剂.

采样点:油烟排气口,具体的点位设置应遵守《固定污染源排气中颗粒物测定与气态污染物采样方法》(GB/T 16157—1996),采样点位于餐馆排烟筒的采样孔内(净化设施后).

采样时间:中午或晚上营业高峰期,持续 1—3 h.

1.6.2 全组分分析方法

VOCs 样品分析遵循《固定污染源废气挥发性有机物的测定固相吸附-热脱附/气相色谱-质谱法》(HJ 734—2014)的具体分析步骤,分析得到样品中 VOCs 的成分.将吸附管置于热脱附仪中进行二级热脱附,脱附气体经气相色谱分离后用质谱检测.根据污染物质谱图、保留时间(min)、匹配因子(%)和峰面积等信息,基于内标法计算,确定餐饮源 VOCs 污染物物种.

1.6.3 仪器与设备

TW-2100 型微小流量空气采样器:青岛拓威智能仪器有限公司;Agilent 6890 气相色谱仪:美国 Agilent 公司;Agilent 5973 质谱检测器:美国 Agilent 公司.

1.6.4 质量保证和质量控制

实验室空白和运输空白中目标物的浓度必须低于方法测定下限;每批样品应校核点的相对误差应在 30% 以内.

2 结果与讨论(Results and discussion)

2.1 餐饮源 VOCs 成分谱建立

成都市餐饮源 VOCs 各组分浓度质量百分比详见表 2,建立成都市餐饮源成分谱.将 VOCs 组分为烷烃、烯烃、芳香烃、卤代烃、OVOCs 和其他六类.由表 2 可知,餐饮源中烷烃占比为 23.12%—30.29%,烯烃占比为 8.61%—25.78%,芳香烃占比为 0.16%—5.86%,卤代烃占比为 0.86%—13.82%,OVOCs 占比为 28.02%—63.77%,其他占比为 2.02%—8.26%.OVOCs、烷烃和烯烃 3 类占比最高,3 类污染物累计质量浓度百分比在 75% 以上,是餐饮源重要的污染物类型.

表 2 成都市餐饮源 VOCs 成分谱组分质量分数表(%)

Table 2 Mass fraction of VOCs composition source profile for catering sources in Chengdu(%)

序号 Serial number	组分类别 Grouping categories	化合物名称 Name of compound	社会餐饮 Commercial cooking		家庭餐饮 Family cooking		食堂餐饮 Canteen cooking	
			占比 Percentage	标准差 Standard deviation	占比 Percentage	标准差 Standard deviation	占比 Percentage	标准差 Standard deviation
			1	烷烃	乙烷	10.44	11.11	4.50
2	烷烃	丙烷	2.70	2.23	2.49	2.87	0.72	0.05
3	烷烃	异丁烷	1.25	1.49	2.86	3.47	0.30	0.19
4	烷烃	正丁烷	2.70	1.37	2.65	2.99	1.14	0.22
5	烷烃	异戊烷	1.14	1.08	0.65	0.46	0.50	0.15
6	烷烃	正戊烷	9.42	11.59	6.42	4.61	1.39	0.30
7	烷烃	环戊烷	0.03	0.04	0.00	0.00	0.13	0.06
8	烷烃	2,2-二甲基丁烷	0.26	0.43	0.00	0.00	8.81	4.15
9	烷烃	2,3-二甲基丁烷	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.02
10	烷烃	2-甲基戊烷	0.04	0.07	0.00	0.00	0.17	0.08
11	烷烃	3-甲基戊烷	0.00	0.01	0.00	0.00	0.13	0.06
12	烷烃	正己烷	0.21	0.28	0.08	0.12	0.13	0.06
13	烷烃	甲基环戊烷	0.01	0.02	0.00	0.00	0.06	0.03
14	烷烃	环己烷	0.00	0.01	0.00	0.00	0.08	0.04
15	烷烃	2,4-二甲基戊烷	0.04	0.08	0.00	0.00	0.10	0.05
16	烷烃	2-甲基己烷	0.00	0.00	0.00	0.00	0.30	0.14
17	烷烃	2,3-二甲基戊烷	0.00	0.00	0.00	0.00	0.11	0.05
18	烷烃	3-甲基己烷	0.00	0.00	0.00	0.00	0.33	0.16
19	烷烃	正庚烷	0.98	1.58	1.19	1.69	0.15	0.06
20	烷烃	甲基环己烷	0.01	0.01	0.00	0.00	0.06	0.03
21	烷烃	2,2,4-三甲基戊烷	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
22	烷烃	2,3,4-三甲基戊烷	0.00	0.00	0.00	0.00	0.14	0.07
23	烷烃	2-甲基庚烷	0.00	0.01	0.00	0.00	0.20	0.09
24	烷烃	3-甲基庚烷	0.00	0.01	0.00	0.00	0.13	0.06
25	烷烃	正辛烷	0.61	1.07	1.18	1.67	0.09	0.04
26	烷烃	正壬烷	0.03	0.05	0.00	0.00	0.04	0.02
27	烷烃	癸烷	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
28	烷烃	十一烷	0.03	0.02	0.02	0.02	0.36	0.16
29	烷烃	十二烷	0.02	0.02	1.05	1.37	0.00	0.02
		烷烃小计	29.97	—	23.12	—	30.29	—
30	烯烃	乙烯	8.63	6.36	2.44	1.74	12.52	3.06
31	烯烃	丙烯	1.83	1.24	0.93	0.81	0.50	0.55
32	烯烃	正丁烯	1.20	0.51	0.26	0.18	0.28	0.28
33	烯烃	丁二烯	10.78	9.07	3.00	2.12	0.15	8.52
34	烯烃	反式-2-丁烯	0.33	0.34	0.01	0.02	1.68	0.79
35	烯烃	顺式-2-丁烯	0.25	0.25	0.00	0.00	0.55	0.26
36	烯烃	1-戊烯	1.77	2.74	0.14	0.20	0.04	0.17
37	烯烃	异戊二烯	0.26	0.44	1.72	1.13	0.05	0.04
38	烯烃	反式-2-戊烯	0.31	0.48	0.07	0.10	0.40	0.19
39	烯烃	顺式-2-戊烯	0.06	0.08	0.00	0.00	0.13	0.06

续表 2

序号 Serial number	组分类别 Grouping categories	化合物名称 Name of compound	社会餐饮 Commercial cooking		家庭餐饮 Family cooking		食堂餐饮 Canteen cooking	
			占比 Percentage	标准差 Standard deviation	占比 Percentage	标准差 Standard deviation	占比 Percentage	标准差 Standard deviation
			79	卤代烃	1,1,2-三氯乙烷	0.00	0.00	0.00
80	卤代烃	1,2-二溴乙烷	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
81	卤代烃	四氯乙烯	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
82	卤代烃	四氯乙烷	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
83	卤代烃	1,2-二氯丙烷	0.00	0.01	0.00	0.00	0.06	0.03
84	卤代烃	反式-1,3-二氯-1-丙烯	0.05	0.10	0.00	0.00	0.67	0.32
85	卤代烃	顺式-1,3-二氯-1-丙烯	0.14	0.28	0.00	0.00	10.06	4.74
86	卤代烃	六氯丁二烯	0.00	0.01	0.00	0.00	0.04	0.02
87	卤代烃	氯苯	0.03	0.06	0.00	0.00	0.36	0.17
88	卤代烃	对二氯苯	0.00	0.01	0.00	0.00	0.03	0.01
89	卤代烃	间二氯苯	0.02	0.03	0.00	0.00	0.63	0.30
90	卤代烃	邻二氯苯	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
91	卤代烃	1,2,4-三氯苯	0.00	0.01	0.00	0.00	0.03	0.01
92	卤代烃	氯代甲苯	0.07	0.15	0.00	0.00	0.04	0.02
		卤代烃小计	0.86	—	2.32	—	13.82	—
93	含氧	乙醛	10.95	4.56	9.01	8.89	8.57	1.44
94	含氧	丙烯醛	8.88	3.40	24.32	14.56	0.15	4.99
95	含氧	丙酮	4.31	4.33	20.19	13.78	3.51	0.99
96	含氧	丙醛	1.12	1.41	0.08	0.12	0.76	0.31
97	含氧	甲基丙烯醛	0.48	0.73	0.17	0.14	3.19	1.48
98	含氧	乙酸乙烯酯	0.15	0.28	0.00	0.00	0.00	0.00
99	含氧	正丁醛	0.65	0.38	0.36	0.52	1.08	0.24
100	含氧	2-丁酮	0.18	0.20	0.02	0.03	1.55	0.72
101	含氧	乙酸乙酯	0.59	0.60	5.33	6.71	3.21	1.27
102	含氧	四氢呋喃	0.00	0.01	0.00	0.00	0.13	0.06
103	含氧	丁烯醛	0.02	0.03	0.40	0.56	0.21	0.10
104	含氧	1,4-二氧六环	0.00	0.01	0.00	0.00	0.03	0.01
105	含氧	甲基叔丁基醚	0.07	0.13	0.03	0.04	2.81	1.32
106	含氧	戊醛	2.33	1.35	1.17	1.66	0.74	0.58
107	含氧	甲基丙烯酸甲酯	0.11	0.21	0.03	0.04	0.21	0.10
108	含氧	4-甲基-2-戊酮	0.00	0.01	0.00	0.00	0.34	0.16
109	含氧	2-己酮	0.08	0.11	0.00	0.00	0.13	0.06
110	含氧	己醛	3.47	1.02	2.50	3.11	0.54	1.81
111	含氧	苯甲醛	0.01	0.01	0.16	0.22	0.15	0.06
112	含氧	间甲基苯甲醛	0.09	0.17	0.00	0.00	0.71	0.33
		OVOCs小计	33.51	—	63.77	—	28.02	—
113	其他	二硫化碳	0.01	0.02	0.39	0.28	0.38	0.18
114	其他	乙炔	8.25	7.29	1.63	0.21	5.14	7.72
		其他小计	8.26	—	2.02	—	5.52	—

注: 食堂餐饮标准差与川菜1、川菜2计算得到.

Note: The standard deviation of canteen catering was calculated with Sichuan Cuisine 1 and Sichuan Cuisine 2.

由表 2 可知,社会餐饮共检测出 87 种 VOCs,其中烷烃 24 种、烯烃 11 种、芳香烃 13 种、卤代烃 17 种、OVOCs 20 种、其他 2 种;家庭餐饮共检测出 43 种 VOCs,其中烷烃 12 种、烯烃 9 种、芳香烃 2 种,卤代烃 4 种、OVOCs 14 种、其他 2 种;食堂餐饮共检测出 92 种 VOCs,其中烷烃 26 种、烯烃 11 种、芳香烃 16 种、卤代烃 18 种、OVOCs 19 种、其他 2 种.社会餐饮和食堂餐饮 VOCs 组分较家庭餐饮更为复杂,家庭餐饮烷烃、芳香烃和卤代烃污染物的种类较少.

如图 1 所示,社会餐饮中 OVOCs(33.51%)、烷烃(29.97%)和烯烃(25.78%)的 3 类占比最高,是社会餐饮重要的污染物类型.OVOCs 污染物物种方面,醛酮类较为重要,其中乙醛(6.19%—17.69%)、丙烯醛(4.89%—15.05%)、丙酮(2.34%—10.77%)、己醛(2.23%—4.8%)和戊醛(1.02%—4.91%)占比较高,是社会餐饮 OVOCs 中的代表性物质.川菜、烧烤的烯烃占比高,可能与有大火烹饪过程的、烹饪温度较高有关,而对于火锅和快餐这类烹饪温度较低的餐饮类型烷烃占比相对较高.

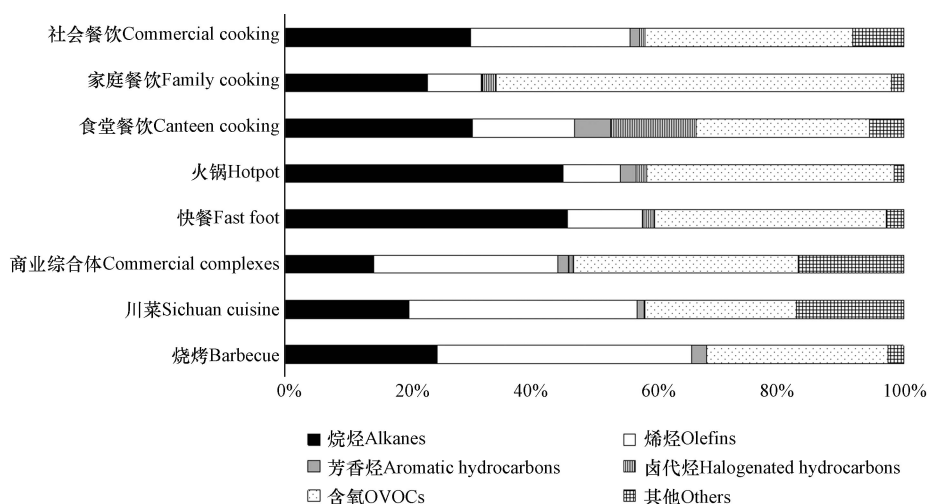


图 1 不同餐饮类型 VOCs 成分谱

Fig.1 VOCs source profile of different catering types

家庭餐饮中 OVOCs(63.76%)和烷烃(23.12%)两类占比最高,是家庭餐饮重要的污染物类型.家庭餐饮中芳香烃的含量最低,扣除 VOCs 背景浓度的影响,仅检测到苯和甲苯两种苯系物,有文献指出^[15]烹饪燃料、食用油量及油温影响餐饮源 VOCs 苯系物的排放.家庭餐饮相较于社会餐饮和食堂餐饮其食用油量较小、油温较低,使得其苯系物产生较少.

食堂餐饮中烷烃(30.29%)和 OVOCs(28.02%)两类占比最高,是食堂餐饮重要的污染物类型.其中芳香烃浓度占比为 5.86%,高于社会餐饮和家庭餐饮,且芳香烃检出种类最多,这可能与食用油油温有关.何万清^[20]的研究表明,当食用油在 130℃ 低温及 260℃ 高温时,其产生的芳香烃种类最多.

本研究涵盖多种餐饮类型,不同类型的特征污染物略有不同,详见表 3.根据不同餐饮类型污染物占比均值大小,计算餐饮源排名前 10 的 VOCs 分别是丙烯醛(11.12%)、乙烷(9.87%)、乙醛(9.51%)、丙酮(9.34%)、乙烯(7.86%)、正戊烷(5.74%)、乙炔(5.01%)、丁二烯(4.64%)、顺式-1,3-二氯-1-丙烯(3.4%)和乙酸乙酯(3.04%),如图 2 所示.它们在污染物浓度中占有较高权重,是餐饮源的特征污染物.

表 3 不同餐饮类型 VOCs 特征污染物

Table 3 VOCs characteristic pollutants of different catering types

类型 Types	特征 VOCs Characteristics of VOCs
社会餐饮	乙醛(11.13%)、乙烷(10.38%)、丁二烯(9.75%)、正戊烷(9.37%)、丙烯醛(8.28%)、乙炔(8.22%)、乙烷(7.44%)、丙酮(4.42%)、己醛(3.21%)
家庭餐饮	丙烯醛(24.32%)、丙酮(20.19%)、乙醛(9.01%)、正戊烷(6.42%)、乙酸乙酯(5.33%)、乙烷(4.5%)、丁二烯(3%)
食堂餐饮	乙烯(16.62%)、乙烷(15.33%)、乙炔(13.25%)、丁二烯(10.44%)、乙醛(6.76%)、丙烯醛(6.18%)、顺式-1,3-二氯-1-丙烯(3.35%)、己醛(3.1%)
烧烤	丁二烯(22.75%)、丙烯醛(15.05%)、乙烯(8.35%)、乙醛(6.19%)、丙烷(5.65%)、正戊烷(4.98%)、正丁烷(4.92%)、丙烯(4%)、异丁烷(3.99%)和己醛(3.47%)

续表 3

类型 Types	特征VOCs Characteristics of VOCs
川菜	乙烯(16.62%)、乙烷(15.33%)、乙炔(13.25%)、丁二烯(10.44%)、乙醛(6.76%)、丙烯醛(6.18%)、顺式-1,3-二氯-1-丙烯(3.35%)、己醛(3.1%)
商业综合体	乙炔(17.03%)、丁二烯(15.22%)、乙醛(14.14%)、乙烯(11.86%)、丙酮(8.18%)、丙烯醛(7.13%)、正戊烷(4.08%)、乙烷(3.47%)、异戊烷(3.2%)
快餐	正戊烷(32.51%)、乙醛(10.89%)、丙烯醛(8.15%)、1-戊烯(7.19%)、戊醛(4.91%)、己醛(4.8%)、正庚烷(4.1%)、丙醛(3.89%)、
火锅	乙烷(29.94%)、乙醛(17.69%)、丙酮(10.77%)、丙烷(5.18%)、丙烯醛(4.89%)、乙烯(3.91%)、正戊烷(3.48%)

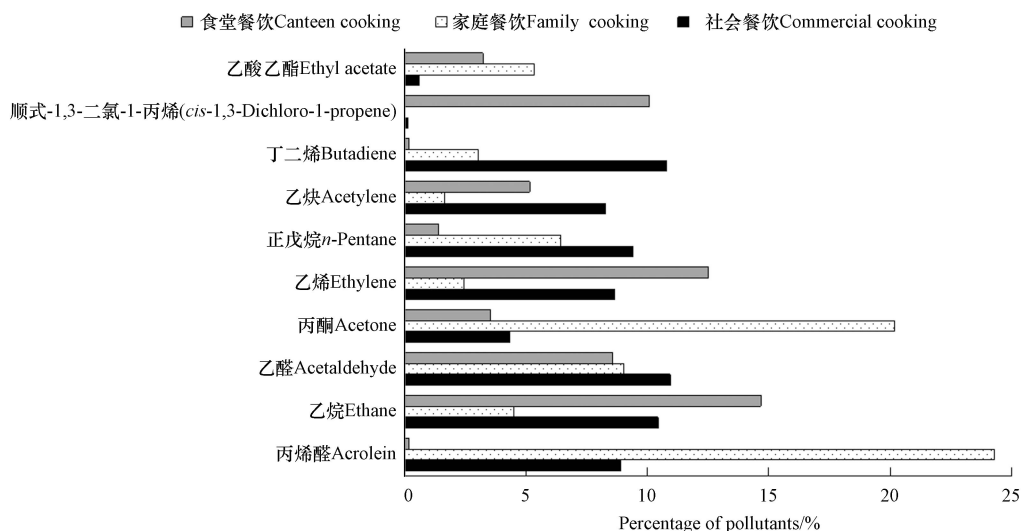


图 2 餐饮源排名前 10 的 VOCs 组分

Fig.2 VOCs components of the top 10 from catering sources

2.2 餐饮源 VOCs 成分谱对比

将餐饮源 VOCs 按照烷烃、烯烃、芳香烃、卤代烃、OVOCs 和其他 6 类进行汇总, 结果详见表 4. 针对餐饮源 VOCs 成分谱的研究主要集中在社会餐饮和食堂餐饮, 社会餐饮中通常包括川菜和烧烤两类. 本研究不仅包括常见的川菜、烧烤和食堂, 还增加了商业综合体、快餐和火锅 3 类, 使得社会餐饮具有成都市本地化特色. 此外, 鲜有研究针对家庭餐饮 VOCs 建立成分谱, 家庭餐饮作为餐饮源中重要的组成部分, 本研究也对其进行了研究.

表 4 餐饮源 VOCs 组分构成 (%)

Table 4 Catering sources VOCs component composition (%)

餐饮类型 Catering Types	烷烃 Alkanes	烯烃 Olefins	芳香烃 Aromatic hydrocarbons	卤代烃 Halogenated hydrocarbons	含氧 OVOCs	其他 Others	数据来源 Reference
社会餐饮	29.97	25.78	1.63	0.86	33.51	8.26	本研究
家庭餐饮	23.12	8.61	0.16	2.32	63.77	2.02	本研究
食堂餐饮	30.29	16.51	5.86	13.82	28.02	5.52	本研究
烧烤	24.67	41.05	2.46	0.04	29.23	2.55	本研究
川菜	20.03	36.92	1.12	0.08	24.56	17.3	本研究
商业综合体	14.41	29.72	1.71	0.8	36.32	17.03	本研究
快餐	45.72	12.02	0.24	1.78	37.39	2.86	本研究
火锅	45.02	9.18	2.61	1.61	40.04	1.55	本研究
烧烤	53.2	42.8	2.2	0.1	—	—	[21]
烧烤	28.4	58.3	13.3	0	—	—	[22]
川菜	14.79	12.44	1.39	0.44	66.76	4.19	[23]
川菜	47.9	41.1	10.8	0.2	—	—	[22]
食堂	64	21	3	1	11	—	[21]

根据文献 [21—22] 可知, 烧烤占比最高的污染物是烯烃, 占比为 42.8%—58.3%, 占比第二的是烷烃, 占比为 28.4%—53.2%; 本研究中烧烤的烷烃类相对较低, 由于文献 [21—22] 未监测 OVOCs, 可能导致结果与本研究有些不同, 但总体而言, 本研究烧烤 VOCs 组分构成与文献相近. 文献 [23] 中关于川菜 OVOCs 占比最高为 66.76%, 烷烃与烯烃占比相近, 芳香烃和卤代烃占比都较低. 本研究中川菜的烯烃含量相对较高, OVOCs 含量相对较低, 可能是由于本研究的川菜存在大火烹饪或烹饪温度等因素导致存在一些差异. 文献 [21] 中食堂的烷烃含量相对较高, 本研究中的 OVOCs 和卤代烃相对较高, 可能是监测组分不同导致结果与本研究存在差异. 总体而言, 本研究的餐饮源 VOCs 与参考文献结果相近, 并增加了家庭餐饮以及社会餐饮中的商业综合体、快餐和火锅 3 类, 具有成都市本地化特色.

2.3 餐饮源 VOCs 全组分探索

2.3.1 VOCs 全组分分析结果

本研究 2.1 节中建立了成都市餐饮源 VOCs 成分谱, 其中 OVOCs、烯烃和烷烃是餐饮源 VOCs 的最主要组分, 3 类污染物累计质量分数百分比在 75% 以上, 为明确 OVOCs、烯烃和烷烃在全组分分析中的物种组成及占比情况, 全组分分析的占比情况根据某类污染物峰面积比上总峰面积计算得到. 将全组分分析与 114 种污染物分析的污染物种类、物种数量及占比情况进行对比分析, 详见表 5.

表 5 VOCs 全组分分析污染物种类及占比情况

Table 5 VOCs full-component analysis of pollutant types and the proportion

类型 Types	污染物种类 Pollutant type	物种数量 Number of Species	占比情况/% Percentage
烧烤-全组分分析	OVOCs	161	41.1
	烯烃	87	36.4
	烷烃	27	8.1
烧烤-114种污染物分析	OVOCs	20	29.2
	烯烃	11	41.1
	烷烃	15	24.7
川菜-全组分分析	OVOCs	127	65.0
	烯烃	27	15.8
	烷烃	12	4.3
川菜-114种污染物分析	OVOCs	20	25.7
	烯烃	11	30.1
	烷烃	27	23.5
食堂-全组分分析	OVOCs	149	54.8
	烯烃	46	18.7
	烷烃	24	6.9
食堂-114种污染物分析	OVOCs	19	28.0
	烯烃	11	16.5
	烷烃	27	30.3

注: 全组分分析的占比根据污染物峰面积比上总峰面积计算得到.

Note: The percentage of full-component analysis was calculated based on the contaminant peak area divided by the total peak area.

VOCs 全组分分析共检测到 207—343 种 VOCs, 其中烧烤全组分分析检测到 343 种 VOCs, 川菜检测到 207 种 VOCs, 食堂检测到 267 种 VOCs. 全组分分析相较于 114 种污染物成分谱, 得到的污染物种类更加复杂、多样. OVOCs 仍然是最主要的污染物种类, 占比高达 41.1%—65.0%, 全组分分析得到的 OVOCs 种类、结构更加复杂. 烯烃也是餐饮源中重要的污染物, 占比为 15.8%—36.4%. 在全组分分析中得到的烷烃占比相对较小, 为 4.3%—8.1%.

2.3.2 VOCs 全组分分析代表物质

全组分分析中 OVOCs、烯烃和烷烃的代表性物质及占比情况见表 6, OVOCs 的代表性物质为芳

樟醇、己醛、反式茴香脑, 烯烃代表性物质为长叶烯和柠檬烯, 烷烃代表性物质为正十五烷、正庚烷. 探索了餐饮源 VOCs 在 114 种组分之外的成分情况, 寻找完善餐饮源成分谱物种的代表性物质.

表 6 VOCs 全组分分析代表物质

Table 6 Representative substances for full-component analysis of VOCs

类型 Types	污染物种类 Pollutant type	代表物质 Representative substances	占比/% Percentage
烧烤-全组分	OVOCs	反式茴香脑、芳樟醇、己醛、桉油精	2.6、2.1、1.7、1.3
	烯烃	柠檬烯、长叶烯、(E)-B-罗勒烯	4.1、3.7、2.3
	烷烃	正十五烷、正庚烷、正辛烷	1.1、1.0、0.9
烧烤-114	OVOCs	丙烯醛、乙醛、己醛	15.1、6.2、3.5
	烯烃	丁二烯、乙烯、丙烯	22.8、8.4、4.0
	烷烃	丙烷、正戊烷、正丁烷	5.7、5.0、4.9
川菜-全组分	OVOCs	乙酸、己醛、十二醇、芳樟醇	2.0、1.5、1.2、1.2
	烯烃	长叶烯、柠檬烯、L-β-蒎烯	10.0、1.4、0.5
	烷烃	正十六烷、正十三烷、正十五烷	1.1、0.9、0.8
川菜-114	OVOCs	乙醛、丙烯醛、己醛	6.7、6.2、3.1
	烯烃	乙烯、丁二烯、丙烯	16.6、10.4、1.1
	烷烃	乙烷、2,2-二甲基丁烷、正戊烷	15.3、2.9、1.8
食堂-全组分	OVOCs	芳樟醇、己醛、2-苯基-2-丙醇、乙酸	2.8、1.6、1.3、0.8
	烯烃	长叶烯、α-愈创木烯、柠檬烯	5.2、2.1、1.4
	烷烃	正十四烷、正十五烷、正庚烷	1.1、0.9、0.9
食堂-114	OVOCs	乙醛、丙酮、乙酸乙酯	8.6、3.5、3.2
	烯烃	乙烯、反式-2-丁烯、顺式-2-丁烯	12.5、1.7、0.6
	烷烃	乙烷、2,2-二甲基丁烷、正戊烷	14.7、8.8、1.4

餐饮源 114 种污染物分析得到的 OVOCs 代表性物质为丙烯醛、乙醛、己醛、丙酮、乙酸乙酯; 烯烃代表物质为丁二烯、乙烯、丙烯、反式-2-丁烯、顺式-2-丁烯; 烷烃为丙烷、正戊烷、正丁烷、乙烷、2,2-二甲基丁烷. 在全组分分析中, 丙烯醛、顺式-2-丁烯和正庚烷占比较低, 主要是因为餐饮源全组分 VOCs 成分复杂、物种多样, 单一物种的占比则更低.

为完善餐饮源 VOCs 在 114 种组分之外的成分谱物种, 可根据实际情况综合考虑, 选择表 5 中关于烧烤、川菜和食堂增加 OVOCs、烯烃和烷烃类的代表物质增加监测, 旨在更全面地反映餐饮源 VOCs 的特征.

2.4 SOA 生成潜势

二次有机气溶胶(SOA)是由天然源和人为源排放的 VOCs 或半挥发性有机物(SVOCs)与大气中的氧化剂(O₃ 等)发生光化学反应, 并通过气体粒子转化或凝结在现有粒子上而形成的有机气溶胶^[24-25]. SOA 是大气气溶胶的重要组成部分, 也是 PM_{2.5} 的重要组成部分, 可占 PM_{2.5} 有机组分的 20%—50%^[26].

计算 SOA 生成潜势计算的方法主要有生成有水溶性有机物(WSOC)测算法、机碳(OC)/无机碳(EC)比率法和气溶胶生成系数(FAC)法^[27]. 本研究采用 FAC 法计算成都市餐饮源二次有机气溶胶生成潜势, 计算公式如下:

$$SOA_i = VOC_{S_{i0}} \times FAC_i$$

式中, SOA_i 为第 i 种 VOCs 生成 SOA 的浓度, μg·m⁻³; VOC_{S_{i0}} 为第 i 种 VOCs 的初始浓度, μg·m⁻³; FAC_i 为第 i 种 VOCs 生成 SOA 的气溶胶生成系数. 监测过程中得到的 VOCs 浓度是氧化后的 VOCs 浓度, 第 i 种 VOCs 的初始浓度 VOC_{S_{i0}} 计算公式如下:

$$VOC_{S_{i0}} = VOC_{S_i} \times (1 - F_{VOC_{S_i}})$$

式中, $VOCs_i$ 为监测到的 i 组分浓度, $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. F_{VOCs_i} 为第 i 种 VOCs 参与反应的质量浓度百分比, %. FAC_i 和 F_{VOCs_i} 来自于 Grosjean 等^[28-33] 大量的烟箱试验和大气化学动力学数据获得的.

由表 7 可知, 芳香烃的排放浓度和二次有机气溶胶排放贡献占比均为最大. 餐饮源 SOA 生成潜势为 $1220.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 社会餐饮 SOA 生成潜势为 $914.2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 家庭餐饮 SOA 生成潜势为 $11.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 食堂餐饮 SOA 生成潜势为 $295.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 社会餐饮是餐饮源 SOA 生成潜势占比为 74.9%, 食堂餐饮占比为 24.2%, 家庭餐饮占比为 0.9%. 社会餐饮是餐饮源 SOA 生成潜势最大的组成部分.

表 7 餐饮源 SOA 生成潜势计算结果

Table 7 Catering source SOA formation potential calculation results

类别 Types	化合物名称 Compounds name	社会餐饮 Commercial cooking		家庭餐饮 Family cooking		食堂餐饮 Canteen cooking		餐饮源 Catering sources	
		SOA _i	贡献率/% Contribution	SOA _i	贡献率/% Contribution	SOA _i	贡献率/% Contribution	SOA _i	贡献率/% Contribution
烷烃	2-甲基戊烷	0.1	0.0	0.0	0.0	1.1	0.4	1.2	0.1
	3-甲基戊烷	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	0.3	0.8	0.1
	正己烷	4.7	0.5	0.1	0.6	0.1	0.0	4.9	0.4
	甲基环戊烷	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0
	环己烷	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.1	0.2	0.0
	正庚烷	5.5	0.6	1.0	8.9	0.1	0.0	6.6	0.5
	甲基环己烷	3.3	0.4	0.0	0.0	2.4	0.8	5.7	0.5
	2,2,4-三甲基戊烷	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	2-甲基庚烷	0.8	0.1	0.0	0.0	1.2	0.4	2.0	0.2
	3-甲基庚烷	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	0.3	0.8	0.1
	正辛烷	0.9	0.1	1.0	9.1	0.1	0.0	2.0	0.2
	正壬烷	23.5	2.6	0.0	0.0	0.9	0.3	24.4	2.0
	癸烷	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0
	十一烷	12.9	1.4	0.6	5.5	13.3	4.5	26.8	2.2
	十二烷	8.0	0.9	1.1	9.2	0.0	0.0	9.1	0.7
	小计	59.9	6.6	3.8	33.3	21.1	7.2	84.8	6.9
芳香烃	苯	237.2	25.9	1.4	12.4	8.0	2.7	246.6	20.2
	甲苯	512.6	56.1	6.2	54.2	68.1	23.1	586.9	48.1
	乙苯	66.3	7.3	0.0	0.0	52.1	17.7	118.4	9.7
	间、对二甲苯	16.4	1.8	0.0	0.0	30.0	10.2	46.4	3.8
	邻二甲苯	18.5	2.0	0.0	0.0	43.9	14.9	62.4	5.1
	异丙苯	0.4	0.0	0.0	0.0	1.8	0.6	2.2	0.2
	正丙苯	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	间乙基甲苯	0.0	0.0	0.0	0.0	11.0	3.7	11.0	0.9
	对乙基甲苯	0.4	0.0	0.0	0.0	9.8	3.3	10.2	0.8
	1,3,5-三甲基苯	0.0	0.0	0.0	0.0	7.8	2.6	7.8	0.6
	邻乙基甲苯	0.7	0.1	0.0	0.0	17.5	5.9	18.2	1.5
	1,2,4-三甲基苯	0.1	0.0	0.0	0.0	5.7	1.9	5.8	0.5
	1,2,3-三甲基苯	0.1	0.0	0.0	0.0	8.1	2.7	8.2	0.7
	间二乙基苯	0.0	0.0	0.0	0.0	3.6	1.2	3.6	0.3
	对二乙基苯	0.5	0.1	0.0	0.0	3.6	1.2	4.1	0.3
	萘	1.2	0.1	0.0	0.0	2.9	1.0	4.1	0.3
小计	854.3	93.4	7.6	66.7	273.9	92.8	1135.8	93.1	
合计	914.2	100.0	11.5	100.0	295.0	100.0	1220.7	100.0	

在污染物类别方面, 餐饮源中芳香烃 SOA 生成潜势贡献率为 93.1%, 烷烃 SOA 生成潜势贡献率为 6.9%, 芳香烃为餐饮源重要的 SOA 生成潜势污染物. 社会餐饮中, 芳香烃 SOA 生成潜势贡献率为 93.4%, 烷烃 SOA 生成潜势贡献率为 6.6%. 家庭餐饮中, 烷烃 SOA 生成潜势贡献率为 33.3%, 芳香烃 SOA 生成潜势贡献率为 66.7%. 食堂餐饮中, 烷烃 SOA 生成潜势贡献率为 7.2%, 芳香烃 SOA 生成潜势贡献率为 92.8%. 社会餐饮和食堂餐饮的烷烃类 SOA 生成潜势贡献率较低, 在家庭餐饮中相对较高; 芳香烃类 SOA 生成潜势贡献率在 3 类餐饮中都较高.

3 结论(Conclusion)

(1) 建立成都市餐饮源本地化成分谱, 共检测出 95 种 VOCs, 包含烷烃 27 种、烯烃 11 种、芳香烃 16 种、卤代烃 19 种、OVOCs 20 种、其他 2 种. OVOCs、烷烃和烯烃 3 类占比最高, 是餐饮源重要的污染物类型. 餐饮源 VOCs 的特征污染物是丙烯醛(11.12%)、乙烷(9.87%)、乙醛(9.51%)、丙酮(9.34%)、乙烯(7.86%)、正戊烷(5.74%)、乙炔(5.01%)、丁二烯(4.64%)、顺式-1,3-二氯-1-丙烯(3.4%)和乙酸乙酯(3.04%).

(2) OVOCs 仍然是最主要的污染物种类, 全组分分析得到的 OVOCs 种类、结构更加复杂. 全组分特征得到 OVOCs 的代表性物质为反式茴香脑和芳樟醇等, 烯烃代表性物质为长叶烯和柠檬烯等, 烷烃代表性物质为正十五烷和正庚烷等.

(3) 采用 FAC 法计算餐饮源 VOCs 二次有机气溶胶生成潜势. 餐饮源 SOA 生成潜势为 $1220.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 芳香烃贡献率最大, 贡献率为 93.1%.

参考文献 (References)

- [1] LEE T, GANY F. Cooking oil fumes and lung cancer: A review of the literature in the context of the U. S. population [J]. *Journal of Immigrant and Minority Health*, 2013, 15(3): 646-652.
- [2] HE L Y, HU M, HUANG X F, et al. Measurement of emissions of fine particulate organic matter from Chinese cooking [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, 38(38): 6557-6564.
- [3] HILDEMAN L M, MARKOWSKI G R, CASS G R. Chemical composition of emissions from urban sources of fine organic aerosol [J]. *Environmental Science & Technology*, 1991, 25(4): 744-759.
- [4] SEE S W, BALASUBRAMANIAN R. Chemical characteristics of fine particles emitted from different gas cooking methods [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, 42(39): 8852-8862.
- [5] WANG G, CHENG S Y, WEI W, et al. Chemical characteristics of fine particles emitted from different Chinese cooking styles [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2015, 15(6): 2357-2366.
- [6] 谭德生, 邝元成, 刘欣, 等. 餐饮业油烟的颗粒物分析 [J]. *环境科学*, 2012, 33(6): 1958-1963.
TAN D S, KUANG Y C, LIU X, et al. Analysis on oil fume particles in catering industry cooking emission [J]. *Environmental Science*, 2012, 33(6): 1958-1963 (in Chinese).
- [7] IWEGBUE C M A, TESI G O, OVERAH L C, et al. Concentrations and profiles of polycyclic aromatic hydrocarbons in some popular fish species in Nigeria [J]. *Journal of Food Protection*, 2015, 78(3): 554-560.
- [8] VENKATARAMAN C, FRIEDLANDER S K. Source resolution of fine particulate polycyclic aromatic hydrocarbons using a receptor model modified for reactivity [J]. *Air & Waste*, 1994, 44(9): 1103-1108.
- [9] ZHAO Y L, HU M, SLANINA S, et al. The molecular distribution of fine particulate organic matter emitted from Western-style fast food cooking [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, 41(37): 8163-8171.
- [10] 黄烯茜. 典型 VOCs 污染源成分谱及基于反应活性的减排对策研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2020.
HUANG X Q. Study on the composition of typical VOCs pollution sources and reduction measures based on reactivity [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2020 (in Chinese).
- [11] SIMON H, BECK L, BHAVE P V, et al. The development and uses of EPA's SPECIATE database [J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2010, 1(4): 196-206.
- [12] WEI W, WANG S X, HAO J M, et al. Trends of chemical speciation profiles of anthropogenic volatile organic compounds emissions in China, 2005-2020 [J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2014, 8(1): 27-41.
- [13] LEE Y Y, PARK H, SEO Y, et al. Emission characteristics of particulate matter, odors, and volatile organic compounds from the grilling of pork [J]. *Environmental Research*, 2020, 183: 109162.

- [14] 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).
- [15] 李勤勤, 龚道程, 吴爱华, 等. 餐饮油烟VOCs排放特征研究进展 [J]. 环境科学与技术, 2018, 41(12): 113-121.
LI Q Q, GONG D C, WU A H, et al. Emission characteristics of VOCs from commercial cooking fumes: A review [J]. Environmental Science & Technology, 2018, 41(12): 113-121 (in Chinese).
- [16] 崔彤, 程婧晨, 何万清, 等. 北京市典型餐饮企业VOCs排放特征研究 [J]. 环境科学, 2015, 36(5): 1523-1529.
CUI T, CHENG J C, HE W Q, et al. Emission characteristics of VOCs from typical restaurants in Beijing [J]. Environmental Science, 2015, 36(5): 1523-1529 (in Chinese).
- [17] CHEN C, ZHAO Y J, ZHAO B. Emission rates of multiple air pollutants generated from Chinese residential cooking [J]. Environmental Science & Technology, 2018, 52(3): 1081-1087.
- [18] 刘昱. 北方地区住宅厨房细颗粒物空间分布特性及人员暴露影响研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2017.
LIU Y. Study and analysis of fine particle distribution and occupant's exposure in A northern residential kitchen [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2017 (in Chinese).
- [19] 谷超. 厨房污染物扩散规律研究与动态模拟软件开发[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2011.
GU C. Experimental study and dynamic simulation software development of pollutants diffusion in a kitchen [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2011 (in Chinese).
- [20] 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 (in Chinese).
- [21] 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, 621: 1300-1309.
- [22] 张春洋, 马永亮. 中式餐饮业油烟中非甲烷碳氢化合物排放特征研究 [J]. 环境科学学报, 2011, 31(8): 1768-1775.
ZHANG C Y, MA Y L. Characterization of non-methane hydrocarbons emitted from Chinese cooking [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, 31(8): 1768-1775 (in Chinese).
- [23] 钱骏, 韩丽, 陈军辉, 等. 四川省餐饮源挥发性有机物组分特征和清单 [J]. 环境科学, 2022, 43(3): 1296-1306.
QIAN J, HAN L, CHEN J H, et al. Emission characteristics and inventory of volatile organic compounds from cooking in Sichuan Province [J]. Environmental Science, 2022, 43(3): 1296-1306 (in Chinese).
- [24] 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 (in Chinese).
- [25] CARLTON A G, WIEDINMYER C, KROLL J H. A review of Secondary Organic Aerosol (SOA) formation from isoprene [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, 9(14): 4987-5005.
- [26] 郑玫, 闫才青, 李小滢, 等. 二次有机气溶胶估算方法研究进展 [J]. 中国环境科学, 2014, 34(3): 555-564.
ZHENG M, YAN C Q, LI X Y, et al. A review of methods for quantifying secondary organic aerosol [J]. China Environmental Science, 2014, 34(3): 555-564 (in Chinese).
- [27] 肖凯, 张晓伟, 郝志飞, 等. 焦化厂VOCs的臭氧生成潜势及二次有机气溶胶生成潜势分析 [J]. 环境工程, 2022, 40(9): 19-25,43.
XIAO K, ZHANG X W, HAO Z F, et al. Analysis of ozone formation potential and secondary organic aerosol formation potential of vocs in a coking plant [J]. Environmental Engineering, 2022, 40(9): 19-25,43 (in Chinese).
- [28] GROSJEAN D, SEINFELD J H. Parameterization of the formation potential of secondary organic aerosols [J]. *Atmospheric Environment (1967)*, 1989, 23(8): 1733-1747.
- [29] 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.
- [30] JACOBSON M C, HANSSON H C, NOONE K J, et al. Organic atmospheric aerosols: Review and state of the science [J]. *Reviews of Geophysics*, 2000, 38(2): 267-294.
- [31] KROLL J H, NG N L, MURPHY S M, et al. Secondary organic aerosol formation from isoprene photooxidation under high-NO_x conditions [J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(18): L18808.
- [32] MARTÍN-REVIEJO M, WIRTZ K. Is benzene a precursor for secondary organic aerosol? [J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, 39(4): 1045-1054.
- [33] JANG M, CZOSCHKE N M, LEE S, et al. Heterogeneous atmospheric aerosol production by acid-catalyzed particle-phase reactions [J]. *Science*, 2002, 298(5594): 814-817.