

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

长江经济带PM_{2.5}空间异质性和驱动因素的地理探测

王丽丽, 刘笑杰, 李丁, 孙颖琦



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年3月

第43卷 第3期

Vol.43 No.3

目次

2000~2020年天津PM_{2.5}质量浓度演变及驱动因子分析 蔡子颖, 郝团, 韩素芹, 唐颖潇, 杨旭, 樊文雁, 姚青, 邱晓滨(1129)

天津市PM_{2.5}-O₃复合污染特征及来源分析 肖致美, 徐虹, 高璟寰, 蔡子颖, 毕温凯, 李鹏, 杨宁, 邓小文, 戴运峰(1140)

基于随机森林模型的武汉市城区大气PM_{2.5}来源解析 张志豪, 陈楠, 祝波, 陶卉婷, 成海容(1151)

华北南部重污染城市周边区域二次气溶胶的化学特征及来源解析 任秀龙, 胡伟, 吴春苗, 胡偲豪, 高娜娜, 张崇崇, 岳亮, 王金喜, 樊景森, 牛红亚(1159)

“大气十条”实施结束川南城市群秋季霾污染过程中水溶性离子特征 吴安南, 黄小娟, 何仁江, 李金建, 叶秋麟, 吴涛, 肖智丹, 刘子锐, 王跃思, 张小玲, 张军科(1170)

郑州市典型污染过程PM₁₀中重金属浓度、来源及健康风险评估 翟诗婷, 王申博, 张栋, 赵孝因, 杨洁茹, 刘洋, 陈红阳, 张瑞芹(1180)

长江经济带PM_{2.5}空间异质性和驱动因素的地理探测 王丽丽, 刘笑杰, 李丁, 孙颖琦(1190)

长三角地区PM_{2.5}浓度对土地利用/覆盖转换的空间异质性响应 周丽霞, 吴涛, 蒋国俊, 张建珍, 濮励杰, 徐飞, 解雪峰(1201)

“2+26”城市春节和元宵节期间污染特征、气象影响和预报回顾分析 朱媛媛, 王晓斐, 汪巍, 刀谔, 王帅, 陈善荣(1212)

基于小波变换的山西省PM_{2.5}污染特征及影响因素 张可可, 胡冬梅, 闫雨龙, 彭林, 段小琳, 尹浩, 王凯, 邓萌杰(1226)

中国地表臭氧浓度估算及健康影响评估 赵楠, 卢毅敏(1235)

湖南省臭氧污染基本特征分析及长期趋势变化主控因素识别 刘妍妍, 杨雷峰, 谢丹平, 泽仁央宗, 黄志烟, 杨俊, 赵鹏, 韩静磊, 贾文超, 袁自冰(1246)

山东半岛近地面O₃浓度时空变化及潜在源区解析 李乐, 刘旻霞, 肖仕锐, 王思远, 米佳乐(1256)

COVID-19疫情期间雄安新区VOCs的变化特征、臭氧生成潜势及来源解析 刘新军, 王淑娟, 刘程, 范莉茹, 付翠轻, 齐莹, 宿文康(1268)

淄博市城区臭氧超标期间的VOCs污染特征与来源解析 王帅, 王秀艳, 杨文, 王雨燕, 白瑾丰, 程颖(1277)

淄博市夏季城区与背景点VOCs污染特征比较 秦涛, 徐勃, 王信梧, 李丽明, 杨文, 王晓丽, 耿春梅(1286)

四川省餐饮源挥发性有机物组分特征和清单 钱骏, 韩丽, 陈军辉, 王斌, 姜涛, 徐晨曦, 李英杰, 王成辉, 王波(1296)

餐饮源气相与颗粒相多环芳烃排放特征 李源速, 吴爱华, 童梦雪, 栾胜基, 李鹭(1307)

堆肥厂不同工作区空气真菌的多样性与群落结构 于奥园, 邢礼军, 孙兴滨, 仇天雷, 王旭明, 高敏(1315)

城市扬尘污染主要成因与精准治尘思路 李廷昆, 冯银厂, 毕晓辉, 张裕芬, 吴建会(1323)

黄河干流水质评价与时空变化分析 刘彦龙, 郑易安(1332)

典型山地城市河流营养元素空间分布特征及影响因素分析:以重庆市清水溪为例 王超, 叶秋, 贾伯阳, 何文战, 党超军, 黄焱, 杜浪(1346)

三峡库区支流的河-湖两态及其对沉积物不同形态磷含量的影响 黄伟, 张研, 罗晓佼, 张磊(1356)

派河及其支流溶解性有机质分子组成特征 詹亚, 尹浩, 冯景伟, 冯艾荣, 胡艳云, 张刘, 郑刘根(1365)

粤港澳大湾区典型潮间带环境多介质中Cd形态空间分布特征及其影响因素 崔新月, 莫武秋, 廖建波(1375)

骆马湖及主要入湖河流表层水体中抗生素的赋存特征及风险评估 龚润强, 赵华璋, 高占欣, 胡冠九, 卜元卿, 张圣虎, 邱惠(1384)

宁夏第三排水沟中抗生素的污染特征与生态风险评估 李富娟, 高礼, 李凌云, 卜兰香, 陶红, 杨桂钦(1394)

百年来北方湖泊沉积物PAHs的变化特征及其对人类活动的响应 龚雄虎, 赵中华, 丁琪琪, 张路, 姚书春, 薛滨(1404)

长江流域河流和湖库的浮游细菌群落差异 胡愈忻, 张静, 黄杰, 段春建, 李天翠, 刘威, 王英才, 胡圣(1414)

河套平原灌溉间隙期乌梁素海水体细菌群落结构特征 史玉娇, 李文宝, 张博尧, 姚国旺, 史小红(1424)

不同空间尺度的景观结构对袁河浮游细菌群落的影响 舒旺, 王鹏, 丁明军, 张华, 黄高翔, 聂明华(1434)

鄱阳湖白鹤保护区微塑料表面微生物群落结构特征 刘淑丽, 简敏菲, 邹龙, 胡启武(1447)

微塑料对变形杆菌生物膜生长发育的影响 陶辉, 戚怡婷, 于多, 杨兰, 顾颖, 厉彦辉(1455)

乌梁素海低密度微塑料聚合物沉降规律 刘禹, 史小红, 张生, 郝若男, 孙标, 赵胜男(1463)

老化前后微塑料对富里酸的吸附 宋亚丽, 俞娅, 郑磊, 汪华, 朱文芳(1472)

天津市滨海河流N₂O扩散通量及控制因子 汤梦瑶, 胡晓康, 王洪伟, 王云仓, 常素云, 王松庆, 钟继承(1481)

铁矿石和生物炭添加对潜流人工湿地污水处理效果和温室气体排放及微生物群落的影响 陈鑫童, 郝庆菊, 熊艳芳, 胡剑, 江长胜(1492)

降雨径流污染风险等级识别与优化方法 齐小天, 张质明, 赵鑫, 胡文翰, 刘迪(1500)

基于贝叶斯网络的给水管网消毒副产物生成因素分析 江杉杉, 王臻宇, 高权, 杨愿愿, 高方舟, 华佩, 应光国(1512)

聚硫代酰胺修饰活性炭对Au(III)的选择性吸附效果与机制 赵文金, 张顺, 安晓强, 兰华春, 刘会娟, 曲久辉(1521)

F/M对活性污泥微生物生态网络的影响 张冰, 孙展朝, 文湘华(1529)

城乡融合区土壤元素地球化学特征与源解析:以天府新区青龙片区为例 刘书准, 王德伟, 施泽明, 唐亮, 章凤英, 廖程, 李晓雨, 徐文斌(1535)

基于总量与形态的矿区周边土壤重金属生态风险与健康风险评估 王蕊, 陈楠, 张二喜(1546)

湖南锡矿山周边土壤-农作物系统镉迁移转换特征及污染评价 张龙, 宋波, 黄凤艳, 肖乃川, 顿梦杰(1558)

生物炭负载氧化石墨烯对离子型稀土土壤中重金属的阻控效应 杨士, 刘祖文, 龙培, 毕永顺, 林苑, 左华伟(1567)

溶解性有机质强化棉花修复镉污染土壤 闵涛, 罗彤, 陈丽丽, 茹思博, 李俊华(1577)

铁锰氧化物-微生物负载生物炭材料对镉和砷的吸附机制 连斌, 吴骥子, 赵科理, 叶正钱, 袁峰(1584)

不同冬小麦品种镉富集转运及离子组特征差异 刘畅, 徐应明, 黄青青, 陶雪莹, 王林, 孙灼兵, 赵立杰(1596)

镉胁迫下不同小麦品种对镉的积累特性 任超, 任或仲, 王浩, 朱利文, 李竞天, 杜倩倩, 李萍(1606)

嘉陵江滨岸带不同土地利用类型对土壤细菌群落多样性的影响 刘坤和, 薛玉琴, 竹兰萍, 徐飞, 朱志豪, 张拓, 张富斌(1620)

蚯蚓/钾改性生物炭对As污染红壤中细菌多样性和群落结构的影响 苏倩倩, 李莲芳, 朱昌雄, 叶婧, 刘雪, 耿兵, 田云龙, 黄晓雅(1630)

DA-6和EDDS施用对龙葵生长、Cd吸收和土壤细菌群落结构的影响 罗洋, 孙丽, 刘方, 任军, 郭金梅, 闫修民(1641)

地膜覆盖对农田土壤养分和生态酶计量学特征的影响 胡志娥, 肖谋良, 王双, 董瑶瑶, 鲁顺保, 陈剑平, 葛体达(1649)

增温和增雨对黄土丘陵区撂荒地土壤呼吸的影响 王兴, 钟泽坤, 朱玉帆, 王佳懿, 杨改河, 任成杰, 韩新辉(1657)

秸秆还田、地膜覆盖及施肥对冬小麦田N₂O和N₂排放的影响 彭毅, 李惠通, 张少维, 阳婷, 王筱斐, 周春菊, 王林权(1668)

基于Meta分析的不同生产条件下秸秆还田对土壤挥发性的影响 赵政鑫, 王晓云, 田雅洁, 王锐, 彭青, 蔡焕杰(1678)

施肥对农田土壤抗生素抗性基因影响的整合分析 冉继伟, 肖琼, 黄敏, 蔡岸冬, 张文菊(1688)

《环境科学》征订启事(1331) 《环境科学》征稿简则(1403) 信息(1462, 1511, 1605)

四川省餐饮源挥发性有机物组分特征和清单

钱骏¹, 韩丽^{1*}, 陈军辉^{1,2}, 王斌³, 姜涛¹, 徐晨曦¹, 李英杰¹, 王成辉¹, 王波¹

(1. 四川省生态环境科学研究院, 成都 610042; 2. 清华大学环境学院, 北京 100084; 3. 四川大学建筑与环境学院, 成都 610065)

摘要: 选取四川省 12 家典型餐饮单位开展了 NMHCs 浓度和 VOCs 组分监测, 结合已有数据, 综合建立了含 117 种 VOCs 组分的餐饮源组分谱, 获得本地化 NMHCs 排放因子, 基于自下而上的研究方法, 建立了四川省餐饮源挥发性有机物排放清单。结果表明, 含氧和烷烃两类组分为川菜、烧烤和食堂餐饮的最主要的组分, 二者合计质量分数在 75% 以上, 主要 VOCs 物种为乙醇、甲醛、乙烷、己醛、乙烯、1,3-丁二烯和丙烯醛等; 含氧组分对 OFP 的贡献最大, 其次是烯烃, 主要 OFP 贡献物种为甲醛、乙烯、乙醇、1,3-丁二烯、丙烯醛和己醛等。2019 年四川省餐饮源 VOCs 排放量和 OFP 值分别为 32 kt 和 141 kt, 分别占四川省人为源 VOCs 排放量和 OFP 值的 5% 左右, 餐饮源对臭氧生成可能有重要贡献, 应加大餐饮源挥发性有机物管控力度。

关键词: 餐饮源; 挥发性有机物 (VOCs); 排放因子; 成分谱; 清单; 四川省; 非甲烷碳氢化合物

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)03-1296-11 DOI: 10.13227/j.hj.kx.202104182

Emission Characteristics and Inventory of Volatile Organic Compounds from Cooking in Sichuan Province

QIAN Jun¹, HAN Li^{1*}, CHEN Jun-hui^{1,2}, WANG Bin³, JIANG Tao¹, XU Chen-xi¹, LI Ying-jie¹, WANG Cheng-hui¹, WANG Bo¹

(1. Sichuan Academy of Environmental Sciences, Chengdu 610042, China; 2. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. School of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: NMHCs concentrations and VOCs components were sampled from 12 typical catering units in Sichuan Province. Combined with literature data, the cooking source profile containing 117 VOCs was established comprehensively, and the NMHCs emission factors were obtained. Based on the bottom-up research method, the volatile organic compounds emission inventory of cooking sources in Sichuan Province was established. The results showed that the oxygen and alkane groups were the most important components for Sichuan cuisine, barbecue, and canteen, and the total proportion of the two groups was greater than 75%. The main VOCs species were ethanol, formaldehyde, ethane, hexanal, ethylene, 1,3-butadiene, and acrolein. Oxygen-containing components contributed the most to OFP, followed by olefin. The major OFP contributors were formaldehyde, ethylene, ethanol, 1,3-butadiene, acrolein, hexanal, etc. In 2019, the VOCs emissions and OFP values of cooking sources in Sichuan Province were 32kt and 141kt, respectively, accounting for approximately 5% of the anthropogenic VOCs emissions and OFP values in Sichuan Province. The VOCs emission from cooking may have an important contribution to ozone formation, which means more attention should be paid to cooking.

Key words: cooking; volatile organic compounds (VOCs); emission factor; source profile; emission inventory; Sichuan Province; NMHCs

挥发性有机物 (volatile organic compounds, VOCs) 是 O₃ 和 PM_{2.5} 的重要前体物^[1], VOCs 的科学有效减排是“十四五”期间空气质量改善的关键^[2], 在开展 VOCs 污染防治过程中, 建立精细准确的 VOCs 排放源清单, 掌握不同排放源的组分构成是其中的重要一环^[3]. 餐饮源是典型的生活排放源, 不仅是挥发性有机物的重要排放来源^[4], 对人体健康和环境异味也有重要的影响^[5]. 周子航等^[6]的研究结果显示, 餐饮源贡献了成都市人为源 VOCs 排放量的 1%. 夏思佳等^[7]的研究发现餐饮源对江苏省人为源 VOCs 贡献率为 3.19%; 王成辉等^[8]在成都中心城区开展的 VOCs 来源解析研究发现餐饮源在秋冬季可贡献 9% 的 VOCs; 此外, 北京和重庆等地发布的餐饮源排放标准^[9,10] 在国标^[11] 的基础上专门增加了 NMHCs 排放限值, 也凸显了餐饮源 VOCs 排放的重要性, 因此开展餐饮源挥发性有机物组分特征和排放清单研究十分必要。

目前对餐饮 VOCs 组分特征的研究主要分为两

大类, 一类为实验室模拟研究^[5,12,13], 一类为实地监测^[14~21], 部分学者获得了不同餐饮类型、不同菜系或是不同菜品的 VOCs 排放特征, 但样本量总体偏少, 实地研究多集中在北京和上海等地, 且测量的组分类型数量不一, 鲜见涵盖 117 种组分 (PAMS、TO15 和 13 种醛酮组分) 的源谱研究; 此外, 餐饮源 VOCs 本地化排放因子较为缺乏, 排放量估算也存在较大偏差^[22]. 四川省是典型的餐饮大省, 餐饮源排放尤其值得关注, 本文以四川省为研究对象, 选取典型餐饮类型开展本地 VOCs 组分特征分析, 建立本地化排放因子并估算 VOCs 清单 (以 NMHCs 计), 以为四川省餐饮源 VOCs 控制提供科学依据。

收稿日期: 2021-04-19; 修订日期: 2021-08-23

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFC0214006); 四川省生态环境厅重点专项 (“长江驻点研究”课题三)

作者简介: 钱骏 (1968 ~), 男, 硕士, 教授级高工, 主要研究方向为大气污染防治, E-mail: 584987226@qq.com

* 通信作者, E-mail: 20676746@qq.com

1 材料与方法

1.1 监测对象与采样方法

2019~2020年间,分别在成都和宜宾选取了川菜、烧烤和食堂等餐饮单位进行挥发性有机物的监测,其中川菜为7家,烧烤为3家,食堂为2家,共计测试12家企业,每家企业均为一个排气筒。

本研究采样点位于排气筒处油烟净化器之后,利用3L的Teflon气袋对排放废气进行采集,具体采样步骤参照HJ732采样规范^[23]进行,同时采用烟气质分析仪(德国testo 3008)获取烟气流量信息。采样

时间为中午或晚上餐饮工作集中时段,在1h内采集3个样品,采样完成后,将采样袋密封遮光保存送至实验室分析NMHCs浓度,NMHCs分析完成后,再选择NMHCs浓度最高的1个气袋,将该气袋中剩余气体转移到接头硅烷化处理的Bottle-Vac采样瓶(1L,Entech Instrument, Inc., SimiValley, CA, USA)中,并在14d内完成后续的VOCs组分分析。采样企业信息如表1所示,其中餐饮单位的规模根据餐饮业面积划分,营业面积在3000m²以上的为特大型,500~3000m²的为大型,150~500m²的为中型,150m²以下(含)为小型。

表1 采样企业基本信息

Table 1 Basic information for the sampled restaurants

餐饮类型	规模	基准灶头数量	营业面积/m ²	风量/m ³ ·h ⁻¹	净化器类型	地点	主要菜肴	烹饪方式	燃料类型	主要油品类型
川菜1	中型	5	380	10 600	静电式	宜宾	炒菜和汤锅	烧、蒸煮和炒	天然气	菜籽油
川菜2	中型	4	210	2 776	静电式	宜宾	小炸鱼、铁板煎蛋、煎河虾和红烧鹅	烧、蒸煮和炒	天然气	菜籽油和动物油
川菜3	小型	2	140	5 586	静电式	宜宾	豆花和炒菜	蒸煮和炒	天然气	菜籽油
川菜4	小型	2	40	2 153	静电式	宜宾	豆花鱼和炒菜	蒸煮、炒	天然气	菜籽油
川菜5	小型	4	150	10 169	静电式	宜宾	炒菜	烧、蒸煮和炒	天然气	菜籽油
川菜6	中型	8	299	12 920	静电式	成都	炒菜、烧菜和汤锅	烧、蒸煮和炒	天然气	菜籽油
川菜7	特大型	51	4 800	35 323	静电式	成都	炒菜、烧菜和汤锅	烧、蒸煮和炒	天然气	菜籽油
烧烤1	中型	7	285	21 121	静电式	成都	烤鱼	炒和烤(电)	天然气	菜籽油
烧烤2	小型	2	117	8 672	静电式	成都	烤串	炭火烧烤	天然气	菜籽油
烧烤3	小型	4	110	4 809	静电式	宜宾	烤串	炭火烧烤和油炸	天然气	菜籽油
食堂1	食堂	8	2 085	14 555	静电式	宜宾	炒菜和烧菜	烧、蒸煮、炒和煎	天然气	菜籽油
食堂2	食堂	5	400	10 936	等离子体+光催化	宜宾	炒菜和烧菜	烧、蒸煮、炒和煎	天然气	菜籽油

1.2 样品分析

VOCs组分采用GC-MS/FID分析,首先利用液氮冷却低温预浓缩技术对废气中VOCs进行富集,加热解析后使用GC-MS/FID进行分析测量。仪器的标定采用美国Linde公司的56种PAMS、65种TO15、13种醛酮标气和含有4种化合物(溴氯甲烷、1,4-二氟苯、氘代氯苯和1-溴-4-氟苯)的内标气体。FID检测器的定量采用外标法,MS定量分析采用内标法。标准样品选取6个体积分数梯度(0.5×10⁻⁹、1×10⁻⁹、2×10⁻⁹、4×10⁻⁹、6×10⁻⁹和8×10⁻⁹),同一梯度标样重复进样3次后取平均值,绘制各目标化合物的标准曲线。每次分析过程中进行标气单点校正和空白测定,单点校正测定结果与标准值偏差应小于30%,空白测定时目标物浓度应低于方法测定下限。成都样品分析的VOCs物种数量为114种(不含乙醇、异丙醇和甲醛),宜宾样品分析的物种数量为116种(不含甲醛)。NMHCs样品分析采用HJ 38-2017方法^[24],采用GC-FID分析检测,外标法定量。气体样品直接进样,标准气为甲烷标气,气体均来源于中国测试技术研究院。根据样品

预估浓度分别建立高、中、低浓度校准曲线,每次样品定量浓度处于标准曲线的中间梯度,标准曲线相关系数应大于0.995。NMHCs分析时质控同样以单点校正和空白测定方法,单点校正测定结果与标准值偏差应小于15%,空白测定时目标物浓度应低于方法测定下限。

1.3 VOCs排放量计算方法

本文中的VOCs排放量计算以NMHCs计,对应的计算公式为:

$$E_i = EF_i \times n \times t \quad (1)$$

式中, E_i 为某*i*类餐饮的VOCs排放量,g·d⁻¹; EF_i 为某*i*类餐饮的VOCs排放因子,g·h⁻¹; n 为对应类别的餐饮企业数量; t 为餐饮每日的营业时间,h。

Wang等^[20]研究了基于餐饮类型和餐馆规模的VOCs排放因子,提出基于餐饮规模的排放因子更适用于开展餐饮源VOCs排放量的估算,综合考虑四川省餐饮企业数量的可获得性,本文采取基于餐饮规模的排放因子,因此本文中 EF_i 的计算公式为:

$$EF_i = c_i \times Q_i \times 10^3 \quad (2)$$

式中, EF_i 为不同餐饮规模企业的VOCs排放因子,

$g \cdot h^{-1}$; c 为监测的 VOCs 浓度, 可以 NMHCs 计或 VOCs 物种加和浓度计, $mg \cdot m^{-3}$, Q 为排放风量, $m^3 \cdot h^{-1}$. 根据餐饮服务业态划分, 餐饮可以分为特大型餐馆、大型餐馆、中型餐馆、小型餐馆、快餐店、小吃店、饮品店和食堂.

1.4 VOCs 成分谱建立方法

将现场监测的各 VOCs 组分浓度与总浓度相除, 获得基础成分谱; 根据周子航^[25]使用的方法, 对宜宾和成都的样品物种组分进行扩充, 扩充为包括甲醛在内的 117 种组分, 其中甲醛的质量分数采用文献[21]中的数据, 成都的乙醇和异丙醇组分的质量分数采用宜宾的同类餐馆数据.

1.5 臭氧生成潜势

臭氧生成潜势 OFP 代表 VOCs 物种在最佳条件下对 O_3 生成的最大贡献, 计算可表示如下:

$$OFP_i = [VOC]_i \times MIR_i \quad (3)$$

式中, OFP_i 为物种的 OFP 值; $[VOC]_i$ 为该 VOCs 物种的浓度或者排放量; MIR_i 表示最大增量反应活性; MIR 值在不同的地区具有一定的差异, 不同 VOCs 物种的 MIR 值来自于 Carter 利用烟雾箱实验得到的经验数值^[26]; 有研究表明, 该 MIR 值的应用可能会低估我国光化学过程中臭氧生成的能力^[27].

2 结果与讨论

2.1 餐饮源 VOCs 组分特征

川菜、烧烤和食堂这 3 种类型餐饮的 VOCs 成分谱组成见表 2, 将 VOCs 组分划分为烷烃、烯烃、炔烃、芳香烃、卤代烃、含氧化物和含硫化合物共 8 种.

含氧和烷烃为各类餐饮 VOCs 的最主要组分, 二者质量分数合计在 75% 以上, 含氧组分对应食堂、烧烤和川菜的质量分数分别为 78.9%、49.4%

和 66.8%, 主要的含氧组分为乙醇和甲醛等醛类物质, 乙醇质量分数较高与烹饪过程中使用料酒有关^[15], 而甲醛等醛类则主要来自于食用油高温分解^[5,17], 此外烧烤对应的丙烯醛质量分数也较高, 可能与烧烤主要通过炭火加热的烹饪方式有关; 烷烃在食堂、烧烤和川菜 3 种餐饮中的质量分数分别为 14.2%、26.3% 和 14.8%, 最主要的烷烃组分为乙烷和丙烷, 此外异丁烷、正丁烷和正戊烷在烧烤中的质量分数较高, 考虑与燃料燃烧有关; 烯烃在烧烤和川菜的质量分数分别为 19.4% 和 12.4%, 主要组分是乙烯、丙烯和 1,3-丁二烯, 而食堂烯烃的质量分数较小; 3 种餐饮中, 卤代烃、芳香烃和炔烃的质量分数均较低, 为 1%~4%. 表 3 汇总了典型研究中同类型菜系的 VOCs 组分构成, 本文各组分质量分数均处于已有研究区间范围. 图 1 为 3 种餐饮的主要 VOCs 物种(涵盖了前 10 组分), 平均来看主要物种为乙醇、甲醛、乙烷、己醛、乙烯、1,3-丁二烯和丙烯醛等, 与文献[15, 17, 20, 21]中提出的物种类似.

目前鲜见报道含 117 种组分的 VOCs 成分谱, Sha 等^[28]研究建立了一套包含 447 种 VOCs 组分的成分谱库, 将该谱库中的餐饮源谱(仅提取 117 种组分)与本研究的源谱进行对比(图 2). 从组分谱物种分布来看, 整体差异不大, 均以 OVOCs 为主要组分, 但从组分的质量分数数值来看, 本研究的烷烃和烯烃物种质量分数值偏高, 而含氧组分尤其是乙醛、乙醇、己醛和丙烯醛等组分则偏低, 综合考虑可能与本研究 VOCs 组分的采样方法和存储时间有关. 当 VOCs 组分从气袋转移至分析瓶时, 可能存在部分 OVOCs 活性组分的损失, 同时样品在分析瓶中的存储时间略长, 也会导致部分 OVOCs 组分损失.

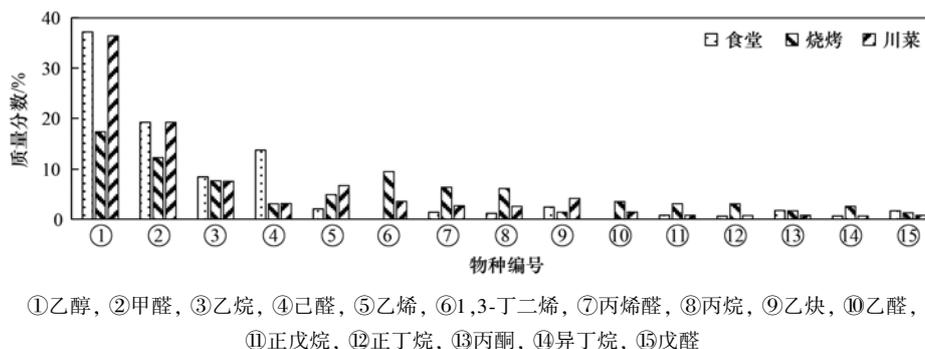


图 1 不同餐饮菜系质量分数前 10 物种

Fig. 1 Top ten VOC species for different cuisines

2.2 餐饮源臭氧生成潜势特征

进一步对餐饮源 VOCs 排放的臭氧生成潜势 (OFP) 特征进行分析. 图 3 为不同餐饮菜系的 OFP

构成及主要贡献物种, 3 种菜系中, 含氧组分对 OFP 的贡献率最大, 最高可为 90%, 其次是烯烃, 贡献率最高在 40% 以上. 从主要 OFP 贡献物种来看, 除甲

表 2 四川省餐饮源 VOCs 成分谱组分质量分数/%
Table 2 VOCs composition ratio of cooking source in Sichuan/%

序号	组分类别	物种	食堂		烧烤		川菜	
			质量分数	偏差	质量分数	偏差	质量分数	偏差
1	烷烃	乙烷	8.47	11.82	7.71	0.69	7.57	11.70
2	烷烃	丙烷	1.23	1.44	6.15	4.22	2.60	5.95
3	烷烃	异丁烷	0.70	0.29	2.64	3.41	0.68	1.61
4	烷烃	正丁烷	0.66	0.35	3.12	3.79	0.80	1.45
5	烷烃	正戊烷	0.84	0.70	3.14	2.27	0.84	0.59
6	烷烃	2-甲基己烷(异庚烷)	0.12	0.08	0.08	0.00	0.10	0.23
7	烷烃	3-甲基己烷	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.03
8	烷烃	正辛烷	0.45	0.58	0.09	0.02	0.11	0.16
9	烷烃	2,3-二甲基戊烷	0.01	0.01	0.01	0.00	0.02	0.06
10	烷烃	异戊烷	0.16	0.17	0.83	0.32	0.46	0.76
11	烷烃	2,2-二甲基丁烷	0.02	0.01	0.01	0.00	0.04	0.09
12	烷烃	2,4-二甲基戊烷	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.04
13	烷烃	3-甲基戊烷	0.03	0.02	0.07	0.00	0.07	0.19
14	烷烃	正己烷	0.32	0.28	0.57	0.59	0.21	0.38
15	烷烃	2-甲基庚烷	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.07
16	烷烃	正壬烷	0.05	0.04	0.06	0.11	0.14	0.48
17	烷烃	癸烷	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.05
18	烷烃	十一烷	0.17	0.18	0.08	0.03	0.23	0.65
19	烷烃	十二烷	0.14	0.21	0.42	0.02	0.20	0.81
20	烷烃	2,2,4-三甲基戊烷	0.02	0.02	0.02	0.00	0.03	0.07
21	烷烃	环戊烷	0.01	0.00	0.03	0.03	0.02	0.05
22	烷烃	2,3-二甲基丁烷	0.07	0.08	0.17	0.00	0.11	0.31
23	烷烃	2-甲基戊烷	0.10	0.10	0.17	0.00	0.11	0.30
24	烷烃	2,3,4-三甲基戊烷	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02
25	烷烃	庚烷	0.48	0.55	0.50	0.57	0.16	0.32
26	烷烃	甲基环己烷	0.04	0.01	0.19	0.01	0.12	0.38
27	烷烃	环己烷	0.02	0.02	0.13	0.00	0.06	0.19
28	烷烃	甲基环戊烷	0.02	0.02	0.02	0.00	0.04	0.14
29	烷烃	3-甲基庚烷	0.01	0.00	0.02	0.00	0.03	0.07
30	烯烃	乙烯	2.09	2.18	4.95	1.66	6.74	6.05
31	烯烃	丙烯	0.15	0.20	1.97	2.07	1.06	2.28
32	烯烃	1-丁烯	0.11	0.07	1.05	1.00	0.46	0.98
33	烯烃	反-2-丁烯	0.02	0.03	0.27	0.52	0.02	0.03
34	烯烃	顺-2-丁烯	0.00	0.00	0.25	0.47	0.02	0.04
35	烯烃	1,3-丁二烯	0.02	0.02	9.52	4.59	3.61	3.70
36	烯烃	1-戊烯	0.05	0.07	0.54	0.71	0.18	0.45
37	烯烃	反-2-戊烯	0.01	0.00	0.10	0.19	0.02	0.04
38	烯烃	顺-2-戊烯	0.01	0.01	0.05	0.09	0.01	0.03
39	烯烃	1-己烯	0.08	0.07	0.60	0.93	0.29	0.67
40	烯烃	异戊二烯	0.01	0.02	0.06	0.03	0.04	0.04
41	炔烃	乙炔	2.46	2.82	1.46	1.60	4.18	2.59
42	芳香烃	苯	0.16	0.13	0.78	0.56	0.44	0.70
43	芳香烃	间/对-二甲苯	0.12	0.15	0.37	0.43	0.18	0.12
44	芳香烃	丙基苯	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.04
45	芳香烃	甲苯	0.44	0.45	0.98	0.70	0.23	0.21
46	芳香烃	邻-二甲苯	0.08	0.08	0.08	0.02	0.03	0.09
47	芳香烃	苯乙烯	0.04	0.05	0.03	0.00	0.03	0.07
48	芳香烃	1,4-二乙基苯	0.00	0.00	0.01	0.00	0.02	0.09
49	芳香烃	1,2,3-三甲基苯	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.07
50	芳香烃	1,3-二乙基苯	0.04	0.06	0.02	0.00	0.04	0.10
51	芳香烃	3-乙基甲苯	0.01	0.00	0.01	0.00	0.02	0.11
52	芳香烃	2-乙基甲苯	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.05
53	芳香烃	异丙基苯	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.03
54	芳香烃	1,2,4-三甲基苯	0.03	0.04	0.03	0.00	0.08	0.33
55	芳香烃	4-乙基甲苯	0.01	0.01	0.02	0.00	0.02	0.11
56	芳香烃	1,3,5-三甲苯	0.01	0.01	0.01	0.00	0.02	0.11

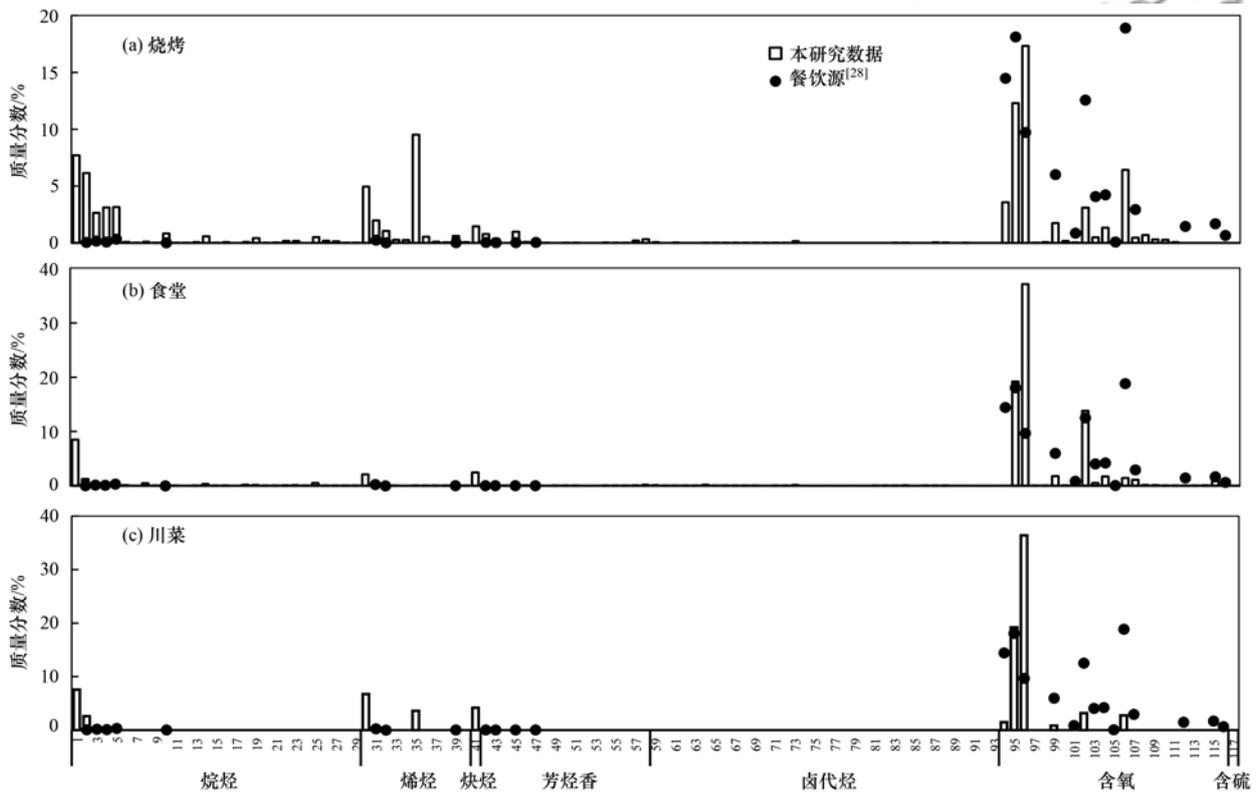
续表 2

序号	组分类别	物种	食堂		烧烤		川菜	
			质量分数	偏差	质量分数	偏差	质量分数	偏差
57	芳香烃	乙基苯	0.08	0.09	0.20	0.09	0.06	0.12
58	芳香烃	萘	0.16	0.24	0.32	0.00	0.16	0.45
59	卤代烃	氯甲烷	0.11	0.15	0.06	0.08	0.06	0.09
60	卤代烃	反-1,2-二氯乙烯	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01
61	卤代烃	顺-1,2-二氯乙烯	0.02	0.02	0.03	0.00	0.01	0.05
62	卤代烃	1,1-二氯乙烯	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01
63	卤代烃	氯乙烯	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02
64	卤代烃	1,2-二氯乙烷	0.19	0.32	0.01	0.00	0.02	0.03
65	卤代烃	1,2-二氯丙烷	0.02	0.03	0.01	0.00	0.01	0.04
66	卤代烃	1,1-二氯乙烷	0.01	0.02	0.01	0.00	0.01	0.02
67	卤代烃	氯乙烷	0.01	0.02	0.01	0.00	0.00	0.01
68	卤代烃	顺-1,3-二氯丙烯	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.04
69	卤代烃	反-1,3-二氯-1-丙烯	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.04
70	卤代烃	三氯甲烷	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.02
71	卤代烃	二氯溴甲烷	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.05
72	卤代烃	1,1,2,2-四氯乙烷	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.02
73	卤代烃	二氯甲烷	0.13	0.20	0.15	0.00	0.15	0.40
74	卤代烃	二氟二氯甲烷	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
75	卤代烃	四氟二氯乙烷	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
76	卤代烃	溴甲烷	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02
77	卤代烃	1,1,2-三氯乙烷	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
78	卤代烃	1,1,1-三氯乙烷	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
79	卤代烃	一氟三氯甲烷	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
80	卤代烃	三氟三氯乙烷	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
81	卤代烃	1,2-二溴乙烷	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.04
82	卤代烃	氯苯	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
83	卤代烃	四氯化碳	0.04	0.06	0.01	0.00	0.01	0.02
84	卤代烃	苜基氯	0.08	0.12	0.01	0.00	0.03	0.11
85	卤代烃	一氯二溴甲烷	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01
86	卤代烃	三氯乙烯	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01
87	卤代烃	1,3-二氯苯	0.03	0.04	0.04	0.00	0.03	0.09
88	卤代烃	1,4-二氯苯	0.03	0.03	0.03	0.00	0.03	0.09
89	卤代烃	1,2-二氯苯	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
90	卤代烃	四氯乙烯	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01
91	卤代烃	三溴甲烷	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
92	卤代烃	1,2,4-三氯苯	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
93	卤代烃	六氯丁二烯	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
94	含氧	乙醛	0.00	0.00	3.57	2.90	1.47	1.44
95	含氧	甲醛	19.20	0.00	12.30	0.00	19.20	0.00
96	含氧	乙醇	37.17	28.94	17.33	20.01	36.39	25.72
97	含氧	四氢呋喃	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02
98	含氧	2-己酮	0.04	0.07	0.07	0.01	0.16	0.37
99	含氧	丙酮	1.78	1.36	1.74	1.04	0.83	0.57
100	含氧	醋酸乙烯酯	0.06	0.03	0.17	0.03	0.11	0.33
101	含氧	2-丁酮	0.18	0.22	0.05	0.05	0.04	0.06
102	含氧	己醛	13.80	17.63	3.10	2.22	3.16	3.49
103	含氧	正丁醛	0.49	0.52	0.48	0.36	0.28	0.39
104	含氧	戊醛	1.71	1.54	1.34	1.16	0.83	0.67
105	含氧	异丙醇	0.46	0.66	0.41	0.47	0.71	0.96
106	含氧	丙烯醛	1.43	1.70	6.42	7.52	2.75	3.07
107	含氧	丙醛	1.10	1.68	0.45	0.14	0.17	0.41
108	含氧	4-甲基-2-戊酮	0.14	0.17	0.69	0.00	0.07	0.12
109	含氧	乙酸乙酯	0.10	0.14	0.30	0.21	0.24	0.29
110	含氧	甲基丙烯酸甲酯	0.01	0.01	0.26	0.45	0.01	0.05
111	含氧	甲基丙烯醛	0.02	0.04	0.06	0.08	0.03	0.03
112	含氧	丁烯醛	0.05	0.02	0.01	0.01	0.09	0.19
113	含氧	甲基叔丁基醚	0.04	0.07	0.01	0.00	0.01	0.02
114	含氧	1,4-二噻烷	0.06	0.08	0.04	0.00	0.02	0.04
115	含氧	苯甲醛	1.01	1.59	0.58	0.02	0.15	0.21
116	含氧	间-甲基苯甲醛	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.04
117	含硫	二硫化碳	0.01	0.00	0.18	0.00	0.01	0.03

表 3 不同餐饮菜系的组分构成/%

Table 3 Composition of different cuisines/%

菜系	ω (烷烃)	ω (烯烃)	ω (炔烃)	ω (芳香烃)	ω (卤代烃)	ω (含氧)	ω (含硫)	物种数量	文献
川菜	14.79	12.44	4.18	1.39	0.44	66.76	0.01	117	本研究
川菜	1.75	1.15	/	1.59	0.06	95.45	/	104	[15]
川菜	13.29	2.07	/	15.00	19.23	50.41	/	99	[20]
川菜	51.20	4.30	/	8.90	/	28.00	/	116	[21]
川菜	47.90	41.10	/	10.80	0.20	/	/	72	[19]
湖南菜	63.80	21.90	/	14.30	/	/	/	51	[18]
烧烤	26.28	19.35	1.46	2.89	0.45	49.39	0.18	117	本研究
烧烤	34.15	37.77	/	17.53	0.58	9.91	/	104	[15]
烧烤	53.20	42.80	/	2.20	0.10	1.70	/	99	[20]
烧烤	9.70	15.80	/	4.90	/	69.20	/	116	[21]
烧烤	28.40	58.30	/	13.30	0	/	/	107	[19]
烤鸭	2.40	12.70	/	14.00	4.20	66.70	/	72	[14]
烧烤	34.70	39.90	/	25.40	/	/	/	51	[18]
食堂	14.16	2.56	2.46	1.18	0.75	78.88	0.01	117	本研究
食堂	63.69	21.03	/	2.82	1.64	10.68	/	99	[20]



横坐标不同序号物种与表 1 对应

图 2 与文献成分谱的比较

Fig. 2 Comparison of source profiles with another study

醛和丙烯醛等醛类以及乙烯和 1,3-丁二烯等烯烃物种之外,乙醇的 OFP 贡献率也较为突出,最高在 15% 以上。

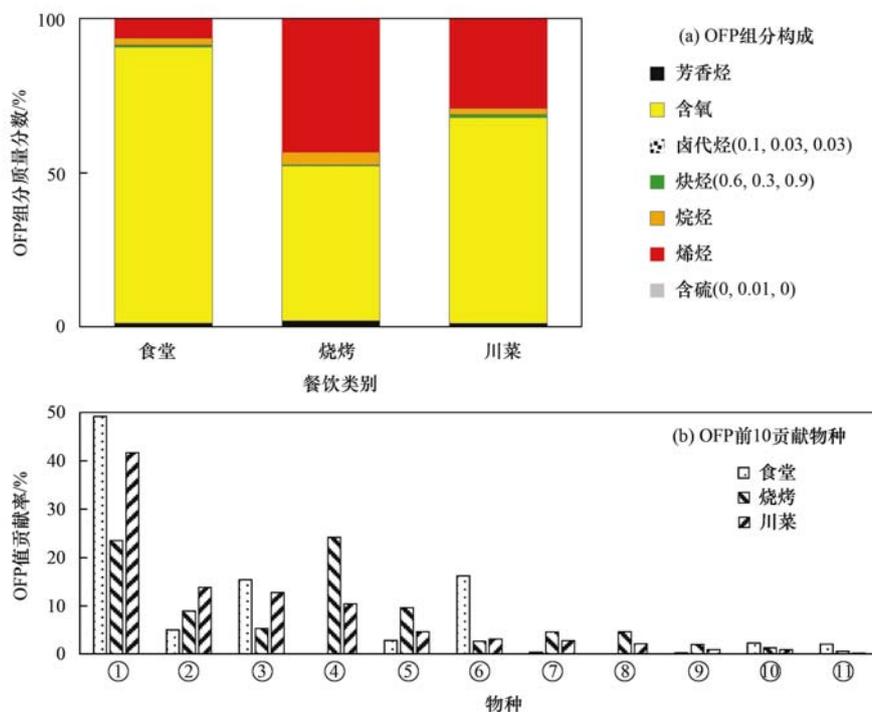
利用各组分的质量分数与各组分的 MIR 值相乘再加和,可获得不同餐饮类型源的 MIR 值,经计算烧烤的 MIR 值为 5.0,川菜为 4.4,食堂为 3.7。将 Sha 等^[28]的研究建立的成分谱库中的 117 组分提取出来,进行归一化计算各类排放源的 MIR 值(表 4),使其与本研究的源 MIR 值进行对比。结果显示,

本研究的 MIR 值略小于文献[28]中餐饮源的 MIR 值,但显著高于文献[28]中的工业过程源、油品存储运输源、固定燃烧源和溶剂使用源等。说明餐饮源对臭氧生成可能有重要贡献,在开展夏季臭氧防控时不应忽视餐饮源的影响。

基于本研究的组分谱结果,进一步分析不同物种数量的成分谱对餐饮源 OFP 的影响,如对川菜和烧烤而言,本研究建立的 117 种组分的组分谱分别是 56 种 VOCs 物种谱(PAMS 组分)、107 种 VOCs

物种组分谱(PAMS + TO15 组分)和 13 种 OVOCs 组分谱对应 OFP 值的 4、2 和 2 倍. 在开展餐饮源

VOCs 组分监测研究时,建议监测 117 种 VOCs 组分,从而更好地掌握餐饮源污染特征.



(a) 中括号内数值分别对应食堂、烧烤和川菜中质量分数; ①甲醛, ②乙烯, ③乙醇, ④1,3-丁二烯, ⑤丙烯醛, ⑥己醛, ⑦丙烯, ⑧乙醛, ⑨1-丁烯, ⑩戊醛, ⑪丙醛

图 3 不同餐饮菜系的 OFP 构成及主要贡献物种

Fig. 3 OFP composition and major species of different cuisines

表 4 基于文献[28]的不同排放源 MIR 值(117 种 VOCs 组分)

Table 4 MIR values of different emission sources (117 VOCs components) based on reference [28]

排放源	固定燃烧源	移动源	非道路移动源	工业过程源	溶剂使用源	油品存储运输源	生物质燃烧源	餐饮源
MIR 值	2.81	3.98	5.69	2.42	3.20	2.66	3.97	5.76

2.3 餐饮源 NMHCs 排放因子

表 5 列出了实测的 12 家餐饮单位的 NMHCs 浓度和基于风量计算的单位小时 NMHCs 排放量,同时也将已有研究中测得的各餐饮类别的 VOCs 和 NMHCs 浓度对比列出. 结果显示,测试的 7 家川菜馆对应的平均 ρ (NMHCs) 为 $(43.7 \pm 79.8) \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 平均单位小时 NMHCs 排放量为 $(444.2 \pm 856.6) \text{ g} \cdot \text{h}^{-1}$, 其中川菜 1 餐馆采集的第一组数据浓度高达 $550 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 导致其小时 NMHCs 排放浓度是其他 6 家川菜餐馆小时浓度的 10 ~ 30 倍, 推测可能与第一组样品采集时餐馆客流量多, 烹饪菜品排放强度大有关; 从排放强度来看, 川菜 1 餐馆的 NMHCs 排放强度虽然是同类其他川菜馆的 10 ~ 100 倍, 但却与 Wang 等^[20] 测试的绍兴菜强度接近.

测试的 3 家烧烤平均 ρ (NMHCs) 为 $(5.5 \pm 4.7) \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 单位小时排放量为 $(44.8 \pm 38.4) \text{ g} \cdot \text{h}^{-1}$, 浓度低于何万清等^[30] 在北京测得的烧烤餐饮的 NMHCs 浓度, 有研究表明^[20], 餐饮源的 VOCs 物

种加和浓度或单位小时排放量往往小于 NMHCs 的浓度或单位小时排放量, 而本研究测得的烧烤 NMHCs 浓度与文献[15, 18, 19]测得的烧烤 VOCs 物种加和排放量相当或偏小, 同样说明本研究测得的烧烤 NMHCs 排放量整体偏低. 监测的 2 家食堂 ρ (NMHCs) 分别为 $2.9 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $11.4 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 单位小时排放量为 $42.2 \text{ g} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $124.7 \text{ g} \cdot \text{h}^{-1}$, 也低于 Wang 等^[20] 测得的上海食堂 NMHCs 单位小时排放量.

根据餐饮服务业态和规模分类标准了解到, 餐饮单位往往是按照规模进行数量统计的, 不同菜系的数量统计较难获得, 因此在进行排放清单计算时需要制定以不同餐饮规模数量为活动水平的排放因子. 表 6 列出了不同规模类型餐饮的 NMHCs 排放因子(以单位小时 NMHCs 排放量计), 其中特大型、中型和小型餐饮因子是基于本次监测的川菜和烧烤的研究结果平均获得的(其中川菜 1 数据过于离散, 未参与统计), 由于实地未测量大型规模餐饮和快餐餐饮, 对应的因子采用文献[20]的数据. 中型

规模餐饮对应的排放因子标准偏差最大,不确定度高,平均排放因子为同类研究中相关因子的 1/4,可能存在低估,下一步还需加强对中型规模餐饮本地排放因子的研究。

表 5 不同餐饮类型的 VOCs 与 NMHCs 浓度和单位小时排放量¹⁾

Table 5 VOCs and NMHCs concentrations and hourly emissions of different catering types

餐饮类型	规模	餐馆名称	VOCs 物种加和			NMHCs			文献
			浓度 /mg·m ⁻³	每小时排放量 /g·h ⁻¹	每小时排放量 不确定度/g·h ⁻¹	浓度 /mg·m ⁻³	每小时排放量 /g·h ⁻¹	每小时排放量 不确定度/g·h ⁻¹	
川菜	中型	川菜 1	/	/	/	224.1	2 375.5	3 096.2	本研究
川菜	中型	川菜 2	/	/	/	9.1	25.3	8.5	本研究
川菜	小型	川菜 3	/	/	/	15.5	86.6	23.3	本研究
川菜	小型	川菜 4	/	/	/	25.9	55.8	24.5	本研究
川菜	小型	川菜 5	/	/	/	7.4	75.3	16.8	本研究
川菜	中型	川菜 6	/	/	/	15.60	201.5	270.0	本研究
川菜	特大型	川菜 7	/	/	/	8.20	289.6	162.0	本研究
川菜	大型	/	11.1	98.02	/	/	/	/	[15]
川菜	小型	/	17.1	56.75	/	/	/	/	[19]
川菜	平均	/	/	5.35	/	/	/	/	[29]
川湘菜	/	/	/	17.80	0.09	/	24.5	0.1	[20]
川湘菜	/	/	/	/	/	8.12	/	/	[30]
湘菜	中型	/	0.5	4.80	/	/	/	/	[18]
湘菜	中型	/	36.8	843.41	/	/	/	/	[19]
烧烤	中型	/	11.1	43.36	/	/	/	/	[15]
烧烤	小型	/	3.5	5.09	/	/	/	/	[18]
烧烤	小型	/	43.8	27.31	/	/	/	/	[19]
烧烤	中型	烧烤 1	/	/	/	0.92	19.4	6.9	本研究
烧烤	小型	烧烤 2	/	/	/	10.26	89.0	31.8	本研究
烧烤	小型	烧烤 3	/	/	/	5.4	26.0	5.4	本研究
烧烤	/	/	/	/	/	15.66	/	/	[30]
食堂	食堂	食堂 1	/	/	/	2.9	42.2	2.9	本研究
食堂	食堂	食堂 2	/	/	/	11.4	124.7	11.4	本研究
食堂	食堂	/	/	15.80	5.94	/	129.4	48.8	[20]
食堂	食堂	/	/	/	/	2.34	/	/	[30]
北京烤鸭	小型	/	8.3	33.25	14.9	/	/	/	[14]
烤鸭	/	/	/	/	/	18.45	/	/	[30]
家常菜	中型	/	0.5	5.68	/	/	/	/	[18]
家常菜	中型	/	4.1	73.76	/	/	/	/	[19]
家常菜	/	/	/	/	/	5.27	/	/	[30]
山东菜	中型	/	0.3	1.77	/	/	/	/	[18]
西式快餐	快餐	/	4.4	23.14	/	/	/	/	[15]
西式快餐	/	/	/	11.20	1.4	/	20.8	2.7	[20]
粤菜	/	/	/	78.40	38.7	/	358.5	176.8	[20]
粤菜	/	/	/	/	/	5.58	/	/	[30]
绍兴菜	/	/	/	225.60	/	/	1030.2	/	[20]
上海菜	/	/	/	111.04	30.4	/	634.6	8.0	[20]
快餐	/	/	/	/	/	2.7	/	/	[30]
浙江菜	中型	/	3.7	31.40	/	/	/	/	[15]
中式快餐	快餐	/	4.7	25.70	/	/	/	/	[15]
中式快餐	快餐	/	13.6	123.24	/	/	/	/	[19]

1) “/”表示无相应的数据

2.4 四川省餐饮源 VOCs(以 NMHCs 计)排放清单

通过四川省大气污染源排放清单平台调查数据,获得 2019 年四川省各市(州)不同规模的餐饮单位数量,与文献[20]类似,餐饮经营时间按照每天 4 h,全年 365 d 计。结合表 6 中的排放因子,计算获得四川省餐饮源 VOCs 排放清单,结果见表 7。2019 年四川省 VOCs 餐饮源排放量为 32 kt,其中成

都市餐饮源排放量最高为 10 kt,与 2017 年四川省和成都市 VOCs 排放量^[31]的相比,占比为 5% 和 6% 左右;基于 2.2 节中臭氧生成潜势的分析,可计算餐饮源的臭氧生成潜势值,简化按照川菜来计算(MIR 值为 4.4),四川省和成都市餐饮源 OFP 值分别为 141 kt 和 44 kt,各占四川省和成都市 VOCs 总 OFP 值的 5% 和 7.5%^[31]。综上表明四川省餐饮源

VOCs 排放对臭氧生成有重要贡献,在开展臭氧污染防治过程中,应加大餐饮源挥发性有机物管控力度.分餐饮类型来看,四川省小型餐馆排放量最大,其次是大型餐馆,分别占全省餐饮排放量的 48% 和 24%,因此应着重加强大型和小型餐馆的管控,此外,由于中型餐馆排放因子可能存在低估,因此中型餐馆的管控也不容忽视.

表 6 不同餐饮规模的 VOCs 排放因子(以 NMHCs 计)/g·h⁻¹

餐饮规模	本研究		文献[20]	
	排放因子	排放因子偏差	排放因子	排放因子偏差
特大型	289.6	162.0	285.9	50.7
大型	983.3	197.6	983.3	197.6
食堂	83.4	10.0	129.4	48.8
中型	82.1	103.5	358.5	105.1
小型	66.5	26.2	24.5	0.1
快餐	20.8	2.7	20.8	2.7

根据 VOCs 清单指南^[32] 计算四川省餐饮源的

表 7 四川省 2019 年餐饮源 VOCs 排放清单

Table 7 VOCs emission inventory of Sichuan Province in 2019

市(州)	VOCs 排放量/t						排放量合计	人口数量/万人	单位人口排放强度/t·万人 ⁻¹	面积/km ²	单位面积排放量/kg·km ⁻²
	特大型	大型	中型餐馆	小型餐馆	快餐	食堂					
成都市	52.0	2 008.4	1 088.0	6 242.3	186.6	812.0	10 389.4	1 633.0	6.4	14 335.0	724.8
绵阳市	43.6	957.6	378.4	414.6	129.8	248.4	2 172.3	485.7	4.5	20 248.0	107.3
南充市	71.0	585.7	261.5	720.1	26.4	199.1	1 863.9	644.0	2.9	12 477.0	149.4
宜宾市	14.0	308.7	310.3	724.1	28.8	291.4	1 677.2	455.6	3.7	13 266.0	126.4
巴中市	0.0	361.8	271.4	766.9	19.2	226.0	1 645.3	332.2	5.0	12 293.0	133.8
泸州市	3.8	357.5	127.7	682.1	7.7	281.2	1 459.9	432.4	3.4	12 236.0	119.3
达州市	14.0	455.1	240.0	475.5	23.1	195.9	1 403.6	572.0	2.5	16 582.0	84.6
自贡市	5.1	287.1	87.0	631.0	16.2	119.6	1 145.9	292.0	3.9	4 381.0	261.6
德阳市	11.0	360.3	158.1	453.1	12.3	134.7	1 129.6	354.5	3.2	5 910.0	191.1
乐山市	3.8	180.9	140.1	559.6	2.8	173.0	1 060.3	326.7	3.2	12 723.0	83.3
资阳市	14.8	370.4	124.3	302.5	15.3	127.4	954.7	251.2	3.8	5 744.0	166.2
广安市	7.2	229.7	162.2	352.6	4.9	149.3	905.9	324.1	2.8	6 341.0	142.9
眉山市	8.5	182.3	174.6	323.5	5.6	200.7	895.2	298.4	3.0	7 140.0	125.4
广元市	0.0	114.8	71.2	519.0	4.8	116.3	826.2	266.7	3.1	16 311.0	50.7
遂宁市	11.0	188.1	108.7	316.4	6.4	143.4	774.1	320.2	2.4	5 323.0	145.4
凉山州	6.8	166.5	75.0	339.4	7.9	172.1	767.7	490.8	1.6	60 294.0	12.7
阿坝州	5.1	149.3	96.9	382.3	1.9	88.6	724.2	94.4	7.7	83 016.0	8.7
内江市	8.0	94.8	71.7	320.9	4.8	161.3	661.5	369.9	1.8	5 385.0	122.8
雅安市	0.0	76.1	44.1	379.8	3.8	124.7	628.5	154.0	4.1	15 046.0	41.8
攀枝花市	3.4	142.1	60.7	165.5	2.4	65.4	439.5	123.6	3.6	7 401.0	59.4
甘孜州	0.0	21.5	128.5	100.5	2.1	92.3	344.9	119.6	2.9	149 599.0	2.3
四川省	282.9	7 598.7	4 180.4	15 172.0	512.9	4 122.7	31 869.6	8 341.0	3.8	486 051.0	65.6
北京 ^[33]							6 169	2 154	2.9	16 410	375.9
上海 ^[20]							7 862	2 424	3.2	6 340.5	1 239.9

3 结论

(1)从浓度构成来看,含氧和烷烃两类组分为川菜、烧烤和食堂餐饮的最主要的组分,二者合计质量分数在 75% 以上,主要 VOCs 物种为乙醇、甲

VOCs 排放量,仅为 292 t,与本研究获得的餐饮源排放量差距巨大,其中活动水平数据的分类和排放因子不同是造成差异的最主要原因.文献[32]是以人口为活动水平,更适用于空间大尺度的排放量估算,而本研究的清单是以不同规模的餐饮单位数量为活动水平,更适用于空间中小尺度的估算.根据四川省统计年鉴数据(2019 年)各市(州)人口和面积数据,进一步获得各市州餐饮排放 VOCs 的人口排放强度和单位面积排放量,结果显示全省餐饮源人口平均排放强度为 3.8 t·万人⁻¹,单位面积排放量为 65.6 kg·km⁻².采用与本文同类清单计算方法的研究多以城市为对象,选取成都的人口排放强度和单位面积排放量与北京^[33]和上海^[20]等地的结果进行比较,成都单位面积 VOCs 排放量分别是北京和上海的 190% 和 60%,人口排放强度是北京和上海的 2 倍左右,差异较小,说明本研究获得的餐饮源 VOCs 排放量与其他同类研究结果具有可比性,可为管理者提供有益的参考.

醛、乙烷、己醛、乙烯、1,3-丁二烯和丙烯醛等;从 OFP 值构成来看,含氧组分对 OFP 的贡献最大,其次是烯烃,主要 OFP 贡献物种为甲醛、乙烯、乙醇、1,3-丁二烯、丙烯醛和己醛等.

(2)测试的 7 家川菜馆对应的平均 ρ (NMHCs)

为 $(43.7 \pm 79.8) \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 平均单位小时 NMHCs 排放量为 $(444.2 \pm 856.6) \text{ g} \cdot \text{h}^{-1}$; 测试的 3 家烧烤平均 ρ (NMHCs)为 $(5.5 \pm 4.7) \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 单位小时排放量为 $(44.8 \pm 38.4) \text{ g} \cdot \text{h}^{-1}$; 测试的 2 家食堂 ρ (NMHCs)分别为 $2.9 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $11.4 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 单位小时排放量为 $42.2 \text{ g} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $124.7 \text{ g} \cdot \text{h}^{-1}$.

(3) 基于本地监测和已有数据, 获得四川省不同规模类型餐饮的 VOCs 排放因子; 2019 年四川省餐饮源 VOCs 排放量和 OFP 值分别为 32 kt 和 141 kt, 分别占人为源 VOCs 排放量和 OFP 值的 5% 左右, 餐饮源对臭氧生成可能有重要贡献, 应加大餐饮源挥发性有机物管控力度。

参考文献:

- [1] 唐孝炎, 张远航, 邵敏. 大气环境化学[M]. (第二版). 北京: 高等教育出版社, 2006. 272-273.
Tang X Y, Zhang Y H, Shao M. Atmospheric environmental chemistry (2nd ed.) [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006. 272-273.
- [2] 叶代启, 刘锐源, 田俊泰. 我国挥发性有机物排放量变化趋势及政策研究[J]. 环境保护, 2020, 48(15): 23-26.
Ye D Q, Liu R Y, Tian J T. Trends of volatile organic compounds emissions and research on policy in China [J]. Environmental Protection, 2020, 48(15): 23-26.
- [3] 邵敏, 袁斌, 王鸣, 等. 挥发性有机物(VOCs)来源及其大气化学作用[M]. 北京: 科学出版社, 2020. 141-142.
Shao M, Yuan B, Wang M, et al. Volatile organic compounds in the atmosphere: sources and the roles in atmospheric chemistry [M]. Beijing: Science Press, 2020. 141-142.
- [4] 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.
- [5] Zhang D C, Liu J J, Jia L Z, et al. Speciation of VOCs in the cooking fumes from five edible oils and their corresponding health risk assessments[J]. Atmospheric Environment, 2019, 211: 6-17.
- [6] 周子航, 邓也, 陆成伟, 等. 成都市人为源挥发性有机物排放清单及特征[J]. 中国环境监测, 2017, 33(3): 39-48.
Zhou Z H, Deng Y, Lu C W, et al. Emission inventory and characteristics of volatile organic compounds from anthropogenic sources in Chengdu [J]. Environmental Monitoring in China, 2017, 33(3): 39-48.
- [7] 夏思佳, 刘倩, 赵秋月. 江苏省人为源 VOCs 排放清单及其对臭氧生成贡献[J]. 环境科学, 2018, 39(2): 592-599.
Xia S J, Liu Q, Zhao Q Y. Emission inventory of anthropogenically sourced VOCs and its contribution to ozone formation in Jiangsu Province [J]. Environmental Science, 2018, 39(2): 592-599.
- [8] 王成辉, 陈军辉, 韩丽, 等. 成都市城区大气 VOCs 季节污染特征及来源解析[J]. 环境科学, 2020, 41(9): 3951-3960.
Wang C H, Chen J H, Han L, et al. Seasonal pollution characteristics and analysis of the sources of atmospheric VOCs in Chengdu urban area [J]. Environmental Science, 2020, 41(9): 3951-3960.
- [9] DB 11/1488-2018, 餐饮业大气污染物排放标准[S].
- [10] DB 50/859-2018, 餐饮业大气污染物排放标准[S].
- [11] GB 18483-2001, 饮食业油烟排放标准[S].
- [12] 高雅琴, 王红丽, 许睿哲, 等. 餐饮源挥发性有机物组成及排放特征[J]. 环境科学, 2019, 40(4): 1627-1633.
Gao Y Q, Wang H L, Xu R Z, et al. Characterization of volatile organic compounds from cooking emissions [J]. Environmental Science, 2019, 40(4): 1627-1633.
- [13] 何万清, 聂磊, 田刚, 等. 基于 GC-MS 的烹调油烟 VOCs 的组分研究[J]. 环境科学, 2013, 34(12): 4605-4611.
He W Q, Nie L, Tian G, et al. Study on the chemical compositions of VOCs emitted by cooking oils based on GC-MS [J]. Environmental Science, 2013, 34(12): 4605-4611.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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 Scientiarum Circumstantiae, 2011, 31(8): 1768-1774.
- [20] 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.
- [21] 陈文泰, 胡崑, 薛艳, 等. 餐饮源挥发性有机物(VOCs)排放特征及对臭氧生成的影响[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2020, 12(6): 647-655.
Chen W T, Hu K, Xue Y, et al. Characterization of volatile organic compounds (VOCs) from cooking emission and their impact on ozone formation [J]. Journal of Nanjing University of Information Science & Technology (Natural Science Edition), 2020, 12(6): 647-655.
- [22] 李勤勤, 龚道程, 吴爱华, 等. 餐饮油烟 VOCs 排放特征研究进展[J]. 环境科学与技术, 2018, 41(12): 113-121.
Li Q Q, Gong D C, Wu A H, et al. Emission characteristics of VOCs from commercial cooking fumes: a review [J]. Environmental Science & Technology, 2018, 41(12): 113-121.
- [23] HJ 732-2014, 固定污染源废气 挥发性有机物的采样 气袋法[S].
- [24] HJ 38-2017, 固定污染源废气 总烃、甲烷和非甲烷总烃的测定 气相色谱法[S].

- [25] 周子航, 邓也, 谭钦文, 等. 四川省人为源挥发性有机物组分清单及其臭氧生成潜势[J]. 环境科学, 2019, **40**(4): 1613-1626.
Zhou Z H, Deng Y, Tan Q W, *et al.* Speciated VOCs emission inventory and ozone formation potential in Sichuan province[J]. Environmental Science, 2019, **40**(4): 1613-1626.
- [26] Carter W P L. Updated maximum incremental reactivity scale and hydrocarbon bin reactivities for regulatory applications [R]. Riverside: California Air Resources Board, 2010. 7-339.
- [27] 邱婉怡, 刘禹含, 谭照峰, 等. 基于中国四大城市群计算的最大增量反应活性[J]. 科学通报, 2020, **65**(7): 610-621.
Qiu W Y, Liu Y H, Tan Z F, *et al.* Calculation of maximum incremental reactivity scales for volatile organic compounds based on typical megacities in China[J]. Chinese Science Bulletin, 2020, **65**(7): 610-621.
- [28] Sha Q E, Zhu M N, Huang H W, *et al.* A newly integrated dataset of volatile organic compounds (VOCs) source profiles and implications for the future development of VOCs profiles in China [J]. Science of the Total Environment, 2021, **793**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.148348.
- [29] 蒋燕, 尹元畅, 王波, 等. 成都市川菜烹饪油烟中 VOCs 排放特征及其对大气环境的影响[J]. 环境化学, 2014, **33**(11): 2005-2006.
- [30] 何万清, 王天意, 邵霞, 等. 北京市典型餐饮企业大气污染物排放特征[J]. 环境科学, 2020, **41**(5): 2050-2056.
He W Q, Wang T Y, Shao X, *et al.* Pollution characteristics of cooking fumes, particulates, and non-methane hydrocarbons in the exhaust of typical Beijing restaurants [J]. Environmental Science, 2020, **41**(5): 2050-2056.
- [31] 徐晨曦, 陈军辉, 李媛, 等. 四川省基于第二次污染源普查数据的人为源大气污染源排放清单及特征[J]. 环境科学, 2020, **41**(10): 4482-4494.
Xu C X, Chen J H, Li Y, *et al.* Emission inventory and characteristics of anthropogenic air pollution sources based on second pollution source census data in Sichuan province [J]. Environmental Science, 2020, **41**(10): 4482-4494.
- [32] 中华人民共和国环境保护部. 大气挥发性有机物源排放清单编制技术指南(试行) [EB/OL]. http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201408/t20140828_288364.htm, 2014-08-20.
- [33] 孙成一, 白画画, 陈雪, 等. 北京市餐饮业大气污染物排放特征[J]. 环境科学, 2020, **41**(6): 2596-2601.
Sun C Y, Bai H H, Chen X, *et al.* Emission characteristics of the catering industry in Beijing [J]. Environmental Science, 2020, **41**(6): 2596-2601.



CONTENTS

Analysis of Change and Driving Factors of PM _{2.5} Mass Concentration in Tianjin from 2000 to 2020	CAI Zi-ying, HAO Jian, HAN Su-qin, <i>et al.</i> (1129)
Characteristics and Sources of PM _{2.5} -O ₃ Compound Pollution in Tianjin	XIAO Zhi-mei, XU Hong, GAO Jing-yun, <i>et al.</i> (1140)
Source Analysis of Ambient PM _{2.5} in Wuhan City Based on Random Forest Model	ZHANG Zhi-hao, CHEN Nan, ZHU Bo, <i>et al.</i> (1151)
Chemical Characteristics and Sources of Atmospheric Aerosols in the Surrounding District of a Heavily Polluted City in the Southern Part of North China	REN Xiu-long, HU Wei, WU Chun-miao, <i>et al.</i> (1159)
Characteristics of Water-soluble Ions in an Autumn Haze Process in the Southern Sichuan Urban Agglomeration After the Implementation of China's Air Pollution Prevention and Control Action Plan	WU An-nan, HUANG Xiao-juan, HE Ren-jiang, <i>et al.</i> (1170)
Concentration, Source, and Health Risk Assessment of PM ₁ Heavy Metals in Typical Pollution Processes in Zhengzhou	ZHAI Shi-ting, WANG Shen-bo, ZHANG Dong, <i>et al.</i> (1180)
Geographical Detection of Spatial Heterogeneity and Drivers of PM _{2.5} in the Yangtze River Economic Belt	WANG Li-li, LIU Xiao-jie, LI Ding, <i>et al.</i> (1190)
Spatial Heterogeneity of PM _{2.5} Concentration in Response to Land Use/Cover Conversion in the Yangtze River Delta Region	ZHOU Li-xia, WU Tao, JIANG Guo-jun, <i>et al.</i> (1201)
Analysis of Pollution Characteristics, Meteorological Impact, and Forecast Retrospective During the Spring Festival and the Lantern Festival in "2 + 26" Cities	ZHU Yuan-yuan, WANG Xiao-fei, WANG Wei, <i>et al.</i> (1212)
Pollution Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} in Shanxi Province Based on Wavelet Transform	ZHANG Ke-ke, HU Dong-mei, YAN Yu-long, <i>et al.</i> (1226)
Estimation of Surface Ozone Concentration and Health Impact Assessment in China	ZHAO Nan, LU Yi-min (1235)
Analysis of Ozone Pollution Spatio-temporal Evolution Characteristics and Identification of Its Long-term Variation Driving Factor over Hunan Province	LIU Yan-yan, YANG Lei-feng, XIE Dan-ping, <i>et al.</i> (1246)
Temporal and Spatial Variation in O ₃ Concentration Near the Surface of Shandong Peninsula and Analysis of Potential Source Areas	LI Le, LIU Min-xia, XIAO Shi-ni, <i>et al.</i> (1256)
Characteristics, Ozone Formation Potential, and Source Apportionment of VOCs During the COVID-19 Epidemic in Xiong'an	LIU Xin-jun, WANG Shu-juan, LIU Cheng, <i>et al.</i> (1268)
Characteristics and Source Analysis of VOCs Pollution During the Period of Ozone Exceeding the Standard in Zibo City	WANG Shuai, WANG Xiu-yan, YANG Wen, <i>et al.</i> (1277)
Comparison of VOCs Pollution Characteristics Between an Urban Site and a Background Site in Summer in Zibo	QIN Tao, XU Bo, WANG Xin-wu, <i>et al.</i> (1286)
Emission Characteristics and Inventory of Volatile Organic Compounds from Cooking in Sichuan Province	QIAN Jun, HAN Li, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i> (1296)
Emission Characteristics of Gas-and Particle-Phase Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from Cooking	LI Yuan-ju, WU Ai-hua, TONG Meng-xue, <i>et al.</i> (1307)
Diversity and Community Structure of Airborne Fungi in Different Working Areas of Composting Plants	YU Ao-yuan, XING Li-jun, SUN Xing-bin, <i>et al.</i> (1315)
Main Problems and Refined Solutions of Urban Fugitive Dust Pollution in China	LI Ting-kun, FENG Yin-chang, BI Xiao-hui, <i>et al.</i> (1323)
Water Quality Assessment and Spatial-temporal Variation Analysis in Yellow River Basin	LIU Yan-long, ZHENG Yi-an (1332)
Spatial Distribution and Influential Factors of Nutrients in Rivers of a Typical Mountainous City: A Case Study of the Qingshuixi River in Chongqing	WANG Chao, YE Qiu, JIA Bo-yang, <i>et al.</i> (1346)
River-Lake States in the Tributary of the Three Gorges Reservoir Area and Their Effects on the Phosphorus Content of Different Forms in the Sediment	HUANG Wei, ZHANG Xing, LUO Xiao-jiao, <i>et al.</i> (1356)
Molecular Signatures of Dissolved Organic Matter in the Paihe River and Its Tributaries	ZHAN Ya, YIN Hao, FENG Jing-wei, <i>et al.</i> (1365)
Multiphase Spatial Distribution Characteristics of Cd Morphology in Typical Intertidal Zones in the Guanglong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area and Its Influencing Factors	CUI Xin-yue, MO Wu-qiu, LIAO Jian-bo (1375)
Occurrence Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics in the Surface Water of Luoma Lake and Its Main Inflow Rivers	GONG Run-qiang, ZHAO Hua-jin, GAO Zhan-qi, <i>et al.</i> (1384)
Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Antibiotics in the Third Drain of Ningxia	LI Fu-juan, GAO Li, LI Ling-yun, <i>et al.</i> (1394)
Historical Changes and Responses to Human Activities of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Lake Sediments from Northern China During the Past 100 Years	GONG Xiong-hu, ZHAO Zhong-hua, DING Qi-qi, <i>et al.</i> (1404)
Characteristics of Bacterioplankton Community Between River and Lake/Reservoir in the Yangtze River Basin	HU Yu-xin, ZHANG Jing, HUANG Jie, <i>et al.</i> (1414)
Characteristics of Bacterial Community Structure in Wuliangs Lake During an Irrigation Interval in Hetao Plain	SHI Yu-jiao, LI Wen-bao, ZHANG Bo-yao, <i>et al.</i> (1424)
Effects of Landscape Structures on Bacterioplankton Communities at Multi-spatial Scales in the Yuanhe River	SHU Wang, WANG Peng, DING Ming-jun, <i>et al.</i> (1434)
Microbial Community Structure on Microplastic Surface in the <i>Grus leucogeranus</i> Reserve of Poyang Lake	LIU Shu-li, JIAN Min-fei, ZOU Long, <i>et al.</i> (1447)
Influence of Microplastics on the Development of <i>Proteus</i> Biofilm	TAO Hui, QI Yi-ting, YU Duo, <i>et al.</i> (1455)
Deposition Law of Low-Density Microplastics Aggregation in Wuliangs Lake	LIU Yu, SHI Xiao-hong, ZHANG Sheng, <i>et al.</i> (1463)
Adsorption of Fulvic Acid on Virgin and Aging Microplastics	SONG Ya-li, YU Ya, ZHENG Lei, <i>et al.</i> (1472)
Diffusive Fluxes and Controls of N ₂ O from Coastal Rivers in Tianjin City	TANG Meng-yao, HU Xiao-kang, WANG Hong-wei, <i>et al.</i> (1481)
Effects of Hematite and Biochar Addition on Wastewater Treatment Efficiency, Greenhouse Gas Emission, and Microbial Community in Subsurface Flow Constructed Wetland	CHEN Xin-tong, HAO Qing-ju, XIONG Yan-fang, <i>et al.</i> (1492)
Identification and Optimization Method of Rainfall-Runoff Pollution Risk Level	QI Xiao-tian, ZHANG Zhi-ming, ZHAO Xin, <i>et al.</i> (1500)
Factor Analysis of Disinfection Byproduct Formation in Drinking Water Distribution Systems Through the Bayesian Network	JIANG Shan-shan, WANG Zhen-yu, GAO Quan, <i>et al.</i> (1512)
Selective Adsorption of Au(III) by Activated Carbon Supported Polythioamides and Adsorption Mechanism	ZHAO Wen-jin, ZHANG Shen, AN Xiao-qiang, <i>et al.</i> (1521)
Impacts of F/M Ratio on Microbial Networks in Activated Sludge	ZHANG Bing, SUN Chen-xiang, WEN Xiang-hua (1529)
Geochemical Characteristics and Source Apportionment of Soil Elements in an Urban-rural Integration Area: A Case Study in the Qinglong Area of Tianfu New District	LIU Shu-huai, WANG De-wei, SHI Ze-ming, <i>et al.</i> (1535)
Ecological and Health Risk Assessments Based on the Total Amount and Speciation of Heavy Metals in Soils Around Mining Areas	WANG Rui, CHEN Nan, ZHANG Er-xi (1546)
Characteristics of Antimony Migration and Transformation and Pollution Evaluation in a Soil-Crop System Around a Tin Mine in Hunan Province	ZHANG Long, SONG Bo, HUANG Feng-yan, <i>et al.</i> (1558)
Effect of Controlling Heavy Metals in Soil of Rare Earth Mining Area by Biochar Supported Graphene Oxide	YANG Shi, LIU Zu-wen, LONG Bei, <i>et al.</i> (1567)
Enhanced Remediation of Cd Contaminated Soil by Cotton with DOM	MIN Tao, LUO Tong, CHEN Li-li, <i>et al.</i> (1577)
Novel Insight into the Adsorption Mechanism of Fe-Mn Oxide-Microbe Combined Biochar for Cd(II) and As(III)	LIAN Bin, WU Ji-zi, ZHAO Ke-li, <i>et al.</i> (1584)
Variations in Cadmium Accumulation and Transport and Ionic Traits Among Different Winter Wheat Varieties	LIU Chang, XU Ying-ming, HUANG Qing-qing, <i>et al.</i> (1596)
Cadmium Accumulation Characteristics of Different Heat Varieties Under Cadmium Stress	REN Chao, REN Yu-zhong, WANG Hao, <i>et al.</i> (1606)
Effect of Different Land Use Types on the Diversity of Soil Bacterial Community in the Coastal Zone of Jialing River	LIU Kun-he, XUE Yu-qin, ZHU Lan-ping, <i>et al.</i> (1620)
Effects of Earthworms/Biochar on Bacterial Diversity and Community in As-contaminated Red Soil	SU Qian-qian, LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, <i>et al.</i> (1630)
Effects of DA-6 and EDDS on Growth and Cd Uptake by <i>Solanum nigrum</i> L. and on the Soil Bacterial Community Structure	LUO Yang, SUN Li, LIU Fang, <i>et al.</i> (1641)
Effects of Plastic Mulch Film on Soil Nutrients and Ecological Enzyme Stoichiometry in Farmland	HU Zhi-e, XIAO Mou-liang, WANG Shuang, <i>et al.</i> (1649)
Effects of Warming and Increased Precipitation on Soil Respiration of Abandoned Grassland in the Loess-Hilly Regions	WANG Xing, ZHONG Ze-kun, ZHU Yu-fan, <i>et al.</i> (1657)
Effect of Film Mulching, Straw Retention, and Nitrogen Fertilization on the N ₂ O and N ₂ Emission in a Winter Wheat Field	PENG Yi, LI Hui-tong, ZHANG Shao-wei, <i>et al.</i> (1668)
Effects of Straw Returning on Soil Ammonia Volatilization Under Different Production Conditions Based on Meta-analysis	ZHAO Zheng-xin, WANG Xiao-yun, TIAN Ya-jie, <i>et al.</i> (1678)
Impacts of Fertilization on Soil Antibiotic Resistance Genes Across Croplands: A Meta-Analysis	RAN Ji-wei, XIAO Qiong, HUANG Min, <i>et al.</i> (1688)