

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第8期

Vol.38 No.8

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

用于滤膜称重的饱和氯化镁溶液恒湿系统搭建与评估	李晓晓, 张强, 邓建国, 蒋靖坤, 郝吉明 (3095)
钢铁工业排放颗粒物中碳组分的特征	张进生, 吴建会, 马威, 冯银厂 (3102)
常州市大气 PM _{2.5} 中 PAHs 污染特征及来源解析	顾爱军, 刘佳澍, 罗世鹏, 毕承路, 苏亚兰, 叶招莲, 盖鑫磊 (3110)
兰州河谷盆地大气多环芳烃干沉降通量及来源	尉媛丽, 刘攀亮, 于周锁, 高宏, 毛潇萱, 马建民, 黄韬 (3120)
株洲市大气降尘中元素特征及来源分析	王世豪, 张凯, 柴发合, 钟学才, 周广柱, 杨晴, 柯馨妹 (3130)
传统北京烤鸭烤制过程中大气污染物的排放特征	徐敏, 何万清, 聂磊, 韩力慧, 潘涛, 石爱军 (3139)
基于车载测试的重型柴油车尾气典型烷烃排放特征	史纯珍, 郝雪薇, 申现宝, 曹鑫悦, 张伟, 吴辉, 姚志良 (3146)
基于 wavelet-SVM 的 PM ₁₀ 浓度时序数据预测	王平, 张红, 秦作栋, 姚清晨, 耿红 (3153)
广州港船舶停泊工况排放因子实测及排放量初步估算	黄学良, 张洲, 杨威强, 李晟, 朱明, 方华, 何俊杰, 陈俊文, 万承浩, 张艳利, 刘国光, 黄祖照, 王宇骏, 王新明 (3162)
沙尘天气对生物气溶胶中总微生物浓度及粒径分布的影响	李鸿涛, 祁建华, 董立杰, 高冬梅 (3169)
典型生活垃圾处理设施恶臭排放特征及污染评价	芦会杰 (3178)
杭州地区城区降雪中全氟化合物的污染特征	张明, 唐访良, 俞雅雲, 徐建芬, 陈金汉, 余波, 周姗, 张伟 (3185)
黄浦江流域典型污水中不同粒径胶体的三维荧光光谱特征	聂明华, 晏彩霞, 杨毅, 周俊良, 刘敏 (3192)
漓江地表水体有机碳来源	赵海娟, 肖琼, 吴夏, 刘凡, 苗迎, 蒋勇军 (3200)
夏季热分层效应对典型岩溶水库水化学及溶解无机碳的影响	吴飞红, 蒲俊兵, 李建鸿, 张陶, 李丽, 黄思宇 (3209)
城市不同功能区地表水重金属污染特性比较: 以宁波为例	徐美娟, 童桂华, 孙丹, 李建新, 虞效益 (3218)
地下水主要组分水化学异常识别方法对比: 以柳江盆地为例	张小文, 何江涛, 彭聪, 张昌延, 倪泽华 (3225)
人为扰动背景下城郊溪流底质磷的生物-非生物吸收潜力分析	李如忠, 叶舟, 高苏蒂, 郑悦 (3235)
长江口低氧区沉积物中磷的形态及其环境意义	刘军, 臧家业, 冉祥滨, 赵晨英, 刘季花, 王小静 (3243)
三峡库区小流域不同土地利用类型“土壤-水体”氮磷含量特征及其相互关系	陈成龙, 高明, 木志坚, 倪九派, 祁乐 (3254)
黄土高原降雨驱动下流域碳输移特征及其碳流失评估: 以羊圈沟坝系流域为例	鄂馨卉, 汪亚峰, 高扬, 陈利顶, 陈世博, 陈维梁 (3264)
新型溴代苯酚类消毒副产物的氯化降解机制	李欢, 李正魁, 李爱民, 周庆, 王莹, 潘咏 (3273)
藻形态及混凝剂组成对混凝-超滤过程的影响	张大为, 徐慧, 王希, 门彬, 王东升, 段晋明 (3281)
汝溪河浮游硅藻功能群特征及其与环境因子相关性分析	向蓉, 李巧玉, 喻焱, 张洪波, 董聪聪, 施军琼, 吴忠兴 (3290)
石岩水库叶绿素 a 时空分布及其影响因子分析	宋云龙, 张金松, 郭小雅, 朱佳, 王丽, 陶益, 张丽 (3302)
不同湿地模型中根系微生物的多样性	王林, 李冰, 余家辉, 朱加宾, 朱健 (3312)
北海湖微生物群落结构随季节变化特征	张雅洁, 李珂, 朱浩然, 张洪勋 (3319)
基于高通量测序的流化床生物滤器细菌群落结构分析	张海耿, 宋红桥, 顾川川, 单建军, 张宇雷, 倪琦 (3330)
高效反硝化菌和包埋填料性能及微生物群落分析	孟婷, 杨宏 (3339)
基于城市污水资源化的微藻筛选与污水预处理	韩松芳, 金文标, 涂仁杰, 陈洪一 (3347)
生物膜贴壁培养小球藻净化猪粪沼液废水的效果	王愿珠, 程鹏飞, 刘德富, 刘天中 (3354)
微气泡臭氧催化氧化-生化耦合工艺深度处理煤化工废水	刘春, 周洪政, 张静, 陈晓轩, 张磊, 郭延凯 (3362)
pH 冲击对海洋厌氧氨氧化菌处理含海水污水脱氮效能的影响	于德爽, 周同, 李津, 王晓霞, 吴国栋, 王骁静 (3369)
酒精废水部分亚硝化-厌氧氨氧化脱氮的可行性	周正, 林兴, 王凡, 顾澄伟, 沈婧, 袁砚, 金润 (3377)
模拟废水中钼的微生物回收及其对亚甲基蓝的催化特性	康乃馨, 朱能武, 郭雯颖, 何志心 (3385)
采用颜色空间表征 ANAMMOX 启动与冲击过程	王利君, 李志华, 韩冬, 张天宇, 杨成建 (3393)
CSTR 和 MBR 反应器的短程硝化快速启动	张婷, 吴鹏, 沈耀良, 闫刚, 徐乐中, Samwine Thomas (3399)
硫酸盐还原氨氧化体系中基质转化途径	完颜德卿, 黄勇, 毕贞, 刘忻, 姚鹏程, 张文静 (3406)
不同 TOC/NH ₄ ⁺ -N 对厌氧氨氧化脱氮效能的影响	王凡, 刘凯, 林兴, 周正, 李祥, 黄勇 (3415)
盐度对 EGSB 反应器的运行及厌氧颗粒污泥的影响	谭潇, 黄靛, 杨平, 涂奔州 (3422)
CANON 颗粒污泥工艺的启动与负荷提高策略	孙延芳, 韩晓宇, 张树军, 李星, 曹相生 (3429)
胞外聚合物对活性污泥吸附去除全氟辛酸磺酸 (PFOS) 的影响	刘鑫彤, 尹华, 彭辉, 李浩榕, 杨萍萍, 曹雅娟 (3435)
不同施肥方式下紫色土 N ₂ O 与 NO _x 的排放特征	胡磊, 刘韵, 朱波 (3442)
地膜覆盖对蔬菜地甲烷排放的影响	张凯莉, 郝庆菊, 冯迪, 石将来, 石孝均, 江长胜 (3451)
模拟的增温增雨对内蒙古温带草原土壤氨氧化微生物的影响	张翠景, 沈菊培, 孙翼飞, 王军涛, 杨中领, 韩红艳, 张丽梅, 万师强, 贺正 (3463)
长期施肥酸性旱地土壤硝化活性及自养硝化微生物特征	徐白璐, 钟文辉, 黄欠如, 秦红益, 邓欢, 韩成 (3473)
施加碳酸钙对酸性土壤微生物氮循环的影响	郭安宁, 段桂兰, 赵中秋, 唐仲, 王杨扬, 王伯勋 (3483)
水稻不同生育期根际与非根际土壤胞外酶对施氮的响应	魏亮, 汤珍珠, 祝贞科, 蔡观, 葛体达, 王久荣, 吴金水 (3489)
凋落物呼吸温度敏感性的变化特征及其影响因素	张彦军 (3497)
西北干旱区农田土壤磁性特征及其环境意义	王新, 夏敦胜, 王博, 陈红, 刘浩 (3507)
小麦秸秆驱动菱铁矿热解制备磁性生物炭及其吸附 Cd ²⁺ 活性	张如玉, 刘海波, 邹雪华, 庆承松, 李梦雪, 陈冬, 陈天虎 (3519)
交通污染暴露对 DNA 甲基化的影响	汪婷, 丁锐, 黄丹妮, 祝子逸, 章军, 叶怀庄, 徐迎春, 金永堂 (3529)
外接菌种对污泥堆肥效能及堆体细菌群落的影响	杨萍萍, 尹华, 彭辉, 唐少宇, 卢妙, 刘皓 (3536)
中国电动自行车动力铅酸蓄电池生命周期评价	刘巍, 田金平, 陈吕军 (3544)
《环境科学》征稿简则 (3280) 《环境科学》征订启事 (3301) 信息 (3353, 3472, 3535)	

传统北京烤鸭烤制过程中大气污染物的排放特征

徐敏¹, 何万清², 聂磊², 韩力慧^{1*}, 潘涛^{2*}, 石爱军²

(1. 北京工业大学环境与能源工程学院, 区域大气复合污染防治北京市重点实验室, 北京 100124; 2. 北京市环境保护科学研究院, 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: 烤鸭是具有北京特色的传统美食之一, 制作过程采用果木炭火烤制方式, 与其它食物烹饪过程存在明显的差异, 国内还未对这类餐饮源的排放特征进行过系统研究, 为掌握这类餐饮源排放特征, 从而为污染控制提供技术依据, 选取北京市具有代表性的烤鸭店, 研究了其烤鸭烤制过程中大气污染物的排放特征。结果表明, 传统烤鸭烤制过程中排放的油烟、颗粒物、挥发性有机物(VOCs)和醛酮类化合物的基准排放浓度分别为(0.74 ± 0.45)、(15.32 ± 7.93)、(7.60 ± 3.41)和(1.22 ± 0.59) $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$; 颗粒物排放浓度要远高于油烟排放浓度, VOCs组分构成相对复杂, 既包括烷烃、烯烃、芳香烃等VOCs也包括醛酮类、醇类、酯类等含氧VOCs和卤代烃, 其中3-甲基呋喃、乙醇和乙酸甲酯的浓度最高; 醛酮类化合物的主要组分有乙醛、甲醛和丙烯醛等, 其中C1~C3物质占72.27%。

关键词: 北京烤鸭; 油烟; 颗粒物; VOCs; 醛酮类化合物

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)08-3139-07 DOI: 10.13227/j.hjks.201701165

Atmospheric Pollutant Emission Characteristics from the Cooking Process of Traditional Beijing Roast Duck

XU Min¹, HE Wan-qing², NIE Lei², HAN Li-hui^{1*}, PAN Tao^{2*}, SHI Ai-jun²

(1. Key Laboratory of Beijing on Regional Air Pollution Control, College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. Beijing Key Laboratory of Urban Atmospheric Volatile Organic Compounds Pollution Control and Application, Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection, Beijing 100037, China)

Abstract: As one of the characteristics of traditional food in Beijing, there is a significant difference between roast duck and other foods in the cooking process, in that fruit trees are used as fuel in the former. However, system research about the emission characteristics of this food source has not been done domestically. In order to grasp such food source emission characteristics and provide technical basis for pollution control, we selected the representative roast duck restaurant in Beijing and studied the emission characteristics of atmospheric pollutants in the cooking process of roast duck. The results showed that the emission concentrations of cooking fumes, particulate matter, volatile organic compounds (VOCs), and aldehyde and ketone compounds were (0.74 ± 0.45), (15.32 ± 7.93), (7.60 ± 3.41), and (1.22 ± 0.59) $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$, respectively. The emission concentration of particulate matter was much higher than that of cooking fumes. The VOC component composition was very complex, containing alkanes, alkenes, aromatic hydrocarbons, and oxygen VOCs, such as aldehydes, ketones, alcohols, ester compounds, and halogenated hydrocarbons, with the highest concentrations of 3-methylfuran, ethanol, and methyl acetate. The main components of aldehyde and ketone compounds were acetaldehyde, formaldehyde, and acrolein, of which C1-C3 compounds were 72.27%.

Key words: Beijing roast duck; cooking fumes; particulate matter; volatile organic compounds; aldehyde and ketone compounds

近年来,随着餐饮业的迅速发展,所带来的环境问题已成为我国城市群面临的主要环境问题之一^[1-4]。烹调油烟是指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^[5,6],主要由颗粒物和气态污染物组成,其中颗粒物粒径在 $0.010 \sim 10 \mu\text{m}$ 之间,可长时间悬浮于空气中^[7-10];气态污染物主要是一些挥发性有机物(volatile organic compounds, VOCs),其组分十分复杂,可以造成光化学烟雾污染^[11-13],还可以生成二次气溶胶,加速城市细颗粒物的形成^[14],同时也是餐饮异味扰民的主要原因^[15]。醛酮类化合物是挥发性有机物中化学反应活性较强的一类物

质^[16-18],不仅是大气光化学反应的重要中间体,还对对流层中臭氧和过氧乙酰硝酸酯(PANs)的生成产生重要影响^[19-23]。

目前,许多学者对餐饮油烟做了很多研究。温梦婷等^[2]研究发现北京餐饮源排放细粒子对有机颗粒物的贡献和交通源的排放相当。崔彤等^[24]研究了北京市典型餐饮企业VOCs排放浓度,结果表

收稿日期: 2017-01-19; 修订日期: 2017-03-21

基金项目: 环境保护公益性行业科研专项(2014001019, 201409003); 北京市教委项目(PXM2016_014204_001029)

作者简介: 徐敏(1989~),女,硕士,主要研究方向为大气污染控制, E-mail: S201405148@emails.bjut.edu.cn

* 通信作者, E-mail: hlh@bjut.edu.cn; pantao@cee.cn

明,烧烤的 VOCs 排放浓度最高,达 $12.22 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$,中、西式快餐、川菜和浙菜约为 $4 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 左右.程婧晨等^[25]选取 8 家不同类型的餐饮企业测定其醛酮类化合物的排放浓度,结果表明,其浓度水平范围为 $115.47 \sim 1\,035.99 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

北京烤鸭作为具有世界声誉的北京著名菜式,需要采用果木炭火烤制才能保持其传统风味,依据大众点评网 2016 年数据,保守估计北京市约有 1 200 家以上餐饮企业提供烤鸭,其中大部分餐饮企业尤其是大中型餐饮企业为保证口感仍保留其传统的果木炭火烤制方式.综合国内外有关餐饮油烟的研究,国内还未对这类餐饮源的排放特征进行过系统研究,本文选取北京市具有代表性的大型连锁烤鸭店作为研究对象,分析了其烤鸭烤制过程中排放的各类大气污染物的浓度水平和组分构成.通过对传统北京烤鸭烤制过程排放的大气污染物有更加全

面的了解,以期为后期筛选和研发有针对性的治理技术提供理论基础,进而为餐饮业的污染物控制与管理提供决策依据.

1 材料与方法

1.1 样品采集

选取具有代表性的大型连锁烤鸭店,根据文献^[26]的要求,在中午和晚上的用餐高峰期,对该烤鸭店一层烤鸭房 7 楼楼顶的单独排气筒排烟管道平直管段内的大气污染物进行了多次样品采集.该烤鸭店一楼烤鸭房装有油烟收集装置,楼顶装有油烟净化设备,为测得烤鸭烤制过程中实际排放的污染物浓度,本文将采样点设置在油烟收集装置后,油烟净化设备前.该烤鸭店餐饮企业的基本信息和采样时段的相关信息见表 1.

表 1 该传统烤鸭店的基本信息
Table 1 Basic information of the traditional roast-duck restaurant

烹饪特点	燃料类型	灶头/个	餐位/个	风机风量 $/\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$	实测风量 $/\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$	采样期间 烤鸭数量/只
挂炉果木烤鸭	果木	2	1 058	4 000	3 658	40

油烟和颗粒物的采样方式相同,均是采用崂应 3012H 型自动烟尘(气)测试仪(青岛崂山应用技术研究)等速抽取油烟排气筒内的气体,采样要求按文献^[27]规定执行,10 min 一个样品,每次采集 5 个平行样.本研究采集油烟所用的滤芯为带网格的金属滤芯;采集颗粒物所用的一体式油烟滤芯是根据本实验要求而专门定做的,其中滤芯总质量 $\leq 8 \text{ g}$,内置双层滤膜,第一层为聚丙烯纤维滤膜,孔径 $1.0 \sim 2.0 \text{ }\mu\text{m}$;第二层为超细玻璃纤维滤膜,孔径 $0.3 \text{ }\mu\text{m}$,过滤效率 $\geq 99.99\%$ ($\geq 0.3 \text{ }\mu\text{m}$).

VOCs 的采样方法参照文献^[24],将餐饮企业排放的油烟气以 $300 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 的流量经过颗粒物过滤器采集至 Tedlar 采样袋中,每个样品共采集 30 min.采样结束后,立即将 Tedlar 采样袋中的气体转移到 Summa 罐中保存.

醛酮类化合物的采样方法参照文献^[25],将餐饮企业排放的油烟气以 $500 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 的流量依次经过颗粒物过滤器和碘化钾臭氧去除柱采集至 2,4-二硝基苯肼(2,4-dinitrobenzene hydrazine, DNPH)采样管,每个样品采集时间为 30 min. VOCs 及醛酮类化合物采样的连接管路均采用特氟龙(Teflon)管.

1.2 样品分析

烹调油烟是指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.本文中油烟定量分析方法参照文献^[27]中的分光光度法,用四氯化碳作溶剂对金属滤筒进行超声清洗,将清洗液移入 25 mL 比色管中定容后用红外分光光度仪测定,油烟的含量由波数分别为 $2\,930$ 、 $2\,960$ 和 $3\,030 \text{ cm}^{-1}$ 谱带处的吸光度 A_{2930} 、 A_{2960} 、 A_{3030} 进行计算,其中所用的标准定量物质为高温回流食用花生油,具体操作详见文献^[27].

餐饮油烟类颗粒物是指餐饮业在食物加工、烹饪过程中油脂、各类有机物质经过复杂物理或化学变化形成并排放的液态或固态颗粒物.本文中颗粒物定量分析方法为重量法,将餐饮业排气筒中的油烟类颗粒物吸附、过滤并收集于已恒重的一体式油烟滤芯内,除去水分(自由水)后,由采样前后滤芯的质量差除以采样气体体积,计算出油烟类颗粒物的浓度.本方法测量出的颗粒物浓度值应换算为标准状态下的干烟气数值.

VOCs 定量分析参考 USEPA 推荐的 TO-15 方法.样品通过 Entech7100A 浓缩系统预浓缩除掉大部分水和 CO_2 后,被转移到气相色谱/质谱联用仪(Agilent 7890A/5975C)进行定量分析.标准物质:TO-15 标准气体(Scott Gases,美国)和 PAMs 标准气体(Spectra gases,美国).具体操作详见文献^[24].

DNPH 定量分析方法采用超高效液相色谱方法 (UPLC)。超高效液相色谱仪: Agilent 1290 Infinity LC (DAD 检测器); 色谱柱: Zorbax RRHD Eclipse Plus C18 (2.1 × 100 mm, 1.8 μm); Visiprep DL 固相萃取仪和醛酮-DNPH 混标 (TO11/IP-6A Aldehyde/Ketone-DNPH Mix) 均购自 Supelco, 混标质量浓度: 15 000 μg·L⁻¹。具体操作详见文献[25]。

2 结果与讨论

2.1 传统北京烤鸭烤制过程中污染物浓度水平及组分构成

2.1.1 污染物浓度水平

由表 2 可以看出,传统烤鸭烤制过程中油烟实测排放浓度为 (0.81 ± 0.50) mg·m⁻³,以单个灶头基准排风量 2 000 m³·h⁻¹ 换算成基准风量排放浓度为 (0.74 ± 0.45) mg·m⁻³; 颗粒物实测排放浓度为 (16.75 ± 8.67) mg·m⁻³, 基准风量排放浓度为 (15.32 ± 7.93) mg·m⁻³; VOCs 实测排放浓度 (8.31 ± 3.73) mg·m⁻³, 基准风量排放浓度为 (7.60 ± 3.41) mg·m⁻³,与文献[24]相比,其浓度低于烧烤,明显高于中、西式快餐、川菜和浙菜; 醛酮类化合物的实测排放浓度为 (1.33 ± 0.65) mg·m⁻³,基准风量排放浓度为 (1.22 ± 0.59) mg·m⁻³,略高于文献[25]中的 1 035.99 μg·m⁻³。

2.1.2 VOCs 的组分构成

由图 1 可以看出传统烤鸭烤制过程中排放的 VOCs 组分构成相对复杂,既包括烷烃、烯烃、芳香烃等 VOCs 也包括醛酮类、醇类、酯类等含氧 VOCs 和卤代烃,且含量由多到少依次为醛酮类、酯类、其他含氧 VOCs、芳香烃、烯烃、醇类、卤代烃和烷烃。通过分析本研究 and 文献[24]的数据可知,烤鸭烤制过程中排放的 VOCs 组分除烷烃和卤代烃外各组分含量都比较高,而非烧烤类中式菜系排放的 VOCs 主要是醇类,其他组分含量比较少; 与非烤鸭类烧烤相比,烤鸭烤制过程中排放的 VOCs 组分中烃类物质的质量分数只有 29.03%,而其在非烤鸭类烧烤中的质量分数高达 89.65%,且酯类及其他含氧 VOCs 的比重远高于非烤鸭类烧烤。由图 2 可以看出传统烤鸭烤制过程中排放 VOCs 的主要组分有 3-甲基呋喃、乙醇、乙酸甲酯、丙酮和 2,3-丁二酮等,其中 3-甲基呋喃和乙醇的排放浓度均高于 1 mg·m⁻³,乙酸甲酯、丙酮、2,3-丁二酮和苯等的排放浓度均在 0.25 ~ 0.94 mg·m⁻³,其他组分的排放浓度均小于 0.2 mg·m⁻³。

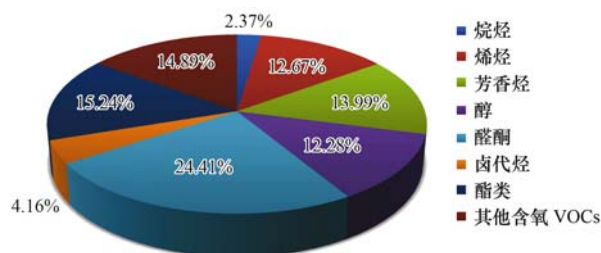


图1 烤鸭烤制过程中排放 VOCs 的组分构成

Fig. 1 Composition of VOC emissions from the traditional cooking process of Beijing roast duck

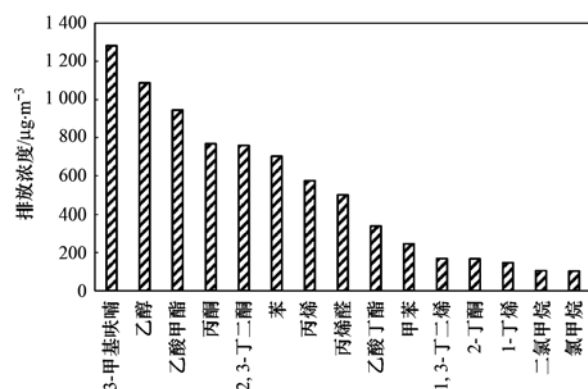


图2 烤鸭烤制过程中排放 VOCs 的主要组分浓度

Fig. 2 Main VOC components of the emissions from the traditional cooking process of Beijing roast duck

2.1.3 醛酮类化合物的组分构成

由图 3 可以看出传统烤鸭烤制过程中排放的醛酮类化合物中,主要有乙醛、甲醛和丙烯醛,其次是丙酮和丁醛,剩余物质含量比较少,所占质量分数均小于 5%; 同时也可以看出该烤鸭店排放的醛酮类化合物中,主要是 C1 ~ C3 物质,所占质量分数为 72.27%,C4 ~ C8 物质只占 27.73%,这主要是因为长时间的果木燃烧使得烤炉中温度过高,使大分子物质有条件分解成小分子物质[25]。

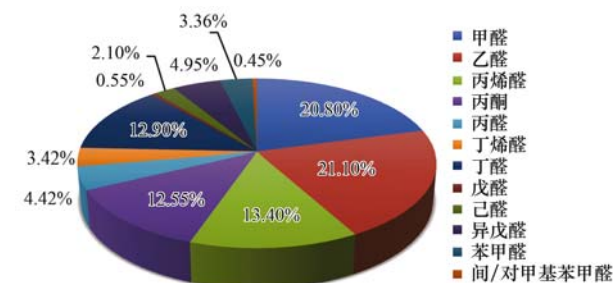


图3 烤鸭烤制过程中排放醛酮类化合物的组分构成

Fig. 3 Composition of aldehyde and ketone compounds of the emissions from the traditional cooking process of Beijing roast duck

2.2 烤鸭烤制过程中排放污染物浓度关系

2.2.1 油烟浓度与颗粒物浓度之间的关系

现有国家排放标准采用油烟排放浓度作为餐饮

表 2 传统烤制过程中污染物排放浓度/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

Table 2 Pollutant emission concentrations from the traditional cooking process of Beijing roast duck/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

污染物	$n = 19$ (实测排放浓度)			基准风量排放浓度		
	min	max	ave			
油烟	297.00	1 998.00	806.53 $\pm$ 495.06			737.57 $\pm$ 452.73
颗粒物	5 760.42	32 610.35	16 748.46 $\pm$ 8 666.22			15 316.47 $\pm$ 7 925.26
种类	化合物	化学式	$n = 9$ (实测排放浓度)			
			min	max	ave	
烷烃	丙烷	C_3H_8	8.29	38.32	18.97	
	正丁烷	C_4H_{10}	28.64	122.21	66.60	
	正戊烷	C_5H_{12}	11.70	54.96	27.62	
	异戊烷	C_5H_{12}	4.05	25.52	13.53	
	甲基环戊烷	C_6H_{12}	5.96	5.96	5.96	
	2,2-二甲基丁烷	C_6H_{14}	37.39	37.39	37.39	
	正己烷	C_6H_{14}	7.99	74.50	28.32	
	庚烷	C_7H_{16}	4.78	30.71	14.84	
烯烃	丙烯	C_3H_6	265.88	1 089.00	573.58	
	1,3-丁二烯	C_4H_6	69.91	474.43	168.99	
	1-丁烯	C_4H_8	71.00	260.00	147.58	
	顺-2-丁烯	C_4H_8	18.55	76.75	40.18	
	反-2-丁烯	C_4H_8	13.05	53.00	29.23	
	正戊烯	C_5H_{10}	10.13	69.69	30.32	
	顺-2-戊烯	C_5H_{10}	8.06	54.69	20.23	
	反-2-戊烯	C_5H_{10}	11.06	54.69	27.12	
	异戊二烯	C_5H_8	12.33	129.32	42.02	
	正己烯	C_6H_{12}	42.38	65.63	61.25	
VOCs 芳香烃	苯	C_6H_6	362.84	1220.14	702.47	
	甲苯	C_7H_8	128.96	439.46	246.88	
	乙苯	C_8H_{10}	17.89	170.83	58.96	
	间/对二甲苯	C_8H_{10}	13.44	128.71	47.55	
	邻二甲苯	C_8H_{10}	5.96	83.76	31.80	
	苯乙烯	C_8H_8	24.98	261.39	80.81	
	4-乙基甲苯	C_9H_{12}	16.02	16.02	16.02	
	1,3,5-三甲苯	C_9H_{12}	31.5	31.5	31.5	
	1,2,4-三甲苯	C_9H_{12}	8.73	44.84	26.79	
	1-乙基-2-甲基苯	C_9H_{13}	9.96	9.96	9.96	
	1-乙基-3-甲基苯	C_9H_{13}	6.38	6.38	6.38	
	乙醇	$\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$	89.95	2 628.57	1 087.25	
	异丙醇	$\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$	4.70	51.27	18.06	
醛酮类	丙烯醛	$\text{C}_3\text{H}_4\text{O}$	236	1 320	500	
	丙酮	$\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$	377.00	2 048.64	767.40	
	2-丁酮	$\text{C}_4\text{H}_8\text{O}$	76.50	343.93	167.24	
	2-己酮	$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}$	3.62	3.62	3.62	
	2,3-丁二酮	$\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_2$	319.43	1637.07	759.50	
卤代烃	氯甲烷	CH_3Cl	47.32	188.84	103.49	
	二氯甲烷	CH_2Cl_2	8.55	484.50	106.08	
	三氯一氟甲烷	CCl_3F	18.09	20.58	19.34	
	顺-1,2-二氯乙烷	$\text{C}_2\text{H}_2\text{Cl}_2$	145.29	145.29	145.29	
酯类	乙酸甲酯	$\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_2$	273.54	1976.86	944.45	
	乙酸乙酯	$\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$	20.82	197.21	87.95	
	乙酸丁酯	$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_2$	138.79	556.18	339.40	
其他含氧 VOCs	四氢呋喃	$\text{C}_4\text{H}_8\text{O}$	24.30	123.11	57.83	
	3-甲基呋喃	$\text{C}_5\text{H}_6\text{O}$	481.75	2 814.36	1 282.14	
合计			3 412.28	13 768.49	8 312.08	
实测排放浓度					8 312.08 $\pm$ 3 727.03	
基准风量排放浓度					7 601.40 $\pm$ 3 408.37	

续表 2

	碳数/特征	化合物	化学式	n = 9 (实测排放浓度)		
				min	max	ave
醛酮类化合物	C1	甲醛	CH ₂ O	199.66	443.23	312.30
	C2	乙醛	C ₂ H ₄ O	174.73	862.27	316.83
	C3	丙烯醛	C ₃ H ₄ O	63.46	898.89	201.19
	C3	丙酮	C ₃ H ₆ O	132.22	319.47	188.41
	C3	丙醛	C ₃ H ₆ O	36.25	210.26	66.36
	C4/直链	丁烯醛	C ₄ H ₆ O	13.86	256.21	51.34
	C4/直链	丁醛	C ₄ H ₈ O	108.72	278.57	193.64
	C5/直链	戊醛	C ₅ H ₁₀ O	4.34	9.01	8.18
	C6/直链	己醛	C ₆ H ₁₂ O	6.69	79.74	31.58
	C5/支链	异戊醛	C ₅ H ₁₀ O	15.89	95.97	74.31
	C7/环状	苯甲醛	C ₇ H ₆ O	16.34	150.62	50.39
	C8/环状	间/对甲基苯甲醛	C ₈ H ₈ O	3.08	20.00	6.77
	合计			798.45	2 892.35	1 332.50
实测排放浓度			1 332.50 ± 645.05			
基准风量排放浓度			1 218.57 ± 589.89			

源大气污染物管控指标,文献[28]研究分析了采用油烟浓度测试方法管控餐饮源时存在的问题,即油烟监测结果和实际排放感观之间存在一定的差异,这是导致“检测结果达标,目测却还有浓烟”^[28]现象产生的原因,本研究同步开展了油烟与颗粒物排放浓度的对比监测。由图 4 可知,烤鸭烤制过程中排放的颗粒物浓度明显高于油烟的浓度,采样期间油烟排放浓度(0.74 ± 0.45) $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 符合国家排放标准,颗粒物的平均浓度是油烟平均浓度的 20 多倍,

环境影响很明显,两者测试方法原理的不同应是造成其浓度差异的主要原因,文献[27]中油烟的测定方法忽略了除油脂以外的其他油烟颗粒物^[28],由此可知烤鸭烤制过程中,排放的颗粒物不仅包括烤制过程中排放的液态油滴,也包括果木燃烧过程产生的颗粒态污染物;由图 5 可知两者排放浓度的线性相关性并不好,油烟浓度指标并不能准确表征北京烤鸭烤制过程中实际排放的颗粒态污染物的排放强度。

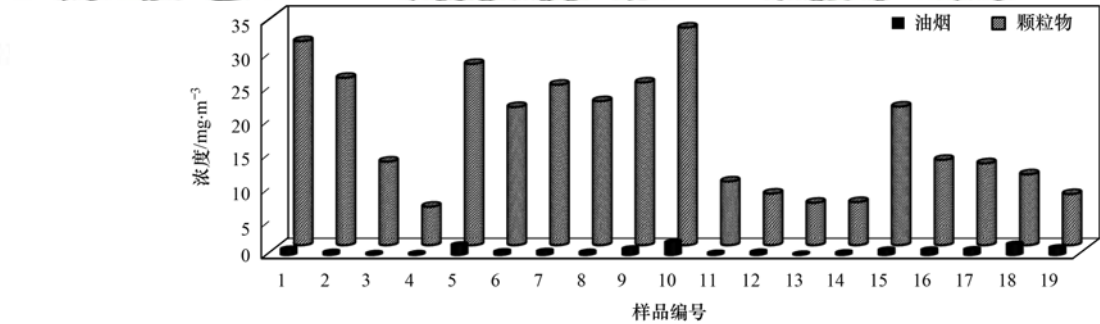


图 4 油烟浓度与颗粒物浓度比较

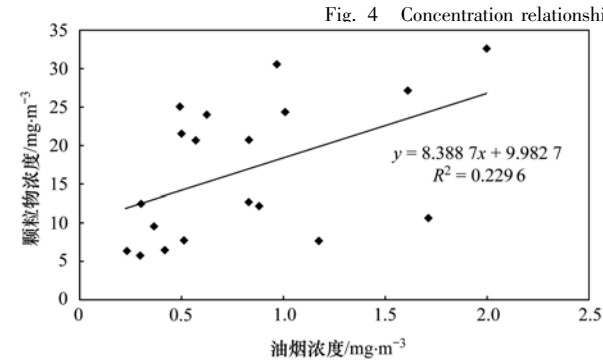


图 5 油烟浓度与颗粒物浓度之间的关系

Fig. 5 Relationship between oil smoke concentration and particulate matter concentration

2.2.2 醛酮类化合物浓度与 VOCs 浓度之间的关系

醛酮类化合物作为 VOCs 中反应活性较强的一部分,有必要研究其与 VOCs 排放浓度之间的关系,将醛酮类化合物浓度与 VOCs 浓度制作散点图,由图 6 可知烤鸭烤制过程中排放的醛酮类化合物浓度与 VOCs 浓度之间存在较好的线性相关性,表明烤鸭烤制过程中 VOCs 排放浓度的变化趋势能够较好地反映醛酮类化合物排放浓度的变化。

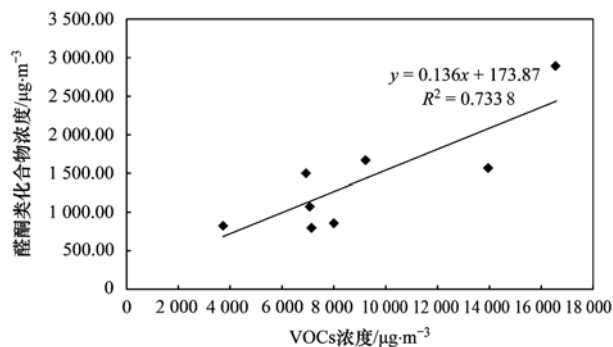


图 6 醛酮类化合物浓度与 VOCs 浓度之间的关系

Fig. 6 Relationship between aldehyde and ketone compound concentration and VOC concentration

3 结论

(1) 传统北京烤鸭烤制过程中排放的油烟气中油烟、颗粒物、VOCs 和醛酮类化合物的基准风量排放浓度分别为 (0.74 ± 0.45) 、 (15.32 ± 7.93) 、 (7.60 ± 3.41) 和 $(1.22 \pm 0.59) \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

(2) 传统北京烤鸭烤制过程中排放的 VOCs 组分构成相对复杂,既包括烷烃、烯烃、芳香烃等 VOCs 也包括醛酮类、醇类、酯类等含氧 VOCs 和卤代烃,且 VOCs 的主要组分有 3-甲基呋喃、乙醇、乙酸甲酯、丙酮和 2,3-丁二酮等,其中 3-甲基呋喃和乙醇的排放浓度均高于 $1 \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

(3) 传统北京烤鸭烤制过程中排放醛酮类化合物的主要组分有乙醛、甲醛和丙烯醛,其次是丙酮和丁醛,其中 C1 ~ C3 物质所占比例为 72.27%,主要是因为长时间的果木燃烧使得烤炉中温度过高,使大分子物质有条件分解成小分子物质。

(4) 传统北京烤鸭烤制过程中排放的颗粒物浓度明显高于油烟浓度,且不具有明显的线性相关性,烤鸭烤制过程中排放的油烟浓度指标并不适用于表征颗粒物的排放强度,要想对这类餐饮源排放的颗粒物进行管控,必须在未来修订的餐饮业大气污染物排放标准中增加颗粒物的排放限值。

参考文献:

- [1] 陈晗. 餐饮业油烟污染现状及防治对策[J]. 环境科学与管理, 2006, **31**(3): 76-78.
Chen H. Current pollution situation and control countermeasures of oil fume from the catering trade[J]. Environmental Science and Management, 2006, **31**(3): 76-78.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 苏仕军, 蒋文举, 杨志山. 餐饮业外排烹调油烟气的危害及净化方法研究进展[J]. 环境污染治理技术与设备, 2000, **1**(3): 77-81.
Su S J, Jiang W J, Yang Z S. Advance on toxicity and disposal measures of cooking oil fume discharged from the restaurant[J]. Techniques and Equipments for Environmental Pollution Control, 2000, **1**(3): 77-81.
- [5] 牛晓明. 饮食业油烟污染现状分析与对策[J]. 科技情报开发与经济, 2006, **16**(1): 156-158.
Niu X M. Analysis on the current oil-smoke pollution of the food and beverage industry and countermeasures [J]. Sci/Tech Information Development & Economy, 2006, **16**(1): 156-158.
- [6] 徐鹏飞. 预防餐饮油烟污染 利国利民[J]. 环境保护, 2008, (8): 72.
- [7] Schauer J J, Kleeman M J, Cass G R, et al. Measurement of emissions from air pollution sources. 4. C_1 - C_{27} organic compounds from cooking with seed oils [J]. Environmental Science & Technology, 2002, **36**(4): 567-575.
- [8] 程希, 季学李. 烹调油烟污染及其净化技术探讨[J]. 环境保护, 2001, (12): 15-16.
Cheng X, Ji X L. Discussion on pollution and purifying technology of cooking oil fume [J]. Environmental Protection, 2001, (12): 15-16.
- [9] 段玉环, 谢超颖, 方恒. 餐饮业油烟污染及治理技术浅议[J]. 环境污染治理技术与设备, 2002, **3**(11): 67-69.
Duan Y H, Xie C Y, Fang H. Superficial discussion on oil smoke pollution from restaurants and its control techniques[J]. Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control, 2002, **3**(11): 67-69.
- [10] See S W, Balasubramanian R. Risk assessment of exposure to indoor aerosols associated with Chinese cooking [J]. Environmental Research, 2006, **102**(2): 197-204.
- [11] 洪紫萍. 挥发性有机化合物的污染与防治[J]. 环境污染与防治, 1994, **16**(4): 24-26.
Hong Z P. Pollution of volatile organic compounds and its control [J]. Environmental Pollution & Control, 1994, **16**(4): 24-26.
- [12] 靳卫齐, 杨萌. 城市光化学烟雾的形成机理与防治[J]. 化学工业与工程技术, 2007, **28**(3): 22-24.
Jin W Q, Yang M. Mechanism of photochemical smog formation in the city and its mitigation[J]. Journal of Chemical Industry & Engineering, 2007, **28**(3): 22-24.
- [13] 苏雷燕, 赵明, 李岩, 等. 环境空气中挥发性有机物(VOCs)光化学行为的研究进展[J]. 绿色科技, 2013, (11): 178-182.
Su L Y, Zhao M, Li Y, et al. Research progress on photochemical behaviors of ambient volatile organic compounds (VOCs)[J]. Journal of Green Science and Technology, 2013, (11): 178-182.
- [14] 唐孝炎, 邵敏, 张远航. 大气环境化学[M]. (第二版). 北京: 高等教育出版社, 2006. 252-264.
- [15] 廖雷, 钱公望. 烹调油烟的危害及其污染治理[J]. 桂林工学院学报, 2003, **23**(4): 463-468.

- Liao L, Qian G W. Cooking oil fumes pollution and solution[J]. Journal of Guilin Institute of Technology, 2003, **23**(4): 463-468.
- [16] Lary D J, Shallcross D E. Central role of carbonyl compounds in atmospheric chemistry[J]. Journal of Geophysical Research, 2000, **105**(D15): 19771-19778.
- [17] Carter W P L. Development of ozone reactivity scales for volatile organic compounds[J]. Air & Waste, 1994, **44**(7): 881-899.
- [18] Shepson P B, Kleindienst T E, Edney E O, *et al.* Acetaldehyde: the mutagenic activity of its photooxidation products[J]. Environmental Science & Technology, 1986, **20**(10): 1008-1013.
- [19] Huang Y, Ho S S H, Ho K F, *et al.* Characteristics and health impacts of VOCs and carbonyls associated with residential cooking activities in Hong Kong[J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, **186**(1): 344-351.
- [20] Ho S S H, Yu J Z. Determination of airborne carbonyls: comparison of a thermal desorption/GC method with the standard DNPH/HPLC method [J]. Environmental Science & Technology, 2004, **38**(3): 862-870.
- [21] Schauer J J, Kleeman M J, Cass G R, *et al.* Measurement of emissions from air pollution sources. 1. C₁ through C₂₉ organic compounds from meat charbroiling[J]. Environmental Science & Technology, 1999, **33**(10): 1566-1577.
- [22] Ho K F, Lee S C, Louie P K K, *et al.* Seasonal variation of carbonyl compound concentrations in urban area of Hong Kong [J]. Atmospheric Environment, 2002, **36**(8): 1259-1265.
- [23] 王琴, 邵敏, 魏强, 等. 北京及周边地区大气羰基化合物的时空分布特征初探[J]. 环境科学, 2011, **32**(12): 3522-3530.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] HJ/T 62-2001, 饮食业油烟净化设备技术要求及检测技术规范(试行)[S].
- [27] GB 18483-2001, 饮食业油烟排放标准[S].
- [28] 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.

CONTENTS

Evaluation and Development of a Weighing Chamber by Using Saturated MgCl_2 Solution	LI Xiao-xiao, ZHANG Qiang, DENG Jian-guo, <i>et al.</i> (3095)
Characteristics Research on Carbonaceous Component of Particulate Matter Emitted from Iron and Steel Industry	ZHANG Jin-sheng, WU Jian-hui, MA Xian, <i>et al.</i> (3102)
Pollution Characteristics and Source Identification of PAHs in Atmospheric $\text{PM}_{2.5}$ in Changzhou City	GU Ai-jun, LIU Jia-shu, LUO Shi-peng, <i>et al.</i> (3110)
Atmospheric Dry Deposition Fluxes and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Lanzhou Valley, Northwest China	JU Yuan-li, LIU Pan-liang, YU Zhou-suo, <i>et al.</i> (3120)
Characteristics and Sources of Elements in Atmospheric Dust Fall in Zhuzhou City, Central China	WANG Shi-hao, ZHANG Kai, CHAI Fa-he, <i>et al.</i> (3130)
Atmospheric Pollutant Emission Characteristics from the Cooking Process of Traditional Beijing Roast Duck	XU Min, HE Wan-qing, NIE Lei, <i>et al.</i> (3139)
Exhaust Emission Characteristics of Typical Alkanes from Heavy-Duty Diesel Vehicles Based on a Portable Emission Measurement System	SHI Chun-zhen, HAO Xue-wei, SHEN Xian-bao, <i>et al.</i> (3146)
PM_{10} Concentration Forecasting Model Based on Wavelet-SVM	WANG Ping, ZHANG Hong, QIN Zuo-dong, <i>et al.</i> (3153)
Emission Factors and Preliminary Emission Estimates of Air Pollutants from Ships at Berth in the Guangzhou Port	HUANG Xue-liang, ZHANG Zhou, YANG Wei-qiang, <i>et al.</i> (3162)
Influence of Dust Events on the Concentration and Size Distribution of Microorganisms in Bioaerosols	LI Hong-tao, Qi Jian-hua, DONG Li-jie, <i>et al.</i> (3169)
Odor Emission Characteristics and Pollution Evaluation from Typical Household Rubbish Disposal Facilities	LU Hui-jie (3178)
Perfluorinated Compounds in Snow from Downtown Hangzhou, China	ZHANG Ming, TANG Fang-liang, YU Ya-yun, <i>et al.</i> (3185)
Fluorescence Characterization of Fractionated Colloids in Wastewaters Received by Huangpu River	NIE Ming-hua, YAN Cai-xia, YANG Yi, <i>et al.</i> (3192)
Sources of Organic Carbon in the Surface Water of Lijiang River	ZHAO Hai-juan, XIAO Qiong, WU Xia, <i>et al.</i> (3200)
Impacts of Thermal Stratification on the Hydrochemistry and Dissolved Inorganic Carbon in a Typical Karst Reservoir in Summer	WU Fei-hong, PU Jun-bing, LI Jian-hong, <i>et al.</i> (3209)
Comparison of Heavy Metal Contamination Characteristics in Surface Water in Different Functional Areas; A Case Study of Ningbo	XU Mei-juan, TONG Gui-hua, SUN Dan, <i>et al.</i> (3218)
Comparison of Identification Methods of Main Component Hydrochemical Anomalies in Groundwater; A Case Study of Liujiang Basin	ZHANG Xiao-wen, HE Jiang-tao, PENG Cong, <i>et al.</i> (3225)
Biotic and Abiotic Uptake of Phosphorus in Benthic Sediments of Suburban Streams Under Intense Human Disturbance Scenario	LI Ru-zhong, YE Zhou, GAO Su-di, <i>et al.</i> (3235)
Sedimentary Phosphorus Speciation in the Coastal Hypoxic Area of Changjiang Estuary and Its Environmental Significance	LIU Jun, ZANG Jia-ye, RAN Xiang-bin, <i>et al.</i> (3243)
Characteristics and the Relationship of Nitrogen and Phosphorus in Soil and Water of Different Land Use Types of a Small Watershed in the Three Gorges Reservoir Area	CHEN Cheng-long, GAO Ming, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (3254)
Characteristics of Carbon Transportation Under Rainfall Events and Associated Carbon Loss Evaluation in Loess Plateau, China; A Case Study of Yangjuangou Dam Watershed	E Xin-hui, WANG Ya-feng, GAO Yang, <i>et al.</i> (3264)
New Bromated Phenolic Disinfection Byproducts: Mechanism of Their Decomposition During Chlorination	LI Huan, LI Zheng-kui, LI Ai-min, <i>et al.</i> (3273)
Effects of Algal Morphology and Al Species Distribution on the Coagulation-Ultrafiltration Process	ZHANG Da-wei, XU Hui, WANG Xi, <i>et al.</i> (3281)
Functional Group Characteristics of Planktonic Diatoms and Their Relationship with Environmental Factors in the Ruxi River	XIANG Rong, LI Qiao-yu, YU Yi, <i>et al.</i> (3290)
Spatiotemporal Variations of Chlorophyll <i>a</i> and Its Relationship to Environmental Factors in Shiyan Reservoir	SONG Yun-long, ZHANG Jin-song, Guo Xiao-ya, <i>et al.</i> (3302)
Rhizosphere Microbial Diversity in Different Wetland Microcosms	WANG Lin, LI Bing, YU Jia-hui, <i>et al.</i> (3312)
Community Structure of Microorganisms and Its Seasonal Variation in Beihai Lake	ZHANG Ya-jie, LI Ke, ZHU Hao-ran, <i>et al.</i> (3319)
Analysis of Microbial Diversity in a Fluidized-Sand Biofilter Based on High-Throughput Sequencing Technology	ZHANG Hai-geng, SONG Hong-qiao, GU Chuan-chuan, <i>et al.</i> (3330)
Analysis of High-efficiency Denitrifying Bacteria and Embedding Filler Performance and Microflora	MENG Ting, YANG Hong (3339)
Selection of Microalgae for Biofuel Using Municipal Wastewater as a Resource	HAN Song-fang, JIN Wen-biao, TU Ren-jie, <i>et al.</i> (3347)
Purification Effect of Piggery Wastewater with <i>Chlorella pyrenoidosa</i> by Immobilized Biofilm-Attached Culture	WANG Yuan-zhu, CHENG Peng-fei, LIU De-fu, <i>et al.</i> (3354)
Combination of Microbubble Catalytic Ozonation and Biological Process for Advanced Treatment of Biotreated Coal Chemical Wastewater	LIU Chun, ZHOU Hong-zheng, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (3362)
Effect of pH Shock on Nitrogen Removal Performance of Marine Anaerobic Ammonium-Oxidizing Bacteria Treating Saline Wastewater	YU De-shuang, ZHOU Tong, LI Jin, <i>et al.</i> (3369)
Removal of Nitrogen from Alcohol Wastewater by PN-ANAMMOX	ZHOU Zheng, LIN Xing, WANG Fan, <i>et al.</i> (3377)
Biorecovery of Palladium from Simulated Wastewaters and Its Catalytic Property for Methylene Blue	KANG Nai-xin, ZHU Neng-wu, GUO Wen-ying, <i>et al.</i> (3385)
Investigation of Initiation and Shock Process of ANAMMOX Based on Color Space	WANG Li-jun, LI Zhi-hua, HAN Dong, <i>et al.</i> (3393)
Fast Start-up of Shortcut Nitrification in a CSTR and an MBR	ZHANG Ting, WU Peng, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (3399)
Conversion Pathways of Substrates in Sulfate-Reducing Ammonia Oxidation System	WANYAN De-qing, HUANG Yong, BI Zhen, <i>et al.</i> (3406)
Effect of Different TOC to NH_4^+ -N Ratios on Nitrogen Removal Efficiency in the ANAMMOX Process	WANG Fan, LIU Kai, LIN Xing, <i>et al.</i> (3415)
Effects of Salinity on the Operation of EGSB Reactors and the Anaerobic Granular Sludge	TAN Xiao, HUANG Liang, YANG Ping, <i>et al.</i> (3422)
Start-up of Granule CANON Process and the Strategy for Enhancing Total Nitrogen Removal Rate	SUN Yan-fang, HAN Xiao-yu, ZHANG Shun-jun, <i>et al.</i> (3429)
Effect of Extracellular Polymeric Substance (EPS) on the Adsorption of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) onto Activated Sludge	LIU Xin-tong, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i> (3435)
Characteristics of N_2O and NO_x Emissions from Purple Soil Under Different Fertilization Regimes	HU Lei, LIU Yun, ZHU Bo (3442)
Effect of Plastic Film Mulching on Methane Emission from a Vegetable Field	ZHANG Kai-li, HAO Qing-ju, FENG Di, <i>et al.</i> (3451)
Responses of Soil Ammonia Oxidizers to Simulated Warming and Increased Precipitation in a Temperate Steppe of Inner Mongolia	ZHANG Cui-jing, SHEN Ju-peí, SUN Yi-fei, <i>et al.</i> (3463)
Nitrification Activity and Autotrophic Nitrifiers in Long-term Fertilized Acidic Upland Soils	XU Bai-lu, ZHONG Wen-hui, HUANG Qian-ru, <i>et al.</i> (3473)
Effects of CaCO_3 Application on Soil Microbial Nitrogen Cycle in an Acid Soil	GUO An-ning, DUAN Gui-lan, ZHAO Zhong-qiu, <i>et al.</i> (3483)
Responses of Extracellular Enzymes to Nitrogen Application in Rice of Various Ages with Rhizosphere and Bulk Soil	WEI Liang, TANG Zhen-zhu, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i> (3489)
Variation in the Temperature Sensitivity of Surface Litter Respiration and Its Influencing Factors	ZHANG Yan-jun (3497)
Magnetic Properties of Farmland Soils in Arid Regions in Northwest China and Their Environmental Implications	WANG Xin, XIA Dun-sheng, WANG Bo, <i>et al.</i> (3507)
Preparation of Magnetic Biomass Carbon by Thermal Decomposition of Siderite Driven by Wheat Straw and Its Adsorption on Cadmium	ZHANG Ru-yu, LIU Hai-bo, ZOU Xue-hua, <i>et al.</i> (3519)
Effects of Traffic-related Air Pollution Exposure on DNA Methylation	WANG Ting, DING Rui, HUANG Dan-ni, <i>et al.</i> (3529)
Effects of Exogenous Microorganism Inoculation on Efficiency and Bacterial Community Structure of Sludge Composting	YANG Ping-ping, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i> (3536)
Life Cycle Assessment of Traction Lead-acid Batteries for Electric Bikes in China	LIU Wei, TIAN Jin-ping, CHEN Lü-jun (3544)