

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.6
第41卷 第6期

目次

基于SPAMS的天津市夏季环境受体中颗粒物的混合状态及来源	林秋菊, 徐娇, 李梅, 王伟, 史国良, 冯银厂 (2505)
南京北郊降水无机离子和有机酸的化学特征及来源分析	杨笑影, 曹芳, 林煜棋, 章炎麟 (2519)
西安市PM _{2.5} 中水溶性离子的季节变化特征	黄含含, 王羽琴, 李升苹, 陈庆彩 (2528)
新疆石化工业区颗粒物含水量和酸度对二次无机组分形成的影响	刘会斌, 迪丽努尔·塔力甫, 王新明, 张潇潇, 王威, 阿布力克木·阿不力孜, 买里克扎提·买合木提, 刘伟 (2536)
长秋季生物物质燃烧对PM _{2.5} 中WSOC吸光性的影响	孟德友, 曹芳, 翟晓瑶, 张世春, 章炎麟 (2547)
2019年5月上海复合污染过程中挥发性有机物的污染特征及来源	王倩 (2555)
南京工业区秋季大气挥发性有机物污染特征及来源解析	曹梦瑶, 林煜棋, 章炎麟 (2565)
郑州市春季大气污染过程VOCs特征、臭氧生成潜势及源解析	任义君, 马双良, 王思维, 于世杰, 李一丹, 张瑞芹, 尹沙沙 (2577)
上甸子区域背景站VOCs污染特征及其对臭氧生成贡献	韩婷婷, 李颖若, 邱雨露, 何迪, 王焱, 马志强 (2586)
北京市餐饮业大气污染物排放特征	孙成一, 白画画, 陈雪, 翟翼飞, 高启天, 何万清, 聂磊, 石爱军, 李国傲 (2596)
北京市农业机械排放因子与排放清单	王凯, 樊守彬, 亓浩云 (2602)
北京市土壤风蚀扬尘排放因子本地化	李贝贝, 黄玉虎, 毕晓辉, 刘李阳, 秦建平 (2609)
基于MODIS_C061的长三角地区AOD与Angström指数时空变化分析	张颖蕾, 崔希民 (2617)
环渤海地区2,4,4'-三氯联苯的多介质归趋模拟	张毅, 马艳飞, 宋帅, 吕永龙, 张盛, 吴强 (2625)
岗南水库沉积物间隙水有色溶解有机物的时空分布特征及差异分析	周石磊, 孙悦, 苑世超, 彭瑞哲, 刘世崇, 岳奇丞, 张航, 王周强, 李再兴, 罗晓 (2635)
“河-湖”沉积物重金属环境特征及来源解析	李悦昭, 陈海洋, 孙文超 (2646)
伊通河(城区段)沉积物重金属形态分布特征及风险评价	姜时欣, 翟付杰, 张超, 王蒙蒙, 单保庆 (2653)
典型岩溶地下河流域水体中硝酸盐源解析	赵然, 韩志伟, 申春华, 张水, 涂汉, 郭永丽 (2664)
沉积物参与氮磷脉冲式输入对太湖水体营养盐浓度和藻类生长的影响	陈洁, 许海, 詹旭, 许笛, 朱广伟, 朱梦圆, 李鹏飞, 康丽娟 (2671)
丰水期东洞庭湖超微型浮游藻类时空分布特征及其影响因素	李胜男, 陈豪宇, 彭华, 李芸君, 朱坚, 简燕, 纪雄辉 (2679)
胶网藻对水体中恩诺沙星的毒性响应及去除作用	王振方, 韩子玉, 王梦雪, 马逸驰, 王婷, 王丽卿, 张玮 (2688)
不同光照和磷水平下两种沉水植物磷富集和钙磷含量的比较	桑雨璇, 杨珈乐, 熊怡, 尹文博, 汪华, 王和云 (2698)
过氧化钙复合片剂对水体修复和底泥磷控制的作用	张帅, 李大鹏, 丁玉琴, 徐楚天, 许鑫澎, 孙培荣, 赵哲豪, 黄勇 (2706)
基于区域DNDC的稻田轮作氮素空间分异与驱动分析:以晋江流域为例	王亚楠, 祝伟, 祁新华, 范水生 (2714)
不同铁锰浓度的低温铁锰氨地下水净化中氨氮去除途径	张杰, 梅宁, 刘孟浩, 叶雪松, 李冬 (2727)
高晶度Mn-Fe LDH催化剂活化过一硫酸盐降解偶氮染料RBK5	李立, 吴丽颖, 董正玉, 王霖, 张倩, 洪俊明 (2736)
Fe-cyclam/H ₂ O ₂ 体系催化降解罗丹明B机制	余雨清, 陈翔宇, 蔡荣华, 黄歆珏, 陈曼 (2746)
微生物光电化学池去除硝酸盐氮:以PANl/TiO ₂ -NTs为光阳极	卢忆, 周海珊, 彭瑞建, 叶杰旭, 陈建孟, 宋爽, 张士汉 (2754)
缺氧MBR-MMR处理海水养殖废水性能及膜污染特性	陈凡雨, 徐仲, 尤宏, 柳锋, 李之鹏, 陈其伟, 韩红卫 (2762)
HRT对改良式A ² /O-BAF反硝化除磷脱氮的影响	赵凯亮, 刘安迪, 南彦斌, 梁利民, 王云霞, 陈永志 (2771)
重金属Ni(II)对厌氧氨氧化脱氮性能的影响及其动力学特征变化	孙琪, 赵白航, 范飒, 周邦磊, 李玉璋 (2779)
异养硝化-好氧反硝化混合菌对尿素的去除及重金属和盐度的影响	王萌萌, 曹刚, 张迪, 冯乃宪, 潘涌璋 (2787)
火山岩填料曝气生物滤池的SNAD工艺启动特性及功能菌丰度演替	薛嘉俊, 张绍青, 张立秋, 李淑更, 姚海楠, 耿忠轩, 李鸿, 刘晓玲 (2796)
游离羟胺对两种典型亚硝态氮氧化菌活性的影响	沈琛, 张树军, 彭永臻 (2805)
死菌DNA对厌氧消化污泥中抗生素抗性基因及微生物群落分析的干扰	苏宇傲, 刘宏波, 毛秋燕, 张慧旻, 张衍, 刘和 (2812)
中国农田土壤重金属空间分布特征及污染评价	陈文轩, 李茜, 王珍, 孙兆军 (2822)
土壤环境质量预警体系构建与应用	李笑诺, 丁寿康, 陈卫平, 王夏晖, 吕斯丹, 刘睿 (2834)
不同母质发育土壤团聚体分布对外源输入秸秆的响应及其与有机碳矿化的关系	毛霞丽, 邱志腾, 张爽, 沈倩, 章明奎 (2842)
长期施肥稻田土壤胞外酶活性对底物可利用性的响应特征	宁玉菲, 魏亮, 魏晓梦, 祝贞科, 袁红朝, 葛体达, 吴金水 (2852)
生物质炭对磷富集土壤中两种元素生物有效性及作物镉积累的影响	黄洋, 郭晓, 胡学玉 (2861)
基于田块尺度的农田土壤和小麦籽粒镉铅污染特征及健康风险评价	肖冰, 薛培英, 韦亮, 刘成程, 高培培, 樊利敏, 杜佳燕, 刘文菊 (2869)
重构土壤垂直剖面重金属Cd赋存形态及影响因素	胡青青, 沈强, 陈飞, 尹炳, 邹宏光, 庄红娟, 张世文 (2878)
新乡市镉污染土壤细菌群落组成及其对镉固定效果	陈兆进, 李英军, 邵洋, 林立安, 徐鸽, 陈彦, 田伟, 姚伦广, 韩辉 (2889)
三峡消落带适生植物根系活动调控土壤养分与细菌群落多样性特征	李丽娟, 李昌晓, 陈春桦, 杨治华, 陈雪梅 (2898)
滇池水中细菌和古菌氮代谢功能基因的空间分布	张宇, 左剑恶, 王丝可, Alisa Salimova, 李爱军, 李玲玲 (2908)
模拟升温对冰川前缘地微生物种群的影响	王愉琬, 马安周, 种国双, 谢飞, 周汉昌, 刘国华, 庄国强 (2918)
水肥气耦合对温室番茄土壤N ₂ O排放及番茄产量的影响	商子惠, 蔡焕杰, 陈慧, 孙亚楠, 李亮, 朱艳, 王晓云 (2924)
矸石山及其周边村庄土壤浸出液对大麦的毒性作用	尚誉, 杨丰隆, 宁夏, 董铁茹, 桑楠 (2936)
海南省昌化江河口海域生物体中多环芳烃污染特征、来源解析及健康风险评价	汪慧娟, 旷泽行, 周贤, 覃晓青, 黄洪辉 (2942)
春季北京市河流大型底栖动物群落结构特征及影响因素分析	贺玉晓, 李珂, 任玉芬, 王思琪, 方文颖 (2951)
热解温度和时间对香蒲生物炭性质的影响及生态风险评估	蔡朝卉, 楚沉静, 郑浩, 罗先香, 李锋民 (2963)
长江经济带交通碳排放测度及其效率格局(1985~2016年)	蒋自然, 金环环, 王成金, 叶士琳, 黄艳豪 (2972)
《环境科学》征订启事(2595) 《环境科学》征稿简则(2687) 信息(2697, 2713, 2811)	

北京市餐饮业大气污染物排放特征

孙成一¹, 白画画¹, 陈雪¹, 翟翼飞², 高启天², 何万清¹, 聂磊¹, 石爱军¹, 李国傲^{1*}

(1. 北京市环境保护科学研究院, 国家城市环境污染工程技术研究中心, 城市大气挥发性有机污染防治技术与应用北京市重点实验室, 北京 100037; 2. 北京市通州区生态环境局, 北京 101101)

摘要: 餐饮业是中国大型城市大气环境污染源之一. 为了解餐饮业大气污染物的产生能力, 本研究以北京为研究对象, 选取41家不同菜系的餐饮企业, 现场实地检测了净化设备前端的油烟、颗粒物和二甲苯总烃(NMHC)的产生浓度水平. 结果表明, 净化前油烟、颗粒物和 NMHC 的初始平均浓度约为 1.93、6.6 和 10.9 mg·m⁻³. 提出了一种基于工作日与非工作日的估算污染物排放总量的计算方法. 并基于北京市餐饮企业数量和本研究测得的排放因子, 初步估算了 2019 年全市餐饮源主要污染物的初始产生总量, 油烟、颗粒物和 NMHC 的年排放总量分别为 5 512、18 849 和 6 169 t. 川湘菜、烧烤、烤鸭与家常菜产生的油烟与颗粒物浓度的 Pearson 系数均 >0.6, 具有强相关性; 其中川湘菜和烤鸭排放的 Pearson 系数均 >0.8, 呈现极强相关性.

关键词: 餐饮业; 油烟; 颗粒物; 二甲苯总烃(NMHC); 相关性; 初始产生总量

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)06-2596-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.201911076

Emission Characteristics of the Catering Industry in Beijing

SUN Cheng-yi¹, BAI Hua-hua¹, CHEN Xue¹, ZHAI Yi-fei², GAO Qi-tian², HE Wan-qing¹, NIE Lei¹, SHI Ai-jun¹, LI Guo-ao^{1*}

(1. Beijing Key Laboratory of Urban Atmospheric Volatile Organic Compounds Pollution Control and Application, National Engineering Research Center of Urban Environmental Pollution Control, Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection, Beijing 100037, China; 2. Beijing Tongzhou Municipal Ecological Environment Bureau, Beijing 101101, China)

Abstract: The emissions of the catering industry are important sources of air pollution in megacities in China. A total of 41 restaurants in Beijing were selected as the sampling sites to evaluate the contribution of the catering industry to megacity air pollution. The original emissions load of cooking fume, particulate matter, and non-methane hydrocarbon (NMHC) were studied via field tests for different types of restaurants. The results showed that the cooking fume, particulate matter, and NMHCs generated from the kitchen were 1.93, 6.6, and 10.9 mg·m⁻³, respectively. An evaluation method based on working days was developed. Considering the total number of restaurants in Beijing, the original emission loads of 2019 were calculated. The cooking fume, particulate matter, and NMHC emissions were 5 512, 18 849, and 6 169 t, respectively. The Pearson numbers of the cooking fume emission and particulate matter emission from Sichuan and Hunan cuisine, Roast Duck, Grill and Barbecue, and Chinese Home-Style cuisine were all above 0.6, which indicated a high level of correlation between the cooking fume emission and particulate matter emission. Notably, the Pearson numbers of Sichuan and Hunan cuisine and Roast Duck were both higher than 0.8, which indicates a strong correlation between the cooking fume emission and particulate matter emission.

Key words: catering industry; cooking fume; particulate matter; non-methane hydrocarbon (NMHC); correlation; original emission load

餐饮业排放的主要污染物为食品加工过程中产生的油烟、颗粒物、二甲苯总烃(NMHC)以及烹饪使用的煤、天然气的燃烧产物^[1]. 餐饮业废气对空气质量有一定影响, 主要表现在液态油烟与空气中水分结合形成气凝胶, 气凝胶在大气中长时间悬浮, 会导致大气 PM_{2.5} 含量增加^[2], 部分挥发性有机物(VOCs)在大气中经过复杂地反应会生成可以长时间悬浮的二次颗粒物^[2~5], 进一步增加大气 PM_{2.5} 含量. 有研究表明, 餐饮业排放以 PM_{2.5} 为主, 其排放的颗粒物约占北京大气 PM_{2.5} 浓度的 7.5%~21.2%^[5], 是北京城区大气污染的来源之一^[5~8]. 且随着经济平稳增长, 北京市人口增长, 餐饮业消费大大提升. 北京市商务局统计数据显示, 截至 2018 年 12 月, 北京地区共有餐饮企业 5.95 万户, 同比增长

7.7%, 尤其在中心城区, 高密度分布的餐饮企业油烟排放, 是造成局部空气污染的一大原因^[8~11]. 餐饮业排放的油烟成分复杂, 并对人体呼吸道产生不利影响^[12], 大量吸入后有致癌风险^[12~15].

近年来, 为了解餐饮业污染现状, 学者们开展了众多研究. 施巍等^[16]给出了一种餐饮业无组织排放的核算方法. Wang 等^[17]基于 Kuznets Curve 对中国各省市地区餐饮业 VOCs 的排放进行了估算. 林立等^[18]测算了上海典型餐饮业的油烟、颗粒物以及

收稿日期: 2019-11-09; 修订日期: 2019-12-30

基金项目: 北京市科技计划项目(Z181100005418015, Z171100004417029); 国家重点研发计划项目(2017YFC0211504)

作者简介: 孙成一(1994~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为环境监测与污染防治, E-mail: sunchengyi@cee.cn

* 通信作者, E-mail: liguoao@cee.cn

VOCs 的排放,确定餐饮业排放是上海地区细颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ 的主要来源之一。温梦婷等^[19]研究了烹饪产生的 $\text{PM}_{2.5}$ 对北京冬季空气污染的贡献,结果表明研究目标排放的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度为当日大气环境 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的 8~35 倍之多。但是仍缺少北京地区餐饮源直接产生的污染总量的估算。本研究于 2019 年在北京市内选取了川湘菜、烤鸭、烧烤和家常菜这 4 种典型菜系,共 41 家餐饮企业,对各餐饮企业排放的油烟、颗粒物和总烃进行现场采样、分析并估算年排放总量,旨在通过此研究,探明北京市餐饮业大气污染物初始产生总量,考察餐饮业排放的大气污染物对大型城市空气质量的影响程度。

1 器材与方法

1.1 设备与材料

设备:QC-2 大气采样仪(北京市劳动保护科学研究所);大气烟尘气采样仪(青岛崂应环保科技有限公司);OIL-460 型红外测油仪(北京华夏科创仪器股份有限公司);GC8600 型气相色谱(北京北分瑞利分析仪器有限公司);甲烷柱为以 GDX-502 高分子多孔微球为填料的色谱柱,长 3 m,内径 3 mm;总烃柱为以硅烷化玻璃微珠为填料的色谱柱,柱长 1 m,内径 3 mm。系统载气为氮气(>99.999%),氢气由氢气发生器提供;电子天平(0.01 mg, Mettler Toledo, 瑞士)。

材料:聚四氟乙烯杯;不锈钢油烟滤筒;特氟龙气袋;颗粒物滤膜;四氯化碳(上海欧陆科仪有限公司)。

1.2 样品采集与分析

根据城市居民外出就餐习惯,选午间 11:30~13:30 和晚间 17:30~19:30(冬季晚餐高峰时间延后 1 h)的用餐高峰时段对选取的 41 家餐饮企业进行样品采集,其中川湘菜 9 家、烤鸭 10 家、烧烤 5 家和家常菜 17 家。

样品采集参考《饮食业油烟排放标准试行》(GB 18483-2001)、《餐饮业颗粒物的测定 手工称重法》(DB 11/T 1485-2017)和《固定污染源废气挥发性有机物的采样 气袋法》(HJ 732-2014)规定的标准方法。采集断面位于油烟净化设备前端的平直烟道。油烟每组 5 个样品,每个样品采集 10 min,颗粒物每组 1 个样品,采集时间 45 min,非甲烷总烃每组 1 个样品,采集时间 30 min。

样品在规定有效期内进行分析,分析方法参考《饮食业油烟排放标准试行》(GB 18483-2001)、《餐饮业颗粒物的测定 手工称重法》(DB 11/T 1485-

2017)和《固定污染源 总烃、甲烷和非甲烷的测定 气相色谱法》(HJ 38-2017)。本研究采用《固定污染源 总烃、甲烷和非甲烷的测定 气相色谱法》(HJ 38-2017)对烟气中 VOCs 浓度进行分析,故 VOCs 浓度以 NMHC 计。

1.3 污染物年排放总量计算方法

不安装油烟净化设备情况下餐饮企业的污染物年排放总量计算见公式(1)^[19]。

$$W = y \times h \times k \times 10^{-3} \quad (1)$$

式中, W 为年排放总量($\text{kg} \cdot \text{a}^{-1}$); y 为全年营业天数(d); h 为每天营业小时数(h); k 为排放系数($\text{g} \cdot \text{h}^{-1}$)。

排放系数 k 计算见公式(2):

$$k = V_0 \times E \times n \quad (2)$$

式中, V_0 为平均标况风量($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$); E 为基准平均排放浓度, ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$); n 为平均折算灶头数(个)。

由于工作日与非工作日餐饮企业工作强度有差异,所以在进行全年总量计算时将工作日与非工作日分别计算,日排放总量 W_d 计算公式为:

$$W_d = k \times h \times N \quad (3)$$

式中, N 为北京市餐饮企业总数。

全年污染物排放总量计算公式为:

$$W_y = W_{d,g} \times 250 + W_{d,j} \times 115 \quad (4)$$

式中, W_y 为全年排放总量(t); $W_{d,g}$ 为工作日排放总量($\text{t} \cdot \text{d}^{-1}$); $W_{d,j}$ 为非工作日排放总量($\text{t} \cdot \text{d}^{-1}$)。

2 结果与讨论

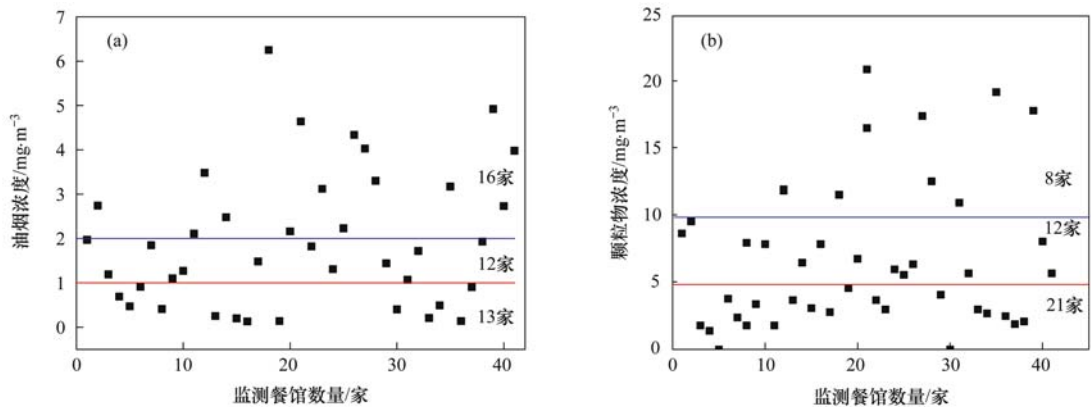
2.1 油烟与颗粒物排放情况

41 家餐饮企业的净化前油烟与颗粒物排放情况见图 1(a),油烟基准排放浓度范围为 0.14~6.25 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$,平均排放浓度为 1.93 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。从中可知,油烟基准排放浓度 < 1.0 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$,即满足《餐饮业大气污染物排放标准》(DB 11/1488-2018)油烟排放限值要求的有 13 家企业,占比 31.71%,这些企业不需加装净化设备即可满足达标排放;油烟基准排放浓度 $\geq 1.0 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 的餐饮企业共 28 家,占比 68.29%,其中油烟基准排放浓度 $\geq 2.0 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,即超标 2 倍的企业有 16 家,占调查总量的 39.02%。由此可见,大部分餐饮企业需通过加装净化设备以消除油烟污染,满足达标排放。DB 11/1488-2018 的编制说明中对 100 家餐饮企业的油烟测试结果为 1.77 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$,与本研究的结果相近。而林立等^[18]的研究发现上海市餐饮企业平均油烟排放浓度为 1.28 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$,朱春等^[6]发现湖南菜和广东菜的油烟密度分别为 1.51 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 1.72 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$,均低于本研究结果,原因在于不同菜系之间的烹饪方式、

烹饪过程以及使用食用油种类和食材不同,可能造成油烟排放差异.

颗粒物排放情况见图 1(b),颗粒物基准排放浓度为 $<0.1 \sim 19.3 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$,平均排放浓度为 $6.6 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$. 从中可知,颗粒物浓度 $<5 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$,即满足 DB 11/1488-2018 油烟排放限值要求的有 21 家企业,占比 51.22%,这些企业无需安装净化设备即可满足排放标准;颗粒物基准浓度 $\geq 5 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 的餐饮企业共 20 家,占比 48.78%,其中颗粒物基准浓

度 $\geq 10 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 有 8 家,占比 19.51%. DB 11/1488-2018 的编制说明中对 100 家餐饮企业的测试结果为 $7.50 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$,与本研究结果相近. 林立等^[18]测得上海市餐饮企业颗粒物排放浓度为 $0.14 \sim 1.67 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间,温梦婷等^[19]测得北京地区川菜、杭州菜以及烧烤等餐饮企业颗粒物排放浓度为 $1.38 \sim 1.81 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$,低于本研究结果. 原因在于样品会受采集断面、净化设备、采样工况和餐饮企业菜系等因素影响,导致颗粒物排放浓度存在较大差异.



(a) 调查餐饮企业油烟净化前超标情况; (b) 调查餐饮企业颗粒物排放情况

图1 调查餐饮企业的油烟与颗粒物排放情况

Fig. 1 Cooking fume and particulate matter emission of the sampling restaurants

2.2 颗粒物与油烟排放浓度相关性分析

研究发现油烟与颗粒物的排放浓度具有一定相

关性,分析结果见图 2,统计结果见表 1.

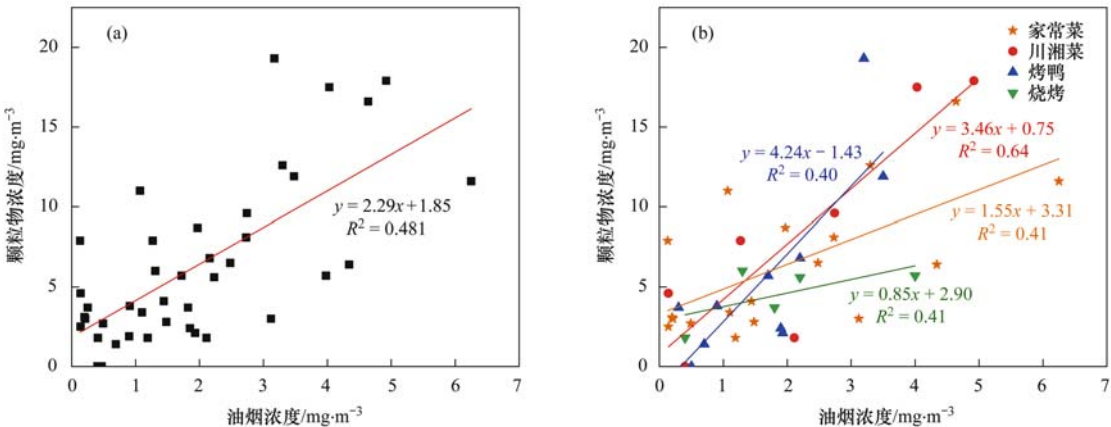
本研究分别对全部餐饮企业与不同菜系间餐饮

表 1 颗粒物与油烟排放浓度相关性分析

Table 1 Correlation analysis between the emission concentration of particulate matter and cooking fume

项目	全部	家常菜	烧烤	烤鸭	川湘菜
样本数量/个	41	17	5	10	9
Pearson 相关系数	0.7	0.6	0.6	0.8	0.9
显著性(双尾)	0.000	0.005	0.243	0.006	0.009
R ²	0.48	0.41	0.40	0.41	0.64

1) Pearson 系数取值范围:0.8~1.0 为极强相关性,0.6~0.8 为强相关性



(a) 调查餐饮企业油烟与颗粒物排放情况; (b) 调查餐饮企业不同菜系的油烟与颗粒物排放情况

图 2 油烟与颗粒物排放浓度相关性分析

Fig. 2 Relative analysis between the emission concentration of cooking fume and particulate matter

企业的油烟与颗粒物浓度进行相关性分析,结果表明油烟与颗粒物之间存在强相关性,且不同菜系间存在差异;家常菜和烧烤排放的油烟与颗粒物表现为强相关性,而烤鸭和川湘菜的 Pearson 系数分别为 0.8 和 0.9,表现出了极强的相关性,与孙鹏等^[20]对河南省郑州市具有代表性餐饮企业排放油烟和颗粒物之间具有很高线性关系的研究结论相符.但是,有研究表明烤鸭排放的油烟与颗粒物之间相关性不好^[21],与本研究的结论不同,可能由于本研究样本中烤鸭均为电烤炉烹饪,与传统果木烤鸭的油烟和颗粒物排放水平不同、样品受采集条件和餐饮企业工况等因素影响.

2.3 NMHC 排放情况

NMHC 排放情况见图 3,NAMC 的基准排放浓度范围为 1.67 ~ 37.4 mg·m⁻³,平均排放浓度为 10.8 mg·m⁻³.NMAC 排放浓度 < 10 mg·m⁻³,满足 DB 11/1488-2018 油烟排放限值要求的有 22 家企业,占比 52.63%;NMAC 初始浓度 ≥ 10 mg·m⁻³ 的餐饮企业共 17 家,占比 42.5%,其中颗粒物基准浓度 ≥ 20 mg·m⁻³ 有 6 家,占比 15%.DB11/1488-2018 的编制说明中对 100 家餐饮企业的测试结果为 7.50 mg·m⁻³,与本研究的结果相近.55% 的餐饮企业 NMHC 的初始排放浓度符合标准,无需进一步治理,约有一半的企业需要安装 VOCs 治理设施,其中约有 15% 的餐饮企业需要安装净化效率高于 60% 的 VOCs 治理设施.是否全面推广普及针对 VOCs 的净

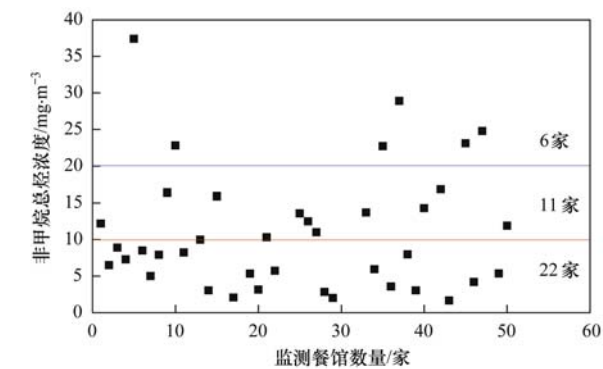


图 3 调查餐饮企业的非甲烷总烃排放情况

Fig. 3 NMAC emission situation of the sampling restaurants

化设备有待商榷.

将本研究所得 NMHC 数据与上海市餐饮企业 VOCs 排放浓度 (0.87 ~ 7.31 mg·m⁻³)^[18] 进行对比,差异较大,原因可能是:①净化设备对 VOCs 有良好的净化效果.本研究采集的为净化前的样品,而上海市的研究可能包含了净化后的样品;②样本所覆盖餐饮企业数量和菜系不同;③采样时工况不同.

2.4 污染物排放总量估算

分别统计了 41 家餐饮企业的标况排放风量与平均基准灶头数.如图 4 所示,各餐饮企业不同标况风量的区间内和不同折算灶头数量下呈正态分布趋势,标况风量平均值约为 10 000 m³·h⁻¹,折算灶头数量平均值为 5 个.

经实地调查发现,工作日 (250 d·a⁻¹) 餐饮企业作业时间集中在 12:00 ~ 13:00 与 18:00 ~ 19:00,主

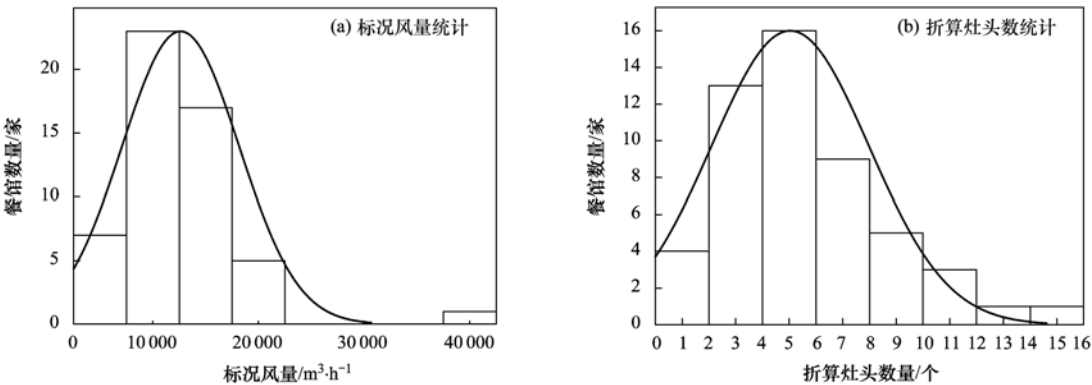


图 4 餐饮企业基本情况

Fig. 4 Basic situation of the sampled restaurants

营项目为外卖;非工作日 (115 d·a⁻¹) 堂食顾客较多,兼具大量外卖,作业时间主要集中在 11:30 ~ 13:30 与 17:30 ~ 19:30,即工作日日均作业时长约 2 h,非工作日约 4 h.按商务部统计的 2018 年北京市餐饮业市场主体 5.95 万户,估算 2019 年工作日与非工作日北京市餐饮源油烟、颗粒物和 NMHC 的排放总量,并计算 2019 年全年排放总量分别为 5 512、18 849 和 6 169 t.结果见表 2.

表 2 北京市餐饮业全年产生污染物估算

Table 2 Evaluation of the annual emission loads of the catering industry in Beijing

排放污染物	工作日排放 /t·d ⁻¹	非工作日排放 /t·d ⁻¹	全年累计总量 /t
油烟	11.5	23.0	5 512
颗粒物	39.3	78.5	18 849
NMHC	12.9	25.7	6 169

1) NMHC 排放浓度未计算折算灶头排放浓度,故使用公式时 n 按 1 计算

2012 年广州市餐饮企业油烟全年排放 15.6 t^[22], 与本研究估算的 5 512 t 相差较大. 原因可能是广州和北京的餐饮企业类型不同, 并且调查中粤菜占比 60%, 粤菜以蒸、煲烹饪为主, 油烟排放能力远低于以煎、炸、烹、炒和烤为主的各大菜系.

上海市 2014 年餐饮源颗粒物排放总量为 681 ~ 946 t^[23], 广州市 2011 年餐饮源细颗粒物排放总量为 2 807.93 t^[24], 均与本研究估算的 18 848 t 相差极大, 原因可能在于: ①本研究中采样位置位于净化设备前端, 未考虑净化设备对颗粒物的净化效率; ②本研究受颗粒物样品采集方法所限, 无法区分细颗粒物与粗颗粒物, 大量粗颗粒物的存在使得测算结果高于其它研究; ③不同城市的主要餐饮类型占比不同. 本研究估算颗粒物排放总量远高于北京市 2005 年餐饮源细颗粒物排放总量 (2 100 t)^[19], 除以上原因外, 自 2005 年 (4.1 万家) 至 2018 年 (5.95 万家), 北京市餐饮企业数量增长 30%. 生活水平提高, 外出就餐人数增加, 同时外卖行业兴起, 导致餐饮源排放总量显著增长. 本文基于餐饮企业数量估算 2019 年北京 VOCs 年排放总量为 6 169 t, 与上海 2014 年 VOCs 年排放总量相近 (4 124.33 ~ 7 818.04 t·a⁻¹)^[18]. 作为特大城市, 北京与上海的餐饮业 VOCs 排放强度相似. 本研究估算的北京市 VOCs 排放总量高于广州市 2011 年餐饮源 VOCs 排放总量 1 091.91 t^[24], 该差异源自地区菜系差别. 本文与 Wang 等^[17] 基于上海市人口估算 2018 年北京的 VOCs 年排放总量 (1 608.18 t·a⁻¹) 相差近 4 倍, 但是其基于餐饮企业数量与其基于上海市人口估算的 2018 年上海市 VOCs 年排放量相差也近 4 倍, 产生这种差距的原因可能是两种算法的统计学误差. 本研究估算的 VOCs 产生总量低于北京市 2003 年餐饮业 VOCs 排放总量 10 559 t^[25], 可能是受样品采集和检测方法、采样时工况、餐饮企业建筑结构和净化设备等影响导致.

3 结论

(1) 选取的 41 家餐饮企业涵盖了 4 种典型菜系, 具有一定的代表性. 北京市餐饮源产生污染物能力较强, 油烟、颗粒物和总有机碳的基准平均浓度分别为 1.93、6.6 与 10.9 mg·m⁻³, 均超过了北京市对餐饮企业排放的地方标准, 对餐饮企业加装高效净化器十分有必要.

(2) 餐饮源产生的油烟与颗粒物之间存在较强的相关性, 在对餐饮源排放污染物的监督管理过程中可以只对其中一项污染物进行检测, 用于评估此餐饮企业的排放能力, 从而节省检测费用.

(3) 估算了北京市 2019 年餐饮业油烟、颗粒物和 NMHC 的年产生总量, 分别为 5 512、18 849 和 6 169 t, 略高于实际排放数值. 原因是本文选取的菜系排放水平稍高于其他菜系, 且样品均采集自净化设备前端, 未考虑净化效率对实际排放总量的影响.

(4) 本研究为《餐饮业大气污染排放标准》(DB 11/1488-2018) 发布后的第一次在北京市范围内对餐饮源污染物产生的普查. 随着近年来餐饮业的飞速发展, 该行业产生的污染物总量呈现上升趋势. 本文提供了以北京为例的中国特大城市餐饮企业排放强度的估算数据与估算方法, 为政府了解餐饮企业的排放强度提供了基础数据, 为治理特大城市餐饮企业污染提供数据支持, 并提出了需要重点治理的对象.

参考文献:

- [1] 刘芃岩, 马傲娟, 邱鹏, 等. 保定市餐饮源排放 PM_{2.5} 中有机污染物特征及来源分析[J]. 环境化学, 2019, 38(4): 770-776.
Liu P Y, Ma A J, Qiu P, et al. Characteristics and sources of organic pollutants on PM_{2.5} from cooking fume in Baoding[J]. Environmental Chemistry, 2019, 38(4): 770-776.
- [2] 刘欣然. 北京大气气溶胶中烃类有机污染物的特征研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院 (大气物理研究所), 2008.
Liu X R. A study on characteristics of hydrocarbon in the atmospheric aerosols of Beijing [D]. Beijing: Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 2008.
- [3] Xiang Z Y, Wang H L, Stevanovic S, et al. Assessing impacts of factors on carbonyl compounds emissions produced from several typical Chinese cooking[J]. Building and Environment, 2017, 125: 348-355.
- [4] 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.
Jiang Y, Yin Y C, Wang B, et al. VOCs emission characteristics in cooking oil fume of Sichuan cuisine in Chengdu and its effect on atmospheric environment [J]. Environmental Chemistry, 2014, 33(11): 2005-2006.
- [5] 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.
- [6] 朱春, 李旻雯, 缪盈盈, 等. 城市烹饪油烟颗粒物排放特性分析[J]. 绿色建筑, 2014, (5): 57-60, 71.
Zhu C, Li M W, Liao Y Y, et al. Analysis of characters of particulate emissions generated from urban cooking fume [J]. Green Building, 2014, (5): 57-60, 71.
- [7] Barletta B, Meinardi S, Rowland F S, et al. Volatile organic compounds in 43 Chinese cities[J]. Atmospheric Environment, 2005, 39(32): 5979-5990.
- [8] 王桂霞. 北京市餐饮源排放大气颗粒物中有机物的污染特征研究[D]. 北京: 中国地质大学 (北京), 2013.
Wang G X. The organic pollution characteristics in the Beijing cooking source emissions of atmospheric particulate matter [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2013.

- [9] 肖德林, 邓仕槐, 张静, 等. 餐饮油烟对环境空气质量的影响[A]. 见:《环境工程》2018 年全国学术年会论文集(下册)[C]. 北京:《环境工程》编委会, 工业建筑杂志社有限公司, 2018. 441-445, 452.
- [10] Robinson E S, Gu P S, Ye Q, *et al.* Restaurant impacts on outdoor air quality: elevated organic aerosol mass from restaurant cooking with neighborhood-scale plume extents [J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, **52**(16): 9285-9294.
- [11] 孙涛, 蔡昱, 张云. 餐饮废气颗粒物排放特征及环境影响研究[J]. *安徽农业科学*, 2015, **43**(11): 257-258, 281.
Sun T, Cai Y, Zhang Y. Study on the characters of particles from cooking fumes and environmental impact[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2015, **43**(11): 257-258, 281.
- [12] 吴鑫. 烹饪油烟的排放特征及颗粒物的个体暴露研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2015.
Wu X. The research on emission of cooking fume and personal exposure of particles[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2015.
- [13] Zhang N, Han B, He F, *et al.* Chemical characteristic of $PM_{2.5}$ emission and inhalational carcinogenic risk of domestic Chinese cooking[J]. *Environmental Pollution*, 2017, **227**: 24-30.
- [14] 陈宇炼, 王心如. 烹调油烟的毒性研究进展[J]. *环境与健康杂志*, 1999, **16**(2): 120-122.
Chen Y L, Wang X R. Advances in studies on the toxicity of cooking fume[J]. *Journal of Environment and Health*, 1999, **16**(2): 120-122.
- [15] 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.
- [16] 施巍, 丁勤栋, 苏静. 餐饮服务性行业油烟无组织排放核算方法的研究[A]. 见: 中国环境保护优秀论文集(2005)(下册)[C]. 北京: 中国环境科学学会, 2005. 1842-1846.
- [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] 林立, 何校初, 鄢坚平, 等. 上海餐饮油烟污染特征研究[J]. *环境科学与技术*, 2014, **37**(120): 546-549.
Lin L, He C X, Wu J P, *et al.* Research of Shanghai cooking fume pollution[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **37**(120): 546-549.
- [19] 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.
- [20] 孙鹏, 孔德芳, 梁亦欣. 河南省餐饮油烟污染控制指标及排放限值探讨[J]. *环境保护科学*, 2019, **45**(2): 57-63.
Sun P, Kong D F, Liang Y X. Discussion on control indexes and emission limits of fume pollutants from catering industry in Henan province[J]. *Environmental Protection Science*, 2019, **45**(2): 57-63.
- [21] 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.
- [22] 彭竞, 肖乡. 广州市饮食业油烟污染状况及其对空气质量影响分析调查[J]. *化工管理*, 2016, (10): 115-117.
Peng J, Xiao X. Analysis and investigation on fume pollution in catering industry in Guangzhou and its influence on air quality [J]. *Chemical Enterprise Management*, 2016, (10): 115-117.
- [23] 王红丽, 景盛翱, 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.
- [24] 黄继章, 李伟铿, 张宝春. 广州市餐饮源排放研究[J]. *广州环境科学*, 2013, **28**(2): 1-2, 6.
Huang J Z, Li W K, Zhang B C. Study on cooking emissions in Guangzhou[J]. *Guangzhou Environmental Science*, 2013, **28**(2): 1-2, 6.
- [25] 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): 1768-1775.
Zhang C Y, Ma Y L. Characterization of non-methane hydrocarbons emitted from Chinese cooking[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, **31**(8): 1768-1775.

CONTENTS

Mixed State and Sources of Fine Particulate Matter in the Summer in Tianjin City Based on Single Particle Aerosol Mass Spectrometer (SPAMS)	LIN Qiu-ju, XU Jiao, LI Mei, <i>et al.</i> (2505)
Characteristics and Sources of Inorganic Ions and Organic Acids in Precipitation in the Northern Suburb of Nanjing, China	YANG Xiao-ying, CAO Fang, LIN Yu-qi, <i>et al.</i> (2519)
Seasonal Variation of Water-soluble Ions in PM _{2.5} in Xi'an	HUANG Han-han, WANG Yu-qin, LI Sheng-ping, <i>et al.</i> (2528)
Effect of Liquid Water Content of Particles and Acidity of Particulate Matter on the Formation of Secondary Inorganic Components in Xinjiang Petrochemical Industrial Area	LIU Hui-bin, Dilinuer-Talifu, WANG Xin-ming, <i>et al.</i> (2536)
Effect of Biomass Burning on the Light Absorption Properties of Water Soluble Organic Carbon in Atmospheric Particulate Matter in Changchun	MENG De-you, CAO Fang, ZHAI Xiao-yao, <i>et al.</i> (2547)
Chemical Characteristics and Sources of Volatile Organic Compounds in Shanghai During an Ozone and Particulate Pollution Episode in May 2019	WANG Qian (2555)
Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric VOCs in the Nanjing Industrial Area in Autumn	CAO Meng-yao, LIN Yu-chi, ZHANG Yan-lin (2565)
Ambient VOCs Characteristics, Ozone Formation Potential, and Source Apportionment of Air Pollution in Spring in Zhengzhou	REN Yi-jun, MA Shuang-liang, WANG Si-wei, <i>et al.</i> (2577)
Characteristics of VOCs and Their Roles in Ozone Formation at a Regional Background Site in Beijing, China	HAN Ting-ting, LI Ying-ruo, QIU Yu-lu, <i>et al.</i> (2586)
Emission Characteristics of the Catering Industry in Beijing	SUN Cheng-yi, BAI Hua-hua, CHEN Xue, <i>et al.</i> (2596)
Emission Factors and Emission Inventory of Agricultural Machinery in Beijing Under Real-world Operation	WANG Kai, FAN Shou-bin, QI Hao-yun (2602)
Localization of Soil Wind Erosion Dust Emission Factor in Beijing	LI Bei-bei, HUANG Yu-hu, BI Xiao-hui, <i>et al.</i> (2609)
Spatial and Temporal Characteristics of AOD and Angström Exponent in the Yangtze River Delta Based on MODIS_C061	ZHANG Ying-lei, CUI Xi-min (2617)
Fate Simulation of 2,4,4'-Trichlorobiphenyl in the Bohai Rim Using the Multimedia Model	ZHANG Yi, MA Yan-fei, SONG Shuai, <i>et al.</i> (2625)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Difference Analysis of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Sediment Interstitial Water from Gangnan Reservoir	ZHOU Shi-lei, SUN Yue, YUAN Shi-chao, <i>et al.</i> (2635)
Environmental Characteristics and Source Apportionment of Heavy Metals in the Sediments of a River-Lake System	LI Yue-zhao, CHEN Hai-yang, SUN Wen-chao (2646)
Speciation Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments from the Yitong River City Area	JIANG Shi-xin, ZHAI Fu-jie, ZHANG Chang, <i>et al.</i> (2653)
Identifying Nitrate Sources in a Typical Karst Underground River Basin	ZHAO Ran, HAN Zhi-wei, SHEN Chun-hua, <i>et al.</i> (2664)
Influence of Nutrient Pulse Input on Nitrogen and Phosphorus Concentrations and Algal Growth in the Sediment-Water System of Lake Taihu	CHEN Jie, XU Hai, ZHAN Xu, <i>et al.</i> (2671)
Temporal and Spatial Variation Patterns of Picophytoplankton and Their Correlations with Environmental Factors During the Wet Season in East Lake Dongting	LI Sheng-nan, CHEN Hao-yu, PENG Hua, <i>et al.</i> (2679)
Toxicological Effects of Enrofloxacin and Its Removal by Freshwater Micro-Green Algae <i>Dictyosphaerium</i> sp.	WANG Zhen-fang, HAN Zi-yu, WANG Meng-xue, <i>et al.</i> (2688)
Comparative Phosphorus Accumulation and Ca-P Content of Two Submerged Plants in Response to Light Intensity and Phosphorus Levels	SANG Yu-xuan, YANG Jia-le, XIONG Yi, <i>et al.</i> (2698)
Effect of Calcium Peroxide Composite Tablets on Water Remediation and Phosphorus Control in Sediment	ZHANG Shuai, LI Da-peng, DING Yu-qin, <i>et al.</i> (2706)
Spatial Differentiation and Driving Analysis of Nitrogen in Rice Rotation Based on Regional DNDC: Case Study of Jinjiang River Watershed	WANG Ya-nan, SHUI Wei, QI Xin-hua, <i>et al.</i> (2714)
Low Temperature Ammonia Nitrogen Removal from an Iron, Manganese, and Ammonia Groundwater Purification Process with Different Concentrations of Iron and Manganese	ZHANG Jie, MEI Ning, LIU Meng-hao, <i>et al.</i> (2727)
Degradation of RBKS by High Crystallinity Mn-Fe LDH Catalyst Activating Peroxymonosulfate	LI Li, WU Li-ying, DONG Zheng-yu, <i>et al.</i> (2736)
Mechanisms of Fe-cyclam/H ₂ O ₂ System Catalyzing the Degradation of Rhodamine B	YU Yu-qing, CHEN Xiang-yu, CAI Quan-hua, <i>et al.</i> (2746)
Removal of Nitrate Nitrogen by Microbial Photoelectrochemical Cell; PANI/TiO ₂ -NTs as a Photoanode	LU Yi, ZHOU Hai-shan, PENG Rui-jian, <i>et al.</i> (2754)
Performance and Membrane Fouling Characteristics of Mariculture Wastewater Treated by Anoxic MBR-MMR	CHEN Fan-yu, XU Zhong, YOU Hong, <i>et al.</i> (2762)
Effect of HRT on Denitrifying Phosphorus and Nitrogen Removal in Modified A ² /O-BAF	ZHAO Kai-liang, LIU An-di, NAN Yan-bin, <i>et al.</i> (2771)
Effect of Ni(II) on Anaerobic Ammonium Oxidation and Changes in Kinetics	SUN Qi, ZHAO Bai-hang, FAN Sa, <i>et al.</i> (2779)
Removal of Urea by Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Mixed Strains and Effects of Heavy Metals and Salinity	WANG Meng-meng, CAO Gang, ZHANG Di, <i>et al.</i> (2787)
Start-up Characteristics of SNAD Process and Functional Abundance Succession of Volcanic Rock Biological Aerated Filter	XUE Jia-jun, ZHANG Shao-qing, ZHANG Li-qiu, <i>et al.</i> (2796)
Effect of Free Hydroxylamine on the Activity of Two Typical Nitrite-oxidizing Bacteria	SHEN Chen, ZHANG Shu-jun, PENG Yong-zhen (2805)
Interference of Dead Cell DNA on the Analysis of Antibiotic Resistance Genes and Microbial Community in Anaerobic Digestion Sludge	SU Yu-ao, LIU Hong-bo, MAO Qiu-yan, <i>et al.</i> (2812)
Spatial Distribution Characteristics and Pollution Evaluation of Heavy Metals in Arable Land Soil of China	CHEN Wen-xuan, LI Qian, WANG Zhen, <i>et al.</i> (2822)
Construction and Application of Early Warning System for Soil Environmental Quality	LI Xiao-nuo, DING Shou-kang, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (2834)
Response of Aggregate Distribution to Input Straw and Their Linkages to Organic Carbon Mineralization in Soils Developed from Five Different Parent Materials	MAO Xia-li, QIU Zhi-teng, ZHANG Shuang, <i>et al.</i> (2842)
Response of Extracellular Enzyme Activities to Substrate Availability in Paddy Soil with Long-term Fertilizer Management	NING Yu-fei, WEI Liang, WEI Xiao-meng, <i>et al.</i> (2852)
Effects of Biochar on Bioavailability of Two Elements in Phosphorus and Cadmium-Enriched Soil and Accumulation of Cadmium in Crops	HUANG Yang, GUO Xiao, HU Xue-yu (2861)
Characteristics of Cd, As, and Pb in Soil and Wheat Grains and Health Risk Assessment of Grain-Cd/As/Pb on the Field Scale	XIAO Bing, XUE Pei-ying, WEI Liang, <i>et al.</i> (2869)
Reconstructed Soil Vertical Profile Heavy Metal Cd Occurrence and Its Influencing Factors	HU Qing-qing, SHEN Qiang, CHEN Fei, <i>et al.</i> (2878)
Bacterial Community Composition in Cadmium-Contaminated Soils in Xinxiang City and Its Ability to Reduce Cadmium Bioaccumulation in Pak Choi (<i>Brassica chinensis</i> L.)	CHEN Zhao-jin, LI Ying-jun, SHAO Yang, <i>et al.</i> (2889)
Root Activities of Re-Vegetated Plant Species Regulate Soil Nutrients and Bacterial Diversity in the Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir	LI Li-juan, LI Chang-xiao, CHEN Chun-hua, <i>et al.</i> (2898)
Spatial Distribution of Nitrogen Metabolism Functional Genes of Eubacteria and Archaeobacteria in Dianchi Lake	ZHANG Yu, ZUO Jian-e, WANG Si-ke, <i>et al.</i> (2908)
Effect of Simulated Warming on Microbial Community in Glacier Forefield	WANG Yu-wan, MA An-zhou, CHONG Guo-shuang, <i>et al.</i> (2918)
Effect of Water-Fertilizer-Gas Coupling on Soil N ₂ O Emission and Yield in Greenhouse Tomato	SHANG Zi-hui, CAI Huan-jie, CHEN Hui, <i>et al.</i> (2924)
Toxicity of Soil Leachate from Coal Gangue and Its Surrounding Village of Barley (<i>Hordeum vulgare</i>)	SHANG Yu, YANG Feng-long, NING Xia, <i>et al.</i> (2936)
Characteristics, Source Analysis, and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) Pollution in Marine Organisms from Estuaries of Changhua River in Hainan Province	WANG Hui-juan, KUANG Ze-xing, ZHOU Xian, <i>et al.</i> (2942)
Characteristics of Macrobenthos Community Structure and Their Relationships with Environmental Factors in Rivers of Beijing in Spring	HE Yu-xiao, LI Ke, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (2951)
Effect of Pyrolytic Temperature and Time on Characteristics of <i>Typha angustifolia</i> Derived Biochar and Preliminary Assessment of the Ecological Risk	CAI Zhao-hui, CHU Chen-jing, ZHENG Hao, <i>et al.</i> (2963)
Measurement of Traffic Carbon Emissions and Pattern of Efficiency in the Yangtze River Economic Belt (1985-2016)	JIANG Zi-ran, JIN Huan-huan, WANG Cheng-jin, <i>et al.</i> (2972)