

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.5
第41卷 第5期

目次

上海大气 PM _{2.5} 来源解析对比: 基于在线数据运用 3 种受体模型	周敏 (1997)
不同浓度臭氧对单颗粒气溶胶化学组成的影响	吴梦曦, 成春雷, 黄渤, 李梅, 陈多宏 (2006)
二次有机气溶胶壳对氯化钠核吸湿性的影响: 基于单颗粒微观尺度	张淑佳, 徐亮, 郭新梅, 黄道, 李卫军 (2017)
城区与县区不同空气质量下碳组分污染特征对比分析	李欣悦, 张凯山, 邓林俐, 向铤鹏, 武文琪, 殷子渊 (2026)
临沂市 PM _{2.5} 和 PM ₁₀ 中元素分布特征及来源解析	陆平, 赵雪艳, 殷宝辉, 张楠, 王歆华, 余浩, 杨文, 王晓丽 (2036)
西安市秋冬季市区与山区微生物气溶胶组成特征及来源	谢雯文, 路瑞, 慕飞飞, 戚玉珍, 白文艳, 李彦鹏 (2044)
北京市典型餐饮企业大气污染物排放特征	何万清, 王天意, 邵霞, 聂磊, 石爱军 (2050)
基于随机森林模型的中国 PM _{2.5} 浓度影响因素分析	夏晓圣, 陈菁菁, 王佳佳, 程先富 (2057)
大气污染联合治理分区视角下的中国 PM _{2.5} 关联关系时空变异特征分析	杨文涛, 黄慧坤, 魏东升, 赵斌, 彭焕华 (2066)
基于地-空观测数据的粤港澳大湾区大气污染调查及时空演变特征	王耀庭, 梁加成, 郑祚芳, 李青春, 李威, 窦俊 (2075)
龙子祠泉域岩溶地下水水化学特征及成因	唐春雷, 郑秀清, 梁永平 (2087)
三峡水库总磷时空变化特征及滞留效应分析	唐小娅, 童思陈, 黄国鲜, 许光祥, 李丹 (2096)
三峡水库汛后蓄水期典型支流溶解氧与叶绿素 a 垂向分布特征	杨凡, 纪道斌, 王丽婧, 李虹, 李莹杰 (2107)
汉丰湖正式运行年水体营养盐分布特征	付适, 倪九派, 何丙辉, 李天阳, 唐毅, 钱田, 向可翠 (2116)
白洋淀水体富营养化和沉积物污染时空变化特征	刘鑫, 史斌, 孟晶, 周云桥, 可欣, 王铁宇 (2127)
新安江水库悬浮颗粒物时空分布、沉降通量及其营养盐效应	史鹏程, 朱广伟, 杨文斌, 许海, 朱梦圆, 刘明亮, 虞左明, 吴志旭, 郑文婷, 王裕成, 笪文怡, 胡林娜 (2137)
不同水文情景下高邮湖、南四湖和东平湖有色可溶性有机物的生物可利用性特征	张柳青, 石玉, 李元鹏, 郭燕妮, 周蕾, 周永强, 张运林, 杨艳 (2149)
水源水库藻类功能群落演替特征及水质评价	李衍庆, 黄廷林, 张海涵, 温成成, 杨尚业, 林子深, 高欣 (2158)
人工强制混合对金盆水库水体藻类群落结构时空演替的影响	王晨旭, 黄廷林, 李楠, 齐允之, 徐金兰, 司凡, 张晗, 路林超 (2166)
雄安新区-白洋淀冬季冰封期水体好氧反硝化菌群落空间分布特征及驱动因素	周石磊, 孙悦, 岳智丞, 张航, 王周强, 刘世崇, 彭瑞哲, 苑世超, 李再兴, 崔建升 (2177)
分层型水库水体好氧不产氧光合细菌时空演替特征	张海涵, 王燕, 黄廷林, 王晨旭, 路林超, 司凡, 李楠, 刘凯文, 闫苗苗, 苗雨甜 (2188)
大型通江湖泊有色可溶性有机物对不同水文情景的响应	郭燕妮, 李元鹏, 石玉, 张柳青, 周蕾, 周永强, 张运林, 韩龙飞 (2198)
秦岭北麓河流夏季有色溶解有机物分布特征及影响因素	林子深, 黄廷林, 杨尚业, 温成成, 李衍庆, 周石磊, 宋选社 (2210)
长江下游流水体中多环芳烃的分布及生态风险评估	贾天琪, 雷荣荣, 武小琳, 倪涛涛, 孙树睿, 郭伟, 刘文彬 (2221)
太湖水体中 NSAIDs 的时空分布规律和生态风险评价	廉杰, 李祎飞, 王晓喧, 叶彬, 邹华, 史红星 (2229)
8 种典型 PhACs 在水中的赋存、生态风险及其对大型溞的影响	徐鑫磊, 刘建超, 陆光华 (2239)
我国南方桉树人工林区水库沉积物污染物的分布特征及迁移规律	朱雅, 李一平, 罗凡, 李荣辉, 黄列, 程一鑫, 蒋裕丰 (2247)
基于连续监测的城市内河返黑返臭机制初探: 以南宁市二坑溪为例	李永新, 王威, 何妹, 申泰铭 (2257)
城郊流域源汇景观格局与水体抗生性的关系	李敏, 唐剑锋, 陈利顶, 赵方凯, 冯青郁, 杨磊 (2264)
城市雨水径流中溶解性有机物的分子化学多样性	聂云汉, 陈浩, 李磊, 朱奔, 赵昕, 贾其隆, 徐慧婷, 叶建锋 (2272)
方解石/氯磷灰石混合物添加对水体内源磷迁移转化的调控效应和机制	柏晓云, 林建伟, 詹艳慧, 常明玥, 吴俊麟, 辛慧敏, 黄良君 (2281)
不同环境条件下铁矿物和针铁矿纳米颗粒稳定性	王智巧, 马杰, 陈雅丽, 翁莉萍, 顾亚陶, 李永涛 (2292)
向日葵秸秆生物炭强化 Fe(III)/S ₂ O ₈ ²⁻ 体系降解苯甲酸	孙鹏, 张凯凯, 张玉, 张延荣 (2301)
非活化单过硫酸盐降解柳氮磺胺吡啶: 动力学及机制	丁曦, 张学维, 周润生, 宋哲, 严佳颖, 周磊, 修光利 (2310)
贵州某规模化养猪场废水中抗生素的污染特征及去除效果	杨钊, 李江, 向福亮, 李彦澄, 马凯, 谢锋 (2320)
新型填料 A/O 生物滤池处理低碳氮比农村污水脱氮	赵远哲, 杨永哲, 王海燕, 储昭升, 常洋, 董伟羊, 闫国凯, 王欢, 李丛宇 (2329)
贫营养好氧反硝化菌株的脱氮特性及氮/碳平衡分析	文刚, 王彤, 黄廷林, 万琪琪, 曹瑞华, 寇莉青, 杨尚业 (2339)
连续流 SNAD 工艺处理猪场沼液启动过程中微生物种群演变及脱氮性能	秦嘉伟, 信欣, 鲁航, 张萍萍, 王露蓉, 邹长武, 郭俊元 (2349)
不同培养条件厌氧氨氧化颗粒污泥性质及微生物群落结构差异	姜澄, 郭萌蕾, 谢军祥, 常尧枫, 谢嘉玮, 陈重军, 沈耀良 (2358)
反硝化除磷耦合部分亚硝化-厌氧氨氧化一体式工艺的启动	陈亚, 印雯, 张星星, 张钰, 宋吟玲, 吴鹏, 徐乐中 (2367)
土壤环境承载力评价体系构建与应用	李笑诺, 丁寿康, 陈卫平, 王夏晖, 吕斯丹, 刘睿 (2373)
磁性生物炭的合成及对土壤重金属污染的钝化效果	王俊楠, 程珊珊, 展文豪, 任强, 马晓宇, 王洋洋 (2381)
还原增溶强化 EGTA 淋洗修复重金属污染土壤	张金永, 朱玉婷, 王明新, 韩堂, 葛嘉琦 (2390)
不同价态铬和土壤理化性质对大麦根系毒性阈值的影响	付平南, 贡晓飞, 罗丽韵, 王琪, 李花粉 (2398)
生物炭施用对紫色土旱坡地土壤氮流失形态及通量的影响	王舒, 王子芳, 龙翼, 严冬春, 慈恩, 徐国鑫, 李妍, 高明 (2406)
长期撂荒恢复土壤团聚体组成与有机碳分布关系	王兴, 钟泽坤, 张欣怡, 吴少君, 卢绪巧, 杨改河, 任成杰, 韩新辉 (2416)
施用生物炭对壤土土壤微生物代谢养分限制和碳利用效率的影响	王强, 耿增超, 许晨阳, 郭靖宇, 李倩倩, 刘莉丽, 赵汉红, 杜旭光 (2425)
间种高粱及施用大颗粒尿素对茶园 N ₂ O 排放的影响	张珂彬, 刘新亮, 康曼, 王毅, 沈健林, 李勇 (2434)
缙云山森林植被类型对土壤 N ₂ O 相关功能微生物的影响	王盛燕, 王富华, 罗东海, 吕盛, 王子芳, 高明 (2445)
咸水滴灌对棉田土壤 N ₂ O 排放和反硝化细菌群落结构的影响	郭慧楠, 马丽娟, 黄志杰, 李美琪, 侯振安, 阎伟 (2455)
有机质提升对酸性红壤氮循环功能基因及功能微生物的影响	储成, 吴赵越, 黄欠如, 韩成, 钟文辉 (2468)
模拟酸雨对毛竹阔叶林过渡带土壤真菌结构及其多样性的影响	王楠, 潘小承, 王传宽, 白尚斌 (2476)
海洋沉积物中细菌 DNA 和 RNA 水平群落差异	李明月, 杨雨虹, 米铁柱, 贺惠, 甄毓 (2485)
2003 ~ 2013 年中国湿地变化的空间格局与关联性	周婷, 马姣姣, 徐颂军 (2496)

北京市典型餐饮企业大气污染物排放特征

何万清, 王天意, 邵霞, 聂磊, 石爱军*

(北京市环境保护科学研究院, 国家城市环境污染控制工程技术研究中心, 北京市城市大气挥发性有机物污染防治技术与应用重点实验室, 北京 100037)

摘要: 为了解北京市餐饮业的大气污染排放浓度和总体排放水平, 为有针对性地制定北京市餐饮污染控制对策提供依据, 本研究选取了北京市典型的餐饮企业, 结合现场实测和测试期间餐饮企业灶头使用情况, 分析不同类型餐饮企业油烟、颗粒物和二甲苯总烃(NMHC)的排放浓度和各污染物指标之间的关系, 估算了北京市餐饮业大气污染物的排放量。结果表明, 典型餐饮企业油烟、颗粒物和 NMHC 的平均排放浓度分别为 (2.91 ± 5.52) 、 (9.25 ± 10.02) 和 (12.72 ± 11.38) $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 均超过了北京市地方排放标准。其中烤鸭和烧烤的颗粒物和 NMHC 排放较高, 容易超标, 是餐饮业治理的重点。烤鸭的颗粒物与油烟的比值范围为 6.21 ~ 43.08; 烧烤的颗粒物与油烟的比值范围为 5.03 ~ 19.07; 炒菜类餐饮企业颗粒物与油烟的比值范围为 0.75 ~ 7.55; 炭火烧烤和果木烤鸭颗粒物的排放浓度远大于油烟的排放浓度。Pearson 相关系数分析表明, 餐饮企业颗粒物与油烟的排放浓度为强相关, 颗粒物和 NMHC 的排放浓度为弱相关。粗略估算获得 2014 年北京市餐饮源油烟、颗粒物和 NMHC 的排放量分别为 2 492、6 127 和 9 436 t。

关键词: 餐饮; 油烟; 颗粒物; 二甲苯总烃(NMHC); 排放特征

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)05-2050-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201908063

Pollution Characteristics of Cooking Fumes, Particulates, and Non-methane Hydrocarbons in the Exhaust of Typical Beijing Restaurants

HE Wan-qing, WANG Tian-yi, SHAO Xia, NIE Lei, SHI Ai-jun*

(National Urban Environmental Pollution Control Engineering Research Center, Beijing Key Laboratory of Urban Atmospheric Volatile Organic Compounds Pollution Control and Application, Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection, Beijing 100037, China)

Abstract: To understand the atmospheric pollution emission concentration and overall emission level of the Beijing catering industry, and thus provide a basis for the targeted formulation of pollution control measures for the catering industry, this study selected typical catering enterprises in Beijing to research. Combined with the use of stoves during the on-site measurement and testing period, the emission concentrations of cooking fumes, particulates, and non-methane hydrocarbons (NMHC), and the relationship between them in different types of catering enterprises, were analyzed, and the emission of atmospheric pollutants in the Beijing catering industry was estimated. The results showed that the average concentrations of cooking fumes, particulates, and NMHC of typical catering enterprises were (2.91 ± 5.52) , (9.25 ± 10.02) , and (12.72 ± 11.38) $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$, respectively. These all exceed the Beijing local emission standards. Of the typical catering enterprises, roast duck and barbecue had higher particulate matter and NMHC emissions, which easily exceeded the emission standard. Roast duck and barbecue are therefore the governance focus of the catering industry. The ratio of particulates to cooking fumes in roast duck, barbecue, and cooking catering enterprises ranged from 6.21 to 43.08, 5.03 to 19.07, and 0.75 to 7.55, respectively. The emission concentrations of particles are much larger than those of cooking fumes from charcoal grill and fruit-roasted duck. Pearson correlation coefficient analysis showed that the concentrations of particulates and cooking fumes in catering enterprises were strongly correlated, and the concentrations of particulates and NMHC were weakly correlated. The study estimates roughly that the emissions of cooking fumes, particulates, and NMHC were 2 492, 6 127, and 9 436 tons, respectively, from the catering industry in Beijing in 2014.

Key words: catering; cooking fume; particulates; non-methane hydrocarbons(NMHC); emission characteristics

近年来,随着我国社会经济的快速发展以及居民生活水平的提高,餐饮业得到蓬勃发展。根据北京市统计局发布的统计公报,2018年北京市餐饮消费收入1 101.8亿元,比上年同期增长7.3%^[1]。在享受丰富多样的美食的同时,餐饮油烟污染问题逐渐引起了人们的重视,国内许多大城市餐饮油烟污染的投诉已占有所有环保投诉的30%~40%^[2]。需要强调的是,餐饮企业主要集中在城市核心区、商业区、居民区等人口集中区域,这无形中也加重了餐饮污染

对区域环境质量及周边居民的影响程度。

烹调油烟主要是食物烹饪和食品生产加工过程中挥发的油脂、有机质及其热氧化和热裂解产生的混合物,主要由颗粒物和气态污染物组成^[3]。研究表明,餐饮油烟是大气中挥发性有机物(volatile

收稿日期: 2019-08-07; 修订日期: 2019-12-10

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0211504)

作者简介: 何万清(1983~),女,高级工程师,主要研究方向为大气污染控制, E-mail: wanqing888@126.com

* 通信作者, E-mail: shiaijun@cee.cn

organic compounds, VOCs) 和城市气溶胶的重要来源^[4-6]. 餐饮 VOCs 中的烯烃和芳香烃具有较高的光化学活性,是臭氧和二次有机气溶胶的重要前体物^[7,8]. 同时,油烟中的 VOCs 所表现出的有毒、刺激性、致癌作用和具有特殊的气味能导致人体产生种种不适反应,并对人体健康造成极大的危害^[9].

目前,学者们主要对餐饮油烟的人体健康影响评估^[10,11], PM_{2.5} 和 VOCs 排放的影响因素研究^[12-17],不同菜系 PM_{2.5} 和 VOCs 的排放组分特征研究^[3,18-21],排放因子的探索^[3,11,12,22],排放量估算方法和时空分布特征^[22-24],以及餐饮净化技术研究进展等方面进行了积极的探索^[25-27]. 这些研究为量化餐饮源的环境影响和清单编制方法提供了思路. 但是,PM_{2.5} 和 VOCs 的组分检测分析方法繁复,组分复杂多变,难以适用于日常监管执法. 因此,2018 年北京市发布了《餐饮业大气污染物排放标准》(DB 1488-2018)^[28],提出了油烟、颗粒物和非甲烷总烃(non-methane hydrocarbons, NMHC)这 3 项污染物的排放限值. 然而,国内尚未对餐饮源的油烟、颗粒物和 NMHC 这些常规污染物的排放情况进行研究.

本研究选取北京市典型的餐饮企业,结合现场实测和测试期间餐饮企业灶头使用情况,分析不同

类型餐饮企业油烟、颗粒物和 NMHC 的排放情况和各污染物指标之间的关系,估算北京市餐饮业大气污染物的排放量. 通过掌握北京市餐饮业的大气污染排放浓度和不同类型餐饮企业的排放水平,以期为重点有针对性地制定北京市餐饮业污染控制对策提供依据.

1 材料与方法

1.1 测试对象

本研究在 2016 年和 2017 年期间选取了不同规模不同类型的二十多家具有采样条件的典型餐饮企业,在中午和晚上的用餐高峰时段,在餐饮企业净化设备前的排烟管道的平直管段内同时同点采集净化前的油烟、颗粒物和 NMHC,采样点的设置按照《饮食业油烟排放标准》(GB 18483-2001)^[29]的规定执行. 根据现场情况和采样测试的难易程度,不同餐饮企业获得的油烟、颗粒物和 NMHC 有效样本数不等. 本研究选取的采样对象包括了炭火烧烤、果木烤鸭、川湘菜、家常菜、快餐类、食堂、粤菜以及商场综合排口,基本代表了北京市 90% 的餐饮类型,具有较好的典型性和代表性. 现场采样餐饮企业基本信息如表 1 所示.

表 1 餐饮企业基本信息

Table 1 Basic information of the sampled restaurants

餐饮企业	川湘菜	家常菜	烤鸭	烧烤	食堂	粤菜	快餐类	商场综合排口
规模	大型	大中小型	大型	中小型	中型	大型	小型	—
燃料类型	天然气	天然气	果木	木炭	天然气	天然气	天然气	天然气
实际使用灶头数/个	4~6	2~12	2	2~5	3	4	2	—
废气流速/m·s ⁻¹	1.9~5.9	2.0~8.8	0.8~1.2	2.0~3.6	1.3~3.5	2.7~3.3	1.3~2.5	6.1~7.7
烹饪特点	烹饪方式以爆炒、肉类先过油炸为主,大量使用葱姜蒜和辣椒花椒注重麻辣香,油重味浓	以家常烧炒为主,不同菜系融合,喜放料酒生抽等调料,口味偏咸鲜	挂炉果木烤鸭	以木炭为燃料,将牛、羊、鸡肉串成串直接在炭火上烤制	大锅集中翻炒,不少食材事先焯水,用料多而不精,作业时间短	烹饪方式以炖煮焖烧为主,注重食材本身的鲜嫩味道,调味相对清淡	速食加工,少为半成品加工而成,烹饪手法简单	不同餐饮企业混合排放,视具体企业而定,无明显特点

1.2 采样方法

油烟和颗粒物的采集均使用崂应 3012H 型自动烟尘测试仪(青岛崂山应用技术研究所),只是采样枪的设计不同. 二者均采用等速采样法,即等速抽取餐饮企业排气筒内的气体分别通过油烟滤筒和颗粒物检测滤芯,则油烟和颗粒物分别被收集在相应的检测滤芯内. 油烟滤筒和颗粒物检测滤芯主要为结构和材质不同. 油烟滤筒为金属不锈钢材质,内填充金属不锈钢丝,对油烟的截留粒径和效率没有明确的要求. 颗粒物的检测滤芯外壳材质为聚丙烯,内置双层滤膜,第一层滤膜为聚丙烯纤维滤膜,孔径 1~3 μm,第二层为玻璃纤维滤膜,玻璃纤维滤膜对

0.3 μm 标准粒子的截留效率不小于 99.95%. 油烟和颗粒物的采样方案为连续采集 5 次,每次 10 min,取 5 个样品的平均值作为测试结果. 油烟和颗粒物的采样具体操作详见文献[29,30].

本研究采用气袋法采集餐饮企业排放废气中 NMHC. 具体的采样步骤参照 HJ732^[31]进行. 采样流量为 500 mL·min⁻¹,每个样品采集 20 min,连续采集 3 个样品,以 3 个样品的平均值作为测试结果. 采样完成后,将采样袋密封遮光保存送至实验室分析.

1.3 分析方法

油烟的分析方法采用红外分光光度法. 油烟的

含量由波数分别为 $2\,930\text{ cm}^{-1}$ (CH_2 基团中 C—H 键的伸缩振动)、 $2\,960\text{ cm}^{-1}$ (CH_3 基团中 C—H 键的伸缩振动)和 $3\,030\text{ cm}^{-1}$ (芳香环中 C—H 键的伸缩振动)谱带处的吸光度 A_{2930} 、 A_{2960} 和 A_{3030} 进行计算. 因此油烟指标仅测试了餐饮排放烟气中含油有机物的浓度,不包括 EC、含氮、含氧有机物、盐类和其他无机物质. 而颗粒物的分析方法为重量法,即将颗粒物收集到检测滤芯上, $0.3\text{ }\mu\text{m}$ 以上所有物质进行称重,包含了所有能过滤到滤芯上的物质,与环境空气中颗粒物的检测方法原理相一致,能够较好地表征餐饮颗粒物对环境污染的影响. 油烟和颗粒物的分析具体操作详见文献[29,30].

NMHC 的分析方法依据《固定污染源排气中非甲烷总烃的测定-气相色谱法》(HJ/T 38-1999)^[32] 的规定,用双柱双氢火焰离子化检测器气相色谱仪,注射器直接进样,分别测定样品中的总烃和甲烷含量,以两者之差得非甲烷总烃含量.

1.4 结果换算

餐饮企业大气污染物的排放浓度受到餐饮企业风机风量和使用的灶头数等因素的影响,为排除这些因素的影响,本研究根据饮食业国家排放标准^[28] 要求利用计算公式(1)将餐饮企业的实测排放浓度换

算成基准风量时的排放浓度.

$$c_{\text{基}} = c_{\text{测}} \times \frac{Q_{\text{测}}}{nq_{\text{基}}} \quad (1)$$

式中, $c_{\text{基}}$ 指折算为单个灶头基准风量时的排放浓度 ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$); $c_{\text{测}}$ 指实测排放浓度 ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$); $Q_{\text{测}}$ 指实测排风量 ($\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$); n 指折算的工作灶头个数; $q_{\text{基}}$ 指单个灶头基准排风量,大、中和小型均为 $2\,000\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$.

2 结果与讨论

2.1 典型餐饮企业油烟、颗粒物和 NMHC 的排放浓度

根据文献[29]的要求,现场实测浓度应换算成基准浓度作为餐饮单位的排放浓度. 由于商场综合排口无法对应到具体企业,现场采样时无法得到实际使用灶头数,因此本研究未将其实测浓度折算为基准风量浓度. 表 2 为各类型餐饮排放的油烟、颗粒物和 NMHC 实测浓度和基准浓度. 从中可看出,测试餐饮企业的油烟、颗粒物和 NMHC 的平均浓度为 (2.91 ± 5.52) 、 (9.25 ± 10.02) 和 $(12.72 \pm 11.38)\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$,与文献[20]的测试结果处于同一水平. 各指标总体平均排放浓度均超过了文献[28]规定

表 2 典型餐饮企业油烟、颗粒物和 NMHC 的实测浓度和基准浓度/ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$

Table 2 Measured concentrations and baseline concentrations of cooking fumes, particulates and NMHC for typical restaurants/ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$

餐饮类型	颗粒物		油烟		非甲烷总烃	
	实测浓度	基准浓度	实测浓度	基准浓度	实测浓度	基准浓度
食堂	2.20 ± 0.12	4.51 ± 0.04	0.44 ± 0.03	0.98 ± 0.24	2.34 ± 1.08	4.38 ± 2.56
家常菜	3.06 ± 2.41	4.80 ± 2.31	2.59 ± 4.72	4.97 ± 8.55	5.27 ± 7.36	8.84 ± 10.06
川湘	3.33 ± 2.15	4.18 ± 1.68	1.23 ± 0.89	1.88 ± 1.11	8.12 ± 9.71	15.33 ± 15.81
烧烤	16.47 ± 22.36	17.39 ± 19.51	5.01 ± 8.91	5.11 ± 8.77	15.66 ± 13.36	18.29 ± 11.51
烤鸭	16.29 ± 8.06	12.97 ± 5.20	0.88 ± 0.48	0.85 ± 0.59	18.45 ± 10.16	16.85 ± 10.8
粤菜	2.52 ± 1.42	5.05 ± 3.67	1.75 ± 0.78	2.74 ± 1.39	5.58 ± 4.31	10.23 ± 7.76
快餐类	1.50 ± 0.46	2.94 ± 1.21	1.22 ± 0.32	2.16 ± 0.56	2.71 ± 2.15	6.26 ± 5.49
商场综合	2.82 ± 1.43	—	1.22 ± 0.90	—	8.58 ± 4.00	—
总体	8.74 ± 11.92	9.25 ± 10.02	1.97 ± 4.11	2.91 ± 5.52	9.63 ± 10.36	12.72 ± 11.38

1.0 、 5.0 和 $10.0\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 的排放限值,并且各类型餐饮企业除烤鸭外污染物排放浓度大小顺序均为 $\text{NMHC} > \text{颗粒物} > \text{油烟}$.

烧烤类的油烟、颗粒物和 NMHC 的排放浓度都最高,分别为 (5.11 ± 8.77) 、 (17.39 ± 19.51) 和 $(18.29 \pm 11.51)\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$. 这是由于本研究所测的烧烤企业所用燃料均为木炭,在烤架上直接烤制牛、羊、鸡肉和海鲜等肉类食材以及各种蔬菜. 有研究表明,燃料燃烧过程是颗粒物和 VOCs 的来源之一^[33,34],木炭的燃烧本身会产生大量的颗粒物和 VOCs. 其次食品内部有机物质分解也会产生油烟和 VOCs^[35]. 在烤制食品过程中,食物本身的有机质、油脂、食用油以及各种酱料与炭火直接接触或滴到

木炭上,在高温条件下发生反应会产生大量肉眼可见的油烟颗粒物以及 VOCs.

北京烤鸭排放的颗粒物和 NMHC 的浓度很高分别为 $(12.97 \pm 5.20)\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $(16.85 \pm 10.80)\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$,但排放的油烟浓度很低为 $(0.85 \pm 0.59)\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$. 推断这与烤鸭使用的燃料和制作方式有关. 本研究烤鸭均为果木挂炉烤鸭,因此果木的燃烧会产生部分颗粒物和 VOCs^[33,34]. 而烤鸭在烤制过程一直悬挂在烤炉膛内,在烤炉门口燃烧果木,果木燃烧产生的热量在炉膛内积蓄,间接利用炉膛内积蓄的热气熏烤鸭胚,而不是跟燃烧果木的明火直接接触,因此热气使鸭胚的部分有机质氧化分解生成挥发性有机物,而不会有大量的油烟产生.

其他炒菜类的餐饮企业所用燃料均为天然气,油烟、颗粒物和 NMHC 的排放浓度没有一致的变化规律. 这与炒菜类各餐饮企业的规模、食材、菜品、师傅操作习惯手法以及客流量工况的组合变化多样相关. 油烟浓度由大到小顺序依次为家常菜、粤菜、快餐类、川湘菜和食堂, 排放浓度依次为 (4.97 ± 8.55) 、 (2.74 ± 1.39) 、 (2.16 ± 0.56) 、 (1.88 ± 1.11) 和 (0.98 ± 0.24) $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$; 颗粒物浓度由大到小顺序依次为粤菜、家常菜、食堂、川湘菜和快餐类, 排放浓度依次为 (5.05 ± 3.67) 、 (4.80 ± 2.31) 、 (4.51 ± 0.04) 、 (4.18 ± 1.68) 和 (2.94 ± 1.21) $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$; NMHC 浓度由大到小顺序依次为川湘菜、粤菜、家常菜、快餐类和食堂, 排放浓度依次为 (15.33 ± 15.81) 、 (10.23 ± 7.76) 、 (8.84 ± 10.06) 、 (6.26 ± 5.49) 和 (4.38 ± 2.56) $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$.

2.2 典型餐饮企业油烟、颗粒物和 非甲烷总烃的达标分析

对不同类型餐饮企业而言, 由图 1 可知, 家常菜、川湘菜和其他炒菜类的餐饮企业油烟的超标率分别为 71.4%、75.0% 和 90.9%, 远超过了烧烤和烤鸭的超标率, 分别为 44.4% 和 33.3%. 可见, 典型餐饮企业油烟的超标主要是由炒菜类餐饮企业贡献. 颗粒物的超标率中, 烤鸭和烧烤的超标率远高于总体的超标率, 分别为 100.0% 和 63.6%, 而家常菜、川湘菜和其他炒菜类的颗粒物超标率分别为 42.8%、37.5% 和 18.2%, 可见, 烤鸭和烧烤颗粒物超标的概率较高, 快餐类、食堂和粤菜等其他炒菜类颗粒物超标的可能性较小. 这与烤鸭烧烤使用的果木和木炭材料有关^[33,34]. NMHC 的超标比例中, 也是烤鸭和烧烤的超标比例高, 分别为 88.5% 和 73.3%, 家常菜、川湘菜和其他炒菜类的 NMHC 超标率分别为 34.8%、50.0% 和 28.6%. 研究表明, 加热温度越高, NMHC 的排放浓度越高, 烤鸭和烧烤制作过程的温度高, 因此 NMHC 的排放浓度高, 超标的

概率就大^[14]. 可见, 不同类型餐饮企业 NMHC 的超标概率与颗粒物的相似, 烤鸭和烧烤的颗粒物和 NMHC 排放较高, 均容易超标, 是餐饮业治理的重点.

2.3 典型餐饮企业油烟和颗粒物排放浓度比较

现行国家标准以油烟作为饮食业大气污染物的控制指标, 文献[18,20]分析了采用油烟管控餐饮源时存在的问题, 即油烟检测结果达标但目测有可见浓烟的现象, 尤其是烧烤烤鸭类餐饮企业, 造成居民投诉但检测结果达标无法责令整改处罚的监管难点. 根据文献[28,29]中油烟和颗粒物的定义及检测方法可知, 油烟和颗粒物所包含的物质有一定的重合性但又有所差异. 因此本研究同步开展了油烟与颗粒物排放浓度的比对检测. 由图 2 可看出, 烧烤、烤鸭和炒菜类颗粒物对油烟的浓度比值差异很大. 烤鸭颗粒物与油烟比值的平均值为 21.28, 比值范围为 6.21 ~ 43.08; 烧烤颗粒物与油烟比值的平均值为 9.11, 比值范围为 5.03 ~ 19.07; 炒菜类颗粒物与油烟比值平均值为 2.81, 比值范围为 0.75 ~ 7.55. 餐饮业颗粒物与油烟的比值由高到低的顺序为烤鸭类 > 烧烤类 > 炒菜类.

推测造成这种结果的原因主要有两方面, 一是北京烤鸭烤制过程中采用果木作为燃料, 燃料燃烧过程中会产生大量的非油脂性颗粒物; 二是北京烤鸭在制作过程中是用作料将鸭子腌制后将整只鸭子放进烤炉进行烤制, 所产生的油烟主要是鸭子外皮在烤制过程中产生的油脂类物质, 相对油脂含量比较少^[18]. 而烧烤油烟占颗粒物的比例比烤鸭高, 这主要是因为烧烤类餐饮企业在烤制食材的过程中, 会在食材的表面涂抹一层食用油, 食用油在高温烤制过程中会产生大量油脂类颗粒物, 并且烧烤过程中会不时翻动烤制的食材, 这样也会使烤制的食物

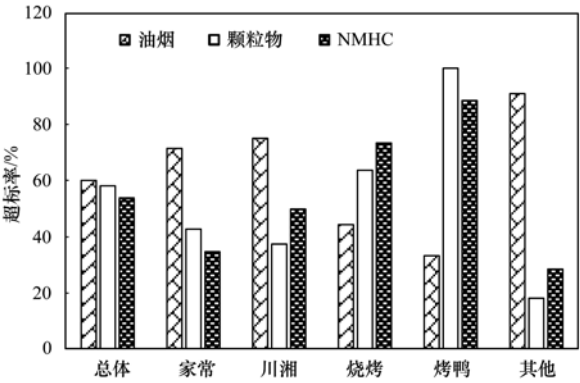


图 1 各类型餐饮企业油烟、颗粒物和 NMHC 的超标率
Fig. 1 Excess rates of cooking fumes, particulates, and NMHC for various types of catering enterprises

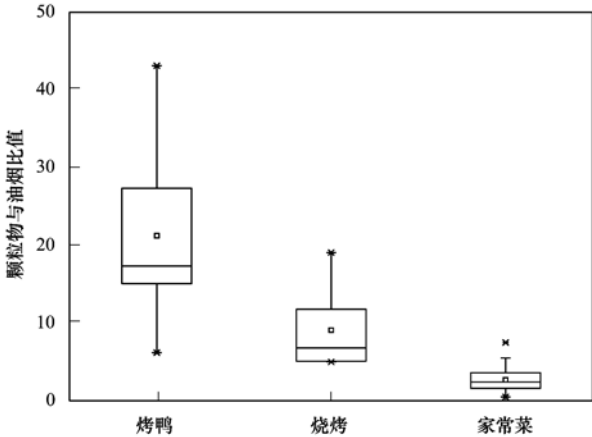


图 2 不同类型典型餐饮企业颗粒物和油烟浓度比值
Fig. 2 Ratios of particulates and cooking fumes of different catering enterprises

(主要是肉类食材)和食用油产生更多的油脂类颗粒物.炒菜类的燃料均为天然气,天然气燃烧产生的颗粒物较少^[36],因此,炒菜类颗粒物大部分由食用油和食材烹饪过程氧化而产生,颗粒物较油烟的浓度比值在3种类型中最低.比对结果表明,颗粒物的检测结果一般大于油烟的检测结果.可见,本研究所采用的手工称重法测得的颗粒物能更全面地反映餐饮业烹饪过程的污染物排放,更好地评估餐饮业对环境质量的影响.

2.4 典型餐饮企业油烟、颗粒物和 NMHC 排放相关性

为研究餐饮源油烟、颗粒物和 NMHC 排放之间的关系,笔者对不同类型餐饮企业的颗粒物与油烟和颗粒物与 NMHC 的实测排放浓度按照烤鸭、烧烤和炒菜类分别计算 Pearson 相关系数,如表3所示.从中可知,烤鸭、烧烤和炒菜类的颗粒物和油烟的 Pearson 相关系数有所差异,分别为0.48、0.67和0.77.烧烤和炒菜类的颗粒物浓度与油烟浓度为强相关,烤鸭的颗粒物浓度与油烟浓度相关性稍弱,为中等强度相关.烤鸭过程可分为果木燃烧和鸭子被烘烤两个部分,果木燃烧产生颗粒物但不产生油烟,鸭子自身的油脂经烘烤后会产生油烟,此时油烟与颗粒物是一致的^[18,28,29].烧烤和炒菜类油烟和颗粒物同是烹饪过程产生^[33,34].表明颗粒物与油烟是相互关联又有所区别的两项指标,这也验证了不同燃料和烹饪方式对颗粒物排放浓度的影响.表3显示,烤鸭、烧烤和炒菜类的颗粒物与 NMHC 排放浓度的 Pearson 相关系数分别为0.32、0.41和0.21,相关性均为弱相关.表明 NMHC 是完全独立于颗粒物的气态污染物.

表3 不同类型餐饮企业颗粒物和油烟,颗粒物和 NMHC 的 Pearson 相关系数

Table 3 Pearson correlation coefficients of particulates and cooking fumes, particulate, and NMHC for typical restaurants

类型	颗粒物和油烟	颗粒物和 NMHC
烤鸭	0.48	0.32
烧烤	0.67	0.41
炒菜类	0.77	0.21

2.5 北京市餐饮业大气污染物排放量估算

以本研究测得的典型餐饮企业油烟、颗粒物和 NMHC 的平均排放浓度、平均灶头数、排气量以及作业时间,按照排放因子法,采用2014年北京食品药品监督管理局餐饮注册信息,粗略估算北京市餐饮业大气污染物的排放量清单.2014年北京市注册餐饮服务单位64 010家,估算结果为北京市2014年餐饮源大约排放油烟2 492 t、颗粒物6 127 t和 NMHC

9 436 t.

图3是北京市各区餐饮服务单位对油烟或颗粒物或 NMHC 的排放贡献.由于3项污染物除排放因子不同其他计算参数均相同,因此3项污染物的排放贡献是一致的.从中可知,朝阳区、海淀区和昌平区餐饮业大气污染物的排放贡献位列前三,分别占比为17.1%、12.4%和8.9%.这与这3个区餐饮服务单位数量占比顺序是一致的.中心城区东城区和西城区餐饮的排放总量占比虽然不高,但由于面积小,餐饮分布密集,单位面积的排放强度最高.

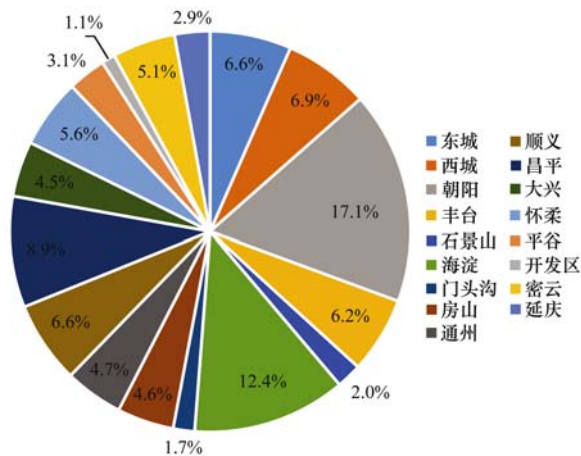


图3 2014年北京市餐饮业大气污染物的区域排放贡献

Fig. 3 Regional emission contributions of cooking fumes, particulates, and NMHC in the Beijing catering industry (2014)

由图4所示,从业态规模分布来看,北京市餐饮业排放贡献最大的为单位食堂,排放占比达30.9%,这是因为北京市各类机关单位企业总部高校数量多,因此各类食堂数量众多,在北京市餐饮业中数量占比最大,这也是北京市餐饮业的重要特点之一.除食堂外,中型餐饮的数量最多,因此排放占比为第二,占21.0%.此外,数量不多但灶头数多、排放负荷高的大型餐饮排放占比也较高,达15.6%.食堂、中型餐饮、大型餐饮和小型餐饮这四大类餐饮服务

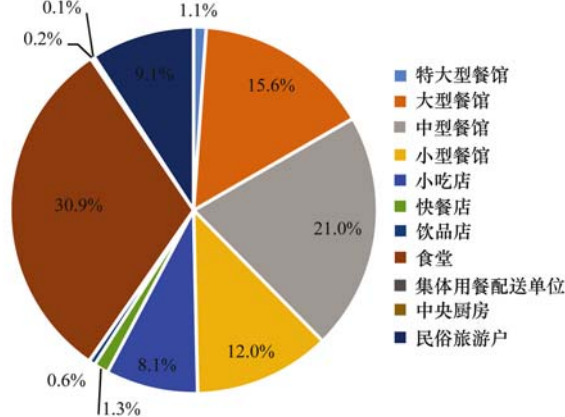


图4 2014年北京市不同类型餐饮企业大气污染物的排放贡献

Fig. 4 Emission contributions of cooking fumes, particulates, and NMHC from different types of catering enterprises in Beijing (2014)

单位占总排放贡献达 80.0%,是北京市餐饮业污染排放最主要的类型。

3 结论

(1) 基于现场测试企业样本,北京市典型餐饮企业油烟、颗粒物和 NMHC 的平均排放浓度分别为 (2.91 ± 5.52) 、 (9.25 ± 10.02) 和 (12.72 ± 11.38) $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。其中炭火烧烤类油烟、颗粒物和 NMHC 的排放浓度最高;果木烤鸭类颗粒物和 NMHC 的排放浓度高,油烟的排放浓度低。由于烧烤和烤鸭使用炭火和果木,因此烧烤和烤鸭的颗粒物和 NMHC 的超标概率比炒菜类高。

(2) 炭火烧烤和果木烤鸭颗粒物的排放浓度远大于油烟的排放浓度。烤鸭的颗粒物与油烟的比值范围为 6.21 ~ 43.08;烧烤的颗粒物与油烟的比值范围为 5.03 ~ 19.07;炒菜类餐饮企业颗粒物与油烟的比值范围为 0.75 ~ 7.55。比值情况表明,手工称重法测得的颗粒物能够更好地评估餐饮业对环境空气的影响。Pearson 相关系数分析表明,餐饮企业颗粒物与油烟的排放浓度为强相关,颗粒物和 NMHC 的排放浓度为弱相关。可见,油烟和颗粒物可以协同净化达标,NMHC 需要单独处理。

(3) 粗略估算获得 2014 年北京市餐饮源油烟、颗粒物和 NMHC 的排放量分别为 2 492、6 127 和 9 436 t。从区域排放贡献和排放强度方面看,朝阳区、海淀区、昌平区、东城区和西城区是治理重点区域。从规模业态角度看,食堂、中型餐饮、大型餐饮和小型餐饮是北京市治理的重点类型。

参考文献:

- [1] 北京市统计局. 北京市 2018 年国民经济和社会发展统计公报[EB/OL]. http://www.beijing.gov.cn/zfxgk/110037/tjgb53/2019-03/25/content_99dc7590aa8149c2bd5b4106ace0e40.shtml, 2019-03-20.
- [2] 林立,何校初,郭坚平,等. 上海餐饮油烟污染特征研究[J]. 环境科学与技术, 2014, 37(S2): 546-549.
Lin L, He X C, Wu J P, et al. Research of Shanghai cooking fume pollution[J]. Environmental Science & Technology, 2014, 37(S2): 546-549.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [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] 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.
- [9] 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估[D]. 兰州: 兰州大学, 2018.
- [10] Weinstein J R, Astier-Peñaloza 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,景盛翱,乔利平. 餐饮排放有机颗粒物的质量浓度、化学组成及排放因子特征[J]. 环境科学, 2019, 40(5): 2010-2018.
Wang H L, Jing S A, Qiao L P. Chemical compositions, mass concentrations, and emission factors of particulate organic matters emitted from catering[J]. Environmental Science, 2019, 40(5): 2010-2018.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] Lin P C, He W Q, Nie L, et al. Comparison of PM_{2.5} emission rates and source profiles for traditional Chinese cooking styles[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26(21): 21239-21252.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 谭德生, 邝元成, 刘欣, 等. 餐饮业油烟的颗粒物分析[J]. *环境科学*, 2012, **33**(6): 1958-1963.
- Tan D S, Kuang Y C, Liu X, *et al.* Analysis on oil fume particles in catering industry cooking emission [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(6): 1958-1963.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 吴雪伟, 陈卫卫, 王堃, 等. 长春市餐饮源 $PM_{2.5}$ 和 VOCs 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 VOCs emission inventories from cooking in Changchun City[J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(8): 2882-2889.
- [24] 秦之渭, 唐文雅, 尹元畅, 等. 基于互联网大数据的成都餐饮源细颗粒物排放空间分配研究[J]. *环境科学学报*, 2017, **37**(12): 4511-4518.
- Qin Z M, Tang W Y, Yin Y C, *et al.* Spatial distribution of $PM_{2.5}$ emission from cooking sources in Chengdu based on internet big data method [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, **37**(12): 4511-4518.
- [25] Gysel N, Welch W A, Chen C L, *et al.* Particulate matter emissions and gaseous air toxic pollutants from commercial meat cooking operations [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2018, **65**: 162-170.
- [26] Gysel N, Dixit P, Schmitz D A, *et al.* Chemical speciation, including Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs), and toxicity of particles emitted from meat cooking operations [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **633**: 1429-1436.
- [27] 舒木水, 淡默, 纪晓慧, 等. 油烟净化设备对餐饮排放物的净化效率[J]. *环境工程*, 2018, **36**(11): 81-84.
- Shu M S, Dan M, Ji X H, *et al.* Purification efficiency of cooking fume control equipment to cooking emission [J]. *Environmental Engineering*, 2018, **36**(11): 81-84.
- [28] DB11/1488-2018, 餐饮业大气污染物排放标准[S].
- [29] GB 18483-2001, 饮食业油烟排放标准[S].
- [30] DB11/T 1485-2017, 餐饮业 颗粒物的测定 手工称重法[S].
- [31] HJ 732-2014, 固定污染源废气 挥发性有机物的采样 气袋法[S].
- [32] HJ/T 38-1999, 固定污染源排气中非甲烷总烃的测定-气相色谱法[S].
- [33] 李兴华, 王书肖, 郝吉明. 民用生物质燃烧挥发性有机化合物排放特征[J]. *环境科学*, 2011, **32**(12): 3515-3521.
- Li X H, Wang S X, Hao J M. Characteristics of Volatile Organic Compounds (VOCs) emitted from biofuel combustion in China [J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(12): 3515-3521.
- [34] 陈振辉, 杨海平, 杨伟, 等. 生物质燃烧过程中颗粒物的形成机理及排放特性综述[J]. *生物质化学工程*, 2014, **49**(5): 33-38.
- Chen Z H, Yang H P, Yang W, *et al.* A review of the formation mechanism and emission characteristics of particles in the biomass combustion process [J]. *Biomass Chemical Engineering*, 2014, **49**(5): 33-38.
- [35] Lee S. Emissions from street vendor cooking devices (charcoal grilling) [S]. U. S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA/600/R-99/048 (NTIS PB99-146995), 1999.
- [36] 彭瑞玲, 刘君卓, 潘小川, 等. 3 种民用燃料的燃烧颗粒物的含量及其粒径组成[J]. *环境与健康杂志*, 2005, **22**(1): 13-15.
- Peng R L, Liu J Z, Pan X C, *et al.* The content and the proportion of the combustion particles $PM_{2.5}$, PM_{10} and TSP in three main fuels [J]. *Journal of Environment and Health*, 2005, **22**(1): 13-15.

CONTENTS

Comparison of Three Receptor Models for Source Apportionment of PM _{2.5} in Shanghai: Using Hourly Resolved PM _{2.5} Chemical Composition Data	ZHOU Min (1997)
Impact of Differents in the Concentrations of Ozone on the Chemical Composition of Single Particles	WU Meng-xi, CHENG Chun-lei, HUANG Bo, <i>et al.</i> (2006)
Influence of Secondary Organic Coating on Hygroscopicity of a Sodium Chloride Core: Based on Micro-scale Single Particle Analysis	ZHANG Shu-jia, XU Liang, GUO Xin-mei, <i>et al.</i> (2017)
Comparative Analysis of Pollution Characteristics of Carbonaceous Aerosol Components in the Atmosphere Between Urban and Suburban Areas	LI Xin-yue, ZHANG Kai-shan, DENG Lin-li, <i>et al.</i> (2026)
Distribution Characteristics and Source Apportionment of Elements Bonded with PM _{2.5} and PM ₁₀ in Linyi	LU Ping, ZHAO Xue-yan, YIN Bao-hui, <i>et al.</i> (2036)
Characteristics and Sources of Microbial Aerosols in Urban and Mountainous Areas in Autumn and Winter in Xi'an, China	XIE Wen-wen, LU Rui, MU Fei-fei, <i>et al.</i> (2044)
Pollution Characteristics of Cooking Fumes, Particulates, and Non-methane Hydrocarbons in the Exhaust of Typical Beijing Restaurants	HE Wan-qing, WANG Tian-yi, SHAO Xia, <i>et al.</i> (2050)
PM _{2.5} Concentration Influencing Factors in China Based on the Random Forest Model	XIA Xiao-sheng, CHEN Jing-jing, WANG Jia-jia, <i>et al.</i> (2057)
Spatio-temporal Variation of PM _{2.5} Related Relationships in China from the Perspective of Air Pollution Regional Linkage Control and Prevention	YANG Wen-tao, HUANG Hui-kun, WEI Dong-sheng, <i>et al.</i> (2066)
Characteristics of Spatial and Temporal Evolution and Investigation of Air Pollution in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area Based on Ground-Space Observation Data	WANG Yao-ting, LIANG Jia-cheng, ZHENG Zuo-fang, <i>et al.</i> (2075)
Hydrochemical Characteristics and Formation Causes of Ground Karst Water Systems in the Longzici Spring Catchment	TANG Chun-lei, ZHENG Xiu-qing, LIANG Yong-ping (2087)
Tempo-spatial and Retention Analysis of Total Phosphorus in the Three Gorges Reservoir	TANG Xiao-ya, TONG Si-chen, HUANG Guo-xian, <i>et al.</i> (2096)
Vertical Distribution Characteristics of Dissolved Oxygen and Chlorophyll a in Typical Tributaries During the Impoundment Period of the Three Gorges Reservoir	YANG Fan, JI Dao-bin, WANG Li-jing, <i>et al.</i> (2107)
Spatial-temporal Distribution of Nutrients in Hanfeng Lake After Official Operation	FU Shi, NI Jiu-pai, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (2116)
Spatio-temporal Variations in the Characteristics of Water Eutrophication and Sediment Pollution in Baiyangdian Lake	LIU Xin, SHI Bin, MENG Jing, <i>et al.</i> (2127)
Spatial-temporal Distribution of Suspended Solids and Its Sedimentation Flux and Nutrients Effects in Xin'anjiang Reservoir, China	SHI Peng-cheng, ZHU Guang-wei, YANG Wen-bin, <i>et al.</i> (2137)
Bioavailability Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Lake Gaoyou, Lake Nansi, and Lake Dongping Under Different Hydrological Scenarios	ZHANG Liu-qing, SHI Yu, LI Yuan-peng, <i>et al.</i> (2149)
Succession Characteristics of Algae Functional Groups and Water Quality Assessment in a Drinking Water Reservoir	LI Yan-qing, HUANG Ting-lin, ZHANG Hai-han, <i>et al.</i> (2158)
Effect of Artificial Mixing on Temporal and Spatial Succession of Algae Community Structure in Jinpen Reservoir	WANG Chen-xu, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2166)
Spatial Distribution Characteristics and Driving Factors of Aerobic Denitrification Bacterial Community Structure from Baiyangdian Lake in Xiong'an New Area During the Winter Freezing Period	ZHOU Shi-lei, SUN Yue, YUE Ge-cheng, <i>et al.</i> (2177)
Spatial and Temporal Succession Characteristics of Aerobic Anoxygenic Photosynthesis Bacteria in a Stratified Reservoir	ZHANG Hai-han, WANG Yan, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (2188)
Response of Chromophoric Dissolved Organic Matter Dynamics to Different Hydrological Scenarios in the Two Largest Freshwater Lakes Connected to the Yangtze River	GUO Yan-mi, LI Yuan-peng, SHI Yu, <i>et al.</i> (2198)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Chromophoric Dissolved Organic Matter in a Northern-Side River of the Qinling Mountains in Summer	LIN Zi-shen, HUANG Ting-lin, YANG Shang-ye, <i>et al.</i> (2210)
Distribution, Sources, and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Tributary Waters of the Lower Reaches of the Yangtze River, China	JIA Tian-qi, LEI Rong-rong, WU Xiao-lin, <i>et al.</i> (2221)
Temporal and Spatial Occurrence of NSAIDs in Taihu Lake and Relevant Risk Assessment	LIAN Jie, LI Yi-fei, WANG Xiao-xuan, <i>et al.</i> (2229)
Occurrence and Ecological Risk of Eight Typical PhACs in Surface Water and Its Impact on <i>Daphnia magna</i>	XU Xin-lei, LIU Jian-chao, LU Guang-hua (2239)
Distribution Characteristics and Migration Rules of Pollutants in Sediments of Reservoirs with <i>Eucalyptus</i> Plantation, Southern China	ZHU Ya, LI Yi-ping, LUO Fan, <i>et al.</i> (2247)
Mechanism of Urban Black Odorous Water Based on Continuous Monitoring: A Case Study of the Erkeng Stream in Nanning	LI Yong-xin, WANG Wei, HE Mei, <i>et al.</i> (2257)
Relationship Between Source-Sink Landscape Pattern and Antibiotics in Surface Water in Peri-urban Watershed	LI Min, TANG Jian-feng, CHEN Li-ding, <i>et al.</i> (2264)
Molecular Chemo-diversity of the Dissolved Organic Matter Occurring in Urban Stormwater Runoff	NIE Yun-han, CHEN Hao, LI Lei, <i>et al.</i> (2272)
Regulating Effect and Mechanism of Calcite/Chlorapatite Mixture Addition on Transformation and Transport of Phosphorus in Sediments	BAI Xiao-yun, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (2281)
Stability of Ferrihydrite and Goethite Nanoparticles Under Different Environmental Conditions	WANG Zhi-qiao, MA Jie, CHEN Ya-li, <i>et al.</i> (2292)
Sunflower-Staw-Derived Biochar-Enhanced Fe(III)/S ₂ O ₈ ²⁻ System for Degradation of Benzoic Acid	SUN Peng, ZHANG Kai-kai, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (2301)
Non-activated Peroxymonosulfate-Induced Degradation of Sulfasalazine: Kinetics and Mechanism Investigations	DING Xi, ZHANG Xue-wei, ZHOU Run-sheng, <i>et al.</i> (2310)
Pollution Characteristics and Removal Effects of Antibiotics in Wastewater from Large-Scale Pig Farms in Guizhou	YANG Zhao, LI Jiang, XIANG Fu-liang, <i>et al.</i> (2320)
Nitrogen Removal in Low-C/N Rural Sewage Treatment by Anoxic/Oxic Biofilter Packed with New Types of Fillers	ZHAO Yuan-zhe, YANG Yong-zhe, WANG Hai-yan, <i>et al.</i> (2329)
Nitrogen Removal Performance and Nitrogen/Carbon Balance of Oligotrophic Aerobic Denitrifiers	WEN Gang, WANG Tong, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (2339)
Bacterial Community Shifts and Nitrogen Removal Characteristics for a SNAD Process Treating Anaerobic Digester Liquor of Swine Wastewater (ADLSW) in a Continuous-Flow Biofilm Reactor (CFBR)	QIN Jia-wei, XIN Xin, LU Hang, <i>et al.</i> (2349)
Characteristics of ANAMMOX Granular Sludge and Differences in Microbial Community Structure Under Different Culture Conditions	JIANG Ying, GUO Meng-lei, XIE Jun-xiang, <i>et al.</i> (2358)
Start-up of an Integrated Process of Denitrifying Phosphorus Removal Coupled with Partial Nitrification and Anaerobic Ammonium Oxidation	CHEN Ya, YIN Wen, ZHANG Xing-xing, <i>et al.</i> (2367)
Construction and Application of an Evaluation System for Soil Environmental Carrying Capacity	LI Xiao-nuo, DING Shou-kang, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (2373)
Synthesis of Magnetic Biochar and Its Application in the Remediation of Heavy-Metal-Contaminated Soils	WANG Jun-nan, CHENG Shan-shan, ZHAN Wen-hao, <i>et al.</i> (2381)
Remediation of Heavy-Metal-Contaminated Soil by EDTA Washing Enhanced with Reduction Solubilization	ZHANG Jin-yong, ZHU Yu-ting, WANG Ming-xin, <i>et al.</i> (2390)
Toxicity of Chromium to Root Growth of Barley as Affected by Chromium Speciation and Soil Properties	FU Ping-nan, GONG Xiao-fei, LUO Li-yun, <i>et al.</i> (2398)
Effect of Fertilizer Reduction and Biochar Application on Soil Nitrogen Loss in Purple Upland	WANG Shu, WANG Zi-fang, LONG Yi, <i>et al.</i> (2406)
Relationship Between the Composition of Soil Aggregates and the Distribution of Organic Carbon Under Long-Term Abandoned Restoration	WANG Xing, ZHONG Ze-kun, ZHANG Xin-yi, <i>et al.</i> (2416)
Effects of Biochar Application on Soil Microbial Nutrient Limitations and Carbon Use Efficiency in Lou Soil	WANG Qiang, GENG Zeng-chao, XU Chen-yang, <i>et al.</i> (2425)
N ₂ O Emissions from Tea Plantations with Sorghum Intercropping and Application of Big Urea Pills	ZHANG Ke-bin, LIU Xin-liang, KANG Man, <i>et al.</i> (2434)
Effects of Different Forest Vegetation Types on Soil Nitrogen-Related Microbial Communities and Functions in Jinyun Mountain	WANG Ying-yang, WANG Fu-hua, LUO Dong-hai, <i>et al.</i> (2445)
Nitrous Oxide Emission and Denitrifying Bacterial Communities as Affected by Drip Irrigation with Saline Water in Cotton Fields	GUO Hui-nan, MA Li-juan, HUANG Zhi-jie, <i>et al.</i> (2455)
Effect of Organic Matter Promotion on Nitrogen-Cycling Genes and Functional Microorganisms in Acidic Red Soils	CHU Cheng, WU Zhao-yue, HUANG Qian-ru, <i>et al.</i> (2468)
Effects of Simulated Acid Rain on Soil Fungi Diversity in the Transition Zone of Moso Bamboo and Broadleaf Forest	WANG Nan, PAN Xiao-cheng, WANG Chuan-kuan, <i>et al.</i> (2476)
Differences Between DNA- and RNA-Based Bacterial Communities in Marine Sediments	LI Ming-yue, YANG Yu-hong, MI Tie-zhu, <i>et al.</i> (2485)
Spatial Patterns and Spatial Autocorrelations of Wetland Changes in China During 2003-2013	ZHOU Ting, MA Jiao-jiao, XU Song-jun (2496)