

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 Qinqin, Gong Daocheng, Wu Aihua, et al. Emission characteristics of VOCs from commercial cooking fumes: a review[J]. Environmental Science & Technology, 2018, 41(12): 113-121.

餐饮油烟 VOCs 排放特征研究进展

李勤勤¹, 龚道程², 吴爱华^{1*}, 王伯光², 栾胜基¹

(1. 北京大学深圳研究院深圳环境模拟与污染控制重点实验室, 广东 深圳 518057;

2. 暨南大学环境与气候研究院, 广东 广州 511443)

摘要: 随着餐饮业的快速发展, 餐饮油烟排放 VOCs 对人体健康和环境的危害受到广泛关注。该文对餐饮油烟 VOCs 排放特征的研究进行了综述, 包括餐饮源对大气环境中 VOCs 的贡献、时空分布特征、化学成分谱、排放因子及排放量估算, 并初步探讨了影响餐饮源 VOCs 排放特征的多种因素。文章指出了餐饮油烟 VOCs 排放特征研究的不足之处, 主要包括源谱未统一、排放因子未本地化、排放量估算存在偏差等。规范化源谱测量方法及测量组分, 加强对中小型餐馆 VOCs 排放的监测, 标准化餐饮油烟 VOCs 源谱数据库将是后续研究的重点工作。

关键词: 餐饮油烟; VOCs; 排放特征; 排放因子

中图分类号: X511 **文献标志码:** A **doi:** 10.19672/j.cnki.1003-6504.2018.12.017 **文章编号:** 1003-6504(2018)12-0113-09

Emission Characteristics of VOCs from Commercial Cooking Fumes: a Review

LI Qinqin¹, GONG Daocheng², WU Aihua^{1*}, WANG Boguang², LUAN Shengji¹

(1. Shenzhen Key Laboratory of Environment Simulation and Pollution Control, Peking University Shenzhen Institute, Shenzhen 518057, China; 2. Institute for Environmental and Climate Research, Jinan University, Guangzhou 511443, China)

Abstract: With the rapid development of catering industry, more and more attention has been paid to the hazard toward human health and environment caused by VOCs emitted from commercial cooking fumes. In this paper, the researches on emission characteristics of VOCs from commercial cooking fumes were summarized, including the contribution of commercial cooking emissions to VOCs in atmospheric environment, temporal and spatial distributions, chemical composition profiles, emission factors, and estimation of VOCs emission capacities. Various influence factors on VOCs emission characteristics have been preliminarily discussed. Deficiencies of recent researches on emission characteristics of VOCs from commercial cooking emissions have also been stated, such as uniformed chemical composition profiles, unlocalized emission factors, and the deviation of VOCs emissions estimation. Furthermore, in the future studies, more researches should be done on the unification of measurement protocols, measurement of medium and small restaurants, and standardization of chemical composition spectrums.

Key words: commercial cooking fumes; VOCs; emission characteristics; emission factors

随着社会节奏的加快及人均消费水平的提高, 居民外出就餐的频率增加, 餐饮业数量急剧增加, 餐饮油烟污染加剧, 餐饮油烟投诉可达环保投诉总数的 50%^[1]。研究表明, 餐饮油烟排放的气态污染物成分多达 300 多种, 包括多种活性 VOCs 物质^[2], 可促进大气 OH 自由基、O₃ 和二次有机气溶胶的生成, 从而导致光化学烟雾污染事件的发生^[3, 4]。同时, 餐饮油烟排放口 VOCs 的浓度可达环境背景值的 2~9 倍, 说明餐饮油烟 VOCs 浓度较高, 严重影响周围环境^[5];

餐饮油烟排放 VOCs 还是油烟产生强烈刺激气味的主要原因^[6]。

餐饮油烟排放的 VOCs 也包含芳香烃、醛酮、多环芳烃(PAHs)等有毒有害化合物, 长期接触这类污染物可对人体造成 DNA 氧化损伤和脂质过氧化反应^[7]。毒理学研究证实, 油烟可对大鼠呼吸道造成致炎作用^[8]。已有研究表明, 餐饮油烟可导致餐厅厨房及用餐区甲醛、苯、甲苯、氯仿等有害物质浓度超标, 从而危害餐厅职工及顾客的健康^[9, 10]。同时, 流行病学研

《环境科学与技术》编辑部: (网址) <http://fjks.chinajournal.net.cn> (电话) 027-87643502 (电子信箱) hjkyxjs@vip.126.com

收稿日期: 2018-04-09; 修回 2018-06-30

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0211501)

作者简介: 李勤勤(1989-), 女, 硕士, 主要研究方向为大气环境安全与污染控制, (电子信箱) liqq9108@163.com; *通讯作者, (电子信箱) phenix_wah@aliyun.com。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

究证实,餐厅职工慢性和急性呼吸道疾病的发病率远高于普通居民^[11]。因此,餐饮源排放的VOCs可严重危害环境及人体健康,亟需予以控制。

基于以上背景,国内外大量研究对餐饮油烟VOCs的排放特征,包括源贡献、TVOC(总挥发性有机物)浓度、化学成分谱等进行了较为细致的解析,并分析了餐饮油烟VOCs排放因子,估算了VOCs的排放量。本文对餐饮油烟VOCs的已有研究进行了归纳总结与分析,以期全面了解餐饮源VOCs的排放特征,从而为餐饮油烟VOCs排放控制政策的制定及控制技术的研发提供科学依据。

1 餐饮源贡献

餐饮油烟污染日益加剧,餐饮源对城市大气环境VOCs的贡献受到学者的关注。Loh^[12]对香港VOCs排放清单的研究显示,香港地区餐饮油烟VOCs的排放量占人为源VOCs排放总量的1.07%。周子航等^[13]分析了成都市人为源VOCs排放清单,结果显示餐饮源的贡献率为0.94%。夏思佳等^[14]分析了江苏省人为源VOCs排放清单,指出餐饮源对江苏省人为源VOCs贡献率为3.19%,各市餐饮源VOCs贡献率由高到低依次为:宿迁8.18%、盐城6.38%、连云港6.37%、徐州5.04%、淮安4.94%、南通4.01%、泰州3.21%、扬州2.99%、镇江2.73%、常州2.49%、无锡2.17%、南京1.96%和苏州1.44%。

羰基化合物是具有极高反应活性及毒性的一类VOCs物质,大气羰基化合物的来源一直是国内外学者研究的重点^[15]。Wang等^[16]指出餐饮源是城市区域羰基化合物的主要来源之一,其贡献率仅次于机动车尾气和固定源。冯艳丽等^[17]对比分析了大气环境与多种污染源排放的羰基化合物分布差异,指出油烟可能是大气中高分子羰基化合物的主要来源之一。研究表明,机动车尾气与餐饮油烟排放的甲醛浓度接近,但餐饮油烟其它羰基化合物的总浓度接近机动车尾气总浓度的5倍,尤其是大分子羰基化合物(C₅~C₁₀)^[18];餐饮油烟已成为城市大气环境中高分子羰基化合物的主要来源之一^[18,19]。综上所述,餐饮源已成为城市大气环境中VOCs的重要来源之一,尤其是活性高、危害大的羰基化合物,其贡献不容忽视。

2 时空分布特征

气候环境及人文的差异影响居民饮食习惯,促使不同地域形成特色鲜明的餐饮类型,从而导致餐饮油烟污染具有地域性。沈阳是我国北方典型的大型城市,其餐饮油烟TVOC平均质量浓度高达3.4 mg/m³^[5]。

上海是我国中东部典型大型城市,其餐饮油烟TVOC浓度变化范围为0.87~7.31 mg/m³^[20]。成都为中西部典型大型城市,其餐饮油烟TVOC浓度变化范围为0.06~0.75 mg/m³^[21]。香港为我国南部典型大型城市,其餐饮油烟TVOC的排放浓度0.08~1.66 mg/m³^[22]。由此可见,餐饮油烟TVOC浓度具有一定的空间分布特征,但相关研究需进一步展开。

不同季节气候环境的改变同样可以影响餐饮油烟VOCs的排放。王秀艳等^[9]对天津某中型餐馆油烟VOCs进行了监测分析,指出夏季油烟处理装置油烟去除效率较冬季低,从而影响不同季节餐饮油烟VOCs的排放特征。受客流量及烹饪菜肴变化的影响,餐饮源不同时间段VOCs排放情况有所变化。王敏等^[22]对学校食堂不同时段的餐饮油烟进行了采样分析,结果显示,不同时间段餐饮油烟TVOC浓度不同,且各组分占比发生改变,并指出高峰期产生、炒菜后消失的醇类是由加入的料酒产生的。冯艳丽等^[17]对花都某酒店油烟气中羰基化合物的监测结果显示,午市羰基化合物总浓度与晚市的总浓度存在差异,午市和晚市羰基化合物组成特征亦存在差异。尹元畅等^[21]使用在线监测仪器连续监测餐饮油烟TVOC浓度,发现不同时间段TVOC浓度随餐馆炒菜个数的变化而变化;食材刚下锅时TVOC浓度急剧变化。综上所述,餐饮油烟VOCs排放特征受油烟净化装置、客流量、烹饪菜肴、炒菜个数等影响而具有时间分布特征。

3 不同菜系VOCs排放特征

3.1 TVOC浓度

为进一步了解不同类型餐饮源TVOC排放情况,表1归纳总结了不同菜系餐饮源排放TVOC浓度。虽然各研究的采样方法、采样时间及分析方法等存在差异,但表1仍能在一定程度上反映不同菜系的TVOC排放特征。从表1中可以看出,不同菜系餐饮油烟TVOC浓度不同。烤制类餐饮源(烤鸭店、烧烤店、烤鸡店、烤猪店等)TVOC浓度往往是最高的,其次是川湘菜餐饮源。整体上而言,中式菜系餐饮源TVOC浓度较西式菜系餐饮源的高,这是由于中式餐饮烹饪方式复杂,较烹饪方式单一的西式餐饮可排放更多的油烟^[23]。

结合表1中各餐饮源的基本信息可以看出,不同菜系餐饮源TVOC浓度受多种因素的影响。To等^[24]研究表明,食材、食用油和燃料均是影响TVOC浓度水平的因素。To等^[25]另一研究指出,与烹饪食材相比,通风罩及空气污染控制系统对油烟污染物排放特征的影响更大。崔彤等^[26]指出,菜系的烹饪特点是影

响不同菜系 VOCs 排放浓度的主要原因,同时常用食材、翻炒频率和程度都是重要的影响因素。而 Zhao 等^[27]则指出,油炸过程排放的 TVOC 浓度最低,但烹饪时间或者烹饪技术对 TVOC 浓度的影响相对较弱,TVOC 浓度变化主要与调料(如料酒)和原料的使用有关,腌制也可使 TVOC 浓度增加。烟气收集罩的进气量是影响 VOCs 排放浓度的另一重要因素^[28]。综上所述,不同菜系餐饮源排放 TVOC 浓度受食材、食用油、烹饪方式、燃料、调料、油烟净化设施等多种因素的影响。

表 1 餐饮油烟排放 TVOC 浓度水平
Table 1 Concentrations of TVOC emitted from commercial cooking fumes

城市	类型	基本信息	浓度
北京 ^[29]	烤鸭	大型;使用果木炭烤制;油烟未净化	8 310 μg/m ³
	家常菜	使用天然气爆炒和蒸煮;静电式净化系统	487.2 μg/m ³
北京 ^[28]	鲁菜	使用天然气;静电式净化系统	257.5 μg/m ³
	湘菜	使用液化气;静电式净化系统	494.3 μg/m ³
	烧烤	使用果木炭烤制和煎炸;无净化系统	3 494 μg/m ³
	烧烤	使用木炭烤制;食材丰富	11 064.7 μg/m ³
北京 ^[26]	中式快餐	使用天然气大火烹炒	4 659.0 μg/m ³
	西式快餐	使用天然气油炸	4 405.7 μg/m ³
	川菜	使用天然气爆炒;使用刺激性气味食材	11 089.5 μg/m ³
	浙菜	使用天然气蒸煮;食材多为蔬菜	3 706.7 μg/m ³
	家常菜	中型;使用天然气爆炒	4 097.6 μg/m ³
	中式快餐	中型;使用天然气	13 584.9 μg/m ³
北京 ^[23]	湘菜	中型;使用天然气;口味多为酸辣	36 749.7 μg/m ³
	川菜	小型;使用天然气爆炒	17 136.3 μg/m ³
	烧烤	小型;使用木炭烤制牛羊肉	43 760.0 μg/m ³
成都 ^[22]	学校食堂	烹饪时间固定;使用料酒	247.2 μg/m ³
	烧烤	主要为烤鱼;傍晚为高峰期	314.3 μg/m ³
香港 ^[30]	韩式烧烤	使用 LPG 煎制食物	378.4 μg/m ³
	中式火锅	使用 LPG 汤锅煮制食物	178.9 μg/m ³
	中式点心	使用 LPG 蒸笼蒸制食物	128.1 μg/m ³
	学校食堂	使用电炉或气炉;活性炭净化烟气	19.3 μg/m ³
Aveiro ^[31]	烤鸡店	使用炭烤制鸡肉;无油烟净化装置	19 639.4 μg/m ³
	烤猪店	使用木烤炉烤制乳猪;无油烟净化装置	8 859.4 μg/m ³
	玉米饼店	使用 LPG 炉	260 ×10 ⁻⁶
Mexico City ^[32]	饭店	使用 LPG 炉和炭烤架;有烟囱	6~38 ×10 ⁻⁶
	烤肉店	使用 LPG 烤制鸡肉	10.7 ×10 ⁻⁶
	油炸食品店	使用猪油油炸食物;无通风系统	3~12 ×10 ⁻⁶

3.2 VOCs 成分谱

本研究将餐饮油烟 VOCs 分为烷烃、烯烃、芳香烃、卤代烃和 OVOCs 五类,如图 1 所示。从图 1 可以看出,不同类型餐饮源排放 VOCs 各组分占比存在较大差异。烤鸭、西式快餐¹、川湘菜、中式快餐、西式快餐²、川菜和浙菜油烟排放的 VOCs 中 OVOCs 的占比最高,为 45.6%~96.9%;食堂、沪菜、绍兴菜和粤菜油烟排放的 VOCs 以烷烃为主,占比为 44.0%~71.5%;烧烤¹和烧烤²油烟排放的 VOCs 主要为烷烃和烯烃,占比分别为 34.2%~53.2% 和 37.8%~42.8%;炸食店主要排放的 VOCs 组分为烷烃和烯烃,分别为 66.0% 和 30.2%;川湘菜和西式快餐¹油烟排放的 VOCs 中卤代烃约占 20%。

图 1 归纳总结了各组物质含碳数分布情况,可以看出,不同类型的餐饮油烟主要排放的含碳数物质较为集中。烷烃主要为 C₂~C₈ 化合物,累计浓度占比的范围为 1.2%~65.5%;烯烃为 C₂~C₆,累计浓度占比的范围为 0.8%~42.8%;芳香烃为 C₆~C₉,0.1%~17.4%;卤代烃为 C₁~C₃ 及 C₆,0.1%~24.0%;OVOCs 则为 C₂~C₆,1.7%~96.9%。

对于烷烯烃而言,食用油加热过程中经催化氢化作用可产生多种 VOCs 物质,最主要的成分为烷烯烃^[33],而烷烯烃来自大分子羰基裂解^[34]。因此,张春洋等^[23]研究指出,川湘菜油烟中烷烯烃占比较高与 2 个菜系较高的食用油使用量密切相关。同时,Wang 等^[35]研究指出,燃料挥发可使 C₂~C₃ 类烷烃排放增加,

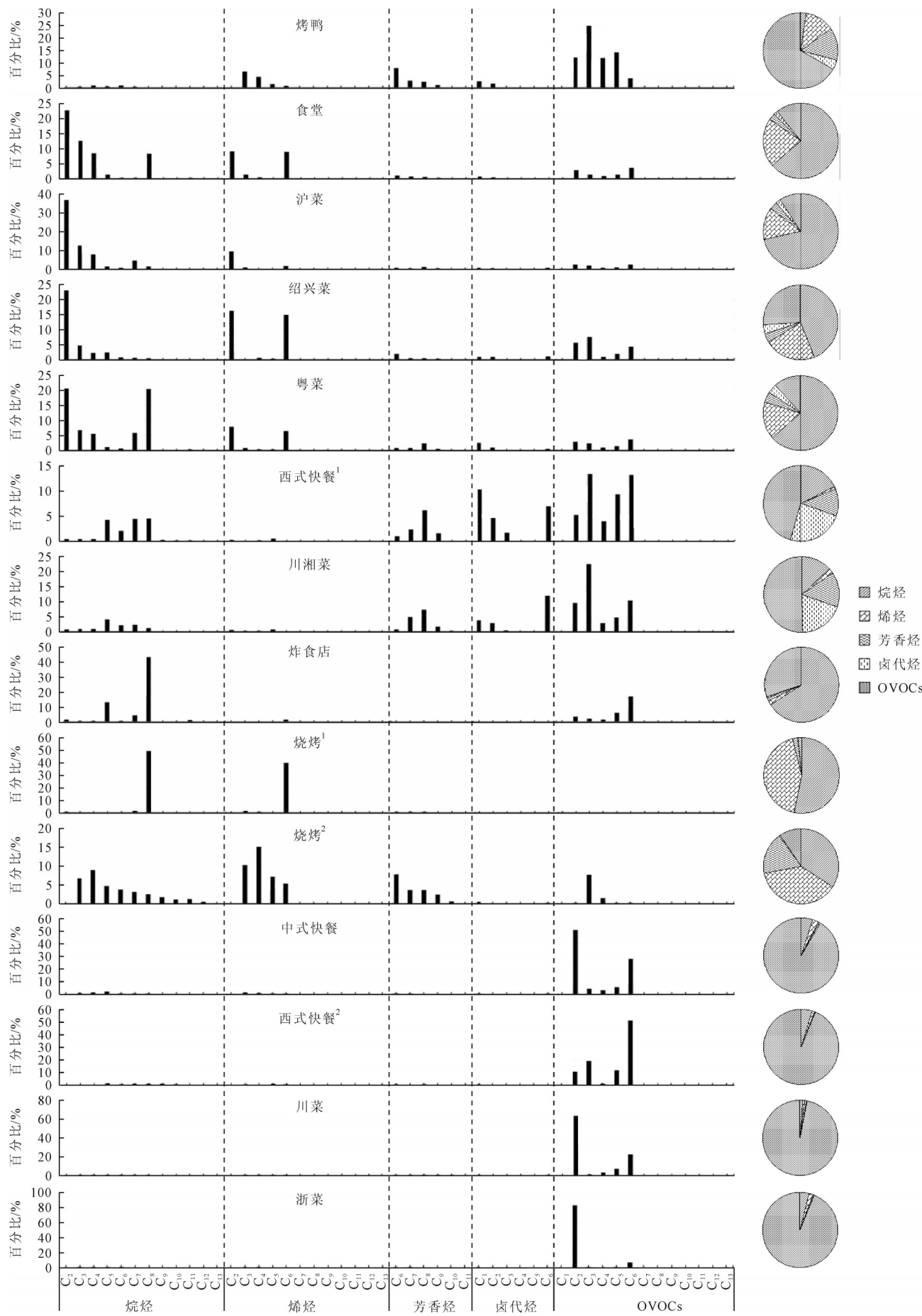


图1 餐饮油烟VOCs成分谱^[26, 29, 35]

Fig.1 Chemical composition spectrums of VOCs emitted from commercial cooking fumes

从而导致烷烃占比增加。Mugica等^[32]研究指出,餐饮油烟中的乙烷、乙烯和乙炔主要来自食物、油脂和木炭的不完全燃烧,丙烷、正丁烷、异丁烷和丙烯则主要来自燃料燃烧过程;烷烯烃的另一来源可能是燃料挥发及肉类和脂肪的不完全燃烧。Cheng等^[28]研究结果显示,家常菜、鲁菜和湘菜烷烃占比最高,而烧烤则为烯烃,并指出烹饪方式是决定餐饮油烟VOCs化学组分的重要影响因素之一。综上所述,餐饮油烟中,烷烯烃可由食用油、食材及烹饪燃料产生,烷烯烃的排放特征受用油量、食材、燃料和烹饪方式的影响。

从图1中可以看出,使用木炭烤制类(烤鸭、烧烤)、用油量较大(川湘菜)及高温煎炸(西式快餐¹)的菜系油烟排放的芳香烃占比较其它菜系的高。Mugica等^[32]研究指出同时,当使用木炭作为燃料时,餐饮油烟中苯、甲苯、二甲苯等芳香烃浓度较高。Kabir等^[36]进一步分析了烧烤用木炭燃烧时的VOCs排放特征,指出苯和甲苯是浓度最高的物质。何万清等^[37]分析了5种食用油加热时VOCs排放特征,研究结果显示,油烟中芳香烃化合物可达4~7种,且食用油在130℃低温和260℃高温时产生的芳香烃种类最多。综上所述,烹饪燃料、食用油量及油温可影响餐饮油烟苯系物的排放。

除西式快餐¹及川湘菜,卤代烃在其它菜系餐饮油烟VOCs中占比较低,如图1所示。何万清等^[37]研究表明,食用油加热的油烟中含有少量的卤代烃。同时,氯代烃还有可能由自来水氯消毒剂、含有氯化物的洗涤剂、食材本身残留的农药及肉类加工厂氯洗过程产生的副产品等在高温下转化而成^[38-40]。因此,导致西式快餐¹及川湘菜油烟卤代烃占比较高的原因可能包括:(1)食用油使用量大;(2)菜品油腻,餐具清洗过程中清洁剂的使用量较大;(3)肉类食材居多。

从图1中可以看出,OVOCs是烤鸭、西式快餐、川湘菜、中式快餐等餐饮油烟排放的VOCs中占比最高的组分。研究表明,餐饮油烟排放的大部分羰基化合物是由食物和食用油在烹饪过程中释放的^[39-41],而烹饪燃料燃烧也可释放羰基化合物^[42]。Xiang等^[43]对比分析了油烟排放VOCs成分谱及食用油的化学成分谱,指出长链碳氢化合物分解产物容易在油品加热过程中挥发,而亚油酸含有更多的双键从而生成更多的羰基化合物。冯艳丽等^[17]和Schauer等^[39]研究指出,壬醛是由不饱和的脂肪酸、油酸(十八烯酸)分解而形成的。崔彤等^[26]指出,中式菜系排放较高的乙醇主要来自黄酒或料酒,两者是腌制、烹饪肉类时的常用调料。程婧晨等^[44]指出,深度烹饪可达到大分子物质分解为小分子物质所需的反应条件,从而使此类餐饮源排放

的C₁~C₃醛酮物质占比较高。史纯珍等^[45]则指出,脂肪酸在高温下可能会裂解或环化产生C₅及C₅以上的羰基化合物,使用含有较多脂肪酸的食用油时,餐饮油烟可排放更多的C₅及C₅以上的羰基化合物。

Fullana等^[46]研究表明,不同种类的食用油羰基化合物排放特征不同,羰基化合物的排放速率随着油温增加而增加,且受烹饪时长的影响。史纯珍等^[45]研究指出,高温可增强反应物分子能量,从而促使生成羰基化合物等高反应活性物质。进一步研究表明,高温促使脂肪酸氧化分解速度增加,从而导致食用油在高温时排放更多的羰基化合物^[47]。Xiang等^[43]研究表明,羰基化合物排放因子:烧烤>油炸>铁板烧>爆炒;肉类菜品>无肉类菜品;葵花籽油较其他油排放量大。Zhang等^[48]研究指出,烹饪燃料、灶台的类型及烟道设计均可影响羰基化合物的排放浓度。陈振贺等^[49]对同一餐馆油烟中醛酮进行多次监测发现,采样时段、菜品的种类、客流量等因素影响餐饮油烟醛酮排放特征。综上所述,餐饮源羰基化合物的排放受油温、烹饪时长、烹饪方式、食材、调料、灶台及烟道设计等因素影响。

4 排放因子及排放量

4.1 排放因子

餐饮油烟VOCs排放总量和贡献率是制定餐饮油烟污染控制政策的主要依据,而排放因子的选取往往直接影响排放量估算的准确性。表2总结了不同菜系、规模及区域的餐饮源VOCs排放因子。从表中可以看出,餐饮油烟VOCs排放因子可分为3类:人均VOCs排放量(g)、单灶台每小时VOCs排放量(g/h stove)和餐馆每小时VOCs排放量(g/h)。其中,以人均排放量计,不同菜系中沪菜的VOCs排放因子最大(2.54 g/person),不同规模中大型餐馆排放因子最大(3.81 g/person);以单灶台排放量计,绍兴菜排放因子最大(12.52 g/h stove);不同规模中则为大型餐馆(13.56 g/h stove);以小时排放量计,绍兴菜排放因子高达225.59 g/h,不同规模中仍为大型餐馆(189.78 g/h);以食用油用量计,烧烤排放因子最大(0.041 g/kg oil),南北方不同城市的餐饮源VOCs排放因子较为接近。综上所述,不同菜系及规模的餐饮源VOCs排放因子不同。

Zhang等^[48]对比分析了多种燃料和炉子的羰基化合物排放特征,指出烹饪用炉羰基化合物的排放因子随燃料种类和炉子类型的变化而变化。Schauer等^[39]研究则指出,食用油类型、烹饪方式均可影响油烟VOCs的排放因子。Fullana等^[46,47]进一步的研究结果

显示,油烟醛类的排放因子随油温和加热时间的变化而变化,且主要受温度的影响。Klein 等^[50]研究则表明,除了油温、食用油类型、烹饪方式外,烹饪食材的种类亦可影响油烟 VOCs 的排放因子。Chen 等^[51]中式烹饪油烟 VOCs 排放因子的研究表明,烹饪方式、食材重量、肉的类型、食用油类型、肉/蔬比例均是影响因素。结合表 2 分析可知,餐饮油烟 VOCs 排放因子受餐馆菜系、规模及常用的烹饪方式、食用油、燃料、食材等影响。

表 2 餐饮油烟 VOCs 排放因子
Table 2 Emission factors of VOCs emitted from commercial cooking fumes

参数	类型	排放因子	文献
菜系	食堂	0.01 g/person; 1.97 g/h stove; 15.76 g/h	[35]
	沪菜	2.54 g/person; 9.09 g/h stove; 111.04 g/h	
	绍兴菜	2.26 g/person; 12.52 g/h stove; 225.59 g/h	
	粤菜	1.96 g/person; 12.04 g/h stove; 78.41 g/h	
	西式快餐	0.32 g/person; 1.86 g/h stove; 11.15 g/h	
	川湘菜	0.17 g/person; 5.94 g/h stove; 17.80 g/h	[28]
	家常菜	0.038 g/kg oil	
	鲁菜	0.012 g/kg oil	
	湘菜	0.032 g/kg oil	
	烧烤	0.041 g/kg oil	
	川菜	21.4 g/d	[52]
规模	特大型	1.77 g/person; 8.57 g/h stove; 128.94 g/h	[35]
	大型	3.81 g/person; 13.56 g/h stove; 189.78 g/h	
	中型	1.97 g/person; 12.03 g/h stove; 78.41 g/h	
	小型	0.18 g/person; 5.94 g/h stove; 17.82 g/h	
城市	沈阳	5.03 g/kg oil	[5]
	成都	5.6 g/kg oil	[21]
省份	江苏省	8.7 t/10 ⁴ person	[14]

4.2 排放量

不同地区饮食习惯、经济发展水平及人口数量等影响餐饮油烟 VOCs 的排放量^[35]。张春洋等^[23]结合统计数据估算得到北京市餐饮 NMHCs 排放量约 10 559 t/a,正餐和快餐分别为 9 159 t/a 和 1 400 t/a。周子航等^[13]采用现场抽样调查及排放因子法计算出成都市餐饮源 VOCs 排放量为 1 485 t/a。李洁^[53]同样采用排放因子法分析了南京市餐饮油烟 VOCs 排放量为 2 765 t/a。王秀艳等^[5]以中型餐馆为代表,结合实际监测 VOCs 浓度及烟气排放速率计算得到沈阳市餐饮业 VOCs 排放量为 581.1 t/a。夏思佳等^[14]估算了江苏省各市餐饮源 VOCs 排放量,徐州市餐饮油烟 VOCs 排放量最高,达 7 100 t/a;镇江则最低,为 2 000 t/a。Wang 等^[35]分析了我国不同省份餐饮油烟 VOCs 排放量,指出山东省和广东省餐饮排放 VOCs 的量最高,分别为 5 680.53 t/a 和 6 122.43 t/a,全国餐饮排放 VOCs 的总量高达 66 244.59 t/a。

除各餐厅 VOCs 排放特征不同,餐厅营业时间、客流量等均可影响餐厅 VOCs 排放总量^[28]。Ho 等^[54]结合烟气流量、营业时间和餐馆数量估算了香港地区普通中式餐厅、港式快餐店、中式烧烤店、西式快餐店和非中式餐厅羰基化合物排放量,依次为 9 520、10 826、1 192、4 610 和 5 713 kg/a,其中甲醛、乙醛、丙烯醛和壬醛占羰基化合物排放总量的 72%,餐饮源丙烯醛年排放量甚至超过机动车尾气的年排放量。Wang 等^[35]对比分析了上海市多种餐馆 VOCs 排放量,结果显示 VOCs 年排放量:烧烤≈川湘菜>食堂>粤菜>苏浙菜>西式快餐。Cheng 等^[28]分析指出家常菜 VOCs 年排放量最高(12.2 kg/a),其次是湘菜(10.3 kg/a)和烧烤(7.2 kg/a),鲁菜最低(3.8 kg/a)。

4.3 不确定性分析

排放量估算的不确定性主要包括:(1)餐饮源活动水平的选取。大多研究中餐饮源的活动数据来自统计年鉴,统计年鉴中未包含小规模餐馆及未注册的流动摊位。而以上 2 种类型的餐饮源数量众多且大多未安装油烟处理设施,餐饮油烟直接排放进入环境空气中,污染更为严重。(2)监测方法的选取。已有研究中餐饮油烟 VOCs 采样点的选取主要为 3 种:一是烹饪灶台上方,高度接近人体呼吸区;二是油烟收集装置后,油烟净化装置前;三是油烟排放口。(3)排放因子的选取。现有研究估算餐饮源 VOCs 排放量时,多采用国内外文献或环保指南中的排放因子,而排放因子未进行本地化,导致排放量的估算存在较大的偏差。(4)估算方法的选取。文献调研中发现,许多研究以中型餐馆或仅以监测的一种或几种类型餐馆的 VOCs 排放情况为代表,估算城市餐饮源 VOCs 排放总量。而餐饮油烟 VOCs 的排放受多种因素的影响,不同餐馆 VOCs 排放特征存在较大差异,从而导致估算结果存在较大偏差。

5 总结与展望

餐饮油烟中包含多种 VOCs 物质,随着餐饮业的快速发展,餐饮油烟污染日益加剧。本文综述了餐饮源 VOCs 排放特征,结果表明,餐饮源已成为城市区域 VOCs 的重要来源之一,其羰基化合物的贡献不容忽视;餐饮源 VOCs 排放具有明显的时空分布特征;受食材、食用油、烹饪方式、燃料、调料、油烟净化设施、灶台及烟道设计等多种因素的影响,不同菜系餐饮油烟 VOCs 源谱存在差异;餐馆菜系、规模及常用的烹饪方式、食用油、燃料、食材等均可影响餐饮油烟 VOCs 排放因子;不同地区饮食习惯、经济发展水平及人口数量等影响城市餐饮油烟 VOCs 的排放总量;除各菜系

VOCs排放特征不同外,餐馆营业时间、客流量等均可影响餐馆VOCs排放总量。

目前国内外餐饮油烟VOCs排放特征的研究已经取得了大量成果,但相关工作仍需进一步完善:(1)餐饮油烟VOCs源谱未统一,大部分源谱缺乏卤代烃和OVOCs物质,规范餐饮油烟采样方法,构建餐饮油烟VOCs源谱数据库将为区域环境污染溯源研究提供帮助;(2)餐饮源VOCs排放量的估算存在偏差,加强中小规模及未注册餐馆油烟污染物的监测、获得本地化的排放因子、规范监测方法等,可提高餐饮源VOCs排放量估算的准确性;(3)影响餐饮源VOCs排放特征的因素多种多样,识别关键影响因素,有助于建立具有代表性的源谱;(4)餐饮源排放多种高危害、高活性的VOCs物质,加强餐饮源VOCs迁移转化的研究有助于理清其对人体及环境的危害。

在统一餐饮油烟VOCs源谱的基础上,建立餐饮油烟VOCs源谱数据库,评估餐饮油烟VOCs的迁移转化,对餐饮油烟排放标准的制定及控制措施的实施具有重要的指导意义,从而有效控制餐饮油烟污染,提高城市空气质量,使得居民健康生活环境得到保障。

[参考文献]

- [1] 褚艳玲,班远冲,田翠翠.深圳中心城区餐饮油烟污染及防治对策探讨[J].绿色科技,2015(9):223-225.
Chu Yanling, Ban Yuanchong, Tian Cuicui. Research of the pollution from cooking oil fume and its control measures in the central area of Shenzhen[J]. Journal of Green Science and Technology, 2015(9):223-225.
- [2] 梁衍魁.餐饮业烹调油烟气的组成与危害及净化方法探讨[J].能源与环境,2004(1):43-44.
Liang Yankui. Study on the composition, endanger and purification technology of cooking fumes from catering industry [J]. Energy and Environment, 2004(1):43-44.
- [3] Kumar A, Singh D, Kumar K, et al. Distribution of VOCs in urban and rural atmospheres of subtropical India: temporal variation, source attribution, ratios, OFP and risk assessment [J]. Science of the Total Environment, 2018(613/614):492-501.
- [4] Han D M, Wang Z, Cheng J P, et al. Volatile organic compounds (VOCs) during non-haze and haze days in Shanghai: characterization and secondary organic aerosol (SOA) formation[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017,24(22):18619-18629.
- [5] 王秀艳,史建武,白志鹏,等.沈阳市烹饪油烟中VOCs排放特征分析[J].中国人口,资源与环境,2011,21(3):364-366.
Wang Xiuyan, Shi Jianwu, Bai Zhipeng, et al. Measurement of VOCs emissions from cooking in Shenyang City[J]. China Pollution, Resource and Environment, 2011,21(3):364-366.
- [6] 廖雷,钱公望.烹调油烟的危害及其污染治理[J].桂林工学院学报,2003,23(4):463-468.
Liao Lei, Qian Gongwang. Cooking oil fumes pollution and solution[J]. Journal of Guilin Institute of Technology, 2003, 23(4):463-468.
- [7] Lai C H, Jaakkola J J K, Chuang C Y, et al. Exposure to cooking oil fumes and oxidative damages: a longitudinal study in Chinese military cooks[J]. Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology, 2013,23(1):94-100.
- [8] 吴禹,周向东.烹饪油烟颗粒物对大鼠肺损伤作用的研究[J].中国职业医学,2007,34(1):31-33.
Wu Yu, Zhou Xiangdong. Effect of particulates from heated cooking oil smoke on lung injury in rats[J]. China Occupational Medicine, 2007,34(1):31-33.
- [9] Singh A, Chandrasekharan Nair K, Kamal R, et al. Assessing hazardous risks of indoor airborne polycyclic aromatic hydrocarbons in the kitchen and its association with lung functions and urinary PAH metabolites in kitchen workers [J]. Clinica Chimica Acta, 2016(452):204-213.
- [10] Svecova V, Topinka J, Solansky I, et al. Personal exposure to volatile organic compounds in the Czech Republic[J]. Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology, 2012,22(5):455-460.
- [11] Juntarawijit C, Juntarawijit Y. Cooking smoke and respiratory symptoms of restaurant workers in Thailand[J]. BMC Pulmonary Medicine, 2017,17(1):41-51.
- [12] Loh C. Study on Profiles of Cooking Fumes in Hong Kong: Final Report[R]. Revised, 2006, 11.
- [13] 周子航,邓也,陆成伟,等.成都市人为源挥发性有机物排放清单及特征[J].中国环境监测,2017,33(3):39-48.
Zhou Zihang, Deng Ye, Lu Chengwei, et al. Emission inventory and characteristics of volatile organic compounds from anthropogenic sources in Chengdu[J]. Environmental Monitoring in China, 2017,33(3):39-48.
- [14] 夏思佳,赵秋月,李冰,等.江苏省人为源挥发性有机物排放清单[J].环境科学研究,2014,27(2):120-126.
Xia Sijia, Zhao Qiuyue, Li Bing, et al. Anthropogenic source VOCs emission inventory of Jiangsu Province[J]. Research of Environmental Science, 2014,27(2):120-126.
- [15] Kanjanasiranont N, Prueksasit T, Morknong D, et al. Determination of ambient air concentrations and personal exposure risk levels of outdoor workers to carbonyl compounds and BTEX in the inner city of Bangkok, Thailand[J]. Atmospheric Pollution Research, 2016,7(2):268-277.
- [16] Wang H K, Huang C H, Chen K S, et al. Measurement and source characteristics of carbonyl compounds in the atmosphere in Kaohsiung City, Taiwan[J]. Journal of Hazardous

- Materials, 2010,179(1/2/3):1115-1121.
- [17] 冯艳丽,黄娟,文晟,等. 餐馆排放油烟气中羰基化合物浓度及分布特征[J]. 环境科学与技术, 2008,31(2):66-68, 76.
Feng Yanli, Huang Juan, Wen Sheng, et al. Concentration and pattern of carbonyl compounds from oil smoke in restaurant[J]. Environmental Science & Technology, 2008,31(2):66-68, 76.
- [18] Feng Y L, Wen S, Chen Y J, et al. Ambient levels of carbonyl compounds and their sources in Guangzhou, China[J]. Atmospheric Environment, 2005,39(10):1789-1800.
- [19] Schauer J J, Kleeman M J, Cass G R, et al. Measurement of emissions from air pollution sources-I. C₁ through C₂₉ organic compounds from meat charbroiling[J]. Environmental Science and Technology, 1999,33(10):1566-1577.
- [20] 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.
Lin Li, He Xiaochu, Wu Jianping, et al. Research of Shanghai cooking fume pollution[J]. Environmental Science & Technology, 2014,37(S2):546-549.
- [21] 尹元畅,蒋燕,王波,等. 成都餐饮源PM_{2.5}及VOCs排放因子的探索[J]. 环境监测管理与技术, 2015,27(5):63-67.
Yin Yuanchang, Jiang Yan, Wang Bo, et al. The study on fine particles and VOCs emission factor of cooking activities in Chengdu[J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2015,27(5):63-67.
- [22] 王敏,印红玲,李乾钱,等. 川菜烹调源VOCs排放浓度及特征分析[J]. 环境化学, 2013,32(9):1809-1810.
Wang Min, Yin Hongling, Li Qianqian, et al. Concentrations and characteristics of VOCs from Sichuan cuisine[J]. Environmental Chemistry, 2013,32(9):1809-1810.
- [23] 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 Chunyang, Ma Yongliang. Characterization of non-methane hydrocarbons emitted from Chinese cooking[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011,31(8):1768-1775.
- [24] To W M, Yeung L L. Effect of fuels on cooking fume emissions[J]. Indoor and Built Environment, 2011,20(5):555-563.
- [25] To W M, Lau Y K, Yeung L L. Emission of carcinogenic components from commercial citchens in Hong Kong[J]. Indoor and Built Environment, 2007,16(1):29-38.
- [26] 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 Tong, Cheng Jingchen, He Wanqing, et al. Emission characteristics of VOCs from typical restaurants in Beijing [J]. Environmental Science, 2015,36(5):1523-1529.
- [27] Zhao Y J, Li A G, Gao R, et al. Measurement of temperature, relative humidity and concentrations of CO, CO₂ and TVOC during cooking typical Chinese dishes[J]. Energy and Buildings, 2014(69):544-561.
- [28] 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.
- [29] 徐敏,何万清,聂磊,等. 传统北京烤鸭烤制过程中大气污染物的排放特征[J]. 环境科学, 2017,38(8):3139-3145.
Xu Min, He Wanqing, Nie Lei, et al. Atmospheric pollutants emission characteristics from the cooking process of traditional Beijing roast duck[J]. Environmental Science, 2017,38(8):3139-3145.
- [30] 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(1/2/3):181-193.
- [31] Alves C A, Evtyugina M, Cerqueira M, et al. Volatile organic compounds emitted by the stacks of restaurants[J]. Air Quality, Atmosphere & Health, 2015,8(4):401-412.
- [32] Mugica V, Vega E, Chow J, et al. Speciated non-methane organic compounds emissions from food cooking in Mexico [J]. Atmospheric Environment, 2001,35(10):1729-1734.
- [33] 刘中文,孙咏梅,裘著革. 烹调油烟雾中有机成分的分析[J]. 中国公共卫生, 2002,18(9):26-28.
Liu Zhongwen, Sun Yongmei, Xi Zhuge. Analysis on organic compounds of cooking oil fume[J]. China Public Health, 2002,18(9):26-28.
- [34] Silveirajr A, Masuda Y, Chang S S. Chemical reactions involved in the catalytic hydrogenation of oils- II. identification of some volatile by-products[J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 1965,42(2):85-86.
- [35] 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, 2017.
- [36] Kabir E, Kim K H, Ahn J W, et al. Barbecue charcoal combustion as a potential source of aromatic volatile organic compounds and carbonyls[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010,174(1/2/3):492-499.
- [37] 何万清,聂磊,田刚,等. 基于GC-MS的烹调油烟VOCs的组分研究[J]. 环境科学, 2013,34(12):4605-4611.
He Wanqing, Nie Lei, Tian Gang, et al. Study on the chemical compositions of VOCs emitted by cooking oils based on GC-MS[J]. Environmental Science, 2013,34(12):4605-4611.
- [38] Loh M M, Houseman E A, Gray G M, et al. Measured concentrations of VOCs in several non-residential microenvironments in the United States[J]. Environmental Science and Technology, 2006,40(22):6903-6911.
- [39] 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 and Technology, 2002,36(4):567-575.
- [40] Gressey P, Nokes C, Lake R. Chlorinated Compounds

- Formed During Chlorine Wash of Chicken Meat[R]. Christchurch, New Zealand: Institute of Environmental Science & Research Limited, 2008.
- [41] Rogge W F, Hildemann L M, Mazurek M A, et al. Sources of fine organic aerosol-1. charbroilers and meat cooking operations[J]. *Environmental Science and Technology*, 1991,25(6):1112-1125.
- [42] Stockwell C E, Christian T J, Goetz J D, et al. Nepal Ambient Monitoring and Source Testing Experiment (NA-MaSTE): emissions of trace gases and light-absorbing carbon from wood and dung cooking fires, garbage and crop residue burning, brick kilns, and other sources[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016,16(17):11043-11081.
- [43] Xiang Z Y, Wang H L, Stevanovic S, et al. Assessing impacts of factors on carbonyl compounds emissions produced from several typical Chinese cooking[J]. *Building and Environment*, 2017(125):348-355.
- [44] 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*, 2015,36(8):2743-2749.
Cheng Jingchen, Cui Tong, He Wanqing, et al. Pollution characteristics of aldehydes and ketones compounds in the exhaust of Beijing typical restaurants[J]. *Environmental Science*, 2015,36(8):2743-2749.
- [45] 史纯珍,姜锡,姚志良,等. 烹饪油烟羰基化合物排放特征[J]. *环境工程学报*, 2015,9(3):1376-1380.
Shi Chunzhen, Jiang Xi, Yao Zhiliang, et al. Carbonyl compounds emission characteristics in cooking fumes[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2015, 9(3): 2743-2749.
- [46] Fullana A, Carbonell Barrachina A A, Sidhu S. Comparison of volatile aldehydes present in the cooking fumes of extra virgin olive, olive, and canola oils[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2004,52(16):5207-5214.
- [47] Fullana A, Carbonell Barrachina Á A, Sidhu S. Volatile aldehyde emissions from heated cooking oils[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2004,84(15):2015-2021.
- [48] Zhang J F, Smith K R. Emissions of carbonyl compounds from various cookstoves in China[J]. *Environmental Science and Technology*, 1999,33(14):2311-2320.
- [49] 陈振贺,方小丹,何万清,等. 超高效液相色谱法测定餐饮油烟中的十五种醛酮[J]. *分析试验室*, 2014,33(10):1211-1215.
Chen Zhenhe, Fang Xiaodan, He Wanqing, et al. Separation and analysis of fifteen carbonyl compounds from oil smoke in restaurant with a UPLC method[J]. *Chinese Journal of Analysis Laboratory*, 2014,33(10):1211-1215.
- [50] Klein F, Platt S M, Farren N J, et al. Characterization of as-phase organics using proton transfer reaction time-of-flight mass spectrometry: cooking emissions[J]. *Environmental Science and Technology*, 2016,50(3):1243-1250.
- [51] Chen C, Zhao Y J, Zhao B. Emission rates of multiple air pollutants generated from Chinese residential cooking[J]. *Environmental Science and Technology*, 2018.
- [52] 蒋燕,尹元畅,王波,等. 成都市川菜烹饪油烟中VOCs排放特征及其对大气环境的影响[J]. *环境化学*, 2014,33(11): 2005-2006.
Jiang Yan, Yin Yuanchang, Wang Bo. Characteristics and effects on atmospheric environment of VOCs from Sichuan cuisine in Chengdu City[J]. *Environmental Chemistry*, 2014, 33(11):2005-2006.
- [53] 李洁. 南京市餐饮油烟源大气污染物排放清单构建的研究[J]. *安徽农学通报*, 2017,23(4):55-56.
Li Jie. Study on the amounts of cooking oil fumes in Nanjing City[J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2017,23(4):55-56.
- [54] Ho S S H, Yu J Z, Chu K W, et al. Carbonyl emissions from commercial cooking sources in Hong Kong[J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2006, 56(8): 1091-1098.