

上海市典型餐饮油烟颗粒物与 VOCs 源谱研究

江英华 王玮欣 袁宁宁

上海市黄浦区环境监测站, 中国·上海 200011

摘要: 餐饮油烟源是大气颗粒物与挥发性有机物 (VOCs) 排放的重要生活贡献源。在上海市餐饮企业聚集的典型区域, 选取 4 种 (5 家) 不同餐系的餐厅进行颗粒物与 VOCs 源谱测试。结果表明, 川菜油烟的 $PM_{2.5}$ 浓度最高, 这与其烹饪特征有关。油烟颗粒物中 Na、S、Ca、P 等常量元素含量较高, 不同餐系由于烹饪方式和食材的不同具有不同元素组成。各餐饮油烟中非甲烷总烃 (NMHC) 质量浓度差别较大, 介于 $0.283\sim 10.587\text{mg}/\text{m}^3$ 。餐饮油烟 VOCs 组分中 OVOCs 质量分数最大, 其中乙醇质量分数达 50% 以上。

关键词: 餐饮源; $PM_{2.5}$; VOCs; 源谱

Research on the Source Spectrum of Typical Catering Fume Particles and VOCs in Shanghai

Yinghua Jiang Weixin Wang Ningning Yuan

Huangpu District Environmental Monitoring Station, Shanghai, Shanghai, 200011, China

Abstract: Catering oil fume sources are important sources of atmospheric particulate matter and volatile organic compounds (VOCs) emissions in daily life. Select 4 (5) different types of restaurants in typical areas where catering enterprises gather in Shanghai for particulate matter and VOCs source spectrum testing. The results showed that the $PM_{2.5}$ concentration of Sichuan cuisine oil fume was the highest, which was related to its cooking characteristics. The content of constant elements such as Na, S, Ca, and P in oil fume particles is relatively high, and different meal types have different elemental compositions due to different cooking methods and ingredients. The mass concentration of non methane total hydrocarbons (NMHC) in various catering fumes varies greatly, ranging from 0.283 to $10.587\text{ mg}/\text{m}^3$. The mass fraction of OVOCs in the VOCs components of catering fumes is the highest, with ethanol having a mass fraction of over 50%.

Keywords: catering source; $PM_{2.5}$; VOCs; source spectrum

0 前言

近年来上海市餐饮企业数量快速增长, 2022 年上海持证餐饮服务单位为 2015 年数量的两倍^[1]。餐饮企业常位于人口密集区域, 排气筒高度较低^[2], 对空气质量及居民健康具有重要影响。油烟中含有颗粒物、挥发性有机化合物 (VOCs)、碳化合物、氮氧化物等^[3]物质, 排放颗粒物浓度显著高于环境背景值^[4-5], 同时烹饪过程中油脂与食材的挥发、分解、裂解等反应生成较多的 VOCs。影响餐饮源污染物排放的因素包括烹饪方式、烹饪燃料、烹饪温度等, 而传统的中式烹饪会释放较多污染物^[6-8]。研究表明, 长期暴露于油烟可能造成肺功能下降^[9], 具有潜在的肺癌风险^[10-11]。

本研究选取上海市 4 类典型餐饮企业, 结合各类餐企烹饪方式与食材运用等实际情况, 分析不同餐企类别的颗粒物与 VOCs 的不同排放浓度, 并分析其颗粒物与 VOCs 源谱以期颗粒物与 VOCs 源解析提供数据支撑。

1 研究方法

1.1 采样点位

在上海市中心城区选取 4 类典型的餐饮企业 (快餐 1 家、中餐 2 家、日式简餐 1 家、川菜 1 家) 进行颗粒物与 VOCs

排放浓度测试, 均为有组织源排放。

1.2 颗粒物源谱测试方法

通过稀释通道烟气采样法, 采集测试油烟气中气态和颗粒态污染物。每家餐企同时获取 4 组 $PM_{2.5}$ 滤膜样本, 分别用于测定汞、23 种无机元素 (Cu、Zn、Cd、Mn、Sb、As、Ba、Be、Co、V、Ni、Cr、Pb、Al、Se、Ca、Fe、Mg、K、Na、Ti、S、P)、16 种多环芳烃 (荧蒽、苯并 (a) 蒽、苯并 (a) 芘、苯并 (b) 荧蒽、蒽、苯并 (k) 荧蒽、芘、二苯并 (a,h) 蒽、二氢芘、菲、萘、芘、屈、茚、茚并 (1,2,3-c,d) 芘、苯并 (g,h,i) 芘) 和 10 种水溶性离子 (Cl^- 、 NO_3^- 、 F^- 、 SO_4^{2-} 、 NH_4^+ 、 NO_2^- 、 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+})。汞采用冷原子吸收分光光度法测定; 无机元素采用电感耦合等离子体发射光谱测定; 多环芳烃采用气相色谱-质谱法测定; 水溶性离子采用离子色谱法测定。

1.3 VOCs 源谱测试方法

4 类典型餐饮源参照 HJ 1012—2018 测定其非甲烷总烃浓度。利用气袋在烟道口净化装置后直接烟气采样以备 VOCs 组分测定; 采用 2,4-二硝基苯肼 (DNPH) 采样柱采集醛酮类物质, 测定 13 种醛、酮类化合物 (甲醛、乙醛、丙酮、丙烯醛、丙醛、丁烯醛、2-丁酮、甲基丙烯醛、正丁醛、

苯甲醛、戊醛、间甲基苯甲醛和己醛), 采样时在采样管前串联臭氧去除柱, 消除臭氧与衍生剂 DNPH 及衍生后的腈类化合物发生反应干扰。VOCs 组分采用气相色谱质谱联用仪 (GC-MS) 测定; 醛酮类物质采用高效液相色谱仪 (HPLC) 测定。

2 结果与讨论

2.1 PM_{2.5} 成分谱分析

餐饮油烟源 PM_{2.5} 质量浓度范围为 0.4426~0.7587 mg/m³ (见图 1), ρ (PM_{2.5}) 由高到低的顺序为: 川菜>快餐>中餐 #1>中餐 #2>日式简餐。川菜的 ρ (PM_{2.5}) 最高, 川菜的烹饪特点为油重、调料浓、炒的时间短、火候急等, 研究表明油基烹饪以及爆炒类的烹饪方式会释放更多的细颗粒物^[12-13], 烹饪肉食也会产生大量有机颗粒物^[14], 以油炸为主要烹饪方式, 以鸡肉为主要食材的快餐店 ρ (PM_{2.5}) 较高, 仅次于川菜。中餐厅食材丰富, 含有较多海鲜类, 烹饪方式除煎、炸、炒外, 还有蒸、煮、炖等, 水基烹饪释放较油基烹饪更少的细颗粒物^[12]。日式简餐的菜品以冷食、半成品加工居多, 具有清淡、少油的特点, 故 ρ (PM_{2.5}) 最低。

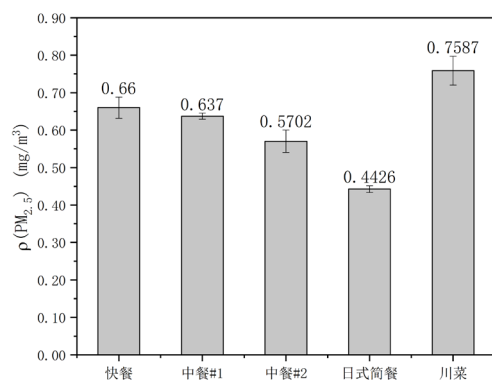


图 1 不同采样点 PM_{2.5} 质量浓度

餐饮油烟源 PM_{2.5} 源谱总体上质量分数较高的组分为 $\omega(\text{Na}) > \omega(\text{Na}^+) > \omega(\text{SO}_4^{2-}) > \omega(\text{NO}_3^-) > \omega(\text{Cl}^-) > \omega(\text{S}) > \omega(\text{NH}_4^+) > \omega(\text{Ca}) > \omega(\text{Ca}^{2+})$ 。无机元素在 PM_{2.5} 中质量分数为 15.3%~32.6%, Na、S、Ca、P 等常量元素质量分数较高, 分别为 5.15%~8.15%, 1.32%~7.05%, 1.64%~5.27%, 1.43%~2.86%。Na 主要来自调料^[13]。中餐 #1 中 Ca、Mg 较高, Ca 可能来自骨头、蛋类、豆制品等, Mg 主要来源于植物, 其中烹饪鱼类常用的紫菜的含镁量高^[15]。川菜油烟 PM_{2.5} 中 K 含量高, K 的来源主要是食材, 蔬菜、谷物、猪肉、瘦牛肉等富含钾; 快餐油烟 PM_{2.5} 中 Al 较高, 可能源于餐厅墙壁。日式简餐油烟 PM_{2.5} 中 Ni 含量占比较高, Ni 主要来自不锈钢锅具的使用^[16], 高温下从不锈钢表面浸出, 甚至可以从不锈钢抽油烟机滤筒中浸出^[8]。

水溶性离子组分在 PM_{2.5} 中质量分数为 22.8%~37.7%, 总体上 Na⁺、SO₄²⁻、Cl⁻、NO₃⁻ 质量分数较高, 这与 Arbex 的研究结果一致^[17], 分别为 4.28%~7.93%, 3.93%~7.87%,

1.78%~9.85%, 3.23%~6.72%, 1.79%~3.53%。Na⁺ 和 Cl⁻ 主要来自食用盐的使用, 而 SO₄²⁻ 和 F⁻ 主要来自饮用水^[17], NO₃⁻ 被认为来源于燃气灶的 NO_x 排放^[18]。川菜的油烟 PM_{2.5} 中 K⁺ 含量较高, 以油为基底物的情况下 K⁺ 的释放与烹制肉类有关^[18], 烹饪使用调味料中也含有 K⁺, 同时川菜馆排放的 Cl⁻ 含量较高, 是由于川菜食盐及调味料使用量较大。中餐 #1 油烟 PM_{2.5} 中 Ca²⁺ 含量较高, 富含 Ca 的菜式可能同时使得 Ca²⁺ 含量较高。不同餐饮源所使用的调料、食材、燃料、烹饪方式等是影响其排放 PM_{2.5} 中化学成分的因素, 见图 2、图 3。

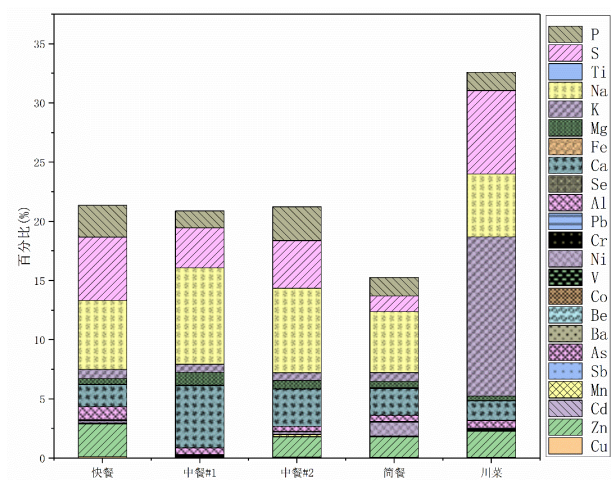


图 2 不同类型餐饮企业 PM_{2.5} 元素组分占比

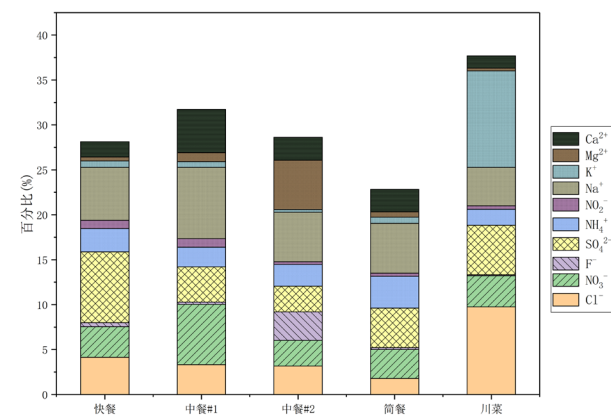


图 3 不同类型餐饮企业 PM_{2.5} 水溶性离子占比

2.2 VOCs 成分谱分析

非甲烷总烃 (NMHC) 为《餐饮业油烟污染物排放标准 (征求意见稿)》及多个地方标准中的挥发性有机物的综合控制指标。本研究以 NMHC 质量浓度分析各菜系油烟排放的 VOCs 质量浓度综合情况。各菜系排放 ρ (NMHC) 介于 0.283~10.587 mg/m³, 与林立等^[19]2014 年测定的上海市餐饮企业 VOCs 排放浓度较为一致。中式烹饪在翻炒过程中, 会促进 VOCs 的挥发, 且水的蒸发会导致大量小油滴和 VOCs 的挥发^[20], 两者的共同作用可能是导致中餐 #1 油烟

中 NMHC 质量浓度过高的原因, 见图 4。

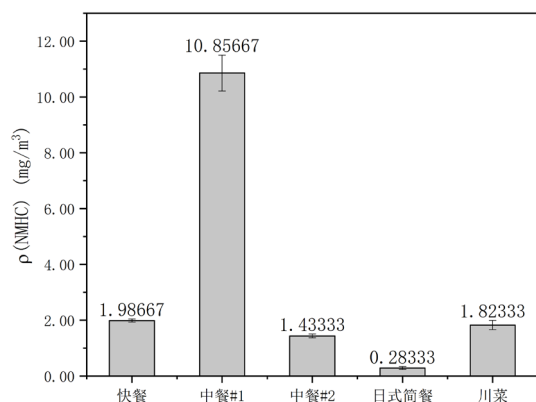


图 4 不同采样点 NMHC 质量浓度

各类餐企油烟共检测出 75 种 VOCs 成分, 包括 18 种烷烃、10 种烯烃、21 种含氧有机物、12 种卤代烃、13 种芳香烃、1 种其他 VOCs。四类餐饮油烟中含氧有机物 (OVOCs) (67.42%~98.27%) 与烷烃 (0.63%~21.23%) 贡献了主要的挥发性有机物, 这与 Wang、陈文泰等的结果一致^[21-22]。其中乙醇组分占比最大, 达到 53.58%~85.87%, 这主要来自黄酒、料酒、啤酒等含酒精的调料, 是腌制、烹饪肉类时的常用调料^[23], 去乙醇后 OVOC 质量分数为 6.36%~16.40%。烷烃在各菜系中占比也较大, 花生油消耗、肉类食材中脂肪不完全燃烧以及天然气的逸散会释放烷烃^[24-25]。油烟中会包含少量的卤代烃, 日式简餐中卤代烃含量较高, 其中氯代烃的来源可能是水中的氯消毒剂、洗涤剂残留、农药及食材加工中氯洗残留或副产品等在高温下转化而成^[26,27]。

四类餐企油烟中 VOCs 主要集中于 C1~C5 的低碳类物质。OVOCs 中主要为 C1~C5 化合物 (63.82%~97.28%), 烷烃中主要是 C3~C5 化合物 (0.48%~19.63%), 烯烃主要为 C3~C4 化合物 (0.10%~3.44%), 卤代烃中主要是 C1~C2 化合物 (0.14%~3.63%), 芳香烃主要是 C6~C8 化合物 (0.11%~2.34%)。餐饮源排放的 C1~C3 物质占比较高的原因是深度烹饪可达到大分子物质转化为小分子的反应条件^[28]。烹饪的高温也可以使脂肪酸裂解或环化产生 C5 及 C5 以上的羰基化合物, 当使用脂肪酸含量较多的食用油时可能使 C5 及 C5 以上的羰基化合物升高^[29], 见图 5。

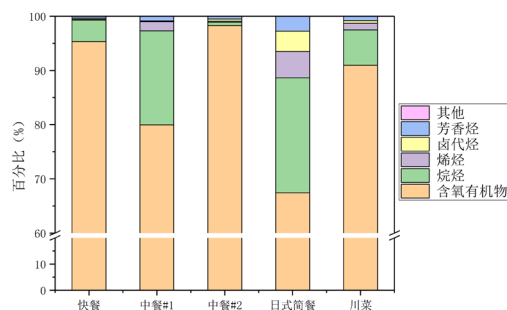


图 5 不同类型餐饮企业 VOCs 组分占比

3 结论

①各菜系餐饮油烟 $PM_{2.5}$ 质量浓度由高到低的顺序为川菜、快餐、中餐、简餐, 川菜因其油重、调料浓、爆炒等烹饪特点, 释放更多的细颗粒物。

②各餐系颗粒物成分谱中 Na、S、Ca、P 等常量元素含量较高, 不同的烹饪方式与食材影响餐饮油烟细颗粒物的元素组成。

③各类餐企餐饮油烟中非甲烷总烃 (NMHC) 质量浓度差别较大, 介于 0.283~10.587mg/m³。其中, 中式翻炒和水分蒸发可能是造成中餐 #1 非甲烷总烃较高。

④餐饮油烟 VOCs 组分中 OVOCs 质量分数最大, 其中乙醇质量分数均达到 50% 以上, 其主要来源于黄酒、料酒、啤酒等含酒精的调料。此外, 肉类脂肪不完全燃烧使得烷烃的质量分数也较大。

参考文献:

- [1] 解放日报.2020年上海市食品安全状况报告(白皮书)[N/OL].
- [2] 张星,钱振清,张德峰,等.餐饮油烟排放特征与净化技术研究进展[J].环境工程,2020,38(1):37-41+20.
- [3] Zhao Y, Zhao B. Emissions of air pollutants from Chinese cooking: A literature review[J]. Building simulation,2018,11(5):977-995.
- [4] 张腾,彭林,李颖慧,等.餐饮源油烟中 $PM_{2.5}$ 的化学组分特征[J].环境科学研究,2016,29(2):183-191.
- [5] 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(11):2620-2625.
- [6] Gao J, Cao C, Zhang X, et al. Volume-based size distribution of accumulation and coarse particles (PM_{0.1-10}) from cooking fume during oil heating[J]. Building and Environment,2013(59):575-580.
- [7] To W M, Yeung L L. Effect of fuels on cooking fume emissions[J]. Indoor and Built Environment,2011,20(5):555-563.
- [8] Wang L, Xiang Z, Stevanovic S, et al. Role of Chinese cooking emissions on ambient air quality and human health[J]. Science of the total environment,2017(589):173-181.
- [9] Du B, Gao J, Chen J, et al. Particle exposure level and potential health risks of domestic Chinese cooking[J]. Building and Environment,2017(123):564-574.
- [10] Tung Y H, Ko J L, Liang Y F, et al. Cooking oil fume-induced cytokine expression and oxidative stress in human lung epithelial cells[J]. Environmental research,2001,87(1):47-54.
- [11] Ko Y C, Cheng L S C, Lee C H, et al. Chinese food cooking and lung cancer in women nonsmokers[J]. American journal of epidemiology,2000,151(2):140-147.
- [12] SEE S W, BALASUBRAMANIAN R. Chemical characteristics of fine particles emitted from different gas cooking methods[J]. Atmospheric Environment,2008,42(39):8852-62.
- [13] 李勤勤,吴爱华,龚道程,等.餐饮源排放 $PM_{2.5}$ 污染特征研究进展[J].环境科学与技术,2018,41(8):41-50.

- [14] Lee S C, Li W M, Chan L Y. Indoor air quality at restaurants with different styles of cooking in metropolitan Hong Kong[J]. *Science of the Total Environment*,2001,279(1-3):181-193.
- [15] 陈晓红,达古拉,徐玲,等.摩尔吸收点二甲酚橙光度法测定紫菜中钙和镁[J]. *食品科技*,2014,39(9):300-302.
- [16] Wang G, Cheng S, 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.
- [17] Arbex M A, Martins L C, Pereira L A A, et al. Indoor NO₂ air pollution and lung function of professional cooks[J]. *Brazilian journal of medical and biological research*,2007,40(4):527-534.
- [18] 赵紫微.烹饪油烟颗粒物组分的排放特征研究[D].大连:大连工业大学,2019.
- [19] 林立,何校初,邬坚平,等.上海餐饮油烟污染特征研究[J].*环境科学与技术*,2014,37(S2):546-549.
- [20] Wang L, Zheng X, Stevanovic S, et al. Characterization particulate matter from several Chinese cooking dishes and implications in health effects[J]. *Journal of Environmental Sciences*,2018(72):98-106.
- [21] Wang H, Xiang Z, Wang L, 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] 陈文泰,胡崑,薛艳,等.餐饮源挥发性有机物(VOCs)排放特征及对臭氧生成的影响[J].*南京信息工程大学学报(自然科学版)*,2020,12(6):647-655.
- [23] 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.
- [24] Rogge W F, Hildemann L M, Mazurek M A, et al. Sources of fine organic aerosol. 1. Charbroilers and meat cooking operations[J]. *Environ.sci.technol*,1991,25(6):1112-1125.
- [25] He W Q, Nie L, Tian G, et al. Study on the chemical compositions of VOCs emitted by cooking oils based on GC-MS[J]. *Huan jing ke xue= Huanjing kexue*,2013,34(12):4605-4611.
- [26] Schauer J J, Kleeman M J, Cass G R, et al. Measurement of emissions from air pollution sources. 4. C₁-C₂₇ organic compounds from cooking with seed oils[J]. *Environmental Science & Technology*, 2002,36(4):567.
- [27] P G, C N, R L. Chlorinated Compounds Formed During Chlorine Wash of Chicken Meat[R]. Christchurch, New Zealand: Institute of Environmental Science & Research Limited,2008.
- [28] 程婧晨,崔彤,何万清,等.北京市典型餐饮企业油烟中醛酮类化合物污染特征[J].*环境科学*,2015(8):2743-2749.
- [29] 史纯珍,姜锡,姚志良,等.烹饪油烟碳基化合物排放特征[J].*环境工程学报*,2015,9(3):1376-1380.

作者简介: 江英华 (1975-) , 男, 高级工程师, 从事污染源废气现场监测研究。