

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.8
第41卷 第8期

目次

首都重大活动与空气重污染应急减排措施效果对比分析	钟焱盛, 周颖, 程水源, 王晓琦, 邵玄逸 (3449)
基于天津市在线数据评估 ISORROPIA-II 模式结果及气溶胶 pH 的影响因素	高洁, 史旭荣, 卫昱婷, 宋少洁, 史国良, 冯银厂 (3458)
餐饮源有机颗粒物排放特征	李源遽, 吴爱华, 童梦雪, 栾胜基, 李鹭, 胡敏 (3467)
华中地区黄冈市一次重度污染期间 PM _{2.5} 中 12 种微量元素特征及来源解析	陈展乐, 田倩, 毛瑶, 刘威杰, 石明明, 程钺, 胡天鹏, 邢新丽, 祁士华, 胡金旭 (3475)
艾比湖地区气溶胶光学特性分析	张喆, 丁建丽, 王瑾杰 (3484)
天津市冬季重污染二次有机化学污染特征及 VOCs 对 SOA 生成潜势	徐虹, 唐邈, 肖致美, 高璟赞, 杨宁, 李立伟, 郑乃源, 陈魁, 邓小文 (3492)
郑州市某城区冬季不同污染水平大气 VOCs 特征及源解析	李一丹, 尹沙沙, 张瑞芹, 于世杰, 杨健, 张栋 (3500)
长江三角洲 2010 ~ 2018 年生物质燃烧中等挥发性有机物 (IVOCs) 排放清单	朱永慧, 王倩, 黄凌, 殷司佳, 李莉, 王杨君 (3511)
北方常见绿化树种 BVOCs 排放特征及其与光合作用参数的相关性	许燕, 李双江, 袁相洋, 冯兆忠 (3518)
广州地区秋季不同站点类型地面臭氧变化特征与影响因子	高平, 庄立跃, 王龙, 陈瑜萍, 闫慧, 沈劲, 范丽雅, 叶代启 (3527)
泰安市大气臭氧污染特征及敏感性分析	李凯, 刘敏, 梅如波 (3539)
有色冶炼园区道路扬尘中重金属污染特征及健康风险评价	冯于耀, 史建武, 钟曜谦, 韩新宇, 封银川, 任亮 (3547)
西安市高校校园地表灰尘重金属污染来源解析	樊馨瑶, 卢新卫, 刘慧敏, 秦青 (3556)
超低排放高湿度气总颗粒物监测方法及燃气电厂实际测试	胡月琪, 颜旭, 孔川, 张虎, 郭晓东 (3563)
厦门市船舶控制区大气污染物排放清单与污染特征	王坚, 黄压, 刘艳英, 陈森阳, 吴艳聪, 何月云, 杨心怡 (3572)
基于交通流的成都市高分辨率机动车排放清单建立	潘玉瑾, 李媛, 陈军辉, 石嘉诚, 田红, 张季, 周敬, 陈霞, 刘政, 钱骏 (3581)
基于无人机多光谱影像和 OPT-MPP 算法的水质参数反演	黄昕晰, 应晗婷, 夏凯, 冯海林, 杨垠晖, 杜晓晨 (3591)
不同水体分层对沉积物间隙水氮素垂向分布影响: 以三峡水库和小湾水库为例	刘静思, 朱晓声, 胡子龙, 张思思, 杨正健, 纪道斌, 刘德富 (3601)
城市河道表层水及沉积物中微塑料的污染现状与污染行为	赵昕, 陈浩, 贾其隆, 沈忱思, 朱奔, 李磊, 聂云汉, 叶建锋 (3612)
上海河道浮游植物群落结构时空变化特征及影响因素分析	许志, 陈小华, 沈根祥, 朱英, 钱晓雍, 张心良, 张卫, 胡双庆, 白玉杰 (3621)
过氧化钙 (CaO ₂) 联合生物炭对河道底泥的修复	李雨平, 姜莹莹, 刘宝明, 阮文权, 缪恒锋 (3629)
基于双同位素 ($\delta^{15}\text{N}$ -NO ₃ ⁻ , $\delta^{18}\text{O}$ -NO ₃ ⁻) 和 IsoSource 模型的岩溶槽谷区地下水硝酸盐来源的定量示踪	徐璐, 蒋勇军, 段世辉, 何瑞亮 (3637)
三峡库区规模化顺坡沟壑果园氮、磷输出过程及流失负荷	严坤, 王玉宽, 刘勤, 徐佩, 闫洋洋 (3646)
高度城镇化地区城市小区降雨径流污染特征及负荷估算	高斌, 许有鹏, 陆苗, 林芷欣, 徐兴 (3657)
Fe@GOCS 的制备及其对水中 As(III) 的吸附	赵超然, 单慧媚, 曾春芽, 张进贤, 彭三曦 (3665)
微塑料对水中铜离子和四环素的吸附行为	薛向东, 王星源, 梅雨晨, 庄海峰, 宋亚丽, 方程冉 (3675)
多孔填料特性对生物膜形成影响	江宇勤, 厉炯慧, 方治国 (3684)
硝化生物膜系统对低温的适应特性: MBBR 和 IFAS	李韧, 于莉芳, 张兴秀, 戴子承, 滑思思, 彭党聪 (3691)
单质硫自养短程反硝化耦合厌氧氨氧化强化脱氮	方文烨, 李祥, 黄勇, 郭超然, 胡羽婷, 陶仁杰 (3699)
间歇梯度曝气的生活污水好氧颗粒污泥脱氮除磷	张玉君, 李冬, 李帅, 张杰 (3707)
基于不同废污泥源的短程反硝化快速启动及稳定性	张星星, 王超超, 王焱, 徐乐中, 吴鹏 (3715)
基于 AHP-PROMETHEE II 法的鸟粪石磷回收污泥预处理方案决策	刘晓蕾, 李安婕 (3725)
零价铁对厌氧消化过程中氨氮抑制解除的影响	刘吉宝, 牛雨彤, 郁达伟, 谭颖峰, 左壮, 魏源送 (3731)
基于厌氧膜生物反应器的剩余污泥-餐厨垃圾厌氧共消化性能	戴金金, 牛承鑫, 潘阳, 陆雪琴, 甄广印, 郑朝辉, 张瑞良, 何欣昱 (3740)
亚剂量抗生素诱导抗性基因水平迁移	袁其懿, CHEN Hong-jie, Laurence Haller, 何义亮 (3748)
四环素胁迫对 <i>Shigella flexneri</i> 细菌四环素抗性基因抗性表达的影响过程	高品, 阮晓慧, 邱文婕, 薛罡, 钱雅洁 (3758)
羟胺对氨氧化菌和亚硝酸盐氧化菌的竞争性选择	乔昕, 王博, 郭媛媛, 彭永臻 (3765)
高温冲击对亚硝酸盐氧化过程中微生物菌群结构影响	侯晓薇, 牛永健, 李维维, 王光杰, 孙洪伟 (3773)
微生物种间相互作用产生锰氧化的普适性及其潜在应用	宁雪, 梁金松, 柏耀辉, 廖恺玲俐, 刘会娟, 曲久辉 (3781)
三亚河红树林表层沉积物中好氧氨氧化微生物的分布特征及潜在硝化速率	罗晴, 甄毓, 彭宗波, 贺惠 (3787)
臭氧污染对水稻生长、产量及矿质金属元素含量的影响	方笑堃, 罗小三, 张丹, 吴礼春, 邱丹, 陈志炜, 赵朕 (3797)
改变碳输入对新疆天山雪岭云杉林土壤呼吸的短期影响	邵康, 贡璐, 何学敏, 陈文静, 张雪妮, 朱海强 (3804)
有机无机肥配施对不同程度盐渍土 N ₂ O 排放的影响	周慧, 史海滨, 郭珈玮, 张文聪, 王维刚 (3811)
原位电阻热脱附土壤升温机制及影响因素	葛松, 孟宪荣, 许伟, 施维林 (3822)
羽序灯心草作为酸性矿山废弃地先锋植物潜力	黄建洪, 伏江丽, 严鑫睿, 尹凤, 田森林, 宁平, 李英杰 (3829)
滴灌方式和生物质炭对温室土壤矿质态氮及其微生物调控的影响	蔡九茂, 刘杰云, 邱虎森, 吕谋超, 周新国 (3836)
棉秆炭调控对碱性镉污染水稻根际土壤真菌群落结构和功能的影响	刘师豆, 韩耀光, 朱新萍, 吴相南 (3846)
不同水分管理模式联合叶面喷施硅肥对水稻 Cd 累积的影响	魏宾斌, 周航, 刘佳炜, 张竞颐, 黄芳, 霍洋, 胡雨丹, 辜娇峰, 刘俊, 廖柏寒 (3855)
螯合剂 GLDA 对象草修复镉污染农田的影响	覃建军, 唐盛爽, 蒋凯, 黄敬, 侯红波, 龙坚, 彭佩钦 (3862)
种植业面源污染防控技术发展历程分析及趋势预测	俞映惊, 杨林章, 李红娜, 朱昌雄, 杨祺, 薛利红 (3870)
《环境科学》征订启事 (3636) 《环境科学》征稿简则 (3764) 信息 (3538, 3628, 3724)	

餐饮源有机颗粒物排放特征

李源遽^{1,2}, 吴爱华^{1*}, 童梦雪¹, 栾胜基¹, 李鹭¹, 胡敏²

(1. 北京大学深圳研究院, 深圳 518057; 2. 北京大学环境科学与工程学院, 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100871)

摘要: 餐饮油烟是大气有机颗粒物的重要来源之一. 本研究在深圳市内选择了西餐、茶餐厅、职工食堂和韩式料理这4种类型的餐馆, 通过对这4类餐厅的外场采样, 分析各类型餐厅油烟中有机颗粒物的化学组成, 筛选了餐饮油烟污染源的有机特征组分. 结果表明, 各餐馆排放的PM_{2.5}中, 有机物占60%以上. 在所有定量的有机组分之中, 脂肪酸含量最高, 其次是二元羧酸和正构烷烃, 而多环芳烃、甾醇和单糖等有机组分的含量较低. 颗粒物的有机组成特征受到菜系的影响, 西餐厅和韩式料理排放脂肪酸、正构烷烃和多环芳烃等有机物含量较高, 但却排放了低含量的甾醇和单糖, 茶餐厅和职工食堂则相反. 餐饮源颗粒物中Fla/(Fla + Pyr)和LG/(Gal + Man)的比值受菜系影响较小, 也区别于其他污染源的比值, 可以作为餐饮源潜在的示踪物. 餐饮源为深圳市大气颗粒物贡献了大量的脂肪酸和二元羧酸.

关键词: 大气环境; 餐饮源; 颗粒物; 有机组分; 示踪物

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)08-3467-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.202001027

Emission Characteristics of Particulate Organic Matter from Cooking

LI Yuan-ju^{1,2}, WU Ai-hua^{1*}, TONG Meng-xue¹, LUAN Sheng-ji¹, LI Zhi¹, HU Min²

(1. Shenzhen Institute, Peking University, Shenzhen 518057, China; 2. State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, College of Environmental Sciences and Engineering, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Cooking is an important source of atmospheric particulate organic matter (POM). In this study, four Chinese restaurants in Shenzhen (west style, dim-sim restaurant, worker's canteen, and Korean cuisine) were sampled to examine the chemical composition of POM and research molecular tracers. The result showed that more than 60% of the PM_{2.5} mass was due to organic compounds. For the quantified organic compounds, the results indicated that fatty acids, dicarboxylic acids, and *n*-alkanes were the major organic compounds emitted from all cooking styles, PAHs, sterols, and monosaccharide anhydrides were found at relatively low levels. The composition of POM was strongly influenced by cooking style. The cooking styles of the west and Korean restaurant emitted the most abundant fatty acids, *n*-alkanes, and PAHs, but the least sterols and monosaccharide anhydrides, whereas the dim-sim restaurant and worker's canteen displayed the opposite results. The values of Fla/(Fla + Pyr) and LG/(Gal + Man) provided candidate tracers for cooking because they were less influenced by the cooking styles and were significantly different from other pollutant sources. Furthermore, cooking contributed significant amounts of fatty acids and dicarboxylic acids to atmospheric PM in Shenzhen.

Key words: atmospheric environment; cooking; PM; organic compounds; tracers

随着我国经济的不断发展, 大气污染问题日益严重. 目前, 我国大气环境污染的特征主要表现为大气氧化性增强、二次污染严重和有机物污染突出, 有机物已成为大气颗粒物的主要组分之一^[1,2]. 餐饮源排放的颗粒物中有机组分占颗粒物总质量的50%以上, 是大气有机颗粒物的重要来源之一^[3~6]. 据报道, 北京市餐饮源排放的有机颗粒物对大气一次有机气溶胶(OA)的贡献已经超过20%^[7,8]. 因此, 明晰烹饪过程中有机颗粒物的排放特征是当前我国环境保护的重要工作.

国内外学者针对中西式餐饮油烟中有机颗粒物的化学组成和排放因子等开展了较广泛的研究. 国外针对西餐肉类烹饪定量分析了超过75种有机物, 包括正烷烃、脂肪酸、二元羧酸、醛酮类、呋喃、内酯和类固醇等. 在这些化合物中, 浓度最高的是十六烷酸, 十八烷酸和十八烯酸; 而肉类烹饪排放的胆甾醇的浓度与大气中胆甾醇的浓度是一致的. 因此, 综

合胆甾醇、十六烷酸、十八烷酸和十八烯酸等的排放特征, 可以作为西式餐饮(肉类烹饪)的特征指示物^[9~14]. 国内在有机颗粒物方面的研究开展于2000年之后, He等^[15]最早于2004年对深圳市的粤菜和湘菜的排放特征进行了研究, 随后Zhao等^[16]在此基础上进一步研究了广州市粤菜、川菜、湘菜和东北菜油烟中有机颗粒物的组成特征. 他们的研究发现中式餐饮比西餐排放了更多的多环芳烃. 此外, 十四烷酸、十六烷酸、十八烷酸、正壬醛、内酯和左旋葡聚糖都是潜在的中式餐饮有机示踪物. 近年来, 国内学者又通过模拟实验对油烟颗粒物中的有机组分进行了分析^[17~19], 其中王红丽等^[19]的研究发现实验过

收稿日期: 2020-01-03; 修订日期: 2020-02-27

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0211501); 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室开放课题项目(19K02ESPCP)

作者简介: 李源遽(1990~), 男, 博士后, 主要研究方向为大气污染控制, E-mail: liyuanju1990@outlook.com

* 通信作者, E-mail: IERESPC@163.com

程中产生的有机颗粒物中质量分数最高的是正构烷烃和甾醇类有机物,该结果与 He 等^[15]和 Zhao 等^[16]的结果之间存在较大的差距。

中式餐饮烹饪方式复杂、菜系众多,国内针对不同菜系的研究还不够全面,这是造成外场采样与模拟实验结果有差异的原因;而除了中餐之外,国内西餐的规模也越来越大,国内还缺少针对西餐的深入研究。因此,本文选择了包括西餐、广式茶餐厅、职工食堂和韩式料理作为研究对象,通过对深圳市的上述4类餐厅的外场采样,深入探讨各类型餐厅油烟中有机颗粒物的化学组成,并筛选餐饮油烟污染源的有机特征组分。

1 材料与方法

1.1 样品采集

本研究在深圳市内选择了西餐、茶餐厅、职工食

堂和韩式料理这4种类型的餐馆,各类型餐厅的具体信息见表1。每家餐厅采样2 d,每天两次,采样时间是11:00~13:00和17:00~19:00的用餐高峰期。采样期间,使用一台中流量采样泵(Model2030,崂应,中国)在烟道-专用采样口进行采集。采样口位于烟道垂直管段,避开了烟道弯头和阀门等部件。采样器配有4个采样通道,采样速率为 $100\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$,两个采样通道的滤膜是直径为47 mm的石英滤膜(Whatman plc, Middlesex, 英国),用于分析颗粒物有机组分,两个通道的滤膜是Teflon膜(Gelman Sciences, 47 mm),用于测定 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度。采样的同时,利用小流量的HoneyComb(R&P Corp, 美国, $10\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$)颗粒物采样器同步采样,用以校对颗粒物的质量浓度。采样前,采样膜用铝箔包好放在马弗炉里,在 600°C 下加热4 h,然后在恒温恒湿箱中静置24 h后取出待用。

表1 餐厅信息

Table 1 Basic information for each restaurant

餐馆类型	菜系特点	灶台数	食用油	实测风量/ $\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$	油烟净化装置
西餐厅	煎炸为主,肉类烹饪较多,蔬菜烹饪较少	4	橄榄油	21 328	静电式
韩式料理	以韩式烧烤为主,口味较重,多用辣椒酱等辛辣调味料	5	花生油	19 078	静电式
茶餐厅	蒸煮为主,少量油炸,口味清淡	4	调和油	11 326	静电式
职工食堂	菜品烹饪量大但烹饪方式简单	5	调和油	33 451	静电式

1.2 样品分析

样品采集后,首先剪取滤膜的四分之一用于分析样品的有机碳和元素碳含量,样品($1.45\text{ cm}\times 1\text{ cm}$)利用热光碳分析仪(Sun-set Laboratory Inc. 美国)测定,仪器EC和OC的检测限为 $0.2\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。将剩余采样膜均匀剪碎后放入处理过的提取瓶中,首先加入氘代物内标(氘代二十四烷烃、苯甲酸-D和氘代蒽),然后加入甲醇和二氯甲烷(体积比1:3)的混合提取液,在超声波仪(KQ3200B, 昆山超声仪器有限公司)中提取,每个样品提取3次。提取完毕后将提取液过滤并倒入蒸馏瓶中,利用旋转蒸发仪(N-1000, 东京理化器械株式会社, 日本)浓缩。蒸发水浴的温度为 37°C ,压力 $0.02\sim 0.08\text{ MPa}$ 。蒸发浓缩至3 mL后,将样品转移到K-D浓缩管中,用高纯氮气重复吹扫定容至1 mL。然后将样品分为4份,其中2份在冰箱中保存备份,剩余2份,1份直接进样,用于分析非极性物质;另1份则利用硅烷化试剂N,O-双-(甲基硅烷基)-三氟乙酰胺(BSTFA)和三甲基氯硅烷(TMCS)的混合溶液(99:1)(Supelco, 美国)在 70°C 的条件下衍生2 h后分析极性物质。两份样品在进行分析之前都会加入同标样中相同浓度的内标物(六甲苯)。

分析所用的仪器是美国安捷伦公司的

6890plus/5973N型气相色谱和质谱联用仪。色谱柱为DB-5MS(J&W, $60\text{ m}\times 0.25\text{ mm}\times 0.25\text{ }\mu\text{m}$)。GC-MS的主要条件是:进样口温度 300°C ;不分流进样;恒流模式,流速 $1.0\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$;升温程序是起始温度 60°C ,保持10 min,以 $6^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 升温到 300°C ,保持40 min;扫描模式为全扫描。有机组分的定性定量利用内标-工作曲线法进行确定,主要分析检测了正构烷烃、脂肪酸、多环芳烃、二元羧酸、甾醇和单糖等物质。

2 结果与分析

2.1 颗粒物浓度

本研究中,职工食堂的颗粒物浓度最高为 $(2.636\pm 0.371)\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$,其次是韩式料理 $[(2.344\pm 0.313)\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}]$ 和西餐 $[(2.238\pm 0.263)\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}]$,茶餐厅最低为 $(1.862\pm 0.181)\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。与前人的研究结果一样^[20,21],4种类型的餐厅排放的颗粒物均以有机碳(OC)为主,有机碳占 $\text{PM}_{2.5}$ 质量的60%以上,其中职工食堂的有机碳质量占比最高,达到68.9%,剩余3个餐厅的质量占比则较接近,为63.2%~65.3%。元素碳(EC)的质量占比较低,OC与EC的比值为10.6~20.2。在所有定性的有机组分之中(见表2),各餐厅排放的脂肪酸质量

占比最高,其次是二元羧酸和正构烷烃,而多环芳烃、甾醇和单糖等有机组分的质量分数较低.各餐厅排放颗粒物的有机组成特征与 Zhao 等^[16]的结果类似,但与王红丽等^[19]模拟实验的结果差异较大,推测原因可能是其模拟实验的烹饪方式、油和食材的比例与餐厅不同造成的.

表 2 不同菜系排放有机颗粒物化学组成特征/%

Table 2 Composition characteristics of POM emitted

from different cooking styles/%

菜系	西餐	韩式料理	食堂	茶餐厅
正构烷烃	0.25	0.20	0.16	0.17
多环芳烃	0.02	0.02	0.02	0.02
脂肪酸	16.07	14.19	11.26	15.00
二元羧酸	0.54	0.44	0.29	0.47
甾醇	0.04	0.22	0.27	0.22
单糖	0.00	0.01	0.02	0.02

2.2 正构烷烃

图 1 表示了各类型餐厅排放 PM_{2.5} 中正构烷烃 (C14 ~ C33) 的含量分布.各餐厅排放的正构烷烃的总含量均较低,仅占 PM_{2.5} 质量的 0.2% 左右.4 类餐厅中,正构烷烃含量最高的是西餐厅,为 (2 461 ± 215) μg·g⁻¹,其次是韩式料理 [(2 012 ± 239) μg·g⁻¹] 和职工食堂 [(1 578 ± 146) μg·g⁻¹],茶餐厅最低,为 (1 529 ± 144) μg·g⁻¹.韩式料理、食堂和茶餐厅排放的正构烷烃在 C23 ~ C33 之间有明显的奇碳优势,而西餐厅则不明显.食堂和茶餐厅的 C29 含量最高,这与前人针对粤菜、川菜、湘菜等菜系的研究结果一致.高含量的 C29 或者 C31 说明烹饪过程中加入了大量的蔬菜,因为高等维管植物用于合成植物蜡的正烷烃中 C29、C31 的含量最高^[22~25].西餐厅和韩式料理的 C_{max} 均位于 C25,这与针对烤

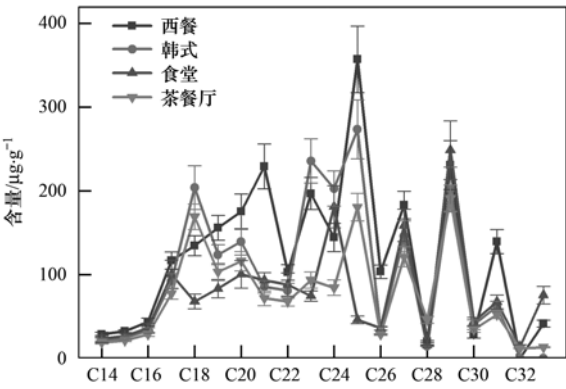


图 1 不同菜系排放正构烷烃含量特征
Fig. 1 Content of *n*-alkanes emitted from different cooking styles

肉的研究结果类似^[10,24,25].

2.3 多环芳烃

图 2 表示各类型餐厅排放 PM_{2.5} 中多环芳烃 (PAHs) 的含量.各餐馆排放的 PM_{2.5} 中 PAHs 的总含量极低,只占 PM_{2.5} 质量的极小部分 (0.02%).在 4 类餐馆之中,PAHs 的含量顺序为:西餐厅 [(240.6 ± 31.2) μg·g⁻¹] > 韩式料理 [(212.1 ± 17.8) μg·g⁻¹] > 茶餐厅 [(209.1 ± 26.3) μg·g⁻¹] > 职工食堂 [(176.8 ± 15.2) μg·g⁻¹].虽然职工食堂的烹饪量较大,排放的 PM_{2.5} 质量浓度最高,但是 PAHs 的含量明显低于西餐厅和韩式料理,主要原因是职工食堂在烹饪过程中加入了一定量的水,从而降低了烹饪温度,而烹饪温度较低会降低多环芳烃的含量.但是,较低的烹饪温度会使得小分子多环芳烃的含量增加^[26],因此职工食堂中排放的 PAHs 中,含量最高的是蒽和菲.

西餐厅烹饪了大量的煎炸食物,所以排放的 PAHs 含量最高,其中含量最高的是䈔,此结果与国外西餐肉类烹饪的结果一致^[10~14,24].韩式料理餐厅

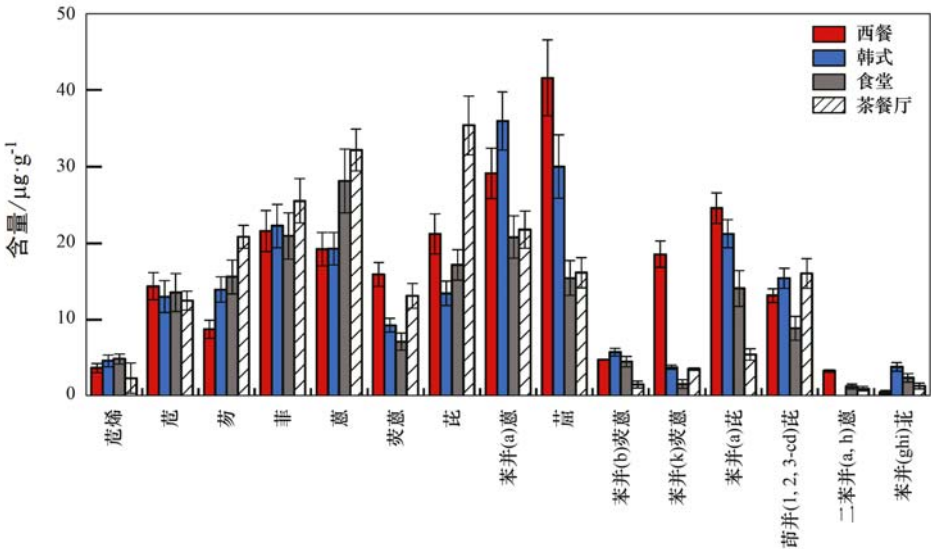


图 2 不同菜系排放多环芳烃含量特征
Fig. 2 Content of PAHs emitted from different cooking styles

中也制作了大量的韩式烤肉,所以 PAHs 的含量处于较高水平,且也排放了高含量的蒽。不过韩式料理排放的颗粒态 PAHs 中,含量最高的是苯并(a)蒽,这是与其他菜系餐馆最大的差别。茶餐厅中主要的烹饪方式是蒸和煮,所以 PAHs 的含量较低,但是在茶餐厅中,还存在一定量油炸食物,所以 PAHs 的含量高于职工食堂。此外,茶餐厅排放的 PAHs 中,芘的含量最高,这与前人针对其他中餐的研究结果接近^[15,16]。并且,由于茶餐厅的烹饪温度也较低,其排放的 PAHs 也以分子量较小的为主。

此外,在本研究中,西餐厅使用的是橄榄油,韩式料理使用的是花生油,茶餐厅和职工食堂使用的则是玉米调和油。前人的研究表明橄榄油和花生油

排放的 PAHs 浓度要明显高于玉米油^[26~28],这也可能是西餐厅和韩式料理排放 PAHs 含量高于食堂和茶餐厅的重要原因。

2.4 脂肪酸

图3表示了不同餐馆排放脂肪酸(F6~F24)的含量分布。总体来说,各餐厅排放 PM_{2.5} 中脂肪酸含量最高。在所有餐厅排放的 PM_{2.5} 中,不饱和脂肪酸的总含量高于饱和脂肪酸,且十六烷酸(F16)、十八烷酸(F18)、油酸(F18:1)和亚油酸(F18:2)是含量最高的脂肪酸,4类脂肪酸的总量约占定量脂肪酸的60%以上。此外,4个餐厅排放的饱和脂肪酸都显示了非常强烈偶碳优势,这说明有大量天然油脂在烹饪过程中发生了水解^[10,23]。

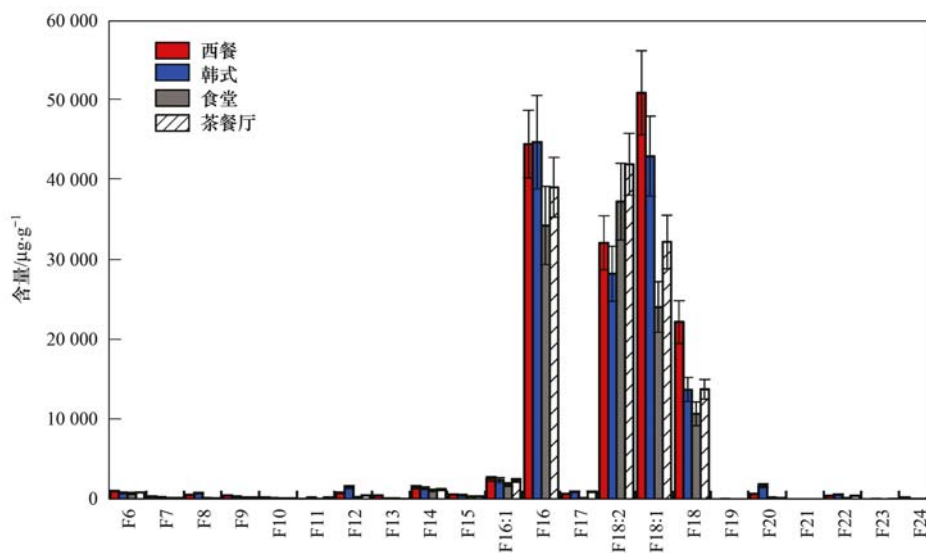


图3 不同菜系排放脂肪酸的含量特征

Fig. 3 Content of fatty acids emitted from different cooking styles

在本研究中,西餐排放了含量最高的脂肪酸 $[(160\,689 \pm 20\,581) \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}]$,脂肪酸总量占西餐厅排放 PM_{2.5} 质量的 16.1%,百分比远高于其他餐厅,说明西餐中脂肪酸对颗粒物的贡献更大,主要的原因是西餐的蔬菜用量比其他菜系特别是中餐低得多。4类含量最高的脂肪酸中, F16 > F18:1 > F18:2 > F18,而国外针对西餐的结果显示煎牛排排放的脂肪酸中 F16 > F18:1 > F18:2 > F18^[10~14],这与本研究中的西餐厅的结果一致。韩式料理排放的脂肪酸总含量仅低于西餐厅,为 $(141\,942 \pm 18\,531) \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$,但是对颗粒物质量的贡献却低于西餐厅,为 14.2%。4类脂肪酸的分布表现为: F16 > F18:1 > F18:2 > F18,与西餐厅的排放特征类似,不过韩式料理颗粒物中 F16 的含量却略高于西餐厅。职工食堂排放的脂肪酸,无论是含量 $[(112\,624 \pm 13\,274) \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}]$ 还是对 PM_{2.5} 的贡献(11.3%)都远低于其他3个餐厅,一方面是由于职工食堂烹饪的方式通

常以煮和炒为主,另一方面则是因为职工食堂通常所使用的食材中脂肪含量较低。4类脂肪酸含量大小顺序为: F18:2 > F16 > F18:1 > F18,与西餐和韩式料理的分布不一样。4个类型的餐厅中,茶餐厅样品中脂肪酸的含量略低于韩式料理,为 $(135\,428 \pm 10\,693) \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$,但是其占 PM_{2.5} 的质量分数却高于职工食堂和韩式料理,为 14.9%。茶餐厅排放脂肪酸含量较低的原因与职工食堂类似,而占比高于职工食堂的原因则是由于茶餐厅中烹饪了一定量的油炸食物。4类含量最高的脂肪酸的分布与职工食堂一样,与 He 等^[15]针对深圳市的粤菜和湘菜的研究结果一致,都是亚油酸的含量最高。

2.5 二元羧酸

图4表示了不同菜系餐厅排放 PM_{2.5} 中二元羧酸的含量,二元羧酸的排放量要远小于脂肪酸,但要高于其他有机物,二元羧酸对 PM_{2.5} 质量的贡献为 0.03%~0.05%。各餐厅二元羧酸的分布并没有明

显的差异. 总体来看, 西餐厅排放的二元羧酸含量明显高于其余 3 家餐厅, 二元羧酸含量大小顺序为: 西餐厅 > 韩式料理 > 茶餐厅 > 职工食堂. 在所有二元羧酸之中, 壬二酸 (C9) 的含量最高, 并且远高于其他二元酸, 同样的结果在前人的研究中也发现^[15,16]. 造成这种现象的原因主要是 C18 不饱和脂肪酸的分解^[10,23]. 实际上烹饪产生的大量 C18 不饱和脂肪酸 (如油酸) 不仅会分解生成壬二酸, 其他 C9 的有机酸甚至醛酮等都有可能生成. 因此, 在本研究中, 除 C9 的二元羧酸外, C9 的饱和脂肪酸含量也远高于其他奇碳数脂肪酸. 这种裂解现象会受到烹饪温度的影响, 温度越高, 脂肪酸的裂解程度越高^[23]. 所以在烹饪温度更高的西餐和韩式料理中, 不饱和脂肪酸 (F18:1 和 F18:2) 的含量低于饱和脂肪酸 (F16).

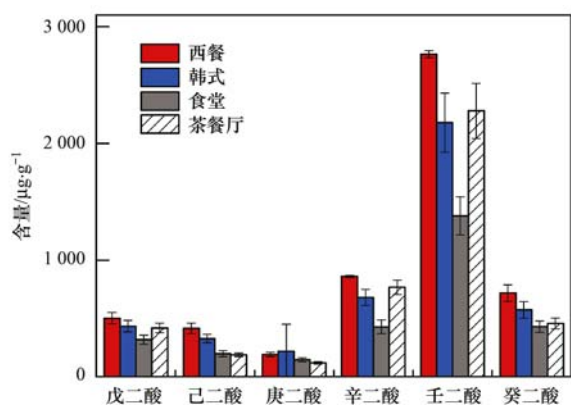


图 4 不同菜系排放二元羧酸含量特征

Fig. 4 Content of dicarboxylic acids emitted from different cooking styles

2.6 甾醇和单糖

本研究中主要检测了 β -谷甾醇、豆甾醇、胆甾醇、半乳糖、甘露聚糖和左旋葡聚糖这 6 类生物标志化合物. 虽然这 6 类化合物的含量均较低 (见图 5), 但是不同菜系餐馆之间差异较大, 可以作为区别不同菜系的指示物. 与前述脂肪酸等有机物不同, 西餐厅排放的甾醇总含量最低, 且在西餐厅的 $\text{PM}_{2.5}$ 样品中并没有检出豆甾醇. 而前人关于西餐肉类烹饪和西式快餐的结果中只检测到了胆甾醇^[10], 这与本研究的结果有一定的差异, 推测原因可能是本研究中西餐厅使用了少量玉米油的关系. 职工食堂排放了最高含量的甾醇, 韩式料理样品中的甾醇含量略低于职工食堂, 而茶餐厅则明显低于职工食堂和韩式料理. 这 3 家餐厅排放的甾醇物质分布类似, 都表现为 β -谷甾醇的含量最高, 胆甾醇次之, 豆甾醇最低. 而在植物体中自然态的甾醇也就是 β -谷甾醇含量最大^[24], 因此, 西餐厅与其他 3 家餐厅的差异可能是由蔬菜的烹饪造成.

单糖通常在大气中十分稳定, 被认为是纤维素热解的示踪物^[22~24]. 由于单糖与植物关系密切, 所以西餐厅仅检测到极低含量的左旋葡聚糖. 韩式料理排放的单糖总含量也较低, 且并未检测到甘露聚糖. 职工食堂和茶餐厅的样品中均检测到了 3 种单糖, 不过职工食堂的含量高于茶餐厅. 食堂和茶餐厅排放的单糖的含量大小顺序均为: 左旋葡聚糖 > 半乳糖 > 甘露聚糖, 与 Zhao 等^[16]的研究结果一致, 因此, 这 3 类单糖可以作为中式餐饮源的潜在示踪物.

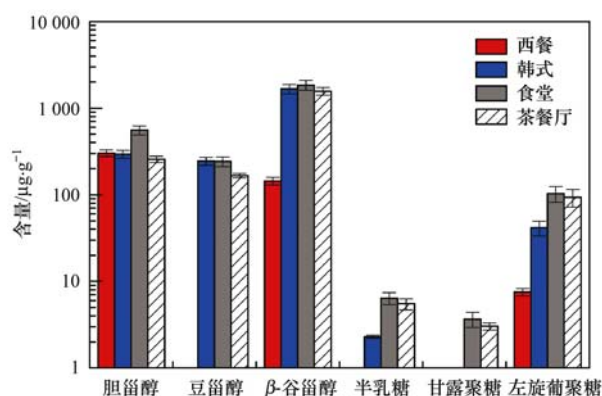


图 5 不同菜系排放生物标志化合物含量特征

Fig. 5 Content of molecular biomarkers emitted from different cooking styles

3 讨论

3.1 潜在示踪物

餐饮油烟颗粒物中不少有机物的分子组成具有很强的源特征性, 是源示踪物的最佳候选者, 如胆甾醇、棕榈酸、油酸、亚油酸和内酯等被认为是肉类烹饪的示踪物^[10]. 但是这些物质通常不仅在餐饮源中出现, 如香烟和植物碎片燃烧也会释放出胆甾醇等物质^[24,25]. 因此, 单独选择某一种物质作为源示踪物存在极大的误差, 需要选择一类有机物的组合来更准确地代表源示踪物.

多环芳烃同系物的特征比值是确定污染物来源的重要指标之一. 表 3 列出了不同菜系餐馆排放颗粒物中 $\text{Phe}/(\text{Ant} + \text{Phe})$ (178, 同分异构体的相对分子量, 下同), $\text{Fla}/(\text{Fla} + \text{Pyr})$ (202), $\text{BaA}/(\text{BaA} + \text{Chry})$ (228) 和 $\text{InP}/(\text{InP} + \text{BghiP})$ (276) 的值. 从中可以看出, 本研究所获得的 PAHs 特征比值, 介于前人的研究结果之间, 其中 $\text{Phe}/(\text{Ant} + \text{Phe})$ 的值都随菜系的不同变化幅度较大, 西餐和韩式料理的值相对较高且十分接近, 而食堂和茶餐厅的值较低也较接近. $\text{InP}/(\text{InP} + \text{BghiP})$ 的值都随着菜系的不同, 变化也十分明显, 并且西餐和韩式料理的值仍非常接近, 而茶餐厅和食堂的值则差距较大. 不同餐馆颗粒物中 $\text{Fla}/(\text{Fla} + \text{Pyr})$ 和 $\text{BaA}/(\text{BaA} + \text{Chry})$ 的比值相对稳定, 变化幅度较小, 其中 $\text{Fla}/(\text{Fla} + \text{Pyr})$ 的值则

表 3 不同菜系餐馆的特征指标¹⁾

Table 3 Diagnostic ratios of each cooking style

菜系	特征指标							
	Phe/(Phe + Ant)	Fla/(Fla + Pyr)	BaA/(BaA + Chry)	InP/(InP + BghiP)	F16/F18	F18:1/F18	Di9/F18:1	LG/(Gal + Man)
西餐	0.53	0.43	0.41	0.96	2.00	2.29	0.05	ND
韩式	0.54	0.41	0.54	0.80	3.25	3.12	0.05	18.03
食堂	0.43	0.29	0.57	0.78	3.19	2.24	0.06	10.25
茶餐厅	0.44	0.27	0.57	0.92	2.83	2.34	0.07	10.98
粤菜(深圳) ^[15]	1.00	0.36	0.47	0.19	2.38	3.01	—	14.57
湘菜(深圳) ^[15]	0.96	0.44	0.51	—	2.70	1.86	—	10.10
粤菜(广东) ^[16]	—	0.32	—	—	2.52	3.27	0.05	—
湘菜(广州) ^[16]	—	0.35	—	—	3.71	4.54	0.05	17.71
川菜(广州) ^[16]	—	0.32	—	—	4.95	4.83	0.06	8.07
东北菜(广州) ^[16]	—	0.41	—	—	8.11	6.55	0.06	12.59
城市交通(上海) ^[26]	—	0.52	0.27	—	—	—	—	—
石油 ^[26]	—	<0.2	—	—	—	—	—	—
干草 ^[31]	—	0.63	0.68	—	5.27	0.87	—	3.00

1) Phe 表示菲, Ant 表示蒽, Fla 表示荧蒽, Pyr 表示芘, BaA 表示苯并(a)蒽, Chry 表示荧蒽, InP 表示茚并(1,2,3-cd)芘, BghiP 表示苯并(ghi)芘; Di9 表示壬二酸; LG 表示左旋葡聚糖, Gal 表示半乳糖, Man 表示甘露聚糖; “—”表示没有数据

在 0.2 ~ 0.5 之间,前人的研究认为石油燃烧 Fla/(Fla + Pyr) 的值小于 0.2,而对于干草和木材等则大于 0.5,交通源则在 0.5 左右^[29,30]. 因此,Fla/(Fla + Pyr) 可以作为餐饮源潜在的示踪物.

十六烷酸(F16)、油酸(F18:1)与十八烷酸(F18)的比值被认为是可能的餐饮源示踪物. 本研究计算了不同菜系颗粒物中的比值,如表 3 所示. 西餐排放的脂肪酸中 F16/F18 的值约为 2,而韩式料理、食堂和茶餐厅样品中 F16/F18 的值都接近 3,中餐和西餐的差异较大. 此外,尽管韩式料理所排放的颗粒物中 F16、F18、F18:1 和 F18:2 这 4 类脂肪酸的分布模式与西餐一致,但是 F16/F18:1 的值差距较大. 与前人的研究相比较,本研究中中餐的结果接近粤菜和湘菜的比值,远远小于川菜和东北菜. 但是总体来看,中餐的 F16/F18 的值更高,因此 F16/F18 可以作为区别中西餐源排放的指标之一. 另一方面,西餐厅样品中 F18:1/F18 的值与职工食堂、茶餐厅的值非常接近,仅小于韩式料理. 与前人的研究相比,本研究中西餐、食堂和茶餐厅的比值较低,仅略高于深圳的湘菜馆;韩式料理的比值与粤菜的比值接近,但仍远小于川菜和东北菜. 此项比值,西餐和部分中餐的差异不大. 此外,各餐厅壬二酸与油酸的比值变化范围在 0.05 ~ 0.07,不同菜系之间的差异也较小.

LG/(Gal + Man) 即左旋葡聚糖/(半乳糖 + 甘露聚糖) 的值通常是木材或者秸秆燃烧的示踪物. 本研究也进行了计算,具体结果见表 3:西餐厅中只检测出了少量的左旋葡聚糖,无法计算,而剩余 3 家餐厅中韩式料理的比值最高,食堂和茶餐厅的值较低但非常接近. 综合前人的研究结果,中式餐饮排放

的颗粒物中 LG/(Gal + Man) 的平均值为 12.78,区别于木材干草燃烧的平均值为 (3.00) 和家庭壁炉的平均值 (18.00)^[24~26,31,32],因此, LG/(Gal + Man) 也可以作为中式餐饮的源示踪物.

3.2 与大气样品对比

本研究于 2019 年 7 月 10 ~ 17 日采集深圳市大气样品,采样地点为北京大学深圳研究院大楼西座顶层,大楼周围较空旷,无明显的污染源. 每天采样一次,采样时间约 23.5 h. 图 6 显示了深圳市大气环境中各餐馆排放的颗粒物中部分重要有机物的含量. 从中可以发现,深圳市大气颗粒物中左旋葡聚糖的含量远远高于餐饮源颗粒物. 左旋葡聚糖通常来源于生物质燃烧,因此,餐饮源对大气颗粒物中的左旋葡聚糖贡献相对较低. 餐饮源颗粒物中多环芳烃的含量也远低于大气颗粒物,也说明除了餐饮源之外,大气颗粒物中的多环芳烃还有大量其他的来源,如汽车尾气等,对比前人的研究结果也可以发现,交

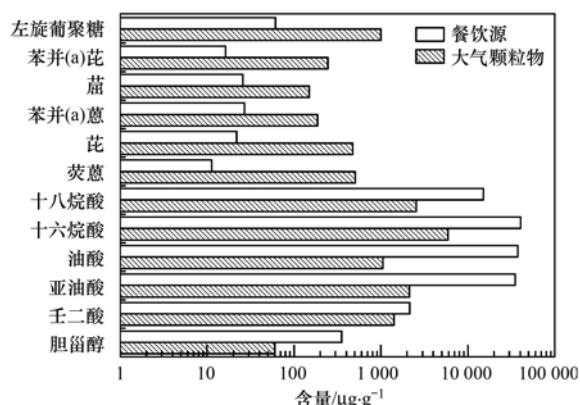


图 6 深圳大气和餐饮源颗粒物中重要有机物的含量

Fig. 6 Content of important organic compounds from cooking and in ambient air in Shenzhen

通源对大气颗粒物中 PAHs 的贡献程度要高于餐饮源^[30]. 另一方面, 餐饮源颗粒物中脂肪酸的含量要高于大气颗粒物, 其中不饱和脂肪酸的差距较大, 主要原因是饱和脂肪酸在大气中更容易氧化分解. 在餐饮源和大气颗粒物中, 饱和脂肪酸的含量较为接近, 这说明餐饮源对深圳市大气颗粒物中的饱和脂肪酸的贡献较大. 此外, 大气颗粒物中壬二酸的含量也低于餐饮源, 但差距相对较小, 原因是餐饮源等排放 C18 的烯酸或者 C9 的醛类在大气中的氧化反应, 生成了一定量的壬二酸.

4 结论

(1) 各餐厅排放的颗粒物中有机碳(OC)含量最高, 占 $PM_{2.5}$ 质量的 60% 以上. 在所有定性的有机组分之中, 脂肪酸含量最高, 平均占 $PM_{2.5}$ 质量在 15% 左右, 其次是二元羧酸和正构烷烃, 而多环芳烃、甾醇和单糖等有机组分所占质量分数较低.

(2) 菜系的不同对颗粒物的有机组成有明显的影响, 西餐厅排放的脂肪酸、正构烷烃和多环芳烃等有机物含量均是最高, 其次是韩式料理, 茶餐厅和职工食堂的含量较低. 但是甾醇和单糖等生物标志化合物的含量, 西餐厅却要远低于其余 3 类餐厅.

(3) 不同有机物之间的比值可以作为餐饮源的特征指标, $Fla/(Fla + Pyr)$ 和 $LG/(Gal + Man)$ 的比值在不同餐馆排放的颗粒物中较稳定, 变化幅度小, 与其他污染源的特征比值也有明显的区别, 可以作为餐饮源潜在的示踪物. 而 $Phe/(Ant + Phe)$ 和 $InP/(InP + BghiP)$ 等指标都随着菜系的不同, 变化明显, 可以作为不同菜系的污染特征.

(4) 餐饮源对深圳市大气颗粒物最大的贡献是提供了大量的脂肪酸和二元羧酸, 而对多环芳烃、单糖类物质的贡献较低.

致谢: 感谢中国科学院过程工程研究所赵紫薇同学对本研究样品采集工作的帮助.

参考文献:

- [1] He K B, Yang F M, Ma Y L, *et al.* The characteristics of $PM_{2.5}$ in Beijing, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2001, **35** (29): 4959-4970.
- [2] Chen G B, Morawska L, Zhang W Y, *et al.* Spatiotemporal variation of PM_{10} pollution in China [J]. *Atmospheric Environment*, 2018, **178**: 198-205, doi: 10.1016/j.atmosenv.2018.01.053.
- [3] Crippa M, DeCarlo P F, Slowik J G, *et al.* Wintertime aerosol chemical composition and source apportionment of the organic fraction in the metropolitan area of Paris [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, **13**(2): 961-981.
- [4] Sun Y L, Zhang Q, Schwab J J, *et al.* Characterization of the sources and processes of organic and inorganic aerosols in New York city with a high-resolution time-of-flight aerosol mass spectrometer [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, **11** (4): 1581-1602.
- [5] Wan M P, Wu C L, To G N S, *et al.* Ultrafine particles, and $PM_{2.5}$ generated from cooking in homes [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(34): 6141-6148.
- [6] 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.
Zhang T, Peng L, Li Y H, *et al.* Chemical characteristics of $PM_{2.5}$ emitted from cooking fumes [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2016, **29**(2): 183-191.
- [7] 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.
- [8] Huang X F, He L Y, Hu M, *et al.* Highly time-resolved chemical characterization of atmospheric submicron particles during 2008 Beijing Olympic Games using an aerodyne high-resolution aerosol mass spectrometer [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, **10**(18): 8933-8945.
- [9] Hildemann 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.
- [10] 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 & Technology*, 1991, **25** (6): 1112-1125.
- [11] Schaner J J, Kleeman M J, Cass G R, *et al.* Measurement of emissions from air pollution sources. 1. C_1 through C_{29} organic compounds from meat charbroiling [J]. *Environmental Science & Technology*, 1999, **33**(10): 1566-1577.
- [12] Schauer J J, Kleeman M J, Cass G R, *et al.* Measurement of emissions from air pollution sources. 2. C_1 through C_{30} organic compounds from medium duty diesel trucks [J]. *Environmental Science & Technology*, 1999, **33**(10): 1578-1587.
- [13] Schauer J J, Kleeman M J, Cass G R, *et al.* Measurement of emissions from air pollution sources. 4. C_1 - C_{27} organic compounds from cooking with seed oils [J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, **36**(4): 567-575.
- [14] McDonald J D, Zielinska B, Fujita E M, *et al.* Emissions from charbroiling and grilling of chicken and beef [J]. *Journal of The Air & Waste Management Association*, 2003, **53**(2): 185-194.
- [15] 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.
- [16] Zhao Y L, Hu M, Slanina S, *et al.* Chemical compositions of fine particulate organic matter emitted from Chinese cooking [J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, **41**(1): 99-105.
- [17] 叶素芬, 张彬, 符海欢, 等. 模拟烹调中细颗粒及多环芳烃的排放特征 [J]. *厦门大学学报(自然科学版)*, 2013, **52** (6): 824-829.
Ye S F, Zhang B, Fu H H, *et al.* Emission of fine particles and fine particle-bound polycyclic aromatic hydrocarbons from simulated cooking fumes [J]. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 2013, **52**(6): 824-829.
- [18] 符海欢, 田娜, 商惠斌, 等. 模拟不同排放源排放颗粒及多环芳烃的粒径分布研究 [J]. *环境科学*, 2014, **35**(1): 46-52.
Fu H H, Tian N, Shang H B, *et al.* Size distribution of particle

- and polycyclic aromatic hydrocarbons in particle emissions from simulated emission sources[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(1): 46-52.
- [19] 王红丽, 景盛翱, 乔利平. 餐饮排放有机颗粒物的质量浓度、化学组成及排放因子特征[J]. *环境科学*, 2019, **40**(5): 2010-2018.
- Wang H L, Jing S A, Qiao L P. Chemical compositions, mass concentrations, and emission factors of particulate organic matters emitted from catering [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(5): 2010-2018.
- [20] See S W, Balasubramanian R. Risk assessment of exposure to indoor aerosols associated with Chinese cooking [J]. *Environmental Research*, 2006, **102**(2): 197-204.
- [21] See S W, Balasubramanian R. Chemical characteristics of fine particles emitted from different gas cooking methods [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(39): 8852-8862.
- [22] 陈业高. 植物化学成分[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004. 115-253.
- [23] 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.
- [24] Rogge W F, Hildemann L M, Mazurek M A, *et al.* Sources of fine organic aerosol. 4. Particulate abrasion products from leaf surfaces of urban plants [J]. *Environmental Science & Technology*, 1993, **27**(13): 2700-2711.
- [25] Rogge W F, Hildemann L M, Mazurek M A, *et al.* Sources of fine organic aerosol. 5. Natural gas home appliances [J]. *Environmental Science & Technology*, 1993, **27**(13): 2736-2744.
- [26] Abdullahi K L, Delgado-Saborit J M, Harrison R M, *et al.* Emissions and indoor concentrations of particulate matter and its specific chemical components from cooking: a review [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **71**: 260-294.
- [27] Chen B H, Chen Y C. Formation of polycyclic aromatic hydrocarbons in the smoke from heated model lipids and food lipids[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2001, **49**(11): 5238-5243.
- [28] Chen Y C, Chen B H. Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in fumes from fried chicken legs [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2003, **51**(14): 4162-4167.
- [29] Miguel A H, Pereira P A P. Benzo(k)fluoranthene, benzo(ghi)perylene, and indeno(1,2,3-cd)pyrene: new tracers of automotive emissions in receptor modeling[J]. *Aerosol Science and Technology*, 1989, **10**(2): 292-295.
- [30] Gu Z P, Feng J L, Han W L, *et al.* Diurnal variations of polycyclic aromatic hydrocarbons associated with PM_{2.5} in Shanghai, China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2010, **22**(3): 389-396.
- [31] Oros D R, Simoneit B R T. Identification and emission factors of molecular tracers in organic aerosols from biomass burning Part 1. Temperate climate conifers[J]. *Applied Geochemistry*, 2001, **16**(13): 1513-1544.
- [32] Oros D R, Simoneit B R T. Identification and emission factors of molecular tracers in organic aerosols from biomass burning Part 2. Deciduous trees[J]. *Applied Geochemistry*, 2001, **16**(13): 1545-1565.

CONTENTS

Comparison Analysis of the Effect of Emission Reduction Measures for Major Events and Heavy Air Pollution in the Capital	ZHONG Yi-sheng, ZHOU Ying, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i>	(3449)
Evaluation of Different ISORROPIA-II Modes and the Influencing Factors of Aerosol pH Based on Tianjin Online Data	GAO Jie, SHI Xu-rong, WEI Yu-ting, <i>et al.</i>	(3458)
Emission Characteristics of Particulate Organic Matter from Cooking	LI Yuan-ju, WU Ai-hua, TONG Meng-xue, <i>et al.</i>	(3467)
Characteristics and Sources of 12 Trace Amount Elements in PM _{2.5} During a Period of Heavy Pollution in Huanggang, Central China	CHEN Zhan-le, TIAN Qian, MAO Yao, <i>et al.</i>	(3475)
Aerosol Optical Properties over the Ebinur Region	ZHANG Zhe, DING Jian-li, WANG Jin-jie	(3484)
Characteristics of Secondary Organic Particles and the Potential Formation of SOA from VOCs During Wintertime Heavy Pollution Episodes in Tianjin	XU Hong, TANG Miao, XIAO Zhi-mei, <i>et al.</i>	(3492)
Characteristics and Source Apportionment of VOCs at Different Pollution Levels During the Winter in an Urban Area in Zhengzhou	LI Yi-dan, YIN Sha-sha, ZHANG Rui-qin, <i>et al.</i>	(3500)
Emission Inventory of Intermediate Volatility Organic Compounds (IVOCs) from Biomass Burning in the Yangtze River Delta During 2010-2018	ZHU Yong-hui, WANG Qian, HUANG Ling, <i>et al.</i>	(3511)
Emission Characteristics of Biogenic Volatile Compounds (BVOCs) from Common Greening Tree Species in Northern China and Their Correlations with Photosynthetic Parameters	XU Yan, LI Shuang-jiang, YUAN Xiang-yang, <i>et al.</i>	(3518)
Characteristics of Surface Ozone and Impact Factors at Different Station Types During the Autumn in Guangzhou	GAO Ping, ZHUANG Li-yue, WANG Long, <i>et al.</i>	(3527)
Pollution Characteristics and Sensitivity Analysis of Atmospheric Ozone in Taian City	LI Kai, LIU Min, MEI Ru-bo	(3539)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Road Dust from Non-ferrous Smelting Parks	FENG Yu-yao, SHI Jian-wu, ZHONG Yao-qian, <i>et al.</i>	(3547)
Pollution and Source Analysis of Heavy Metal in Surface Dust from Xi'an University Campuses	FAN Xin-yao, LU Xin-wei, LIU Hui-min, <i>et al.</i>	(3556)
Monitoring Method of Total Particulate Matter in Ultra-low-emission and High-humidity Exhaust Gas from Stationary Sources and an Actual Test in a Gas Power Plant	HU Yue-qi, YAN Xu, KONG Chuan, <i>et al.</i>	(3563)
Vessels' Air Pollutant Emissions Inventory and Emission Characteristics in the Xiamen Emission Control Area	WANG Jian, HUANG Zhi, LIU Yan-ying, <i>et al.</i>	(3572)
Method for High-resolution Emission Inventory for Road Vehicles in Chengdu Based on Traffic Flow Monitoring Data	PAN Yu-jin, LI Yuan, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i>	(3581)
Inversion of Water Quality Parameters Based on UAV Multispectral Images and the OPT-MPP Algorithm	HUANG Xin-xi, YING Han-ting, XIA Kai, <i>et al.</i>	(3591)
Effects of Different Water Stratification on the Vertical Distribution of Nitrogen in Sediment Interstitial Waters: A Case Study of the Three Gorges Reservoir and Xiaowan Reservoir	LIU Jing-si, ZHU Xiao-sheng, HU Zi-long, <i>et al.</i>	(3601)
Pollution Status and Pollution Behavior of Microplastic in Surface Water and Sediment of Urban Rivers	ZHAO Xin, CHEN Hao, JIA Qi-long, <i>et al.</i>	(3612)
Spatial and Temporal Variation of Phytoplankton Community Structure and Its Influencing Factors in Shanghai River Channels	XU Zhi, CHEN Xiao-hua, SHEN Gen-xiang, <i>et al.</i>	(3621)
Restoration of River Sediment by Calcium Peroxide (CaO ₂) Combined with Biochar	LI Yu-ping, JIANG Ying-ying, LIU Bao-ming, <i>et al.</i>	(3629)
Quantification of Nitrate Sources to Groundwater in Karst Trough-valley Areas Based on Dual Stable Isotopes of $\delta^{15}\text{N-NO}_3^-$ and $\delta^{18}\text{O-NO}_3^-$ and the IsoSource Model	XU Lu, JIANG Yong-jun, DUAN Shi-hui, <i>et al.</i>	(3637)
Dynamic Process of Nitrogen and Phosphorus Export and Loss Load in an Intensive Orchard with Ridge and Furrow Plantation in the Three Gorges Reservoir Area	YAN Kun, WANG Yu-kuan, LIU Qin, <i>et al.</i>	(3646)
Analysis of Rainfall Runoff Pollution and Pollution Load Estimation for Urban Communities in a Highly Urbanized Region	GAO Bin, XU You-peng, LU Miao, <i>et al.</i>	(3657)
Adsorption of As(III) in Water by Iron-loaded Graphene Oxide-Chitosan	ZHAO Chao-ran, SHAN Hui-mei, ZENG Chun-ya, <i>et al.</i>	(3665)
Sorption Behaviors of Copper Ions and Tetracycline on Microplastics in Aqueous Solution	XUE Xiang-dong, WANG Xing-yuan, MEI Yu-chen, <i>et al.</i>	(3675)
Effect of Porous Fillers Properties on Biofilm Growth	JIANG Yu-qin, LI Jiong-hui, FANG Zhi-guo	(3684)
Adaptability of Nitrifying Biofilm Systems to Low Temperature: MBBR and IFAS	LI Ren, YU Li-fang, ZHANG Xing-xiu, <i>et al.</i>	(3691)
Improved on Nitrogen Removal of Anaerobic Ammonia Oxidation by Coupling Element Sulfur-based Autotrophic Short-cut Denitrification	FANG Wen-ye, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i>	(3699)
Nitrogen and Phosphorus Removal from Domestic Sewage Aerobic Granular Sludge Under Intermittent Gradient Aeration	ZHANG Yu-jun, LI Dong, LI Shuai, <i>et al.</i>	(3707)
Rapid Start-up and Stability of Partial Denitrification Based on Different Waste Sludge Sources	ZHANG Xing-xing, WANG Chao-chao, WANG Yao, <i>et al.</i>	(3715)
Decision-making Analysis of Excess Sludge Pretreatment for Struvite Recovery Based on AHP-PROMETHEE II Method	LIU Xiao-lei, LI An-jie	(3725)
Effect on Ammonia Inhibition Mitigation in the Anaerobic Digestion Process with Zero-Valent Iron	LIU Ji-bao, NIU Yu-tong, YU Da-wei, <i>et al.</i>	(3731)
Performance of Anaerobic Membrane Bioreactors for the Co-digestion of Sewage Sludge and Food Waste	DAI Jin-jin, NIU Cheng-xin, PAN Yang, <i>et al.</i>	(3740)
Antibiotics Induce Horizontal Gene Transfer of Resistance at Sublethal Concentrations	YUAN Qi-yi, CHEN Hong-jie, Laurence Haller, <i>et al.</i>	(3748)
Impact of Tetracycline Antibiotic on the Transcriptional Expression of Tetracycline Resistance Genes in <i>Shigella flexneri</i>	GAO Pin, RUAN Xiao-hui, QIU Wen-jie, <i>et al.</i>	(3758)
Competitive Selection of Hydroxylamine on Ammonia Oxidizing Bacteria and Nitrite Oxidizing Bacteria	QIAO Xin, WANG Bo, GUO Yuan-yuan, <i>et al.</i>	(3765)
Analysis of the Effect of Temperature on the Microbial Flora Structure During the Nitrite Oxidation Process Using 16S rRNA High-throughput Sequencing	HOU Xiao-wei, NIU Yong-jian, LI Wei-wei, <i>et al.</i>	(3773)
Universality and Potential Application of Mn(II) Oxidation Triggered by Microbial Interspecies Interactions	NING Xue, LIANG Jin-song, BAI Yao-hui, <i>et al.</i>	(3781)
Distribution and Potential Nitrification Rates of Aerobic Ammonia-Oxidizing Microorganisms in Surface Sediments of Mangrove in Sanya River	LUO Qing, ZHEN Yu, PENG Zong-bo, <i>et al.</i>	(3787)
Effects of Ozone Pollution on Growth, Yields, and Mineral Metallic Element Contents of Paddy Rice	FANG Xiao-kun, LUO Xiao-san, ZHANG Dan, <i>et al.</i>	(3797)
Short Term Effects of a Changing Carbon Input on the Soil Respiration of <i>Picea schrenkiana</i> Forests in the Tianshan Mountains, Xinjiang	SHAO Kang, GONG Lu, HE Xue-min, <i>et al.</i>	(3804)
Effects of the Combined Application of Organic and Inorganic fertilizers on N ₂ O Emissions from Saline Soil	ZHOU Hui, SHI Hai-bin, GUO Jia-wei, <i>et al.</i>	(3811)
Mechanism and Influencing Factors of Increasing Soil Temperature by <i>in-situ</i> Electrical Resistance Heating	GE Song, MENG Xian-rong, XU Wei, <i>et al.</i>	(3822)
Acid Mine Wasteland Reclamation by <i>Juncus ochraceus</i> Buchen as a Potential Pioneer Plant	HUANG Jian-hong, FU Jiang-li, YAN Xin-rui, <i>et al.</i>	(3829)
Effects of Drip Irrigation Patterns and Biochar Addition on Soil Mineral Nitrogen and Microbial Regulation of Greenhouse	CAI Jiu-mao, LIU Jie-yun, QIU Hu-sen, <i>et al.</i>	(3836)
Effects of Cotton Stalk Biochar on the Structure and Function of Fungi Community in Alkaline Rhizosphere Soil of Rice Under Cadmium Pollution	LIU Shi-dou, HAN Yao-guang, ZHU Xin-ping, <i>et al.</i>	(3846)
Effects of Different Treatments with Water Management Combined with Leaf Spraying Silicon Fertilizer on Cd Accumulation in Rice	WEI Bin-yun, ZHOU Hang, LIU Jia-wei, <i>et al.</i>	(3855)
Effects of Chelate GLDA on the Remediation of Cadmium Contaminated Farmland by <i>Pennisetum purpureum</i> Schum	QIN Jian-jun, TANG Sheng-shuang, JIANG Kai, <i>et al.</i>	(3862)
Situation Analysis and Trend Prediction of the Prevention and Control Technologies for Planting Non-Point Source Pollution	YU Ying-liang, YANG Lin-zhang, LI Hong-na, <i>et al.</i>	(3870)