

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.4

第40卷 第4期

目次

南京江北新区大气单颗粒来源解析及混合状态	于兴娜, 时政, 马佳, 李梅, 龚克坚(1521)
西安市 PM _{2.5} 中碳质气溶胶污染特征	牟臻, 陈庆彩, 王羽琴, 沈振兴, 华晓羽, 张梓萌, 孙浩堯, 王玛敏, 张立欣(1529)
太原市冬季 PM _{2.5} 化学组分特征与来源解析	刘素, 马彤, 杨艳, 高健, 彭林, 曹力媛, 逢妮妮, 张浩杰(1537)
郑州市大气细颗粒物中水溶性离子季节性变化特征及其源解析	闫广轩, 张靖雯, 雷豪杰, 黄海燕, 唐明双, 曹治国, 李云蓓, 樊静, 王跃思, 李怀刚(1545)
珠海市郊区大气 PM _{2.5} 中元素特征及重金属健康风险评价	杨毅红, 贾燕, 卞国建, 于晓巍, 钟昌琴, 全鼎余(1553)
一次沙尘事件对沿海及海洋大气气溶胶中金属粒径分布的影响	金同俊, 祁建华, 郝梓延, 林学辉(1562)
基于 SOA 转化机制的沧州市重点企业秋冬季大气污染模拟	高爽, 伯鑫, 马岩, 雷团团, 王刚, 李时蓓, 陆朝阳, 毛娜, 郝明亮, 黄向峰(1575)
京津冀大气污染变化规律及其与植被指数相关性分析	孙爽, 李令军, 赵文吉, 齐梦溪, 田欣, 李珊珊(1585)
2015~2017年北京及近周边平房燃煤散烧及其污染排放遥感测算	赵文慧, 李令军, 鹿海峰, 姜磊, 张立坤, 王新辉, 邱昀(1594)
基于地基遥感的杭州地区气溶胶光学特性	齐冰, 车慧正, 徐婷婷, 杜荣光, 胡德云, 梁卓然, 马千里, 姚杰(1604)
四川省人为源挥发性有机物组分清单及其臭氧生成潜势	周子航, 邓也, 谭钦文, 吴柯颖, 宋丹林, 黄凤霞, 周小玲(1613)
餐饮源挥发性有机物组成及排放特征	高雅琴, 王红丽, 许睿哲, 景盛翱, 刘跃辉, 彭亚荣(1627)
广州番禺大气成分站一次典型光化学污染过程 PAN 和 O ₃ 分析	邹宇, 邓雪娇, 李菲, 殷长泰(1634)
北京市典型道路扬尘化学组分特征及年际变化	胡月琪, 李萌, 颜旭, 张超(1645)
南昌市扬尘 PM _{2.5} 中多环芳烃的来源解析及健康风险评价	于瑞莲, 郑权, 刘贤荣, 王珊珊, 赵莉斯, 胡恭任(1656)
道路扬尘排放因子建立方法与应用	樊守彬, 杨涛, 王凯, 李雪峰(1664)
现实工况下挖掘机电尾气排放特征分析	马帅, 张凯山, 王帆, 庞凯莉, 朱怡静, 李臻, 毛红梅, 胡宝梅, 杨锦锦, 王斌(1670)
雾-霾天人体平均呼吸高度处不同粒径气溶胶的微生物特性	杨唐, 韩云平, 李琳, 刘俊新(1680)
霾天能见度参数化方案改进及预报效果评估	赵秀娟, 李梓铭, 徐敬(1688)
支持向量机回归在臭氧预报中的应用	苏筱倩, 安俊琳, 张玉欣, 梁静舒, 刘静达, 王鑫(1697)
基于中国电网结构及一线典型城市车辆出行特征的 PHEV 二氧化碳排放分析	郝旭, 王贺武, 李伟峰, 欧阳明高(1705)
岩溶槽谷区地下河硝酸盐来源及其环境效应: 以重庆龙凤槽谷地下河系统为例	段世辉, 蒋勇军, 张远瞩, 曾泽, 王正雄, 吴韦, 彭学义, 刘九缠(1715)
胶州湾表层水体中邻苯二甲酸酯的污染特征和生态风险	刘成, 孙翠竹, 张智, 唐燎, 邹亚丹, 徐擎擎, 李锋民(1726)
湛江湾沉积物中六六六(HCHs)、滴滴涕(DDTs)有机氯农药的分布特征与风险评估	彭诗云, 彭平安, 孔德明, 陈法锦, 于赤灵, 李嘉诚, 梁宇钊, 宋建中(1734)
生态净化系统中 DOM 光学特性及影响因素分析: 以盐龙湖春季为例	马睿, 李璇, 王莲, 王家新, 马卫星, 丁成, 吴向阳(1742)
溶解性有机物(DOM)与区域土地利用的关系: 基于三维荧光-平行因子分析(EEM-PARAFAC)	李昀, 魏鸿杰, 王侃, 张招招, 于旭彪(1751)
汉丰湖流域农业面源污染氮磷排放特征分析	谢经朝, 赵秀兰, 何丙辉, 李章安(1760)
基于 RZWQM 模型模拟太行山低山丘陵区农田土壤硝态氮迁移及淋溶规律	郑文波, 王仕琴, 刘丙霞, 雷玉平, 曹建生(1770)
澜沧江流域梯级水库建设下水体营养盐和叶绿素 a 的空间分布特征	程豹, 望雪, 马金川, 杨正健, 刘德富, 马骏(1779)
福州地区海湾和河口潮汐沼泽湿地秋季上覆水营养盐分布特征	何露露, 杨平, 谭立山, 仝川, 黄佳芳(1788)
尾水受纳河流中 PhACs 在传统水相中的分布及环境风险	王硕, 刘建超, 郑超亚, 张吉琛, 许嘉诚, 徐莹莹, 陆光华(1797)
绿色屋顶雨洪调控能力与效益评价	李俊生, 尹海伟, 孔繁花, 陈佳宇, 邓金玲(1803)
超声活化过硫酸盐降解水中典型臭味	孙昕, 孙杰, 李鹏飞, 汤加刚, 杨晴, 唐晓(1811)
金属有机框架 MIL-53(Fe) 可见光催化还原水中 U(VI)	闫增元, 习海玲, 袁立永(1819)
覆盖材料对洱海不同湖区沉积物溶解态有机磷和无机磷释放影响及差异	龚佳健, 倪兆奎, 肖尚斌, 赵海超, 席银, 王圣瑞(1826)
氢氧化铜改性介孔稻壳生物炭除磷性能	许润, 石程好, 唐倩, 石稳民, 康建雄, 任拥政(1834)
改性污泥基生物炭的性质与重金属吸附效果	陈坦, 周泽宇, 孟瑞红, 王洪廷, 陆文静, 金军, 刘颖(1842)
纳米磁性磷酸二氢钙对 Cd 的吸附、回收与再生	李玉娇, 杨志敏, 陈玉成, 黄磊, 唐海燕(1849)
赤铁矿抑制硫酸盐废水厌氧消化产甲烷过程中硫化氢形成与机制	黄绍福, 叶捷, 周顺桂(1857)
微藻膜反应器处理海水养殖废水性能及膜污染特性	马航, 李之鹏, 柳峰, 徐仲, 尤宏, 王芳, 陈其伟(1865)
生活污水预沉淀-SNAD 颗粒污泥工艺小试	李冬, 崔雅倩, 赵世勋, 刘志诚, 张杰(1871)
生活污水与人工配水对好氧颗粒污泥系统的影响	李冬, 王樱桥, 李帅, 张杰, 王玉刚(1878)
硫磺/硫铁矿自养反硝化系统脱氮性能	周娅, 买文宁, 梁家伟, 代吉华, 牛颖, 李伟利, 唐启(1885)
异养硝化细菌 <i>Pseudomonas putida</i> YH 的脱氮特性及降解动力学	汪旭晖, 杨垒, 任勇翔, 陈宁, 肖倩, 崔坤, 鄯丹(1892)
污泥龄及 pH 值对反硝化除磷工艺效能的影响	韦佳敏, 黄慧敏, 程诚, 蒋志云, 刘文如, 沈耀良(1900)
盐度条件下 ANAMMOX-EGSB 反应器颗粒污泥微生物群落	王晗, 李瀚翔, 陈猷鹏, 郭劲松, 晏鹏, 方芳(1906)
内源碳 PHA 的贮存对混合菌耐低温特性的影响	杨建鹏, 张健, 田晴, 朱艳彬, 李方, Wolfgang Sand(1914)
中国市政污泥中磷的含量与形态分布	王超, 刘清伟, 耿音, 程柳, 王宁, 李彩丹, 毛宇翔(1922)
广州市售水产品中全氟烷基化合物的污染特征和安全风险评价	王旭峰, 王强, 黎智广, 黄珂, 李刘冬, 赵东豪(1931)
长江上游典型农业源溪流溶存氧化亚氮(N ₂ O)浓度特征及影响因素	田琳琳, 王正, 胡磊, 任光前, 朱波(1939)
内蒙古河套灌区不同盐碱程度土壤 CH ₄ 吸收规律	杨文柱, 焦燕, 杨铭德, 温慧洋(1950)
水稻光合碳在植株-土壤系统中分配与稳定对施磷的响应	王莹莹, 肖谋良, 张昀, 袁红朝, 祝贞科, 葛体达, 吴金水, 张广才, 高晓丹(1957)
土壤水分和温度对西南喀斯特棕色石灰土无机碳释放的影响	徐学池, 黄媛, 何寻阳, 王桂红, 苏以荣(1965)
黄土丘陵区侵蚀坡面土壤微生物量碳时空动态及影响因素	覃乾, 朱世硕, 夏彬, 赵允格, 许明祥(1973)
农用地土壤抗生素组成特征与积累规律	孔晨晨, 张世文, 聂超甲, 胡青青(1981)
生物发酵制药 VOCs 与臭味治理技术研究与进展	王东升, 朱新梦, 杨晓芳, 焦茹媛, 赵珊, 宋荣娜, 吕明哈, 杨敏(1990)
《环境科学》征订启事(1612)	《环境科学》征稿简则(1787)
信息(1663, 1796, 1833)	

餐饮源挥发性有机物组成及排放特征

高雅琴^{1,2}, 王红丽^{1*}, 许睿哲^{1,2}, 景盛翱¹, 刘跃辉^{1,2}, 彭亚荣^{1,2}

(1. 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; 2. 复旦大学环境科学与工程系, 上海 200433)

摘要: 餐饮油烟是城市挥发性有机物(VOCs)的重要来源之一, 对人体健康有较大的危害性, 对室内外空气质量也有重要的影响, 因此对其排放特征的研究具有十分重大的意义. 本实验通过模拟油的加热及烹饪过程, 利用气相色谱-质谱联用仪(GC-MS), 以油品、调味料和菜品为变量, 对不同情况下排放油烟中 VOCs 的排放特征及化学组成进行了分析. 结果表明, 油品的排放因子范围为 0.81 ~ 2.53 g·kg⁻¹, 主要排放卤代烃和烷烃; 调味料的排放因子范围为 25.06 ~ 40.18 g·kg⁻¹, 主要排放烷烃; 辣椒炒肉排放量远高于番茄炒蛋, 辣椒炒肉主要排放卤代烃, 番茄炒蛋主要排放芳香烃和烷烃.

关键词: 挥发性有机物(VOCs); 餐饮排放; 气相色谱-质谱联用仪(GC-MS); 排放因子; 化学组成

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)04-1627-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201808069

Characterization of Volatile Organic Compounds from Cooking Emissions

GAO Ya-qin^{1,2}, WANG Hong-li^{1*}, XU Rui-zhe^{1,2}, JING Sheng-ao¹, LIU Yue-hui^{1,2}, PENG Ya-rong^{1,2}

(1. State Environmental Protection Key Laboratory of Formation and Prevention of the Urban Air Complex, Shanghai Academy of Environmental Sciences, Shanghai 200233, China; 2. Department of Environment Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: Volatile organic compounds (VOCs) do great harm to human health, and also have some impact on air quality. Cooking is one of the important sources of VOCs, so the study of cooking emissions is of great significance. By simulating the heating of oil and cooking, the characteristics and chemical composition of VOCs emissions for different types of oil fumes were analyzed by gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS), using different oils, seasonings, and dishes as variables. The results show that the emission factors of the oils range from 0.81 to 2.53 g·kg⁻¹, and the emissions are dominated by halogenated hydrocarbons and alkanes. The emission factors of the seasonings range from 25.06 to 40.18 g·kg⁻¹, and the seasonings mainly emit alkanes. The quantity of emissions from chili fried meat is much higher than that of tomato scrambled eggs, and the chili fried meat mainly emits halogenated hydrocarbons, while tomato scrambled eggs mainly emit aromatic hydrocarbons and alkanes.

Key words: volatile organic compounds (VOCs); cooking emission; gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS); emission factors; chemical compositions

餐饮油烟废气一直以来被认为是中国城市挥发性有机物(volatile organic compounds, VOCs)的主要源头之一^[1~4], 对人体健康有着不利影响^[5~7]; 油烟废气中的醛类会散发臭气, 还有 1,3-丁二烯、芳香烃等致癌物质^[8,9]. 有研究表明, 不吸烟的中国女性患肺癌的概率甚至高于吸烟的中国男性, 其中主要原因之一就是厨房油烟^[10,11]. 此外, 餐饮 VOCs 中的含氧化合物和烯烃具有光化学活性, 是臭氧和二次有机气溶胶的前体物^[7,9,12], 对光化学烟雾的形成有重要影响^[12~16].

餐饮排放的 VOCs 主要是在烹饪的高温条件下, 食用油和食物发生热氧化和热分解等化学反应生成, 其组成和排放特征受多种因素的影响^[11,16,17]. Klein 等^[3]研究了油加热、烤肉、少量油炸和深炸等过程中的 VOCs 排放情况, 对二次有机气溶胶进行了测量, 发现当使用的油品不同时, 各实验组排放的有机物相对含量均不同; Liu 等^[13]研究了不同调料的排放情况, 发现用油加入调料后

的 VOCs 排放量明显多于油加热过程, 并且不同调料的排放情况不同; 何万清等^[18]的研究结果表明, 温度也是影响有机物排放的一个因素, 不同温度下加热油的有机物排放情况不同, 且不同油品受温度影响的程度不同; 郭浩等^[19]的研究还发现, 菜品也对 VOCs 的排放情况有着重要影响, 不同菜品的有机物排放情况有较大差别, 且烹炒类荤菜(尖椒炒肉)的排放因子明显高于其他菜品. 油品、调味料、菜品等因素均会对烹饪 VOCs 的排放情况产生影响, 而 VOCs 的排放情况与人体健康和环境密切相关^[20], 因此有必要对不同情况下的 VOCs 排放情况进行研究. 过去的研究往往只关注其中一个因素产生的影响^[3,13,14,19,21], 缺少对多个因素的分析比

收稿日期: 2018-08-08; 修订日期: 2018-11-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(21607104); 上海市科委项目(18QA1403600); 国家重点研发计划项目(2018YFC0213801); 上海市生态环境局项目(2017-2)

作者简介: 高雅琴(1994~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大气 VOCs 在线监测及其对二次污染的贡献, E-mail: gaoyq16@fudan.edu.cn

* 通信作者, E-mail: wanghl@saes.sh.cn

较。目前区域餐饮源大气污染物清单核算方法仍存在很大的不确定性,以用油量为基准的 VOCs 清单核算不确定度仍然有 61%,远高于同方法 $\text{PM}_{2.5}$ 的清单核算不确定度(31%)^[16,22,23]。一是因为关于 VOCs 排放因子的研究由于测量手段和分析技术等限制,与 $\text{PM}_{2.5}$ 的相关研究^[24~29] 相比还尚有不足,二是因为排放因子仍会受到很多复杂、不可控因素的影响^[16,22~25,30,31]。国内对餐饮排放进行多因素控制的模拟研究较少^[32],需要进一步地研究来量化各因素的影响。

本实验针对油品、调味料和菜品这 3 个影响因素,采用模拟实验的方法,测量了不同油品及其与调味料、菜品搭配的排放因子,并讨论了 3 种因素对排放因子的影响。在此基础上,通过对不同实验组的比较,得出排放因子最低的油品与调味料、菜品的搭配,有助于深入了解餐饮源排放特征,以期为餐饮源大气污染物清单的模拟提供科学基础,并为控制餐饮源排放策略制订提供依据。

1 材料与方法

1.1 实验装置和材料

油烟污染源散发舱实验装置如图 1 所示,包括一台标准油烟气体发生装置 SH9831B,一台电磁炉(带有温度调节档),一个带温度探头的标准平底不锈钢锅,可控制频率和温度的自动炒菜锅和一套排风装置(包括一台离心风机、一条排风管、一个静压箱)。热油加热过程及油烟污染源的散发过程全部在标准化的圆柱锥顶散发舱($D = 0.8 \text{ m}$, $H = 0.75 \text{ m}$, 无底,材料为防高温的有机玻璃)内发生,保证了除少部分的沉降外,整个实验过程中产生的油烟污染散发量被全部收集。利用电磁炉作为燃料源对样品进行加热,避免燃料源污染排放对实验的干扰。实验使用的油品分为 5 类,分别为菜籽油、大豆油、花生油、葵花籽油和猪油。本实验使用的调味料选取中国日常生活中常用的 3 种,分别为辣椒粉、蒜片和花椒粒。本实验中制作的菜品选取了两个比较大众的中式家常菜,分别为辣椒炒肉和番茄炒蛋,能更好地进行后期比对。

本实验分为加热不同油品、热油中加入调料及菜品烹饪共 15 个条件实验,如表 1 所示。油品在单独或搭配调料烹调的过程中,都控制量为 300 mL(按密度 $0.93 \text{ g} \cdot \text{mL}^{-1}$ 换算成质量 279 g),由于猪油呈固体状,故猪油采用称重的方式,实验时猪油的量控制为 300 g。每种调料辣椒粉、蒜片、花椒粒的量都控制在 10 g。调料在热油 20 min 时加入,然后继续加热约 5 min。在制作番茄炒蛋菜品时,放入

油 20 mL、5 g 姜、5 g 蒜、3 g 盐、250 g 番茄和 150 g 鸡蛋。加热 30 s 后加入番茄和鸡蛋,加热 1 min 后加姜和蒜,加热到第 8 min 后加盐。在制作辣椒炒肉菜品时,放入油 20 mL、酱油 20 mL、5 g 姜、5 g 蒜、3 g 盐、200 g 红菜椒、150 g 肉(120 g 瘦肉和 30 g 肥肉),加热 1 min 后加姜蒜,酱油和肉,加热 3 min 后放辣椒。倾倒油的时刻即为烹饪过程开始时间,升温过程约为 5 min,加热稳定后锅温保持在 260°C 左右,油品及搭配调料的实验时长保持 25 min 左右,菜品烹饪保持 10 min 左右。加热或烹饪过程严格按照拟好的步骤、时间进行操作,每一个实验重复 2 次。表 1 中,时间表示单次实验平均时长,序号 16 对应的实验条件用于背景测量。

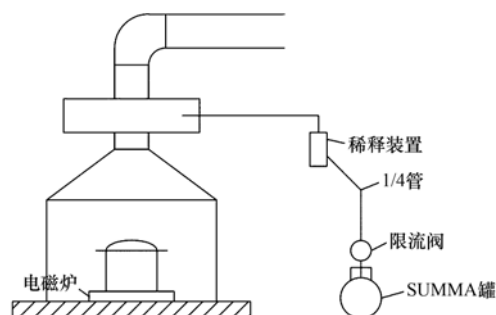


图 1 油烟污染源散发舱实验装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental device for cooking emissions

1.2 样品采集和分析

模拟油烟通过稀释装置稀释 11 倍后,经限流阀被 SUMMA 罐采集,并及时使用气相色谱-质谱联用仪(GC-FID/MS)分析^[33~35]。样品经超低温预浓缩系统冷冻富集和热解析后进入色谱柱, $\text{C}_2 \sim \text{C}_5$ 的碳氢化合物由 FID 检测器检出, $\text{C}_5 \sim \text{C}_{12}$ 的碳氢化合物由 MS 检测器检出。分析前后采用 PAMS 标准气体和 OVOC 标准气体(美国 Spectra Gases 公司)对系统进行多点校准;每分析 8 个样品插一个 1×10^{-9} PAMS 标准样品和 N_2 的分析,以便跟踪分析系统的稳定性^[17]。共计定量分析 102 种 VOCs,分别为 28 种烷烃、11 种烯烃、25 种卤代烃、20 种 OVOCs(13 种醛酮、6 种酯和甲基叔丁基醚)、16 种芳香烃、以及乙炔和乙腈。仪器对不同 VOC 物种的检测体积分数限值为几十到几百万亿分之一。

1.3 排放因子计算

本研究的排放因子是基于实验整理得到的各个物质的散发量数据,实验的作业时间以及风量和实验样品的质量得出的。用实验测得的各物质的浓度 $c(\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$ 乘以当时的风量 $F(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$,即可得出每种样品的单位时间 VOCs 排放量。再用单位时间 VOCs 排放量采样时间 $T(\text{h})$ 除以研究食材(油品或

表 1 不同实验的实验条件
Table 1 Conditions of different experiments

序号	油品	油质量/g	调味料/菜品	质量/g	风量/m ³ ·h ⁻¹	时间/min
1	大豆油	279	—	—	290	25.0
2	花生油	279	—	—	238	28.2
3	猪油	300	—	—	337	29.3
4	菜籽油	279	—	—	315	27.5
5	葵花籽油	279	—	—	314	28.5
6	大豆油	279	花椒	10	258	25.5
7	大豆油	279	辣椒粉	10	191	25.0
8	大豆油	279	蒜片	10	258	28.0
9	花生油	279	花椒	10	290	28.0
10	花生油	279	辣椒粉	10	287	27.0
11	花生油	279	蒜片	10	309	26.5
12	大豆油	279	番茄炒蛋	413	340	10.3
13	大豆油	279	辣椒炒肉	375	290	10.0
14	花生油	279	番茄炒蛋	413	338	10.3
15	花生油	279	辣椒炒肉	375	293	10.0
16	—	—	—	—	320	120

调料等)的质量 $M(\text{kg})$ ，即可得到单位质量的样品的 VOCs 排放量，也就可以得到以样品质量为计算基准的 VOCs 的排放因子(EF)，公式如下^[3]：

$$EF = \frac{c \times F \times T}{M} \quad (1)$$

2 结果与讨论

2.1 不同油品比较

油的加热是油炸的基础步骤，同时也会排放大量的挥发性有机物^[15, 21]。图 2 是不同油品条件下不同类型有机物的排放因子及其百分比。从图 2 (a)中可以看出，5 种油品的总排放因子的范围为 0.81 ~ 2.53 g·kg⁻¹，排放因子最高的是大豆油，其值为 2.53 g·kg⁻¹；最低的是花生油，其值为 0.81 g·kg⁻¹。排放因子最高值为最低值的 3 倍以上，表明油品对挥发性有机物的排放有重要影响。

由图 2(b)可知，对于不同的油品，其加热过程中排放的有机物类别及其占比均不同。菜籽油、花生油和葵花籽油排放因子最高的为烷烃类有机物，分别占总排放因子的 51%、41% 和 52%；而猪油和

大豆油排放因子最高的为卤代烃类有机物，分别占总排放因子的 36% 和 38%。进一步研究表明，大豆油和猪油排放因子最高的有机物为三氯乙烯，菜籽油、花生油和葵花籽油排放因子最高的有机物为正十二烷。

对于烃类有机物，除烷烃外，芳香烃的排放因子也处于较高水平。大豆油、猪油、葵花籽油、菜籽油和花生油的芳香烃排放因子占比分别为 11%、10%、9%、8% 和 7%，总体差距不大，且 5 种油品排放最多的芳香烃类有机物均为甲苯。烯烃和炔烃的排放因子均较低，烯烃排放因子占比最高仅为 5%，而炔烃排放因子占比不超过 1%。

含氧有机物包括醛、酮和酯、醚。在大豆油、猪油、葵花籽油、菜籽油和花生油中，含氧有机物排放因子分别占总排放因子的 26%、16%、14%、23% 和 19%。其中，醛、酮的排放因子均高于酯、醚，且醛的排放因子普遍高于酮。菜籽油排放最多的醛类为乙醛，花生油为丙烯醛，其他 3 种油品均为己醛。这与 Klein 等^[3]的实验结果一致。

本实验检测的含氮有机物为乙腈。总体而言，

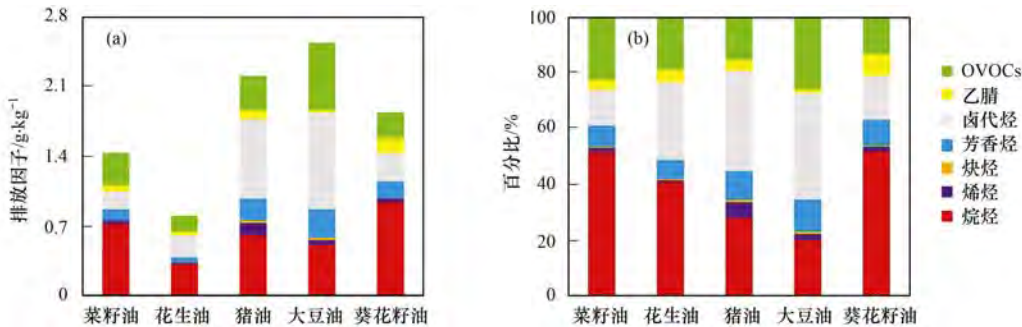


图 2 不同油品的挥发性有机物排放因子和相对组成

Fig. 2 Emission factors and relative contribution of VOCs from the heating of different oils

乙腈在总排放因子中占比较少,一般不超过5%,但在其葵花籽油的总排放因子中占比高达8%。

总体而言,不同油品条件下,VOCs的总排放因子、排放有机物的种类和占比均不同。花生油总排放因子较小,且主要排放的是毒性较低的正十二烷,因此在不考虑食材影响的情况下,花生油更适合烹饪使用。

2.2 不同调味料比较

调味料是烹饪的一个重要元素,用油炒香料能提升菜品的风味,但该过程中也有大量的VOCs排放^[4, 13, 19]。图3是不同调味料与油品搭配条件下不同类型有机物的排放因子及占比。从图3(a)中可以看出,不同调味料的总排放因子有一定的差异,并且油品的差异也会对调味料的有机物排放造成一定的影响。花椒、辣椒粉和蒜片搭配大豆油的总排放因子分别为31.77、31.44和39.44 g·kg⁻¹;搭配花生油的总排放因子分别为38.09、40.18和25.06 g·kg⁻¹。

由图3(b)可知,调味料排放的有机物种类和占比也受调味料种类和油品影响。6个实验组排放因子最高的有机物均为烷烃,花椒、辣椒粉和蒜片搭配大豆油的烷烃排放因子分别占总排放因子的48%、31%和52%,搭配花生油的烷烃排放因子分别占总排放因子的42%、41%和43%;6个实验组排放因子最高的烷烃类有机物均为正十二烷,且除辣椒粉搭配大豆油外,其余5组排放因子最高的有机物均为正十二烷。辣椒粉搭配大豆油排放因子最高的为乙腈,但其排放因子低于烷烃排放因子之和。

6组实验的芳香烃排放因子占比在10%左右,

总体略高于油品的研究结果,辣椒粉搭配大豆油占比最高,为15%;花椒搭配大豆油最低,为8%;排放因子最高的芳香烃均为甲苯,与油品的研究结果一致。烯烃和炔烃排放因子仍处于较低水平,烯烃排放因子占比最高为3%,炔烃排放因子占比均为1%。

调味料的卤代烃排放因子占比明显低于油品,辣椒粉搭配花生油最高,为23%;花椒搭配花生油和蒜片搭配大豆油最低,为8%。花椒和蒜片搭配花生油时,排放因子最高的卤代烃为三氯甲烷,其余实验组为1,4-二氯苯,与油品的实验结果有较大差异。

实验中含氧有机物的排放因子处于较高水平。花椒、辣椒粉和蒜片搭配大豆油的含氧有机物排放因子分别占总排放因子的17%、25%和22%,搭配花生油的含氧有机物排放因子分别占总排放因子的35%、23%和18%。6组实验中醛、酮的排放因子均高于酯、醚,主要排放的含氧有机物为丙酮和乙酸丁酯;花椒搭配花生油的丁酮排放因子较高,导致其总含氧有机物排放因子较高。

乙腈的排放因子受油品的影响较为明显。总体而言,对于同种调味料,大豆油乙腈排放因子及占比均高于花生油。辣椒粉搭配大豆油排放因子占比最高,为13%;辣椒粉搭配花生油占比最低,为2%。

加入调味料后,排放的VOCs种类及其占比与油品实验结果有较大差异,表明调味料是影响VOCs排放的重要因素^[4, 13, 19]。花椒和辣椒粉搭配大豆油总排放因子低于花生油,蒜片搭配花生油总排放因子低于大豆油,因此花椒和辣椒粉更适合搭配大豆油,蒜片更适合搭配花生油。

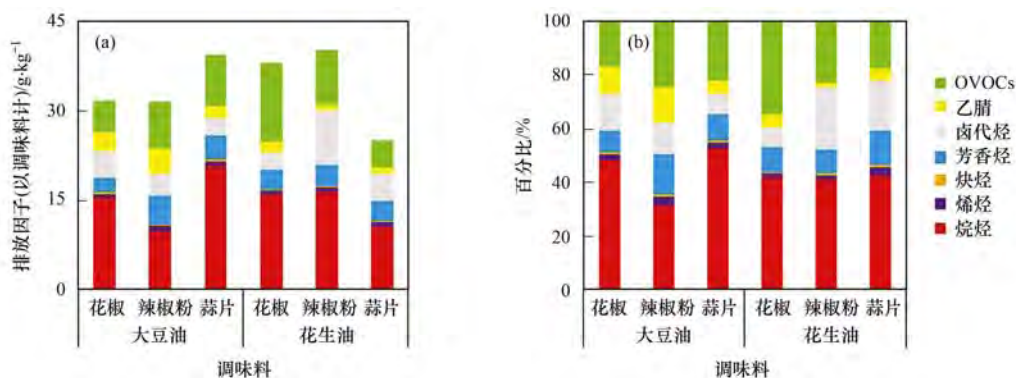


图3 不同调味料的挥发性有机物排放因子和相对组成

Fig. 3 Emission factors and relative contribution of VOCs from the addition of different spices to the oils

2.3 不同菜品比较

比较菜品时,选用中式餐饮常用的大豆油和花生油制作菜品,分别制作了番茄炒蛋和辣椒炒肉两种中式菜品,并对其排放量进行了比较。图4是不同菜品条件下不同类型有机物的排放量及占比。本

实验结果表明,总排放量受菜品的影响较大,且油品对总排放量也有一定影响。辣椒炒肉用大豆油和花生油制作时的总排放量分别为2.05 g·kg⁻¹和4.23 g·kg⁻¹,番茄炒蛋用大豆油和花生油制作时的总排放量分别为0.18 g·kg⁻¹(原料)和0.24 g·kg⁻¹

(原料), 辣椒炒肉的总排放量远高于番茄炒蛋, 与郭浩等^[19]的结果一致. 从图 4(a) 中可以看出, 两种油品制作辣椒炒肉的卤代烃排放量都较高, 使用大豆油和花生油的卤代烃排放量占比分别为 76% 和 80%, 而在番茄炒蛋中则占比较低, 大豆油和花生油制作番茄炒蛋的卤代烃排放量占比分别为 9% 和 16%. 进一步分析表明, 大豆油和花生油制作辣椒炒肉排放的卤代烃主要为二氯甲烷, 其排放量分别为 $1.27 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (原料) 和 $2.72 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (原料). 二氯甲烷排放量过高是导致辣椒炒肉总排放量远高于番茄炒蛋的主要原因. 关于中国不同菜系的源谱研究表明, 四川菜和湖南菜会排放大量的卤代烃^[17], 和本研究结果相一致, 很可能是大量辣椒或辣椒粉的加入导致.

除卤代烃外, 4 个实验组的烷烃排放量也处于较高水平. 用大豆油和花生油制作辣椒炒肉的烷烃排放量占比分别为 20% 和 18%, 制作番茄炒蛋则分别为 21% 和 44%; 主要排放的物质均为正十二烷, 与 2.1 节和 2.2 节中的结论一致. 对于芳香烃,

不同油品的芳香烃排放量受菜品影响程度不同: 大豆油制作两种菜品时的芳香烃排放量相差不大, 花生油制作辣椒炒肉时芳香烃排放量为大豆油的 1/2, 而制作番茄炒蛋时芳香烃排放量为大豆油的 2 倍; 大豆油和花生油制作辣椒炒肉的芳香烃排放量占比分别为 2% 和 1%, 制作番茄炒蛋的芳香烃排放量占比分别为 46% 和 16%. 烯烃和炔烃排放量仍处于较低水平, 烯烃排放量占比不超过 3%, 炔烃则不超过 1%.

含氧有机物在大豆油和花生油制作辣椒炒肉时的排放量占比分别为 2% 和 1%, 在制作番茄炒蛋时的排放量占比分别为 12% 和 14%; 辣椒炒肉排放的含氧有机物主要是丙酮, 番茄炒蛋则是乙醛. 4 个实验组乙腈的排放量相差不大, 在辣椒炒肉中排放量占比约为 1%, 在番茄炒蛋中约为 7%.

菜品、油品都是影响 VOCs 排放量的因素^[36, 37], 菜品的影响大于油品. 由于大豆油制作辣椒炒肉和番茄炒蛋的有机物总排放量低于花生油, 故大豆油比花生油更适合用于制作辣椒炒肉和番茄炒蛋.

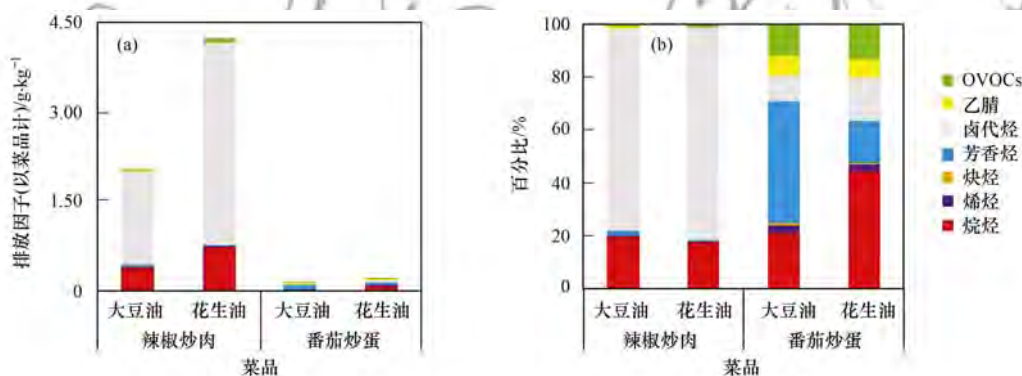


图 4 不同菜品的挥发性有机物的排放因子和相对组成

Fig. 4 Emission factors and relative contribution of VOCs for different dishes

3 结论

(1) 油品的排放因子范围为 $0.81 \sim 2.53 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 菜籽油、花生油和葵花籽油主要排放烷烃, 分别占总排放因子的 51%、41% 和 52%; 大豆油和猪油主要排放卤代烃, 分别占总排放因子的 38% 和 36%.

(2) 调味料的排放因子范围为 $25.06 \sim 40.18 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 排放最多的有机物为烷烃, 花椒、辣椒粉和蒜片搭配大豆油的烷烃排放因子分别占总排放因子的 48%、31% 和 52%, 搭配花生油的烷烃排放因子占总排放因子的 42%、41% 和 43%. 就总排放因子而言, 花椒和辣椒粉更适合搭配大豆油, 蒜片更适合搭配花生油.

(3) 使用大豆油和花生油制作辣椒炒肉时的总排放量分别为 $2.05 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (原料) 和 $4.23 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$

(原料), 制作番茄炒蛋时分别为 $0.18 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (原料) 和 $0.24 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (原料). 辣椒炒肉主要排放卤代烃, 使用大豆油制作番茄炒蛋时主要排放芳香烃, 使用花生油制作时主要排放烷烃. 就总排放因子而言, 大豆油比花生油更适合用于制作辣椒炒肉和番茄炒蛋.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] Klein F, Platt S M, Farren N J, *et al.* Characterization of gas-phase organics using proton transfer reaction time-of-flight mass spectrometry: cooking emissions [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, **50**(3): 1243-1250.

- [4] Klein F, Farren N J, Bozzetti C, *et al.* Indoor terpene emissions from cooking with herbs and pepper and their secondary organic aerosol production potential[J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**: 36623.
- [5] Logue J M, Klepeis N E, Lobscheid A B, *et al.* Pollutant exposures from natural gas cooking burners: a simulation-based assessment for southern California[J]. *Environmental Health Perspectives*, 2014, **122**(1): 43-50.
- [6] Delgado-Saborit J M, Aquilina N J, Meddings C, *et al.* Model development and validation of personal exposure to volatile organic compound concentrations[J]. *Environmental Health Perspectives*, 2009, **117**(10): 1571-1579.
- [7] Zhao X Y, Hu Q H, Wang X M, *et al.* Composition profiles of organic aerosols from Chinese residential cooking: case study in urban Guangzhou, south China[J]. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 2015, **72**(1): 1-18.
- [8] 顾天毅. 兰州市室内典型挥发性有机物污染特征及其健康风险评价[D]. 兰州: 兰州大学, 2018.
- [9] 王秀艳, 高爽, 周家岐, 等. 餐饮油烟中挥发性有机物风险评估[J]. *环境科学研究*, 2012, **25**(12): 1359-1363.
Wang X Y, Gao S, Zhou J Q, *et al.* Risk assessment of VOCs from cooking fumes[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2012, **25**(12): 1359-1363.
- [10] Weinstein J R, Asteria-Pealozza R, Diaz-Artiga A, *et al.* Exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons and volatile organic compounds among recently pregnant rural Guatemalan women cooking and heating with solid fuels[J]. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 2017, **220**(4): 726-735.
- [11] Wang L N, Xiang Z Y, Stevanovic S, *et al.* Role of Chinese cooking emissions on ambient air quality and human health[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **589**: 173-181.
- [12] 王红丽. 上海市大气挥发性有机物化学消耗与臭氧生成的关系[J]. *环境科学*, 2015, **36**(9): 3159-3167.
Wang H L. Chemical loss of volatile organic compounds and its impact on the formation of ozone in Shanghai[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(9): 3159-3167.
- [13] Liu T Y, Liu Q Y, Li Z J, *et al.* Emission of volatile organic compounds and production of secondary organic aerosol from stir-frying spices[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **599-600**: 1614-1621.
- [14] Liu T Y, Li Z J, Chan M N, *et al.* Formation of secondary organic aerosols from gas-phase emissions of heated cooking oils[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, **17**(12): 7333-7344.
- [15] Liu T Y, Wang Z Y, Huang D D, *et al.* Significant production of secondary organic aerosol from emissions of heated cooking oils[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, **5**(1): 32-37.
- [16] 吴雪伟, 陈卫卫, 王堃, 等. 长春市餐饮源 PM_{2.5} 和 VOC_s 排放清单[J]. *中国环境科学*, 2018, **38**(8): 2882-2889.
Wu X W, Chen W W, Wang K, *et al.* PM_{2.5} and VOC_s emission inventories from cooking in Changchun City[J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(8): 2882-2889.
- [17] Wang H L, Xiang Z Y, Wang L N, *et al.* Emissions of volatile organic compounds (VOCs) from cooking and their speciation: a case study for Shanghai with implications for China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **621**: 1300-1309.
- [18] 何万清, 田刚, 聂磊, 等. 烹调油烟中挥发性有机物的排放初探[J]. *环境科学*, 2012, **33**(9): 2973-2978.
He W Q, Tian G, Nie L, *et al.* Preliminary study concerning emissions of the volatile organic compounds from cooking oils[J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(9): 2973-2978.
- [19] 郭浩, 张秀喜, 丁志伟, 等. 家庭烹饪油烟污染物排放特征研究[J]. *环境监控与预警*, 2018, **10**(1): 51-56.
Guo H, Zhang X X, Ding Z W, *et al.* Research on emission characteristics of family cooking fume[J]. *Environmental Monitoring and Forewarning*, 2018, **10**(1): 51-56.
- [20] Wang X Y, Shi J W, Bai Z P, *et al.* Measurement of VOCs emissions from cooking in the northeast area of China[A]. In: *Proceedings of the 2011 2nd International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering*[C]. Hohhot, China: IEEE, 2011. 3212-3215.
- [21] 吴芳谷, 汪彤, 陈虹桥, 等. 餐饮油烟排放特征[A]. 见: 中国颗粒学会 2002 年年会暨海峡两岸颗粒技术研讨会会议论文集[C]. 桂林: 中国颗粒学会, 2002. 5.
- [22] 周子航, 邓也, 张碧, 等. 成都市武侯区生活源挥发性有机物排放清单研究[J]. *四川环境*, 2017, **36**(6): 65-71.
Zhou Z H, Deng Y, Zhang B, *et al.* Study on the domestic emission inventory of volatile organic compounds in Wuhou district, Chengdu[J]. *Sichuan Environment*, 2017, **36**(6): 65-71.
- [23] 王波, 陈军辉, 韩丽. 宜宾市人为源 VOCs 排放清单及其臭氧生成潜势[J]. *四川环境*, 2017, **36**(4): 75-79.
Wang B, Chen J H, Han L. Emission inventory of anthropogenic VOCs sources and ozone formation potential in Yibin City[J]. *Sichuan Environment*, 2017, **36**(4): 75-79.
- [24] 王红丽, 景盛翔, 楼晟荣, 等. 餐饮行业细颗粒物 (PM_{2.5}) 排放测算方法: 以上海市为例[J]. *环境科学*, 2018, **39**(5): 1971-1977.
Wang H L, Jing S A, Lou S R, *et al.* Estimation of fine particle (PM_{2.5}) emission inventory from cooking: case study for Shanghai[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(5): 1971-1977.
- [25] 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.
- [26] Dall'Osto M, Paglione M, Decesari S, *et al.* On the origin of AMS "cooking organic aerosol" at a Rural Site[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49**(24): 13964-13972.
- [27] He L Y, Lin Y, Huang X F, *et al.* Characterization of high-resolution aerosol mass spectra of primary organic aerosol emissions from Chinese cooking and biomass burning[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, **10**(23): 11535-11543.
- [28] Allan J D, Williams P I, Morgan W T, *et al.* Contributions from transport, solid fuel burning and cooking to primary organic aerosols in two UK cities[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, **10**(2): 647-668.
- [29] Robinson A L, Subramanian R, Donahue N M, *et al.* Source apportionment of molecular markers and organic aerosol. 3. Food cooking emissions[J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, **40**(24): 7820-7827.
- [30] 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 M, He W Q, Nie L, *et al.* Atmospheric pollutant emission characteristics from the cooking process of traditional Beijing roast duck[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(8): 3139-3145.

- [31] 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 J C, Cui T, He W Q, *et al.* Pollution characteristics of aldehydes and ketones compounds in the exhaust of Beijing typical restaurants[J]. Environmental Science, 2015, **36**(8): 2743-2749.
- [32] 郑少卿. 餐饮业油烟中 VOCs 的排放特征及其治理技术的研究[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2018.
- [33] Zhu Y H, Yang L X, Kawamura K, *et al.* Contributions and source identification of biogenic and anthropogenic hydrocarbons to secondary organic aerosols at Mt. Tai in 2014 [J]. Environmental Pollution, 2017, **220**: 863-872.
- [34] Dunne E, Galbally I E, Cheng M, *et al.* Comparison of VOC measurements made by PTR-MS, Adsorbent Tubes-GC-FID-MS and DNPH derivatization-HPLC during the Sydney Particle Study, 2012: a contribution to the assessment of uncertainty in routine atmospheric VOC measurements [J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2018, **11**(1): 141-159.
- [35] 王凯雄, 朱杏冬. 烹调油烟气的成分及其分析方法[J]. 上海环境科学, 1999, **18**(11): 526-528.
- Wang K X, Zhu X D. The constituents in cooking-oil smoke and their analytical of methods[J]. Shanghai Environmental Science, 1999, **18**(11): 526-528.
- [36] 崔彤, 程婧晨, 何万清, 等. 北京市典型餐饮企业 VOCs 排放特征研究[J]. 环境科学, 2015, **36**(5): 1523-1529.
- Cui T, Cheng J C, He W Q, *et al.* Emission characteristics of VOCs from typical restaurants in Beijing [J]. Environmental Science, 2015, **36**(5): 1523-1529.
- [37] 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): 1768-1774.
- Zhang C Y, Ma Y L. Characterization of non-methane hydrocarbons emitted from Chinese cooking[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, **31**(8): 1768-1774.



CONTENTS

Source Apportionment and Mixing State of Single Particles in the Nanjing Jiangbei New Area	YU Xing-na, SHI Zheng, MA Jia, <i>et al.</i> (1521)
Characteristics of Carbonaceous Aerosol Pollution in PM _{2.5} in Xi'an	MU Zhen, CHEN Qing-cai, WANG Yu-qin, <i>et al.</i> (1529)
Chemical Composition Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} During Winter in Taiyuan	LIU Su, MA Tong, YANG Yan, <i>et al.</i> (1537)
Seasonal Variation and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Ions in Fine Particulate Matter in Zhengzhou	YAN Guang-xuan, ZHANG Jing-wen, LEI Hao-jie, <i>et al.</i> (1545)
Elemental Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric PM _{2.5} in a Suburb of Zhuhai City	YANG Yi-hong, JIA Yan, BIAN Guo-jian, <i>et al.</i> (1553)
Impact of a Dust Event on the Size Distribution of Metal Elements in Atmospheric Aerosols at a Coastal Region and over the Ocean	JIN Tong-jun, QI Jian-hua, XI Zi-yan, <i>et al.</i> (1562)
CALPUFF Modeling of the Influence of Typical Industrial Emissions on PM _{2.5} in an Urban Area Considering the SOA Transformation Mechanism	GAO Shuang, BO Xin, MA Yan, <i>et al.</i> (1575)
Variation in Pollutant Concentrations and Correlation Analysis with the Vegetation Index in Beijing-Tianjin-Hebei	SUN Shuang, LI Ling-jun, ZHAO Wen-ji, <i>et al.</i> (1585)
Estimation of Coal Consumption and the Emission of Related Contaminants in the Plain Area Around Beijing During 2015-2017	ZHAO Wen-hui, LI Ling-jun, LU Hai-feng, <i>et al.</i> (1594)
Column-integrated Aerosol Optical Properties Determined Using Ground-based Sun Photometry Measurements in the Hangzhou Region	QI Bing, CHE Hui-zheng, XU Ting-ting, <i>et al.</i> (1604)
Speciated VOCs Emission Inventory and Ozone Formation Potential in Sichuan Province	ZHOU Zi-hang, DENG Ye, TAN Qin-wen, <i>et al.</i> (1613)
Characterization of Volatile Organic Compounds from Cooking Emissions	GAO Ya-qin, WANG Hong-li, XU Rui-zhe, <i>et al.</i> (1627)
Analysis of Peroxyacetyl Nitrate and Ozone During a Typical Photochemical Pollution Process at the Panyu Atmospheric Composition Station	ZOU Yu, DENG Xue-jiao, LI Fei, <i>et al.</i> (1634)
Characteristics and Interannual Variation of Chemical Components in Typical Road Dust in Beijing	HU Yue-qi, LI Meng, YAN Xu, <i>et al.</i> (1645)
Sources Analysis and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the PM _{2.5} Fraction of Fugitive Dust in Nanchang City	YU Rui-lian, ZHENG Quan, LIU Xian-rong, <i>et al.</i> (1656)
Methods and Application of Road Fugitive Dust Emission Factor Localization	FAN Shou-bin, YANG Tao, WANG Kai, <i>et al.</i> (1664)
Characterization of Tailpipe Emissions from in-use Excavators	MA Shuai, ZHANG Kai-shan, WANG Fan, <i>et al.</i> (1670)
Microbial Properties of Different Size Aerosols at Human Average Respiratory Height During Fog-haze Days	YANG Tang, HAN Yun-ping, LI Lin, <i>et al.</i> (1680)
Modification and Performance Tests of Visibility Parameterizations for Haze Days	ZHAO Xiu-juan, LI Zi-ming, XU Jing (1688)
Application of Support Vector Machine Regression in Ozone Forecasting	SU Xiao-qian, AN Jun-lin, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (1697)
Analysis of PHEV CO ₂ Emission Based on China's Grid Structure and Travelling Patterns in Mega Cities	HAO Xu, WANG He-wu, LI Wei-feng, <i>et al.</i> (1705)
Sources of Nitrate in Groundwater and Its Environmental Effects in Karst Trough Valleys: A Case Study of an Underground River System in the Longfeng Trough Valley, Chongqing	DUAN Shi-hui, JIANG Yong-jun, ZHANG Yuan-zhu, <i>et al.</i> (1715)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Phthalate Esters (PAEs) in the Surface Water of Jiaozhou Bay	LIU Cheng, SUN Cui-zhu, ZHANG Ge, <i>et al.</i> (1726)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Sediments of Zhanjiang Bay	PENG Shi-yun, PENG Ping-an, KONG De-ming, <i>et al.</i> (1734)
Analysis of the Optical Properties and Factors Influencing DOM in an Ecological Purification System: A Case Study of Yanlong Lake in Spring	MA Rui, LI Xuan, WANG Lian, <i>et al.</i> (1742)
Analysis of the Relationship Between Dissolved Organic Matter (DOM) and Watershed Land-use Based on Three-dimensional Fluorescence-Parallel Factor (EEM-PARAFAC) Analysis	LI Yun, WEI Hong-jie, WANG Kan, <i>et al.</i> (1751)
Analysis of the Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Emissions from Agricultural Non-point Sources on Hanfeng Lake Basin	XIE Jing-chao, ZHAO Xiu-lan, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (1760)
Simulation of the Migration and Leaching of Nitrate Nitrogen in the Farmland Soil Profile in a Hilly Area of Taihang Mountain with the RZWQM Model	ZHENG Wen-bo, WANG Shi-qin, LIU Bing-xia, <i>et al.</i> (1770)
Spatial Distribution Characteristics of Nutrients and Chlorophyll A in the Lancang River Basin Under Cascade Reservoirs	CHENG Bao, WANG Xue, MA Jin-chuan, <i>et al.</i> (1779)
Nutrient Distribution of Overlying Water in Tidal Marshes in Five Estuaries and Bays of the Fuzhou Region in Autumn	HE Lu-lu, YANG Ping, TAN Li-shan, <i>et al.</i> (1788)
Distribution and Environmental Risk of Pharmaceutically Active Compounds in the Traditionally Aqueous Phase of Effluent-receiving Rivers	WANG Shuo, LIU Jian-chao, ZHENG Chao-ya, <i>et al.</i> (1797)
Effects of a Green Roof on Stormwater Regulation and Cost-benefit Analysis	LI Jun-sheng, YIN Hai-wei, KONG Fan-hua, <i>et al.</i> (1803)
Ultrasonically Activated Persulfate Degrades Typical Odors in Water	SUN Xin, SUN Jie, LI Peng-fei, <i>et al.</i> (1811)
Metal Organic Framework MIL-53(Fe) as a Photocatalyst for Visible-light Catalytic Reduction of U(VI) in Aqueous Solution	YAN Zeng-yuan, XI Hai-ling, YUAN Li-yong (1819)
Effects and Differences of the Release of Dissolved Organic and Inorganic Phosphorus in Different Sediments Covered by Different Materials of Erhai Lake	GONG Jia-jian, NI Zhao-kui, XIAO Shang-bin, <i>et al.</i> (1826)
Phosphate Removal Using Rice Husk Biochars Modified with Lanthanum Hydroxide	XU Run, SHI Cheng-hao, TANG Qian, <i>et al.</i> (1834)
Characteristics and Heavy Metal Adsorption Performance of Sewage Sludge-derived Biochar from Co-pyrolysis with Transition Metals	CHEN Tan, ZHOU Ze-yu, MENG Rui-hong, <i>et al.</i> (1842)
Adsorption, Reclaim, and Regeneration of Cd by Magnetic Calcium Dihydrogen Phosphate Nanoparticles	LI Yu-jiao, YANG Zhi-min, CHEN Yu-cheng, <i>et al.</i> (1849)
Effect of Hematite on the Inhibition of Hydrogen Sulfide Formation and Its Mechanism During Anaerobic Digestion and Methanogenesis of Sulfate Wastewater	HUANG Shao-fu, YE Jie, ZHOU Shun-gui (1857)
Pollutant Removal Performance and Membrane Fouling Characteristics in Marine Aquaculture Wastewater Treatment by a Microalgae Membrane Reactor	MA Hang, LI Zhi-peng, LIU Feng, <i>et al.</i> (1865)
Pre-precipitation of Sewage-SNAD Granular Sludge Process Test	LI Dong, CUI Ya-qian, ZHAO Shi-xun, <i>et al.</i> (1871)
Impact of Actual Domestic Sewage and Simulated Wastewater on an Aerobic Granular Sludge System	LI Dong, WANG Ying-qiao, LI Shuai, <i>et al.</i> (1878)
Nitrogen Removal Performance of a Sulfur/Pyrite Autotrophic Denitrification System	ZHOU Ya, MAI Wen-ning, LIANG Jia-wei, <i>et al.</i> (1885)
Nitrogen Removal by Heterotrophic Nitrifying Bacterium <i>Pseudomonas putida</i> YH and Its Kinetic Characteristics	WANG Xu-hui, YANG Lei, REN Yong-xiang, <i>et al.</i> (1892)
Effect of Sludge Retention Time and pH on the Denitrifying Phosphorus Removal Process	WEI Jia-min, HUANG Hui-min, CHENG Cheng, <i>et al.</i> (1900)
Microbial Community of Granular Sludge in an ANAMMOX-EGSB Reactor Under Saline Conditions	WANG Han, LI Han-xiang, CHEN You-peng, <i>et al.</i> (1906)
Effect of Intracellular Carbon Source (PHA) Storage on the Mixed Growth Microbial Community Resistance to Low Temperature	YANG Jian-peng, ZHANG Jian, TIAN Qing, <i>et al.</i> (1914)
Contents and Forms of Phosphorus in the Municipal Sewage Sludge of China	WANG Chao, LIU Qing-wei, ZHI Yin, <i>et al.</i> (1922)
Contamination Characteristics and Safety Risk Assessment of Perfluorinated Alkylated Substances in Aquatic Products from Guangzhou	WANG Xu-feng, WANG Qiang, LI Zhi-guang, <i>et al.</i> (1931)
Characteristics of the Dissolved Nitrous Oxide (N ₂ O) Concentrations and Influencing Factors in a Representative Agricultural Headwater Stream in the Upper Reach of the Yangtze River	TIAN Lin-lin, WANG Zheng, HU Lei, <i>et al.</i> (1939)
CH ₄ Uptake in Different Saline-alkaline Soils in Hetao Irrigation District, Inner Mongolia	YANG Wen-zhu, JIAO Yan, YANG Ming-de, <i>et al.</i> (1950)
Allocation and Stabilization Responses of Rice Photosynthetic Carbon in the Plant-Soil System to Phosphorus Application	WANG Ying-ying, XIAO Mou-liang, ZHANG Yun, <i>et al.</i> (1957)
Effect of Soil Moisture and Temperature on the Soil Inorganic Carbon Release of Brown Limestone Soil in the Karst Region of Southwestern China	XU Xue-chi, HUANG Yuan, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (1965)
Temporal and Spatial Dynamics of Soil Microbial Biomass Carbon and Its Influencing Factors on an Eroded Slope in the Hilly Loess Plateau Region	QIN Qian, ZHU Shi-shuo, XIA Bin, <i>et al.</i> (1973)
Composition, Characteristics, and Accumulation of Antibiotics in the Soil in Agricultural Land	KONG Chen-chen, ZHANG Shi-wen, NIE Chao-jia, <i>et al.</i> (1981)
VOCs and Odors Control and Development in Pharmaceutical Fermentation Industry	WANG Dong-sheng, ZHU Xin-meng, YANG Xiao-fang, <i>et al.</i> (1990)