

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



2019

Vol.40 No.5
第40卷 第5期

目次

2016年10~11月期间北京市大气颗粒物污染特征与传输规律	张晗宇,程水源,姚森,王晓琦,张俊峰(1999)
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	王红丽,景盛翱,乔利平(2010)
泰山顶(1534 m)夏季气溶胶粒径分布特征	沈利娟,王红磊,银燕,陈魁,陈景华,施双双(2019)
郑州-新乡冬季PM _{2.5} 中元素浓度特征及其源分析	闫广轩,张朴真,黄海燕,高雅,张靖雯,宋鑫,张佳羽,李怀刚,曹治国,姜继韶,樊静,王跃思,金彩霞(2027)
我国PM _{2.5} 浓度分阶段改善目标情景分析	贺晋瑜,燕丽,王彦超,雷宇,汪旭颖(2036)
安阳市典型工业源PM _{2.5} 排放特征及减排潜力估算	杜小申,燕丽,贺晋瑜,汪旭颖,王克,张瑞芹(2043)
郑州市典型工业炉窑细颗粒物排放特征及清单	赵庆炎,韩士杰,张铁舜,杨留明,张瑞芹,燕启社(2052)
2015年南京市城区挥发性有机物组成特征及大气反应活性	乔月珍,陈凤,赵秋月,刘倩(2062)
兰州市化石燃料燃烧源排放VOCs的臭氧及二次有机气溶胶生成潜势	刘镇,朱玉凡,郭文凯,刘晓,陈强(2069)
12种常见落叶果树BVOCs排放清单和排放特征	李双江,袁相洋,李琦,冯兆忠(2078)
我国典型陆地生态系统水化学离子特征及空间分布	黄丽,张心昱,袁国富,朱治林,唐新斋,孙晓敏(2086)
我国典型区域地表水环境中抗生素污染现状及其生态风险评价	刘昔,王智,王学雷,李珍,杨超,厉恩华,位慧敏(2094)
我国七大流域水体多环芳烃的分布特征及风险评价	范博,王晓南,黄云,李霖,高祥云,李雯雯,刘征涛(2101)
大连海域入海污染源中PFASs的赋存、输入通量和季节特征	陈虹,韩建波,张灿,程嘉熠(2115)
干旱内陆河流域降水稳定同位素的时空特征及环境意义	袁瑞丰,李宗省,蔡玉琴,邹海明(2122)
柳林泉域岩溶地下水区域演化规律及控制因素	黄奇波,覃小群,刘朋雨,程瑞瑞,李腾芳(2132)
崇左响水地区岩溶地下水主要离子特征及控制因素	周巾枚,蒋忠诚,徐光黎,覃小群,黄奇波,张连凯(2143)
三峡水库水体溶解磷与颗粒磷的输移转化特征分析	秦延文,韩超南,郑丙辉,马迎群,杨晨晨,刘志超,张雷,赵艳民(2152)
三峡水库蓄水至175 m后干流沉积物磷蓄积特征及释放潜力	黎睿,潘婵娟,汤显强,肖尚斌,李青云,杨文俊(2160)
不同水期洞庭湖水体中磷分布特征及影响因素	李莹杰,王丽婧,李虹,欧阳美凤(2170)
巢湖十五里河沉积物磷平衡浓度对外源磷的响应及释放风险	李如忠,鲍琴,戴源(2178)
闽江上游溪流沉积物有机磷空间分布及其环境意义分析	徐健,袁旭音,叶宏萌,张晓辉,周慧华,韩年(2186)
生态工程综合治理系统对农业小流域氮磷污染的治理效应	蒋倩文,刘锋,彭英湘,王华,姚燃,李红芳,罗沛,刘新亮,吴金水(2194)
太湖流域河流沉积物重金属分布及污染评估	张杰,郭西亚,曾野,邓建才(2202)
三峡水库支流汝溪河口水体汞的时空变化特征	马尉斌,陈秋禹,尹德良,孙涛,王永敏,王定勇(2211)
多功能型城市人工湿地水体汞分布特征及其量变分析	刘伟豪,王永敏,樊宇飞,吕东威,王定勇(2219)
不同类型城市人工湿地水体汞的分布特征	樊宇飞,刘伟豪,孙涛,苑萌,吕东威,李先源,王永敏,王定勇(2226)
微塑料对河口沉积物抗生素抗性基因的影响	黄福义,杨凯,张子兴,苏建强,朱永官,张娟(2234)
上海市郊道路地表径流多环芳烃污染特征对比及源解析	吴杰,熊丽君,吴健,沙晨燕,唐浩,林匡飞,李大雁,沈城(2240)
异龙湖不同湖区浮游植物群落特征及其与环境因子的关系	王振方,张玮,杨丽,徐玉萍,赵凤斌,王丽卿(2249)
水库热分层期藻类水华与温跃层厌氧成因分析	刘雪晴,黄廷林,李楠,杨尚业,李扬,徐进,王涵玥(2258)
绿狐尾藻对铜绿微囊藻和羊角月牙藻的抑藻效应	毕业亮,吴诗敏,周思宁,吴尚华,宿辉,白志辉,徐圣君(2265)
紫外/亚硫酸钠还原降解三氯乙酰胺的效能	伏芝萱,郭迎庆,楚文海(2271)
UV降解水溶液中拉法辛的影响因素及机制	吕娟,许志伟,王言(2278)
铝代水铁矿协同吸附砷的机制	黄博,郭朝晖,肖细元,彭驰,朱惠文,史磊,阳安迪(2287)
新型材料磁性氧化铁的除氟效能	方文侃,李小娣,方菁,吴德意(2295)
羧基改性阴极对微生物电合成系统产乙酸性能的影响机制	祁家欣,曾翠平,骆海萍,刘广立,张仁铎,卢耀斌(2302)
基于分区供氧与溶解氧调控的低C/N比污水短程硝化反硝化	吴春雷,荣懿,刘晓鹏,史会欣,章武首,金鹏康,马文伟(2310)
不同COD浓度下低基质厌氧氨氧化的启动特征	马艳红,赵智超,安芳娇,黄利,师晓娟,慕浩,陈永志(2317)
15℃SBBR短程硝化快速启动和稳定运行性能	孙艺齐,卞伟,李军,赵青,王文啸,梁东博,吴耀东(2326)
长期低聚磷条件对AO-SBR系统Accumulibacter代谢特性的影响	王少坡,李柱,赵乐丹,于静洁,赵明,郑胜达,孙力平(2333)
厌氧氨氧化颗粒污泥EPS及其对污泥表面特性的影响	杨明明,刘子涵,周杨,祁菁,赵凡,郭劲松,方芳(2341)
HN-AD菌生物强化接触氧化工艺处理猪场沼液	刘向阳,张千,吴恒,李宸,唐健泓,封丽,肖芃颖,赵天涛(2349)
温度对自养型同步脱氮工艺处理猪场废水厌氧消化液性能及微生物群落的影响	黄方玉,邓良伟,杨红男,杨含,肖友乾,王兰(2357)
城市污水处理系统真核微生物群落特性与地域性差异	秦文韬,张冰,孙晨翔,陈湛,文湘华(2368)
三江平原湿地开垦对土壤微生物群落结构的影响	王娜,高婕,魏静,刘颖,庄绪亮,庄国强(2375)
亚高山湖群中真菌群落的分布格局和多样性维持机制	刘晋仙,李鑫,罗正明,王雪,暴家兵,柴宝峰(2382)
生物质炭对双季稻田土壤反硝化功能微生物的影响	刘杰云,邱虎森,王聪,沈健林,吴金水(2394)
地膜覆盖和施肥对菜地CH ₄ 排放的影响	倪雪,江长胜,陈世杰,李晓茜,石孝均,郝庆菊(2404)
亏缺灌溉对冬小麦农田温室气体排放的影响	王晓云,蔡焕杰,李亮,徐家屯,陈慧(2413)
不同施肥模式对热区晚稻田CH ₄ 和N ₂ O排放的影响	田伟,伍延正,汤水荣,胡玉麟,赖倩倩,文冬妮,孟磊,吴川德(2426)
周期性变温对紫色土有机碳矿化的影响	曾蔓蔓,慈恩,樊晶晶,李江文,翁昊璐,李松(2435)
广西高镉异常区水田土壤Cd含量特征及生态风险评价	宋波,王佛鹏,周浪,吴勇,庞瑞,陈同斌(2443)
超富集植物藿香薹(Ageratum conyzoides L.)对镉污染农田的修复潜力	张云霞,宋波,宾娟,周子阳,陈记玲,陈同斌(2453)
种植油菜麦评价多环芳烃污染土壤的农用风险	焦海华,郭佳佳,张婧旻,张晓霞,茹文明,白志辉(2460)
土壤重金属累积对土地利用与景观格局的响应	舒心,李艳,李锋,冯靖仪,沈嘉瑜,史舟(2471)
某区生活垃圾焚烧发电厂周边及厂区内土壤中重金属元素的污染特征及评价	吕占禄,张金良,陆少游,邹天森,刘凯,张晗,谷亚亚(2483)
《环境科学》征订启事(2018)	《环境科学》征稿简则(2042)
信息(2114, 2348, 2393)	

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

王红丽, 景盛翱*, 乔利平*

(上海市环境科学研究院, 国家环境保护城市大气复合污染成因与防治重点实验室, 上海 200233)

摘要: 餐饮废气是大气有机颗粒物的重要排放源。本研究基于模拟实验, 研究了烹饪方式、食材以及油品等因素对餐饮废气排放有机颗粒物浓度、组成以及排放因子的影响。结果表明, 餐饮排放有机颗粒物的特征受烹饪方式、烹饪食材与烹饪油品等因素影响较大。在所有模拟实验条件下, 餐饮废气中可定量的有机颗粒物中, 正构烷烃、甾醇和脂肪酸(包括饱和脂肪酸和不饱和脂肪酸)所占的平均质量分数分别为68.9%、20.3%和4.2%, 其余的有机物还包括二元羧酸、多环芳烃、单糖以及藿烷类化合物等。有机颗粒物的平均食材排放因子为 $0.0131 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 变化范围为 $0.0014 \sim 0.0271 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。肉类烹饪过程的食材排放因子远大于蔬菜烹饪过程。基于油品的平均排放因子为 $1.8230 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 变化范围为 $0.0019 \sim 10.1730 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。铁架烧烤烹饪方式的油品排放因子大于其他烹饪方式。

关键词: 有机颗粒物(POMs); 餐饮排放; 化学组成; 质量浓度; 排放因子

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)05-2010-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201807062

Chemical Compositions, Mass Concentrations, and Emission Factors of Particulate Organic Matters Emitted from Catering

WANG Hong-li, JING Sheng-ao*, QIAO Li-ping*

(State Environmental Protection Key Laboratory of Formation and Prevention of the Urban Air Complex, Shanghai Academy of Environmental Sciences, Shanghai 200233, China)

Abstract: Catering is an important emission source of atmospheric particulate organic matters (POMs). Mass concentrations, chemical compositions, and emission factors of POMs emitted from catering were studied based on simulation experiments. The effects of different cooking methods, various ingredients, oils, and other factors were investigated. The results showed that the species of POMs emitted from catering were largely influenced by cooking methods, ingredients, and oils. Among all the quantified POMs, the average mass fraction was 68.9%, 20.3%, and 4.2% for N-alkanes, sterols, and fatty acids (including saturated fatty acids and unsaturated fatty acids), respectively. The remaining 5.42% was constituted by dicarboxylic acids, polycyclic aromatic hydrocarbons, monosaccharide anhydrides, and hopane compounds. The average ingredient emission factor was $0.0131 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, ranging from $0.0014 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ to $0.0271 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$. The ingredient emission factors of the meat cooking process were much larger than those of the vegetable cooking process. The average oil emission factor was $1.8230 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, ranging from $0.0019 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ to $10.1730 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$. The oil emission factors of barbecuing were much larger than those of other cooking methods.

Key words: particulate organic matters (POMs); catering; chemical compositions; mass concentrations; emission factors

餐饮废气是大气有机颗粒物的重要来源。研究显示, 肉类炭烤和煎炸过程有机颗粒物的排放量占洛杉矶大气总有机颗粒物的20%, 占总细颗粒物质量的7%^[1,2]。有机颗粒物由成百上千种有机化合物组成, 这些物质可以参与大气化学转化过程从而影响空气质量及太阳辐射^[3~6], 其中一些物质还具有致癌和诱变性质, 健康影响明显^[7~9]。

国内外众多文献就烹饪废气中有机颗粒物的组成进行了详细的研究。结果显示, 餐饮废气的有机颗粒物组成主要取决于烹饪方式与食材^[10]。该废气中常见的有机化合物主要包括正构烷烃、异构烷烃、烯烃、脂肪酸、酮、芳香族化合物、多环芳烃和内酯^[11]。

中西方烹饪方式的不同以及不同中式烹饪中所用食材与油品的不同, 导致餐饮排放的有机颗粒物

组成存在较大的差异^[12]。Rogge等^[13]的研究发现, 肉类烹饪过程排放的C16和C18脂肪酸(包括饱和脂肪酸与不饱和脂肪酸)是城市大气细颗粒混合物中的主要有机物。He等^[12]就深圳的湖南菜餐馆与广东菜餐馆的排放进行了比较, 探讨了不同的中式烹饪方式下有机颗粒物的排放情况, 在可定量的有机物中, 超过90%为脂肪酸; 脂肪酸、二元羧酸和甾醇是湖南菜系和广东菜系餐馆主要的有机排放物; 湖南菜与广东菜在正构烷烃和多环芳烃分子分

收稿日期: 2018-07-09; 修订日期: 2018-11-23

基金项目: 上海市人才发展基金项目(2017046); 上海市重大环保科研项目(2017-02); 上海市科委科技攻关项目(16DZ1204604)

作者简介: 王红丽(1983~), 女, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为活性有机物测量及源汇机制, E-mail: wanghl@saes.sh.cn

* 通信作者, E-mail: jingsa@saes.sh.cn; qiaolp@saes.sh.cn

布上存在一定的差异,且湖南菜排放的脂肪酸相对贡献约为广东菜的 2.5 倍. Zhao 等^[14] 比较了广州市内广东菜、湖南菜、四川菜和东北菜 4 类菜系餐饮废气中有机颗粒物的组成,发现广东菜和湖南菜排放量最大的脂肪酸为油酸;而东北菜排放量最大的脂肪酸为棕榈酸,其棕榈酸排放量与四川菜的油酸排放量接近.

以往研究主要集中在不同菜系排放有机颗粒物特征的比较,而对于食材、油品以及烹饪方式对有机颗粒物排放特征的影响探讨比较少. 因此,本研究通过模拟不同餐饮排放过程,重点探讨食材、油品以及烹饪方式等因素对餐饮排放有机颗粒物特征的影响.

1 材料与方法

1.1 模拟实验

本模拟实验采用的烹饪方式包括铁架烧烤、铁板烧、煎炸与炒这 4 类,食材包括玉米、土豆、五花肉、鸡肉、鲑鱼和猪排这 5 类,油品包括大豆油、玉米油和葵花籽油 3 类. 所用燃料均为无烟煤炭与液化气. 共设计 15 组实验,每组实验进行 2 次平行实验,本文的数据均为 2 次平均实验的均值. 采样时间 30 ~ 60 min,烹饪过程时长 40 ~ 70 min,废气管道平均流速 $7.4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,平均温度 27°C ,瞬间油温 $130\sim290^{\circ}\text{C}$,细颗粒物使用 TH16A 采样器配合

$\text{PM}_{2.5}$ 切割头采样,流量约为 $16.4\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$,采样体积 385 ~ 1 400 L.

本模拟实验主要研究了烹饪方式、食材以及油品对有机颗粒物排放的影响(见表 1). 在研究烹饪方式的影响时,共设计了 9 组室验,分别选取五花肉、猪排、鸡肉以及蔬菜等 4 种食材作为室验食材,各选择了 3 种、2 种、2 种和 2 种方式进行烹饪;同时为了降低油品及食材用量对研究结果的影响,均采用大豆油作为共同的油品,并尽量统一油品的用量,其中肉类的用量均为 5 kg 左右,蔬菜类的用量均为 10 kg 左右.

在研究食材的影响时,共设计了 4 组实验,分别选取玉米、五花肉、鲑鱼、鸡肉等 4 种食材作为实验食材,基于统一的油品(大豆油)、统一的烹饪方式(铁架烧烤)、统一的食材用量以及烹饪时间,其中水产类以及肉类的用量均为 5 kg 左右,蔬菜用量均为 10 kg 左右,烹饪时间均为 60 min 左右.

在研究油品的影响时,共设计了 6 组实验,分别选取大豆油、玉米油、葵花籽油作为不同种类的油品,其中 3 组实验以玉米为食材,以铁架烧烤为烹饪方式,另外 3 组实验以土豆为食材,以炒为烹饪方式. 为降低油品用量与食材用量对研究结果的影响,实验时,油品用量基本保持一致,玉米用量均为 9 kg 左右,土豆用量均为 7 kg 左右.

表 1 模拟实验汇总
Table 1 Simulation experiments'conditions

影响因素	油品	食材	烹饪方式	实验条件编号	食材用量/g	油品用量/g	操作时间/min
烹饪方式的影响	大豆油	五花肉	铁架烧烤	T1	4 996	13	60
			煎炸	T2	5 000	60	60
			炒	T3	5 000	318	46
		猪排	铁板烧	T4	5 000	332	45
			煎炸	T5	5 001	365	93
		鸡肉	铁架烧烤	T6	5 514	20	64
			炒	T7	5 920	612	54
		玉米	铁架烧烤	T8	9 447	667	64
			铁板烧	T9	9 771	446	63
食材的影响	大豆油	玉米	铁架烧烤	T8	9 447	667	64
		五花肉		T1	4 996	13	60
		鲑鱼		T10	5 634	202	60
		鸡肉		T6	5 514	20	64
油品的影响	大豆油	玉米	铁架烧烤	T8	9 447	667	64
	玉米油			T11	9 401	624	62
	葵花籽油			T12	9 252	475	62
	大豆油	土豆	炒	T13	8 000	615	33
	玉米油			T14	6 900	460	41
	葵花籽油			T15	6 900	640	34

1.2 有机颗粒物分析方法

采用超声提取、柱前衍生、气相色谱-质谱(GC-MS)方法对采集到石英滤膜上颗粒物中的

有机物种类和浓度进行分析,利用内标-工作曲线法进行定性定量测定,共分析正构烷烃、多环芳烃、脂肪酸、二元羧酸、芳香酸、甾烷甾醇、

左旋葡聚糖等符合餐饮源排放特征的 94 种有机物^[12]. 具体而言, 采集颗粒物的石英膜首先加入定量的同位素标记内标 20 μL , 然后用甲醇/二氯甲烷(1:3, 体积比)混合液提取 3 次, 提取液合并后, 经旋转蒸发、过滤、氮吹, 浓缩净化为 500 μL 澄清透明的溶液, 取其中一半直接进 GC-MS, 另一半与 200 μL 的 BSTFA/TMCS 进行衍生反应后进 GC-MS, 分别测定其中的非极性和极性有机物. 色谱条件参照 EPA 标准方法 TO-13A, 设定为: 进样口温度 300 $^{\circ}\text{C}$; 不分流进样; 柱箱起始温度 60 $^{\circ}\text{C}$, 保持 10 min, 以 6 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 升温到 300 $^{\circ}\text{C}$, 保持 40 min; 质谱用 SCAN 扫描方式; 离子源温度 290 $^{\circ}\text{C}$; 扫描范围 40 ~ 550 u; 溶剂延迟时间 4.0 min.

1.3 排放因子的计算方法

排放因子基于有机化合物浓度、排风管截面积、管道流速、采集时间、食材质量以及油品质量计算获得. 有机化合物的浓度乘以管道流量与采集时间得到有机化合物质量, 再除以食材质量, 可得基于食材的有机化合物排放因子, 同样用所得有机化合物质量除以油品质量, 可得基于油品的有机化

合物排放因子.

$$\text{EF(食材)} = \frac{\sum_{i=1}^{n=94} c_i \times S \times v \times t}{m(\text{食材})} \quad (1)$$

$$\text{EF(油品)} = \frac{\sum_{i=1}^{n=94} c_i \times S \times v \times t}{m(\text{油品})} \quad (2)$$

式中, EF(食材)和 EF(油品)分别为基于食材和基于油品的排放因子($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$); c_i 为第 i 种化合物的浓度($\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$); S 为管道截面积(m^2); v 为管道流速($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$); t 为采样时间(min); $m(\text{食材})$ 和 $m(\text{油品})$ 分别为实验所用的食材和油品质量(kg).

2 结果与讨论

2.1 有机颗粒物排放浓度及组成特征

2.1.1 不同烹饪方式有机颗粒物排放浓度及组成特征

烹饪方式是影响烹饪废气中有机颗粒物的化学含量及其组成的 1 个重要因素^[15]. 图 1 为不同烹饪方式烹饪废气中有机化合物的浓度及组成特征. 可以看到, 以五花肉为食材时, 在炒、铁架烧烤、煎

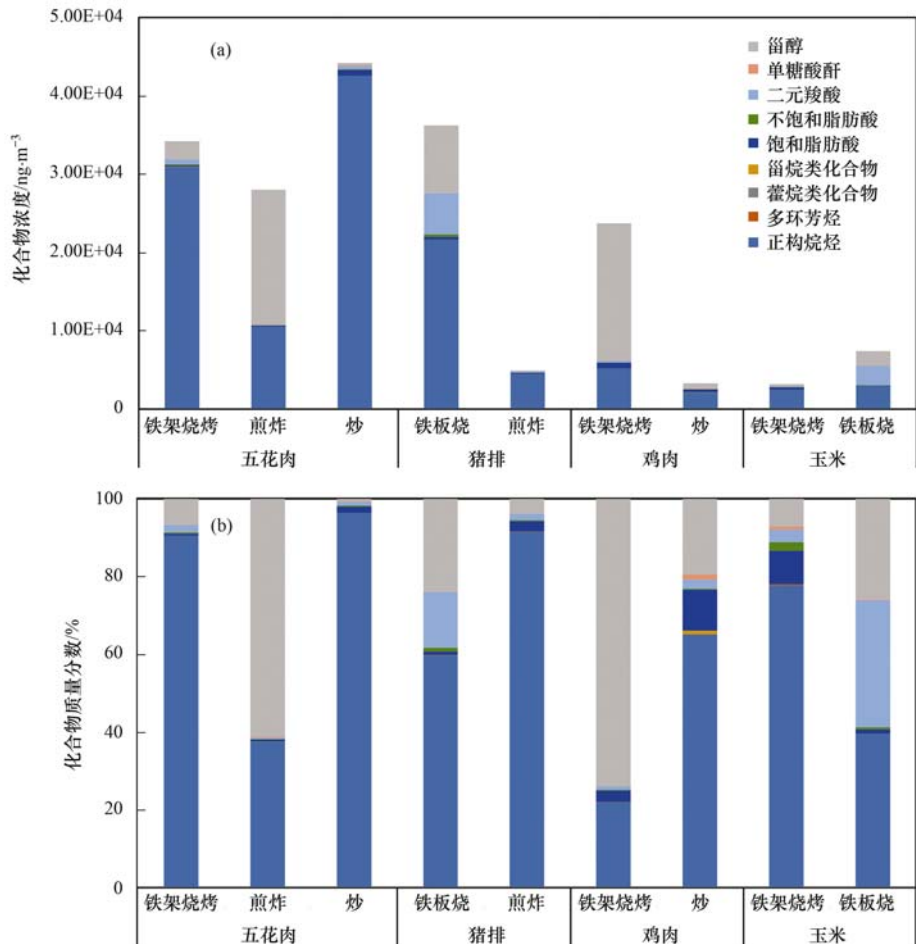


图 1 不同烹饪方式烹饪废气中有机颗粒物浓度及组成特征

Fig. 1 Concentration and composition characteristics of POMs emitted from different cooking styles

炸这 3 种烹饪方式下, 有机颗粒物的排放浓度依次递减. 炒五花肉时, 有机颗粒物的排放浓度高达 $4.42 \times 10^4 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$, 其中正构烷烃的占比(质量分数, 下同)达 96.3%; 而铁架烧烤五花肉时, 有机颗粒物的排放浓度为 $3.42 \times 10^4 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$, 正构烷烃占比为 90.5%; 煎炸五花肉时, 有机颗粒物的排放浓度为 $2.80 \times 10^4 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$, 其中的甾醇的质量分数高于正构烷烃, 为 61.2%. 而在鸡肉烹饪中, 炒鸡肉时有机颗粒物的排放浓度较铁架烧烤时低. 铁板烧猪排时, 有机污染物的排放浓度达 $3.62 \times 10^4 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$, 其中正构烷烃、甾醇和二元羧酸分别占 59.8%、23.9% 和 14.4%; 而煎炸猪排时, 排放浓度仅为 $0.49 \times 10^4 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$, 其中正构烷烃达 91.5%. 铁板烧玉米时, 有机化合物的排放量也同样高于其他烹饪方式, 其排放量为 $0.74 \times 10^4 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$, 其中正构烷烃、二元羧酸和甾醇分别占 39.5%、32.7% 和 26.0%. 通过比较可得, 烹饪方式为铁板烧时, 废气中含量较多的有机化合物为正构烷烃、二元羧酸和甾醇; 而烹饪方式为炒时, 废气中正构烷烃含量高达 95.0%.

2.1.2 不同食材有机颗粒物排放浓度及组成特征

不同食材烹饪废气中有机颗粒物浓度及组成特征见图 2. 从中可见, 铁架烧烤玉米时, 有机颗粒物的排放浓度仅为 $0.32 \times 10^4 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$, 而相同条件下烹饪五花肉时, 有机颗粒物的排放浓度达 $3.42 \times 10^4 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$, 约为铁架烧烤玉米时的 11 倍. 这与已有研究中肉类烹饪过程排放的有机颗粒物高于蔬菜

烹饪过程排放的有机颗粒物的结论一致^[16]. 铁架烧烤肉类时, 有机颗粒物的排放浓度在 $(2.16 \sim 3.42) \times 10^4 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ 之间.

玉米烹饪过程的餐饮废气中含量较多的有机颗粒物为正构烷烃、饱和脂肪酸和甾醇, 其质量分数分别为 77.8%、8.6% 和 7.1%; 五花肉和鱿鱼烹饪过程的废气中含量最高的有机颗粒物均为正构烷烃, 分别占 90.5% 与 97.1%; 而在鸡肉烹饪的废气中含量最高的有机颗粒物为甾醇, 占 74.0%, 这是由于鸡肉中脂肪的含量高于其他食材^[16].

2.1.3 不同油品有机颗粒物排放浓度及组成特征

烹饪使用的油品种类也会影响烹饪烟气中有机颗粒物的浓度及组成^[15,17]. 图 3 为不同油品烹饪废气中有机颗粒物的浓度及组成特征. 可以看到在 2 组实验中, 使用葵花籽油烹饪时, 有机颗粒物的排放浓度均高于使用玉米油与使用大豆油时. 葵花籽油铁架烧烤蔬菜时, 有机颗粒物的平均排放浓度达 $4.63 \times 10^4 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$, 分别高于使用玉米油时的 $2.16 \times 10^4 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ 和使用大豆油时的 $0.83 \times 10^4 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$. 葵花籽油铁架烧烤玉米时, 餐饮废气中含量最高的有机颗粒物为甾醇(72.5%), 其次是二元羧酸(19.2%)和正构烷烃(6.8%); 而大豆油与玉米油铁架烧烤玉米时, 含量最高的有机颗粒物则均是正构烷烃, 其质量分数分别为 77.8% 和 89.2%, 这可能是由于种子油与大豆油组成之间存在的差异所导致的.

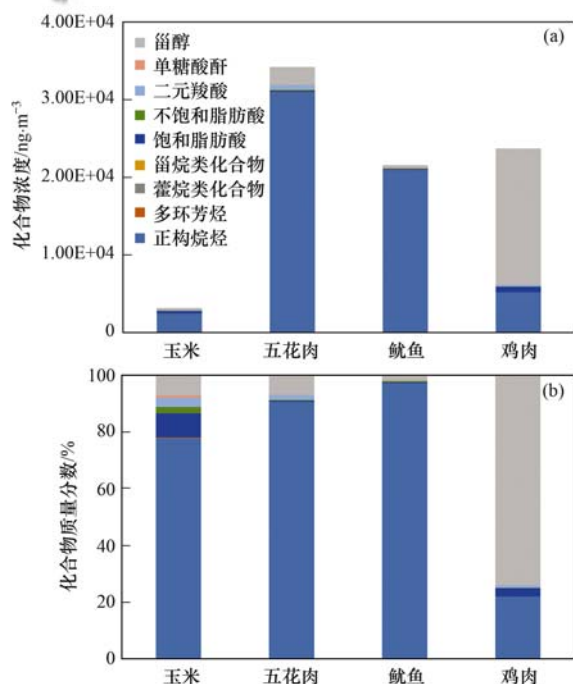


图 2 不同食材烹饪废气中有机颗粒物浓度及组成特征

Fig. 2 Concentration and composition characteristics of POMs emitted from different cooking ingredients

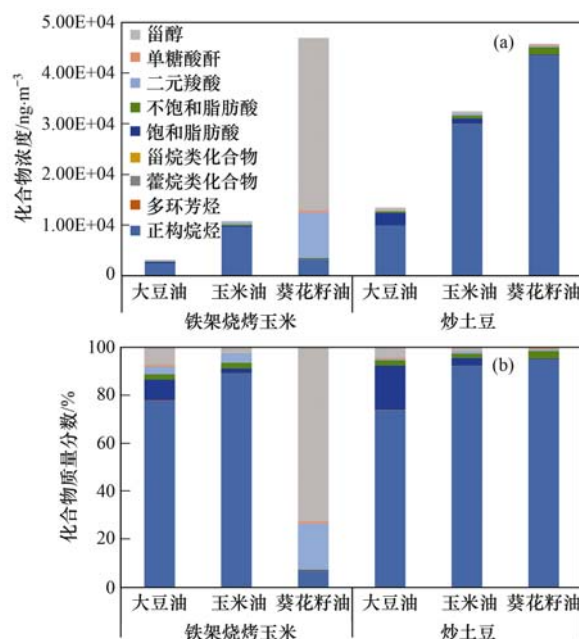


图 3 不同油品烹饪废气中有机颗粒物浓度及组成特征

Fig. 3 Concentration and composition characteristics of POMs emitted from different cooking oils

2.2 基于食材与油品的有机颗粒物排放因子

2.2.1 基于食材的有机颗粒物排放因子

图4给出了不同烹饪方式、食材和油品条件下的基于食材的有机颗粒物排放因子。有机颗粒物的排放因子随着所用烹饪装置、烹饪条件与肉类脂肪含量的不同而变化^[18]。

烹饪肉类食材(五花肉、猪排和鸡肉)时,铁架烧烤、铁板烧、炒和煎炸这4类烹饪方式的平均排放因子分别为0.022 9、0.021 7、0.014 6和0.014 3 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。其中,炒和煎炸2种烹饪方式的食材排放因子相近;铁板烧和铁架烧烤2种烹饪方式的排放因子相近,且大于炒和煎炸2种烹饪方式。这与已有研究中,炭烤比油炸排放产生更多有机颗粒物的结论一致^[18]。具体到单一食材时,以五花肉为食材时,炒和铁架烧烤2种烹饪方式的食材排放因子大于烹饪方式为煎炸时;以猪排为食材时,烹饪方式为铁板烧的食材排放因子大于烹饪方式为煎炸时;以鸡肉为食材时,烹饪方式为铁架烧烤的食材排放因子大于烹饪方式为炒的。

蔬菜烹饪过程的食材排放因子远小于肉类烹饪过程^[16]。大豆油铁架烧烤玉米时的食材排放因子为0.001 4 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$;而相同实验条件下烹饪五花肉、鸡肉和鱿鱼时的食材排放因子分别为0.026 5、0.018 4和0.015 3 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,分别为烹饪玉米时的18、13和11倍;这与以往研究结论基本一致^[16]。

油品为葵花籽油时的食材排放因子远大于油品为玉米油与大豆油时。铁架烧烤玉米时,油品为葵花籽油时的食材排放因子为0.021 0 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,远大于玉米油的0.004 8 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和大豆油的0.001 4 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。炒土豆时,油品为葵花籽油时的食材排放因子为0.015 0 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,大于玉米油的0.012 9 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和大豆油的0.003 7 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

2.2.2 基于油品的有机颗粒物排放因子

不同烹饪方式、食材和油品条件下的基于油品的有机颗粒物排放因子见图5。油品排放因子也很大程度地受到烹饪方式、食材与油品的影响。

以肉类为食材时,烹饪方式为铁架烧烤时有机颗粒物的单位油品排放量远大于其他烹饪方式^[18]。以五花肉为食材,烹饪方式为铁架烧烤时的有机颗粒物的油品排放因子高达10.173 0 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,分别为烹饪方式为煎炸与炒时的5倍和24倍。以鸡肉为食材时,烹饪方式为铁架烧烤时的有机颗粒物油品排放因子达5.063 0 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,是烹饪方式为炒时的262倍。

蔬菜烹饪过程的油品排放因子远小于肉类烹饪过程。以铁架烧烤为烹饪方式,以玉米为食材时的

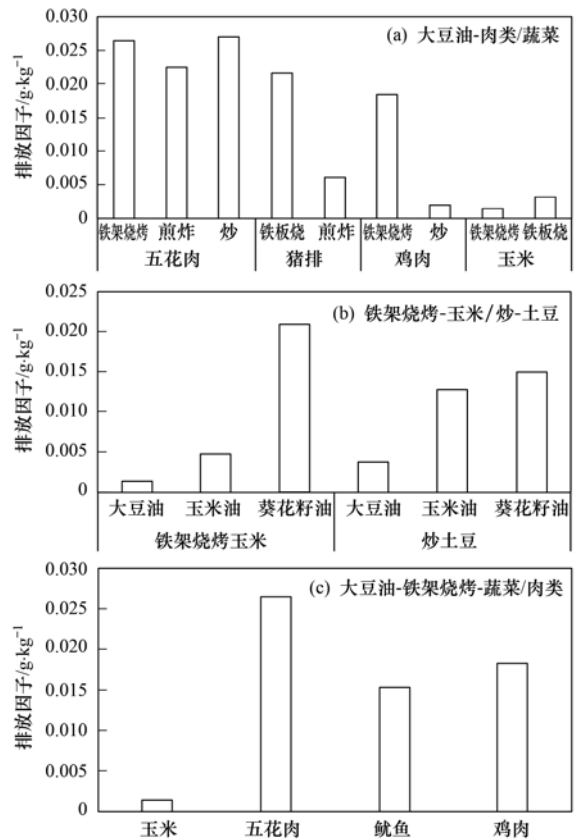


图4 基于食材的排放因子

Fig. 4 Emission factors by to amount of ingredients

油品排放因子为0.020 3 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,分别为以五花肉、鸡肉和鱿鱼为食材时的1/501、1/249和1/21,这与已有研究中铁架烧烤肉类时的油品排放因子远大于铁架烧烤蔬菜时的油品排放因子的结论一致^[16]。

不同油品的油品排放因子存在一定差异。铁架烧烤玉米时,以葵花籽油为油品时的油品排放因子为0.408 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,高于玉米油的0.071 6 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 与大豆油的0.020 3 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。与铁架烧烤玉米有所不同,炒土豆时,以玉米油为油品时的油品排放因子为0.193 0 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,略高于葵花籽油的0.162 0 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,远高于大豆油的0.048 1 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

2.3 有机颗粒物物种组分特征

总体平均而言,在可定量的餐饮排放有机颗粒物中,正构烷烃的平均占比为68.5%,甾醇的平均占比为21.1%,而脂肪酸(包括饱和脂肪酸和不饱和脂肪酸)的平均占比为5.0%,其余的有机物还包括二元羧酸、多环芳烃、单糖酸酐以及藿烷类化合物等。本研究获得的餐饮排放可定量有机颗粒物的浓度相对贡献如图6所示。

2.3.1 正构烷烃

31种C10~C40的正构烷烃被量化,平均贡献总有机物的68.9%,其中C28~C35的正构烷烃的累计平均贡献正构烷烃的99.5%,C31和C33的平均

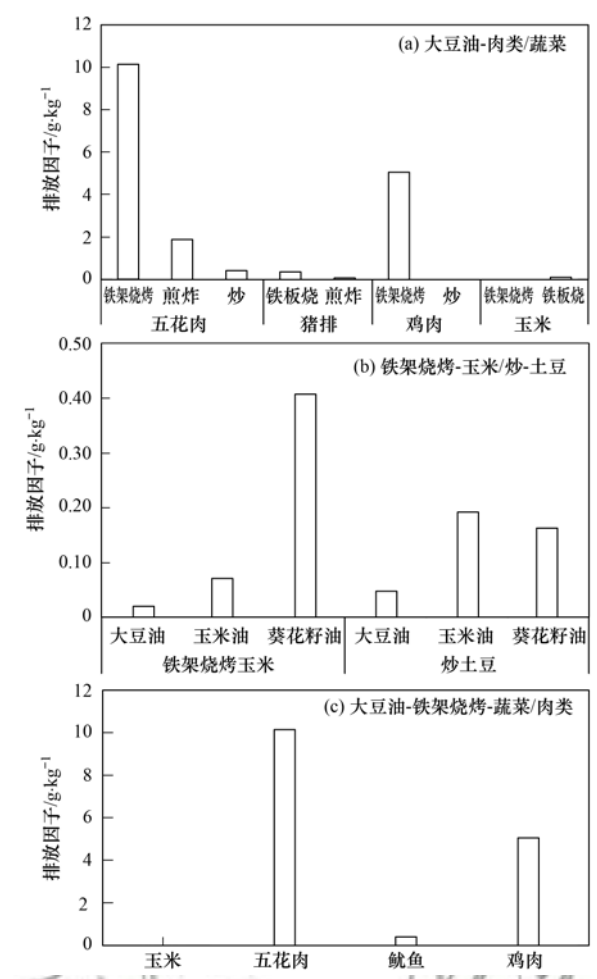


图5 基于油品的排放因子
Fig. 5 Emission factor by to amount of oils

贡献分别为 24.4% 和 73.7%, 为烹饪过程排放有机颗粒物中含量最为丰富的正构烷烃类物质 (图 6). C13 ~ C27 分布呈明显的奇数碳优势^[13,19], 最高浓度出现在 C17 与 C21 处, 从不同油品 (大豆油、玉米油、葵花籽油) 来看, 正构烷烃的分布趋势基本相似^[11].

2.3.2 甾醇

甾醇广泛地存在于动物和植物的身体组织中,

其中植物细胞膜含有 C28 和 C29 植物甾醇, 如豆甾醇以及谷固醇等; 而胆固醇在高等动物体内生物合成, 主要存在于动物脂肪和油品中^[10,20~22]. 在本研究中 (图 6), 甾醇是餐饮废气排放中含量贡献第二多的有机物, 平均贡献总有机物的 20.3%, 其中胆甾醇贡献最高 (90.1%). 就不同烹饪方式而言, 烹饪方式为煎炸时甾醇的贡献最高, 分别为烧烤和炒时的 7 倍和 66 倍; 煎炸和烧烤五花肉时胆甾醇的相对贡献可达 95% 以上, 而豆甾醇的排放量几乎为零^[10,18,23]. 对于不同食材而言, 烧烤鸡肉时甾醇的贡献最高, 分别为烧烤五花肉和鱿鱼时的 8 倍和 51 倍, 且均以胆甾醇的相对含量最高 (95.7% ~ 97.4%), 这与这些食材中较高的胆固醇含量密切相关. 就不同油品烹饪蔬菜而言, 使用大豆油和玉米油炒土豆时废气中豆甾醇的含量达到 97.7% 和 74.1%, 这是由于豆甾醇主要存在于大豆油和其他豆类油品中^[20].

2.3.3 脂肪酸

在动物与植物脂肪中, 含量最高的脂肪酸为棕榈酸甘油酯与磷酸. C16 和 C18 脂肪酸 (包括饱和脂肪酸和不饱和脂肪酸) 是种子油和高等动物脂肪中甘油酯的主要成分^[20,24]. 在烹饪过程中甘油酯发生水解和热氧化, C16 与 C18 脂肪酸会被释放^[10].

13 种 C6 ~ C30 的偶数碳饱和脂肪酸被量化, 平均贡献总有机物的 3.2%, 其中含量较高的 3 种饱和脂肪酸分别是棕榈酸 (十六烷酸)、肉豆蔻酸 (十四烷酸) 和月桂酸 (十二烷酸), 分别平均贡献饱和脂肪酸的 34.3%、26.7% 和 20.4%, 累计平均贡献 81.4% (图 6). 对于不同烹饪方式, 炒五花肉排放的饱和脂肪酸远高于烧烤与煎炸时, 为烧烤和煎炸时的 5 倍左右. 对于不同食材, 用大豆油烧烤鸡肉时饱和脂肪酸的排放量最高, 之后依次为五花肉与鱿鱼, 烧烤鸡肉时的排放量分别约为烧烤五花

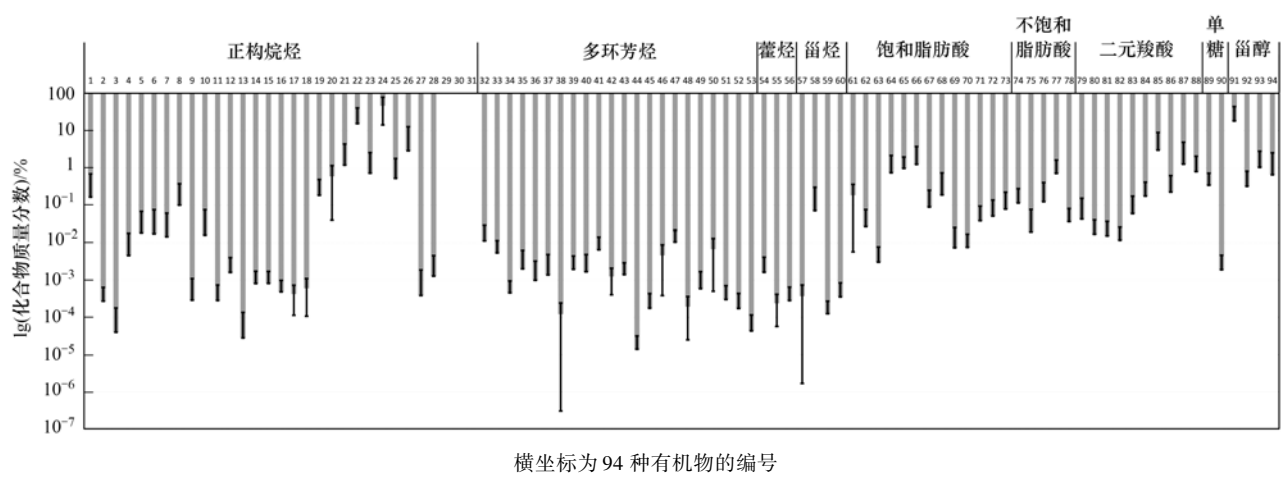


图6 烹饪过程排放有机颗粒物的平均源谱特征

Fig. 6 Average source spectrum characteristics of POMs emitted from the cooking process

肉和鱿鱼时的 5 倍和 7 倍。

5 种 C16 和 C18 的不饱和脂肪酸被量化, 平均贡献总有机物的 1.0%, 其中平均含量最高的为油酸, 贡献不饱和脂肪酸的 70.8%; 其次为亚油酸(罂酸, 12.3%)和棕榈油酸(11.4%)。对于不同烹饪方式, 炒和烧烤五花肉时的不饱和脂肪酸的排放量基本相当, 约为煎炸时的 5 倍; 炒和煎炸时, 油酸的相对含量基本相当, 高达 84.6% 和 86.5%, 而烧烤时的油酸含量只有 59.1%。就不同食材而言, 烧烤五花肉过程中不饱和脂肪酸的排放量远高于其他食材。这是由于脂肪含量较高的食材在相同的烹饪条件下, 相比于低脂肪含量的食材将排放更多的脂肪酸^[10,14,25]。

2.3.4 二元羧酸

二元羧酸是二元醛的氧化产物^[10], 其排放量小于脂肪酸^[12]。本研究中 6 种 C4 ~ C7 的二元羧酸被量化, 平均贡献总有机物的 0.3%, 其中庚二酸的平均相对含量最高(54.6%), 其次为己二酸(18.4%), 两者累计平均贡献 C4 ~ C7 二元羧酸的 73.0%。对于不同烹饪方式, 炒五花肉时 C4 ~ C7 的二元羧酸排放量最高, 分别约为煎炸和烧烤时的 4 倍和 13 倍; 炒五花肉时, 废气中的二元羧酸以庚二酸和己二酸为主, 分别贡献 51.5% 和 46.1%, 累计贡献 97.6%。而已有研究显示, 与中式烹饪有所不同, 在烹饪西式快餐时, 二元羧酸 C4 ~ C8 中排放量最大的为 C6^[10,23]。比较不同食材, 烧烤鸡肉时 C4 ~ C7 二元羧酸的排放量最大, 分别为烧烤五花肉和鱿鱼时的 7 倍和 28 倍。这与鸡肉中脂肪含量较高密切相关^[16]。在使用不同种子油烧烤玉米时, 废气中含量最高的二元羧酸为富马酸(反丁烯二酸), 这是由于富马酸可以被用作食品添加剂(酸味剂), 出现在本次实验的食材中^[26]。

本研究还对 4 种二元苯甲酸进行了量化, 平均贡献总有机物的 5.3%, 其中间-苯二甲酸的平均相对含量最高(57.0%), 其次为甲基邻苯二甲酸(23.8%), 两者累计贡献二元苯甲酸的 80.8%。对于不同烹饪方式, 烧烤五花肉时二元苯甲酸的排放量最高, 分别为炒和煎炸时的 10 倍和 33 倍; 烤五花肉时间-苯二甲酸和对-苯二甲酸的贡献分别为 48.1% 和 35.7%, 累计贡献 83.8%。对于不同食材, 烧烤五花肉时的二元苯甲酸的排放量最高, 分别为烧烤鱿鱼和鸡肉时的 16 倍和 20 倍。从不同油品来看, 以葵花籽油烧烤玉米时二元苯甲酸排放量分别约为玉米油和大豆油的 21 倍和 108 倍; 以葵花籽油为烹饪油品时间-苯二甲酸的占比高达

99.1%, 而以玉米油为烹饪油品时甲基邻苯二甲酸的含量最高(41.1%)。

2.3.5 多环芳烃

多环芳烃主要来源于含碳氢有机化合物的不完全燃烧与热解, 是稳定的有机分子, 其中一些甚至是致癌物^[27,28]。在中式烹饪废气中, 多环芳烃占总量化的化合物的百分数很小, 例如在深圳的中式餐馆中, 多环芳烃的排放量不超过量化化合物的 0.15%^[12]。同样在本研究中, 相较于正构烷烃、甾醇与脂肪酸, 多环芳烃在餐饮废气中的含量非常小, 不超过总有机物的 0.2%。餐饮废气中不同种类多环芳烃含量的多少与烹饪方式有着密切的联系。由于煎炸烹饪过程采用较高的温度且油品使用量较大, 导致多环芳烃的排放量大于其他烹饪方式^[28]。已有研究发现, 在中式烹饪中, 排放浓度最大的多环芳烃为芘^[12], 还有较高的苯并[b]荧蒽、苯并[ghi]芘排放^[29]。而在本研究中(图 6), 烹饪食材以肉类为主, 与以蔬菜为主要食材的中式烹饪有所不同, 废气中含量最高的多环芳烃为晕苯, 贡献了 29.8%; 而在烹饪蔬菜时, 大量的萘、1-甲基萘与蒽被排放, 分别贡献 25.5%、25.7% 和 16.2%, 累计贡献达 67.4%。且肉类烹饪相较于蔬菜烹饪有更多的多环芳烃被排放^[20,24]。Chiang 等^[30]在比较了葵花籽油、蔬菜油、玉米油的烟气提取物后, 发现葵花籽油烟气中含有较高浓度的苯并[a]芘($2.27 \times 10^4 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$), 而玉米油烟气中含有最低浓度的苯并[a]芘($1.87 \times 10^4 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$)。同样在本研究中, 以葵花籽油为烹饪油品时, 多环芳烃的排放量分别约为使用玉米油和大豆油的 5 倍和 6 倍。叶素芬等^[31]的研究得到基于油品的多环芳烃排放因子在 $1.67 \sim 2.28 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 而本研究中相应排放因子为 $0.01 \sim 4.07 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

2.3.6 其他组分

除上述组分外, 本研究还定量了 2 种单糖酸酐、3 种藿烷类物质, 累计对可定量有机颗粒物的总量贡献不足 0.5%。其中, 单糖酸酐组分主要是纤维素分解的主要产物^[14]; 而藿烷类物质主要来自于烹饪过程中燃料的燃烧排放^[30]。

3 结论

(1) 正构烷烃、甾醇与脂肪酸是餐饮废气中含量较多的有机化合物。正构烷烃的平均含量为 68.9%, 甾醇的平均含量是 20.3%, 而脂肪酸(包括饱和脂肪酸和不饱和脂肪酸)的平均含量为 4.2%, 其余的有机物还包括二元羧酸、多环芳烃、单糖酸酐以及藿烷类化合物等。烹饪方式、食材及

油品是影响颗粒有机物的组成特征的重要因素。

(2) 基于食材的排放因子范围在 $0.0014 \sim 0.0271 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。不同种类的食材与油品对食材排放因子有着较大的影响。蔬菜烹饪过程的食材排放因子远小于肉类烹饪过程, 油品为葵花籽油时的食材排放因子大于油品为玉米油与大豆油时。

(3) 基于油品的排放因子范围在 $0.0019 \sim 10.1730 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。油品排放因子很大程度上受到烹饪方式与食材的影响, 铁架烧烤烹饪过程的油品排放因子大于其他烹饪过程, 蔬菜烹饪过程的油品排放因子远小于肉类烹饪过程。

致谢: 感谢上海市环境科学研究院陶士康博士以及楼晟荣博士帮助开展排放模拟实验, 感谢中国科学院大学张元勋教授帮助分析有机组分, 感谢华东理工大学中德学院吴竹清同学帮助整理数据。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Schauer J J, Rogge W F, Hildemann L M, *et al.* Source apportionment of airborne particulate matter using organic compounds as tracers [J]. *Atmospheric Environment*, 1996, **30** (22): 3837-3855.
- [3] Cruz C N, Pandis S N. A study of the ability of pure secondary organic aerosol to act as cloud condensation nuclei [J]. *Atmospheric Environment*, 1997, **31** (15): 2205-2214.
- [4] Novakov T, Penner J E. Large contribution of organic aerosols to cloud-condensation-nuclei concentrations [J]. *Nature*, 1993, **365** (6449): 823-826.
- [5] Facchini M C, Mircea M, Fuzzi S, *et al.* Cloud albedo enhancement by surface-active organic solutes in growing droplets [J]. *Nature*, 1999, **401** (6750): 257-259.
- [6] Wexler A S, Ge Z Z. Hydrophobic particles can activate at lower relative humidity than slightly hygroscopic ones: a Köhler theory incorporating surface fixed charge [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1998, **103** (D6): 6083-6088.
- [7] Durant J L, Lafleur A L, Plummer E F, *et al.* Human lymphoblast mutagens in urban airborne particles [J]. *Environmental Science & Technology*, 1998, **32** (13): 1894-1906.
- [8] Bi X H, Sheng G Y, Peng P A, *et al.* Extractable organic matter in PM₁₀ from LiWan district of Guangzhou City, PR China [J]. *Science of the Total Environment*, 2002, **300** (1-3): 213-228.
- [9] Bi X H, Sheng G Y, Peng P A, *et al.* Size distribution of *n*-alkanes and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in urban and rural atmospheres of Guangzhou, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39** (3): 477-487.
- [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] 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): 567-575.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] Abdullahi K L, Delgado-Saborit J M, Harrison R M. Emissions and indoor concentrations of particulate matter and its specific chemical components from cooking: a review [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **71**: 260-294.
- [16] Buonanno G, Morawska L, Stabile L. Particle emission factors during cooking activities [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43** (20): 3235-3242.
- [17] ARB. Indoor air quality: residential cooking exposures [EB/OL]. <https://www.arb.ca.gov/research/indoor/cooking/0-Cover-TOC-Exec-Summary.PDF>, 2001-11-30.
- [18] 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.
- [19] Simoneit B R T. Characterization of organic constituents in aerosols in relation to their origin and transport: a review [J]. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 1986, **23** (3): 207-237.
- [20] 季鸿崑, 崔桂友, 徐传骏, 等. 烹饪化学基础 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1993. 674-676.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] Schauer J J, Kleeman M J, Cass G R, *et al.* Measurement of emissions from air pollution sources. 1. C₁ through C₂₉ organic compounds from meat charbroiling [J]. *Environmental Science & Technology*, 1999, **33** (10): 1566-1577.
- [24] 安银岭. 植物化学 [M]. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 1996. 311-312.
- [25] 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.
- [26] 邓虹, 雷燕. 饲用酸度调节剂中苹果酸、乳酸、乙酸、柠檬酸、富马酸、丙酸的同步测定 [J]. *饲料博览*, 2018, (6): 8-12.
- [27] Deng H, Lei Y. Determination of malic acid, lactic acid, acetic acid, citric acid, fumaric acid, propionic acid in feed acidifier [J]. *Feed Review*, 2018, (6): 8-12.
- [27] US EPA. Emissions from street vendor cooking devices (charcoal grilling) [EB/OL]. <https://www3.epa.gov/ttnecat1/dir1/mexfr.pdf>, 1999-06.
- [28] IARC. Household use of solid fuels and high-temperature frying: evaluation of carcinogenic risks to humans [R]. Lyon: IARC, 2010. 1-430.
- [29] See S W, Karthikeyan S, Balasubramanian R. Health risk

- assessment of occupational exposure to particulate-phase polycyclic aromatic hydrocarbons associated with Chinese, Malay and Indian cooking [J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 2006, **8**(3): 369-376.
- [30] Chiang T A, Wu P F, Ko Y C. Identification of carcinogens in cooking oil fumes [J]. *Environmental Research*, 1999, **81**(1): 18-22.
- [31] 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.

欢迎订阅 2019 年《环境科学》

《环境科学》创刊于 1976 年,由中国科学院主管,中国科学院生态环境研究中心主办,是我国环境科学学科中最早创刊的学术性期刊。

《环境科学》自创刊以来,始终坚持“防治污染,改善生态,促进发展,造福人民”的宗旨,报道我国环境科学领域内具有创新性高水平,有重要意义的基础研究和应用研究成果,以及反映控制污染,清洁生产和生态环境建设等可持续发展的战略思想、理论和实用技术等。

《环境科学》在国内外公开发行,并在国内外科技界有较大影响,被国内外一些重要检索系统收录,如美国医学索引 MEDLINE;美国化学文摘 CA;俄罗斯文摘杂志 AJ;美国生物学文摘预评 BP;美国医学索引 IM;日本科学技术情报中心数据库 JICST;英国动物学记录 ZR;剑桥科学文摘(CSA): *Environmental Sciences*;剑桥科学文摘(CSA): *Pollution Abstracts*;剑桥科学文摘(CAS): *Life Sciences Abstracts* 等;国内的检索系统有中国科技论文统计与引文数据库(CSTPCD);中文科技期刊数据库(维普);中国期刊全文数据库(CNKI);数字化期刊全文数据库(万方);中国科学引文数据库(CSCD);中国生物学文摘等。

全国各地邮局均可订阅,如有漏订的读者可直接与编辑部联系,办理补订手续。

《环境科学》2019 年全年 12 期。

国内统一连续出版物号:CN 11-1895/X

国际标准连续出版物号:ISSN 0250-3301

国外发行代号:M 205

国内邮发代号:2-821

编辑部地址:北京市海淀区双清路 18 号(2871 信箱) 邮编:100085

电话:010-62941102;传真:010-62849343;E-mail: hjkk@rcees.ac.cn;网址: www.hjkk.ac.cn

CONTENTS

Pollution Characteristics and Regional Transport of Atmospheric Particulate Matter in Beijing from October to November, 2016	ZHANG Han-yu, CHENG Shui-yuan, YAO Sen, <i>et al.</i> (1999)
Chemical Compositions, Mass Concentrations, and Emission Factors of Particulate Organic Matters Emitted from Catering	WANG Hong-li, JING Sheng-ao, QIAO Li-ping (2010)
Size Distributions of Aerosol During the Summer at the Summit of Mountain Taishan (1534 m) in Central East China	SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, YIN Yan, <i>et al.</i> (2019)
Concentration Characteristics and Source Analysis of PM _{2.5} During Wintertime in Zhengzhou-Xinxiang	YAN Guang-xuan, ZHANG Pu-zhen, HUANG Hai-yan, <i>et al.</i> (2027)
Scenario Analysis of PM _{2.5} Concentration Targets and Milestones in China	HE Jin-yu, YAN Li, WANG Yan-chao, <i>et al.</i> (2036)
PM _{2.5} Emission Characteristics and Estimation of Emission Reduction Potential from Typical Industrial Sources in Anyang	DU Xiao-shen, YAN Li, HE Jin-yu, <i>et al.</i> (2043)
Emission Characteristics and List of Inorganic Elements in Fine Particles of Typical Industrial Kilns in Zhengzhou City	ZHAO Qing-yan, HAN Shi-jie, ZHANG Yi-shun, <i>et al.</i> (2052)
Composition and Atmospheric Reactivity of Ambient Volatile Organic Compounds(VOCs) in the Urban Area of Nanjing, China	QIAO Yue-zhen, CHEN Feng, ZHAO Qiu-yue, <i>et al.</i> (2062)
Formation Potential of Ozone and Secondary Organic Aerosol of VOCs from Fossil Fuel Combustion in Lanzhou City	LIU Zhen, ZHU Yu-fan, GUO Wen-kai, <i>et al.</i> (2069)
Inventory and Characteristics of Biogenic Volatile Organic Compounds (BVOCs) for 12 Deciduous Fruit Trees	LI Shuang-jiang, YUAN Xiang-yang, LI Qi, <i>et al.</i> (2078)
Ion Concentrations and Their Spatial Variability in Underground Water and Surface Water in Typical Terrestrial Ecosystems in China	HUANG Li, ZHANG Xin-yu, YUAN Guo-fu, <i>et al.</i> (2086)
Status of Antibiotic Contamination and Ecological Risks Assessment of Several Typical Chinese Surface-Water Environments	LIU Xi, WANG Zhi, WANG Xue-lei, <i>et al.</i> (2094)
Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water Bodies in Seven Basins of China	FAN Bo, WANG Xiao-nan, HUANG Yun, <i>et al.</i> (2101)
Occurrence, Input, and Seasonal Variations of Poly- and Perfluoroalkyl Substances (PFASs) in Rivers and Drain Outlets from the Dalian Coastal Area, China	CHEN Hong, HAN Jian-bo, ZHANG Can, <i>et al.</i> (2115)
Space-time Characteristics and Environmental Significance of Stable Isotopes in Precipitation at an Arid Inland River Basin	YUAN Rui-feng, LI Zong-xing, CAI Yu-qin, <i>et al.</i> (2122)
Regional Evolution and Control Factors of Karst Groundwater in Liulin Spring Catchment	HUNAG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, <i>et al.</i> (2132)
Major Ionic Characteristics and Controlling Factors of Karst Groundwater at Xiangshui, Chongzuo	ZHOU Jin-mei, JIANG Zhong-cheng, XU Guang-li, <i>et al.</i> (2143)
Analysis of Transport and Transformation Characteristics Between Dissolved Phosphorus and Particulate Phosphorus in Water of the Three Gorges Reservoir	QIN Yan-wen, HAN Chao-nan, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (2152)
Vertical Distribution Profiles and Release Potential of Mainstream Column Sediments in the Three Gorges Reservoir After Impoundment to 175 m	LI Rui, PAN Chan-juan, TANG Xian-qiang, <i>et al.</i> (2160)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Phosphorus in the Dongting Lake at Different Water Periods	LI Ying-jie, WANG Li-jing, LI Hong, <i>et al.</i> (2170)
Effects of Exogenous Carbon Addition on Equilibrium Phosphate Concentration and Risk of Phosphorus Release from Sediments in the Shiwuli River, Chaohu Lake Basin	LI Ru-zhong, BAO Qin, DAI Yuan (2178)
Spatial Distribution of Organic Phosphorus in Sediment and Its Environmental Implication in the Upper Stream of Minjiang River	XU Jian, YUAN Xu-yin, YE Hong-meng, <i>et al.</i> (2186)
Nitrogen and Phosphorus Removal by Integrated Ecological Engineering Treatment System in a Small Agricultural Watershed	JIANG Qian-wen, LIU Feng, PENG Ying-xiang, <i>et al.</i> (2194)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in River Sediments from Lake Taihu Basin	ZHANG Jie, GUO Xi-ya, ZENG Ye, <i>et al.</i> (2202)
Temporal and Spatial Variation of Mercury in the Water of the Ruxi River Estuary, a Typical Tributary of the Three Gorges Reservoir Area	MA Wei-bin, CHEN Qiu-yu, YIN De-liang, <i>et al.</i> (2211)
Mercury Distribution Characteristics and Its Mass Balance in a Multifunctional Urban Wetland	LIU Wei-hao, WANG Yong-min, FAN Yu-fei, <i>et al.</i> (2219)
Distribution Characteristics of Mercury in Different Urban Constructed Wetlands	FAN Yu-fei, LIU Wei-hao, SUN Tao, <i>et al.</i> (2226)
Effects of Microplastics on Antibiotic Resistance Genes in Estuarine Sediments	HUANG Fu-yi, YANG Kai, ZHANG Zi-xing, <i>et al.</i> (2234)
Comparison and Source Apportionment of PAHs Pollution of Runoff from Roads in Suburb and Urban Areas of Shanghai	WU Jie, XIONG Li-jun, WU Jian, <i>et al.</i> (2240)
Characteristics of Phytoplankton Community and Its Relationship with Environmental Factors in Different Regions of Yilong Lake, Yunnan Province, China	WANG Zhen-fang, ZHANG Wei, YANG Li, <i>et al.</i> (2249)
Algal Bloom and Mechanism of Hypoxia in the Metalimnion of the Lijiahe Reservoir During Thermal Stratification	LIU Xue-qing, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2258)
Allelopathic Effects and Allelochemicals of <i>Myriophyllum elatinoide</i> s on <i>Microcystis aeruginosa</i> and <i>Selenastrum capricornutum</i>	BI Ye-liang, WU Shi-min, ZHOU Si-ning, <i>et al.</i> (2265)
Removal Efficiency of Trichloroacetamide by UV/Sodium Sulfite	FU Zhi-xuan, GUO Ying-qing, CHU Wen-hai (2271)
Influencing Factors and Transformation Mechanism of Venlafaxine Degradation by UV	LÜ Juan, XU Zhi-wei, WANG Yan (2278)
Mechanism of Synergistic Adsorption of Arsenic and Cadmium by Aluminium-substituted Ferrihydrites	HUANG Bo, GUO Zhao-hui, XIAO Xi-yuan, <i>et al.</i> (2287)
Fluoride Removal Efficiency of Novel Material: Magnetite Core/Zirconia Shell Nanocomposite	FANG Wen-kan, LI Xiao-di, FANG Jing, <i>et al.</i> (2295)
Impact Mechanisms of Carboxyl Group Modified Cathode on Acetate Production in Microbial Electrosynthesis Systems	QI Jia-xin, ZENG Cui-ping, LUO Hai-ping, <i>et al.</i> (2302)
Partial Nitrification and Denitrification of Low C/N Ratio Sewage Based on Zoning Oxygen and Dissolved Oxygen Control	WU Chun-lei, RONG Yi, LIU Xiao-peng, <i>et al.</i> (2310)
Start-up Performance of Low-substrate Anaerobic Ammonium Oxidation Under Different COD Concentrations	MA Yan-hong, ZHAO Zhi-chao, AN Fang-jiao, <i>et al.</i> (2317)
Partial Nitrification Fast Start-up and Stable Performance of 15°C SBBR	SUN Yi-qi, BIAN Wei, LI Jun, <i>et al.</i> (2326)
Effects of Long-term Poly-P Deficiency on the Metabolic Properties of <i>Accumulibacter</i> in AO-SBR System	WANG Shao-po, LI Zhu, ZHAO Le-dan, <i>et al.</i> (2333)
Extracellular Polymeric Substances of ANAMMOX Granular Sludge and Its Effects on Sludge Surface Characteristics	YANG Ming-ming, LIU Zi-han, ZHOU Yang, <i>et al.</i> (2341)
Treatment of Piggery Biogas Slurry by Enhanced Biological Contact Oxidation with HN-AD Bacteria	LIU Xiang-yang, ZHANG Qian, WU Heng, <i>et al.</i> (2349)
Effect of Different Temperatures on the Performance of Autotrophic Nitrogen Removal and Microbial Community from Swine Wastewater	HUANG Fang-yu, DENG Liang-wei, YANG Hong-nan, <i>et al.</i> (2357)
Characteristics and Regional Heterogeneity of Eukaryotic Microbial Community in Wastewater Treatment Plants	QIN Wen-tao, ZHANG Bing, SUN Chen-xiang, <i>et al.</i> (2368)
Effects of Wetland Reclamation on Soil Microbial Community Structure in the Sanjiang Plain	WANG Na, GAO Jie, WEI Jing, <i>et al.</i> (2375)
Distribution Pattern and Diversity Maintenance Mechanisms of Fungal Community in Subalpine Lakes	LIU Jin-xian, LI Cui, LUO Zheng-ming, <i>et al.</i> (2382)
Influence of Biochar Amendment on Soil Denitrifying Microorganisms in Double Rice Cropping System	LIU Jie-yun, QIU Hu-sen, WANG Cong, <i>et al.</i> (2394)
Effects of Plastic Film Mulching and Nitrogen Fertilizer Application on CH ₄ Emissions from a Vegetable Field	NI Xue, JIANG Chang-sheng, CHEN Shi-jie, <i>et al.</i> (2404)
Effects of Water Deficit on Greenhouse Gas Emission in Wheat Field in Different Periods	WANG Xiao-yun, CAI Huan-jie, LI Liang, <i>et al.</i> (2413)
Effects of Different Fertilization Modes on Greenhouse Gas Emission Characteristics of Paddy Fields in Hot Areas	TIAN Wei, WU Yan-zheng, TANG Shui-rong, <i>et al.</i> (2426)
Effects of Cyclical Temperature Fluctuations on Organic Carbon Mineralization in Purple Soil	ZENG Man-man, CI En, FAN Jing-jing, <i>et al.</i> (2435)
Cd Content Characteristics and Ecological Risk Assessment of Paddy Soil in High Cadmium Anomaly Area of Guangxi	SONG Bo, WANG Fo-peng, ZHOU Lang, <i>et al.</i> (2443)
Remediation Potential of <i>Ageratum conyzoides</i> L. on Cadmium Contaminated Farmland	ZHANG Yun-xia, SONG Bo, BIN Juan, <i>et al.</i> (2453)
Evaluation of the Potential Agricultural Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Contaminated Soil by Planting <i>Lactuca sativa</i> L.	JIAO Hai-hua, GUO Jia-jia, ZHANG Jing-min, <i>et al.</i> (2460)
Impacts of Land Use and Landscape Patterns on Heavy Metal Accumulation in Soil	SHU Xin, LI Yan, LI Feng, <i>et al.</i> (2471)
Pollution Characteristics and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Surface Soil Around a Municipal Solid Waste Incineration Power Plant	LÜ Zhan-lu, ZHANG Jin-liang, LU Shao-you, <i>et al.</i> (2483)