

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第8期

Vol.36 No.8

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

基于16S rRNA 基因测序法分析北京霾污染过程中 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 细菌群落特征..... 王步英,郎继东,张丽娜,方剑火,曹晨,郝吉明,朱昕,田埂,蒋靖坤 (2727)

北京城区冬季降尘微量元素分布特征及来源分析 熊秋林,赵文吉,郭道宇,陈凡涛,束同同,郑晓霞,赵文慧 (2735)

北京市典型餐饮企业油烟中醛酮类化合物污染特征 程婧晨,崔彤,何万清,聂磊,王军玲,潘涛 (2743)

基于实际道路交通流信息的北京市机动车排放特征 樊守彬,田灵娣,张东旭,曲松 (2750)

夏季珠江三角洲地区 PM_{2.5} 化学组分特征及其对大气能见度的影响 杨毅红,瞿群,刘随心,李雄,钟佩仪,陶俊 (2758)

隧道工人的 PM₁₀ 职业暴露特征调查分析及其健康风险评价 向华丽,杨俊,仇珍珍,雷万雄,曾婷婷,兰志财 (2768)

基于在线监测的江苏省大型固定燃煤源排放清单及其时空分布特征 张英杰,孔少飞,汤莉莉,赵天良,韩永翔,于红霞 (2775)

柴达木盆地东部降水氢氧同位素特征与水汽来源 朱建佳,陈辉,巩国丽 (2784)

长江口-浙闽沿岸沉积色素的分布特征及其指示意义 李栋,姚鹏,赵彬,王金鹏,潘慧慧 (2791)

“引江济太”过程中中江-望虞河-贡湖氮、磷输入特征研究 潘晓雪,马迎群,秦延文,邹华 (2800)

重庆市典型城镇区地表径流污染特征 王龙涛,段丙政,赵建伟,华玉妹,朱端卫 (2809)

调水调沙对黄河下游颗粒有机碳运输的影响 张婷婷,姚鹏,王金鹏,潘慧慧,高立蒙,赵彬,李栋 (2817)

青藏高原冰川区可溶性有机碳含量和来源研究 严芳萍,康世昌,陈鹏飞,柏建坤,李洋,胡召富,李潮流 (2827)

岩溶区地下水补给型水库表层无机碳时空变化特征及影响因素 李建涛,蒲俊兵,袁道先,刘文,肖琼,于爽,张陶,莫雪,孙平安,潘谋成 (2833)

室内模拟不同因子对岩溶作用与碳循环的影响 赵瑞一,吕现福,段逸凡 (2843)

新乡市地表水体 HCHs 和 DDTs 的分布特征及生态风险评价 冯精兰,余浩,刘书卉,刘梦琳,孙剑辉 (2849)

青木关地下河系统中不同含水介质下正构烷烃对比研究 梁作兵,孙玉川,王尊波,江泽利,廖昱,谢正兰,张媚 (2857)

三峡库区长寿湖水体不同形态汞的空间分布特征 白薇扬,张成,赵锋,唐振亚,王定勇 (2863)

燃煤电厂周围渔业养殖行为对水生生态环境中汞形态变化的影响 梁鹏,王远娜,尤琼智,高云飞,何杉杉 (2870)

运用硫同位素、氮氧同位素示踪里湖地下河硫酸盐、硝酸盐来源 李瑞,肖琼,刘文,郭芳,潘谋成,于爽 (2877)

藻华聚集的生态效应:对凤眼莲叶绿素和光合作用的影响 刘国锋,何俊,杨轶中,韩士群 (2887)

DOM 对被动采样技术的影响与应用 于尚云,周岩梅 (2895)

蛋白质对 PVDF 超滤膜污染行为的界面微观作用力解析 王旭东,周森,孟晓荣,王磊,黄丹曦,夏四清 (2900)

水环境中碳纳米管对沙丁胺醇光降解的影响 汪祺,韩佳芮,魏博凡,周磊,张亚,杨曦 (2906)

β -In₂S₃ 的制备及其太阳光下降解土霉素 艾翠玲,周丹丹,张嵘嵘,邵享文,雷英杰 (2911)

排水管道沉淀物氮释放特性的研究 陈红,卓琼芳,许振成,王劲松,魏清伟 (2918)

生物膜 CANON 反应器中沉积物影响及其成因分析 付昆明,王会芳,左早荣,仇付国 (2926)

ABR-MBR 一体化工艺节能降耗措施优化研究 吴鹏,陆爽君,徐乐中,刘捷,沈耀良 (2934)

两个 CANON 污水处理系统中氨氧化古菌的丰度和多样性研究 高景峰,李婷,张树军,樊晓燕,潘凯玲,马谦,袁亚林 (2939)

ABR 耦合 CSTR 一体化工艺好氧颗粒污泥形成机制及其除污效能研究 巫恺澄,吴鹏,徐乐中,李月寒,沈耀良 (2947)

珠江三角洲地区土壤有机氯农药分布特征及风险评价 窦磊,杨国义 (2954)

广西都安县耕地土壤重金属污染风险评价 吴洋,杨军,周小勇,雷梅,高定,乔鹏炜,杜国栋 (2964)

开封市公园地表灰尘重金属污染及健康风险 段海静,蔡晓强,阮心玲,全致琦,马建华 (2972)

我国西南地区氮饱和和马尾松林土壤和植物¹⁵N自然丰度对长期氮施加的响应 刘文静,康荣华,张婷,朱婧,段雷 (2981)

黄土高原纬度梯度上的植物与土壤碳、氮、磷化学计量学特征 李婷,邓强,袁志友,焦峰 (2988)

开顶式气室原位研究水稻稻富集对大气汞浓度升高的响应 陈剑,王章玮,张晓山,秦普丰,陆海军 (2997)

接种丛枝菌根真菌对蜈蚣草吸收砷的影响 郑文君,王明元 (3004)

水稻种植对黑土微生物生物量和碳源代谢功能的影响 赵志瑞,崔丙健,侯彦林,刘上千,王岩 (3011)

固定化菌剂载体材料腐解产物对污染土壤中砷解吸的影响 全冬丽,双生晴,李晓军,邓万荣,赵然然,贾春云,巩宗强 (3018)

零价铁和碱激发矿渣稳定/固定化处理铬渣研究 陈忠林,李金春子,王斌远,樊磊涛,沈吉敏 (3026)

Fe³⁺ 负载凹凸棒土 (Fe/ATP) 结构表征及其稳定化修复镉 (Cd) 机制研究 杨蓉,李鸿博,周永莉,陈静,王琳玲,陆晓华 (3032)

原位生物修复提高多环芳烃污染土壤农作安全性 焦海华,潘建刚,徐圣君,白志辉,王栋,黄占斌 (3038)

镉-八氯代二苯并呋喃复合污染土壤中紫茉莉对镉的修复能力 张杏丽,邹威,周启星 (3045)

不同水分条件对蜈蚣草修复砷污染土壤的影响 刘秋辛,阎秀兰,廖晓勇,林龙勇,杨静 (3056)

磷矿粉和腐熟水稻秸秆对土壤铅污染的钝化 汤帆,胡红青,苏小娟,付庆灵,朱俊 (3062)

洛克沙肿在青菜及土壤中的残留及降解特性 邵婷,姚春霞,沈源源,张玉洁,苏楠楠,周守标 (3068)

3 种典型有机污染物对 2 种水生生物的急性毒性及安全评价 杨扬,李雅洁,崔益斌,李梅 (3074)

石油污染物对海底微生物燃料电池性能的影响及加速降解效应 孟瑶,付玉彬,梁生康,陈伟,柳昭慧 (3080)

Cu-Mn-Ce/分子筛催化剂吸附甲苯后的微波原位再生及床层温度分布探究 虎雪姣,卜龙利,梁欣欣,孟海龙 (3086)

热处理对猪粪高固厌氧消化产甲烷能力的影响 胡玉瑛,吴静,王士峰,曹知平,王凯军,左剑恶 (3094)

磷石膏对麦田 CO₂ 排放和小麦产量的影响及其经济环境效益分析 李季,吴洪生,高志球,尚小厦,郑培慧,印进,Kakpa Didier,任迁琪, Ogou Katchele Faustin,陈素云,徐亚,姚童言,李炜,钱景珊,马世杰 (3099)

全氟和多氟烷基化合物的环境风险评估研究现状、不确定性与趋势分析 郝薛文,李力,王杰,曹燕,刘建国 (3106)

《环境科学》征订启事 (2757) 《环境科学》征稿简则 (2767) 信息 (2734,2783,3073,3079)

北京市典型餐饮企业油烟中醛酮类化合物污染特征

程婧晨¹, 崔彤², 何万清¹, 聂磊^{1*}, 王军玲¹, 潘涛¹

(1. 北京市环境保护科学研究院, 北京 100037; 2. 中国矿业大学(北京)化学与环境工程学院, 北京 100083)

摘要: 醛酮类化合物作为餐饮油烟的组成物质之一, 是挥发性有机物(volatile organic compounds, VOCs)中化学反应活性较强的一类物质. 但目前国内还没有针对餐饮源醛酮类化合物的排放特征进行较为系统的研究. 为进一步明确餐饮源醛酮类化合物排放水平和控制现状, 获取城市群餐饮源 VOCs 排放控制决策依据, 本研究选取北京市 8 家不同类型的餐饮企业, 采用涂布 2,4-二硝基苯肼(DNPH)的硅胶采样管进行油烟样品采集, 用超高效液相色谱(UPLC)对油烟样品中的醛酮类化合物进行测定. 结果表明按基准风量折算后, 8 家餐饮企业排放的油烟中醛酮类化合物浓度高低依次是: 烤鸭 > 中式烧烤 > 家常菜 > 西式快餐 > 学校食堂 > 中式快餐 > 川菜 > 淮扬菜. 餐饮企业油烟中醛酮类化合物(C1~C9)浓度水平范围为 115.47~1 035.99 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 不同类型餐饮企业油烟中醛酮类化合物组分构成存在较为明显的差异, 中式餐饮企业醛酮类化合物 C1~C3 物质所占比例均在 40% 以上. 快餐类餐饮企业醛酮类化合物 C4~C9 所占比例明显高于其他类型餐饮企业. 从醛酮类化合物控制现状来看, 北京市目前主流高压静电式油烟净化器对醛酮类化合物的去除效果十分有限.

关键词: 醛酮类化合物; 油烟; 餐饮企业; 2,4-二硝基苯肼; 超高效液相色谱

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)08-2743-07 DOI: 10.13227/j.hjxk.2015.08.003

Pollution Characteristics of Aldehydes and Ketones Compounds in the Exhaust of Beijing Typical Restaurants

CHENG Jing-chen¹, CUI Tong², HE Wan-qing¹, NIE Lei^{1*}, WANG Jun-ling¹, PAN Tao¹

(1. Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection, Beijing 100037, China; 2. School of Chemical & Environmental Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Aldehydes and ketones compounds, as one of the components in the exhaust of restaurants, are a class of volatile organic compounds(VOCs) with strong chemical reactivity. However, there is no systematic study on aldehydes and ketones compounds in the exhaust of restaurants. To further clarify the food source emission levels of aldehydes and ketones compounds and controlling measures, to access city group catering VOCs emissions control decision-making basis, this study selected 8 Beijing restaurants with different types. The aldehydes and ketones compounds were sampled using DNPH-silica tube, and then ultra performance liquid chromatography was used for quantitative measurement. The aldehydes and ketones concentrations of reference volume condition from 8 restaurants in descending order were Roasted Duck restaurant, Chinese Style Barbecue, Home Dishes, Western Fast-food, School Canteen, Chinese Style Fast-food, Sichuan Cuisine, Huaiyang Cuisine. The results showed that the range of aldehydes and ketones compounds (C1-C9) concentrations of reference volume condition in the exhaust of restaurants was 115.47-1 035.99 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. The composition of aldehydes and ketones compounds in the exhaust of sampled restaurants was obviously different. The percentages of C1-C3 were above 40% in the exhaust from Chinese style restaurants. Fast food might emit more C4-C9 aldehydes and ketones compounds. From the current situation of existing aldehydes and ketones compounds control, the removal efficiency of high voltage electrostatic purifiers widely used in Beijing is limited.

Key words: aldehydes and ketones compounds; exhaust of restaurant; restaurants; DNPH; UPLC

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^[1-3], 它们不仅是大气光化学反应重要的中间体, 在对流层中还会影响臭氧和 PANs (过氧乙酰硝酸酯) 的生成^[4-8]; 一些醛酮类化合物(如甲醛、乙醛和丙烯醛等)还具有致癌、致畸、致突变的作用^[9,10], 直接危害人体的健康, 近些年醛酮类化合物受到了越来越多的关注^[11,12].

醛酮类化合物是餐饮油烟的重要组成物质. 研究表明, 烹调油烟气中含有醛酮类化合物, 具体组分构成因烹饪条件不同而有一定差别^[13-19]. 在烹饪

时, 醛酮类化合物主要通过以下两种途径产生. 第一, 烹饪燃料如木炭和木材等在燃烧时会生成醛酮类化合物^[20]; 第二, 食用油和食材在高温作用下发生的氧化、裂解、水解反应会产生醛酮类化合物^[21].

收稿日期: 2015-02-12; 修订日期: 2015-03-16

基金项目: 北京市科技计划项目(Z131100004213007); 国家科技支撑计划项目(2013BAC17B01); 环境保护公益性行业科研专项(2014001019)

作者简介: 程婧晨(1990~), 女, 硕士, 主要研究方向为大气污染控制, E-mail: qjqcc09323132@163.com

* 通讯联系人, E-mail: neilei@cee.cn

国外的学者很早就对餐饮源排放的醛酮类化合物进行了研究,他们把工作重点放在研究烹饪过程中产生的醛酮类化合物的组分、浓度及其危害等方面. 采样分析方法主要包括两种,一是采用 DNPH (2,4-二硝基苯肼) 吸附管采样,使用高效液相色谱进行分析;二是利用以 PFBHA (五氟苄基羟胺) 和 PFPH (五氟苯肼) 作为衍生剂的吸附管采样,使用 GC/MS 进行分析^[22~24]. 国内学者也对醛酮类化合物开展了一些研究,大多集中在大气环境中醛酮类化合物的组分构成、浓度水平以及机动车内环境醛酮类化合物组分分析^[25,26]. 针对餐饮源排放的醛酮类化合物,更多的是关注其对人体暴露的危害,而有关不同类型餐饮源醛酮类化合物排放特征的研究相对较少.

我国餐饮污染源类型众多,排放组分复杂,目前还没有针对餐饮污染源醛酮类化合物的排放特征进行较为系统的研究,对餐饮污染源的科学认识还远不能满足环境管理部门进行科学管理和决策的需求. 本研究选择 8 家不同类型的餐饮企业作为采样

对象,对其排放特征进行分析,以期为量化国内餐饮业环境影响和油烟控制技术的筛选提供基础数据.

1 材料与方法

1.1 样品采集

选取烤鸭、家常菜、淮扬菜、川菜、中式快餐、西式快餐和中式烧烤和学校食堂这 8 家典型餐饮企业作为研究对象. 根据《饮食业油烟净化设备技术要求及检测技术规范》^[27],在中午和晚上用餐高峰期,对所选 8 家餐饮企业净化设备前排烟管道的平直管段内的油烟进行了醛酮类化合物样品采集,采样点见图 1. 在距弯头、变径管等管件下游 3 倍当量直径的断面中心处设置采样点,本研究采样的 8 家餐饮企业排烟管道的断面形状均是矩形,当量直径 $D = 2AB / (A + B)$,式中 A 、 B 为边长. 其中中式快餐和学校食堂同时对油烟净化设备后的油烟进行了样品采集,每个样品采集时间为 30 min,采样流量为 $500 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$. 所选餐饮企业的基本信息(菜系类型、规模、燃料类型)和采样时段的相关信息见表 1.

表 1 餐饮企业基本信息

Table 1 Basic information for the sampled restaurants

餐饮企业	烹饪特点	燃料类型	使用灶头数/个	餐位/个	客流量/人
烤鸭店	挂炉果木烤鸭	果木	2	1 058	3 000
家常菜	以家常菜为主,有烤鸭	果木和天然气	6	200	500
淮扬菜	注重鲜活、鲜嫩,调味清淡,强调本味. 烹饪方式主要以炖、焖、煨、焐、蒸为主	天然气	4	200	300
川菜	注重麻、辣、香,油重味浓,烹饪离不开辣椒、胡椒、花椒,主要以炒、烧为主	天然气	6	400	400
中式快餐	烹饪手法简单,部分菜品属于半成品加工	天然气	3	156	500
西式快餐	以炸、烤为主. 多数菜品属于半成品加工	电	1	130	600
中式烧烤	用木炭作燃料,将食物直接置于炭火上烧烤出盘	木炭	4	80	500
学校食堂	作业时间短,用料简单,多而不精	天然气	3	200	—

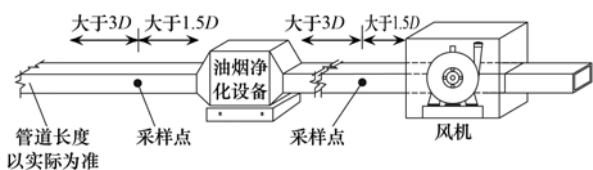


图 1 平直管段采样点示意

Fig. 1 Sampling points of straight pipe

醛酮类化合物采样系统示意图见图 2,其中连接管路材质均为 Teflon (特氟龙) 材料,采样时在 DNPH 采样管 (Sigma-Aldrich 公司的 DNPH-silica) 前端依次安装颗粒物过滤器对油烟中的颗粒物进行截留,安装碘化钾 (KI) 臭氧去除柱,以防止管路中的臭氧与衍生剂 DNPH 及衍生后的胺类化合物发生反应. 采样前,用皂膜流量计校正真空泵流量;

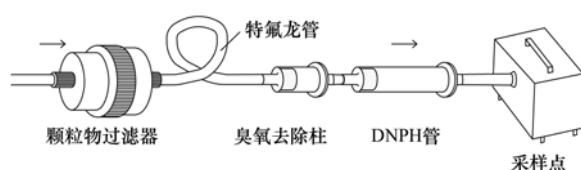


图 2 采样系统示意

Fig. 2 Sampling system diagram

采样时,详细记录餐饮企业烹饪状况;采样后,将 DNPH 采样管两头密封放入有冰袋的保温包中带回实验室分析.

1.2 样品分析预处理

将 DNPH 采样管放于固相萃取装置上,准确加入 5 mL 乙腈反向洗脱采样管,将洗脱液收集于 5 mL 容量瓶中. 用 $0.25 \mu\text{m}$ 滤膜对洗脱液进行过

滤,用超声清洗器处理 5 min,用乙腈定容至标线。

1.3 样品分析

样品测定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);固相萃取仪购自 Supelco。醛酮-DNPH 混标(TO11/IP-6A Aldehyde/Ketone-DNPH Mix)购自 Supelco,浓度 15 000 μg·L⁻¹。

采用梯度洗脱程序(表 2),A 相为超纯水,B 相为乙腈,C 相为水和四氢呋喃(THF)的混合溶液(50/50,体积比)。流速为 0.5 mL·min⁻¹,柱温 40℃。DAD 检测器的波长 360 nm,进样量 2 μL。

2 结果与讨论

2.1 典型餐饮企业油烟中醛酮类化合物的浓度水平

醛酮类化合物的浓度水平受所选餐饮企业的菜系类型、规模、上座率、风机管道设计等诸多因素

表 2 UPLC 梯度洗脱程序

时间/min	A/%	B/%	C/%
0	32	36	32
2.6	45	55	0
4	35	65	0
5.9	35	65	0
6.0	32	36	32
6.5	32	36	32

影响。本研究选取的 8 家典型餐饮企业油烟中醛酮类化合物的实测浓度范围及其平均值列于表 3。

本研究在使用超高效液相色谱法分析检测时选用的标液是 TO-11/IP-6A Aldehyde/Ketone-DNPH Mix,因而油烟中还存在部分醛酮类化合物未能进行定量^[24~29]。本研究只讨论有相应标液的醛酮类化合物的检测结果,因此结果应小于实际的餐饮业排放水平。

表 3 典型餐饮企业醛酮类化合物的浓度水平¹⁾/μg·m⁻³

Table 3 Aldehydes and ketones concentrations in the exhaust of typical sampled restaurants/μg·m⁻³

化合物	烤鸭店(n=6)			家常菜(n=2)			淮扬菜(n=2)			川菜(n=4)		
	min	max	ave	min	max	ave	min	max	ave	min	max	ave
甲醛	221.62	449.11	328.07	59.31	61.98	60.65	40.05	57.21	48.63	33.08	50.62	42.77
乙醛	186.66	329.36	250.74	39.06	41.80	40.43	10.63	19.01	14.82	17.78	38.55	28.70
丙烯醛	68.60	279.63	120.28	24.20	26.91	25.56	10.57	11.12	10.85	11.25	19.00	15.05
丙酮	45.21	292.88	182.70	29.49	30.25	29.87	—	—	—	—	—	—
丙醛	35.59	68.07	48.68	13.71	14.03	13.87	1.86	1.86	1.86	11.67	26.26	18.47
2-丁烯醛	14.69	256.21	62.21	50.63	55.81	53.22	—	—	—	—	—	—
丁醛	29.47	108.72	69.10	21.30	21.54	21.42	3.02	3.36	3.19	9.14	17.30	12.35
苯甲醛	12.81	61.22	42.03	17.73	20.50	19.12	—	—	—	5.50	6.11	5.81
异戊醛	53.45	124.78	81.64	7.05	7.22	7.13	—	—	—	—	—	—
戊醛	0.78	20.27	8.82	16.62	18.70	17.66	3.86	4.44	4.15	11.02	28.86	20.58
邻甲基苯甲醛	bd	bd	bd	—	—	—	—	—	—	—	—	—
间/对甲基苯甲醛	3.03	9.17	5.62	—	—	—	—	—	—	—	—	—
己醛	15.48	66.00	35.16	47.67	62.94	55.31	19.22	20.93	20.08	45.97	68.72	59.46
2,5-二甲基苯甲醛	bd	18.57	18.57	—	—	—	—	—	—	—	—	—
合计	820.82	1 568.17	1 174.59	335.45	353.00	344.23	90.69	114.60	102.64	139.91	250.08	200.28
化合物	中式快餐(n=4)			西式快餐(n=3)			中式烧烤(n=2)			学校食堂(n=2)		
	min	max	ave	min	max	ave	min	max	ave	min	max	ave
甲醛	25.12	46.59	34.20	3.49	4.94	4.03	123.21	145.72	134.46	23.60	26.40	25.00
乙醛	19.40	33.82	27.04	6.59	12.39	9.59	162.95	189.28	176.12	8.02	13.46	10.74
丙烯醛	10.80	16.67	13.26	10.05	15.98	12.23	94.36	118.71	106.53	2.22	4.48	3.35
丙酮	1.22	5.40	3.44	—	—	—	61.66	76.05	68.86	6.32	9.00	7.66
丙醛	12.53	28.55	18.36	1.43	3.93	2.59	63.60	63.89	63.75	2.96	5.84	4.40
2-丁烯醛	—	—	—	14.65	18.74	17.11	141.74	160.66	151.20	1.81	1.81	1.81
丁醛	10.27	15.41	12.63	4.18	7.44	5.90	65.01	69.10	67.06	9.92	18.43	14.18
苯甲醛	29.99	29.99	29.99	5.30	5.30	5.30	28.83	31.98	30.40	—	—	—
异戊醛	4.28	5.72	5.00	3.52	7.20	5.36	3.24	3.24	3.24	—	—	—
戊醛	17.10	32.63	26.62	10.25	17.35	14.96	48.79	53.80	51.30	5.87	11.17	8.52
邻甲基苯甲醛	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
间/对甲基苯甲醛	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
己醛	77.21	110.80	95.24	34.76	67.26	52.53	48.51	53.99	51.25	13.87	23.51	18.69
2,5-二甲基苯甲醛	—	—	—	—	—	—	7.43	7.43	7.43	—	—	—
合计	175.72	305.40	240.78	86.57	154.69	124.30	878.74	933.78	911.59	75.58	111.31	93.44

1)bd 表示低于检出限;—表示目标化合物未检出

为排除规模、上座率、风机风量等因素对不同类型餐饮企业排放水平的影响,以期科学客观地比较各类餐饮企业醛酮类化合物的排放水平,本研究依据文献[30],将实测浓度折算为基准风量条件下的浓度,

表 4 典型餐饮企业油烟中醛酮类化合物的实测排放浓度和基准风量条件下排放浓度

餐厅类型	烤鸭	家常菜	淮扬菜	川菜	中式快餐	西式快餐	中式烧烤	学校食堂
风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	3.50	6.00	10.00	14.00	10.00	7.00	7.00	12.00
使用灶头数/个	2	6	4	6	3	1	4	3
管道面积/ m^2	0.28	1.00	0.25	0.24	0.20	0.25	0.36	0.55
采样风量/ $\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$	3 528	21 600	9 000	12 096	7 200	6 300	9 072	23 760
实测浓度/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	1 174.59	344.23	102.64	200.28	240.78	124.30	911.59	93.44
基准风量条件下浓度/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	1 035.99	619.61	115.47	201.88	288.94	391.53	1 033.75	370.03

由表 4 可知,按照基准风量折算后,8 家典型餐饮企业油烟中醛酮类化合物浓度范围为 115.47 ~ 1 035.99 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,浓度高低依次为:烤鸭 > 中式烧烤 > 家常菜 > 西式快餐 > 学校食堂 > 中式快餐 > 川菜 > 淮扬菜. 由表 3 可知,其中烤鸭油烟中醛酮类化合物浓度最高,浓度范围为 820.82 ~ 1 568.17 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$;其次是中式烧烤,浓度范围是 878.74 ~ 933.78 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$;淮扬菜油烟中醛酮类化合物浓度最低,为 90.96 ~ 114.60 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 烤鸭和中式烧烤较高的排放水平均与其烹饪方式有关. 首先烤鸭和中式烧烤分别以果木和木炭为燃料,且在烤制过程中会不断添加燃料以保持所需温度. 以往研究结果表明,燃料燃烧过程是醛酮类化合物的来源之一[20],本研究中烤鸭过程的果木燃烧和中式烧烤的木炭燃烧过程应是醛酮类化合物主要来源之一;其次在烤制食品时,食品内部有机物质分解也会产生醛酮类化合物[31]. 加之这两种烹饪方式并不像其他类型餐饮企业烹饪时会有炒菜间歇,所以有较高水平的醛酮类化合物产生.

家常菜的浓度水平仅次于中式烧烤,推测是由于所选的家常菜餐饮企业后厨包含一个果木烤鸭房,其烤鸭烤制过程对醛酮类化合物的排放造成影响,这一情景与目前北京市家常菜餐饮企业实际经营情况(大中型家常菜餐饮企业会设置烤鸭房)是一致的. 中式、西式快餐烹饪方式简单,菜品多以半成品加工为主,淮扬菜注重鲜活、鲜嫩,调味清淡,强调本味,烹饪方式主要以炖、焖、煨、焐、蒸为主,这些类型的餐饮企业本身产生的油烟量少,相应也减少了醛酮类化合物的产生量.

由图 3 可知,除了烤鸭,其他类型餐饮企业的醛酮类化合物实测浓度均小于基准风量浓度. 中式快餐、淮扬菜和川菜这三家餐饮企业选择的风机风量

采用单个灶头基准排风量 $2\,000\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ 时的浓度作为指标,对 8 家餐饮企业醛酮类化合物的浓度水平进行了比较. 表 4 为餐饮企业油烟中醛酮类化合物的实测浓度和基准风量条件下排放浓度值.

基本符合《饮食业油烟排放标准》[30]列出的单个灶头基准排风量($2\,000\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$). 家常菜、西式快餐和学校食堂的实测浓度与其各自的基准风量浓度相差较大,表明这三家餐饮企业的风机风量经核算后高于单个灶头基准排风量($2\,000\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$).

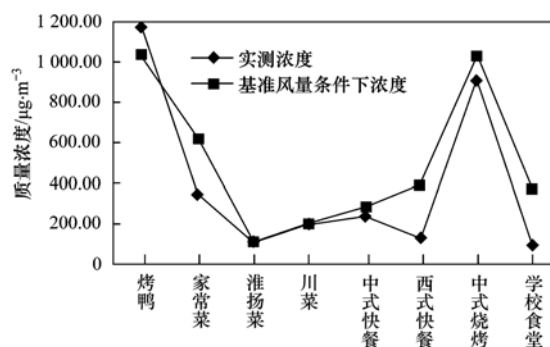


图 3 实测浓度与基准风量条件下浓度对比

Fig. 3 Comparison of concentrations measured in the exhaust of sampled restaurants and concentrations of reference volume condition

2.2 不同类型餐饮企业醛酮类化合物分布特征

8 家典型餐饮企业油烟中醛酮类化合物组分构成见表 5,在 15 种目标醛酮类化合物中,除邻甲基苯甲醛外,其他醛酮类化合物均有不同程度的检出. 2,5-二甲基苯甲醛只在烤鸭和中式烧烤排放的油烟中有检出且浓度很低,其余餐饮企业未检出. 间/对甲基苯甲醛只在烤鸭油烟中检出,而在其余餐饮企业均未检出,一定程度上可以推测其应该主要来源于果木燃烧.

不同类型餐饮企业油烟中醛酮类化合物组分构成存在较为明显的差异(图 4). 西式快餐油烟中的醛酮类化合物 C1 ~ C3 物质仅占 22.89%. 中式餐饮企业醛酮类化合物 C1 ~ C3 物质所占比例均在 40% 以上,烤鸭、淮扬菜和中式烧烤较高,C1 ~ C3 物质所占比例分别为 79.22%、74.20% 和

表 5 8 家餐饮企业油烟中醛酮类化合物组分构成/%

Table 5 Composition of aldehydes and ketones compounds in the exhaust of the 8 sampled restaurants/%

碳数/特征	化合物	烤鸭	家常菜	淮扬菜	川菜	中式快餐	西式快餐	中式烧烤	学校食堂
C1	甲醛	27.93	17.62	47.37	21.35	14.20	3.25	14.75	26.76
C2	乙醛	21.35	11.75	14.44	14.33	11.23	7.71	19.32	11.49
C3	丙烯醛	10.24	7.42	10.57	7.51	5.51	9.84	11.69	3.58
C3	丙酮	15.55	8.68	—	—	1.43	—	7.55	8.20
C3	丙醛	4.14	4.03	1.82	9.22	7.63	2.09	6.99	4.71
	小计	79.22	49.49	74.20	52.42	39.99	22.89	60.30	54.75
C4/直链	2-丁烯醛	5.30	15.46	—	—	—	13.76	16.59	1.94
C4/直链	丁醛	5.88	6.22	3.10	6.16	5.25	4.75	7.36	15.17
C5/直链	戊醛	0.75	5.13	4.04	10.28	11.06	12.04	5.63	9.11
C6/直链	己醛	2.99	16.07	19.56	29.69	39.55	42.27	5.62	20.00
C5/支链	异戊醛	6.95	2.07	—	—	2.08	4.31	0.36	—
C7/环状	苯甲醛	3.58	5.55	—	2.90	12.46	4.26	3.34	—
C8/环状	邻甲基苯甲醛	— ¹⁾	—	—	—	—	—	—	—
C8/环状	间/对甲基苯甲醛	0.48	—	—	—	—	—	—	—
C9/环状	2,5-二甲基苯甲醛	1.58	—	—	—	—	—	0.81	—
	小计	27.51	50.51	26.71	49.03	70.39	81.39	39.70	46.22

1) 表示目标化合物未检出

60.30%, 家常菜、川菜和学校食堂所占比例也在 50% 以上, 与冯艳丽等^[16]对宿舍餐饮一体的酒店的研究结果一致。中式快餐油烟中的 C1 ~ C3 物质占 40%, 是除了西式快餐 C1 ~ C3 所占比例最小的餐饮企业。从组成特征上推断, 快餐类餐饮企业烹饪手法简单, 部分菜品未经深度烹饪, 未达到大分子物质分解成小分子物质所需的反应条件, 依靠简单的半成品加工致使排放了相对多的 C4 ~ C9 醛酮类化合物。

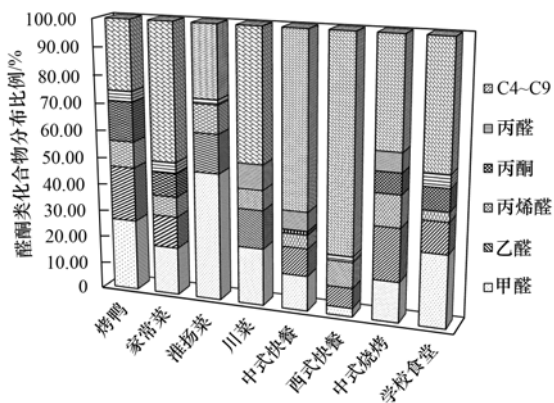


图 4 8 家餐饮企业排放的醛酮类化合物分布特征

Fig. 4 Distribution characteristics of aldehydes and ketones compounds in the exhaust of the 8 sampled restaurants

C4 ~ C9 直链醛酮类化合物浓度高于环状醛酮类化合物, 这符合 Ho 等^[15]在香港对多种不同类型餐馆的研究结果, 在有空气存在的情况下, 加热脂肪和油会产生链式挥发产物。除了烧烤类餐饮企业, 其他企业都没有产生 C8 和 C9 环状醛酮类化合物。

除了西式快餐, 甲醛是检测出的 14 种化合物浓度最高的物质。淮扬菜甲醛比例最高占 50%, 其他餐馆占 20% 左右。丙烯醛所占比例在各个餐馆中差异较小, 都在 5% ~ 10% 范围内。烤鸭有较大的丙酮, 中式烧烤, 家常菜和食堂次之, 中式快餐再次, 淮扬菜、川菜和西式快餐未检测出丙酮。其它单项污染物没有明显的分布规律。

2.3 现有油烟净化设备对醛酮类化合物排放的影响

目前北京市尚未对餐饮企业排放的 VOCs 提出控制要求, 现有排放标准管控的目标是餐饮企业排放的油烟, 主流油烟净化技术是高压静电式净化器 (占北京市 80% 以上), 本研究选取就餐高峰期对中式快餐和学校食堂两家餐饮企业高压静电式净化器前后油烟中的醛酮类化合物进行了采样分析测定, 结果见表 6。

经高压静电式油烟净化器处理后, 油烟中醛酮类化合物并没有得到有效去除, 相反部分物种浓度还有了一定幅度的增加。分析这一结果, 应与高压静电式油烟净化器原理有关, 其原理是利用阴极在高压电场中发射的电子与空气分子碰撞, 使油雾颗粒荷电, 荷电后的油雾颗粒在电场力的作用下向阳极板运动, 并被捕集达到去除的目的^[32]。但事实上, 对于油烟中的气态污染物来说, 静电净化器运行时内部高压放电过程会有一定几率使得油烟中的大分子有机物分解生成小分子有机物, 其中很可能包含醛酮类化合物; 此外在放电过程中产生的臭氧, 也有一定几率与高

分子有机物接触,发生反应从而增加油烟中醛酮类化合物的浓度.基于以上测试结果分析可知,

目前北京市安装的油烟净化设备对醛酮类化合物去除效果十分有限.

表 6 油烟净化器净化前后醛酮类化合物浓度水平/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

Table 6 Comparison of aldehydes and ketones concentrations before and after purification using electrostatic purifiers/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

项目	中式快餐			学校食堂		
	净化前	净化后	净化效率/%	净化前	净化后	净化效率/%
甲醛	34.20	41.10	-20.17	25.00	25.15	-0.59
乙醛	27.04	31.80	-17.61	10.74	10.58	1.48
丙烯醛	13.26	15.07	-13.70	3.35	4.27	-27.57
丙酮	3.44	4.59	-33.28	7.66	5.70	25.56
丙醛	18.36	23.11	-25.83	4.40	4.34	1.50
2-丁烯醛	— ¹⁾	—	—	1.81	1.74	3.99
丁醛	12.63	14.79	-17.14	14.18	12.94	8.74
苯甲醛	29.99	—	100	—	—	—
异戊醛	5.00	6.24	-24.69	—	—	—
戊醛	26.62	31.61	-18.73	8.52	7.36	13.54
邻甲基苯甲醛	—	—	—	—	—	—
间/对甲基苯甲醛	—	—	—	—	—	—
己醛	95.24	112.38	-18.00	18.69	20.86	-11.60
2,5-二甲基苯甲醛	—	—	—	—	—	—
总计	240.78	277.56	-15.27	93.44	81.64	12.63

1) 表示目标化合物未检出

3 结论

(1)按照基准风量折算后,8家典型餐饮企业油烟中醛酮类化合物浓度范围为115.47~1035.99 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,浓度高低依次为:烤鸭>中式烧烤>家常菜>西式快餐>学校食堂>中式快餐>川菜>淮扬菜.烤鸭和中式烧烤较高的排放水平均与其烹饪方式有关,除了食材本身有机物质的分解,烤鸭过程的果木燃烧和中式烧烤的木炭燃烧应是醛酮类化合物主要来源之一.淮扬菜、中式、西式快餐这些类型的餐饮企业本身产生的油烟量少,相应也减少了醛酮类化合物的产生量.

(2)不同类型餐饮企业油烟中醛酮类化合物组分构成存在较为明显的差异.西式快餐油烟中的醛酮类化合物的组成特征与中式餐饮企业存在明显的差异.西式快餐油烟中的醛酮类化合物C1~C3物质所占比例最低,占20%左右,中式餐饮企业醛酮类化合物C1~C3物质所占比例均在40%以上.快餐类餐饮企业排放的油烟中C4~C9醛酮类化合物所占比例明显高于其他类型餐饮企业,其中,西式快餐排放的C4~C9比例明显高于中式快餐.

(3)除了西式快餐,甲醛是检测出的14种目标化合物浓度最高的物质.丙烯醛所占比例在各个餐馆中差异较小在5%~10%左右.烤鸭有较大量的丙酮,家常菜和食堂次之,中式快餐再次,淮扬菜、

川菜和西式快餐未检测出丙酮.

(4)经高压静电式油烟净化器处理后,油烟中醛酮类化合物并没有得到有效去除,相反部分物种浓度还有了一定幅度的增加.目前北京市安装的油烟净化设备对醛酮类化合物去除效果十分有限.

参考文献:

- [1] Lary D J, Shalleross D E. Central role of carbonyl compounds in atmospheric chemistry[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2000, **105**(D15): 19771-19778.
- [2] Carter W P L. Development of ozone reactivity scales for volatile organic compounds[J]. *Air & Waste*, 1994, **44**(7): 881-899.
- [3] 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.
- [4] Hung 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.
- [5] Ho S S H, Yu J Z. Determination of airborne carbonyls: Comparison of a thermal desorption/GC method the standard DNPH/HPLC method [J]. *Environmental Science & Technology*, 2004, **38**(3): 862-870.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 吕辉雄, 蔡全英. 大气中羰基化合物的研究进展[J]. *生态环境学报*, 2009, **18**(4): 1533-1539.
- [10] Malatkova P, Havlikova L, Wsol V. The role of carbonyl reducing enzymes in oxcarbapine *in vitro* metabolism in man [J]. *Chemico-Biological Interactions*, 2014, **220**: 241-247.
- [11] TJ 36-79, 工业企业设计卫生标准[S].
- [12] 大气固定源的采样和分析编委会. 大气固定源的采样和分析[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1993. 502-508.
- [13] 吴芳谷, 汪彤, 陈虹桥, 等. 餐饮油烟排放特征[A]. 见: 中国颗粒学会2002年年会暨海峡两岸颗粒技术研讨会会议论文集[C]. 中国颗粒学会, 2002.
- [14] 王凯雄, 朱杏冬. 烹调油烟气的成分及其分析方法[J]. *上海环境科学*, 1999, **18**(11): 526-528.
- [15] Ho S S H, Yu J Z, Chu K W, *et al.* Carbonyl emissions from commercial cooking sources in Hong Kong [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2006, **56**(8): 1091-1098.
- [16] 冯艳丽, 黄娟, 文晟, 等. 餐馆排放油烟气中羰基化合物浓度及分布特征[J]. *环境科学与技术*, 2008, **31**(2): 66-68, 76.
- [17] 樊巍巍, 孙竹. 西安市室内醛酮类化合物风险研究[J]. *科技创新与应用*, 2013, (20): 33-34.
- [18] Delgado-Saborit J M, Aquilina N J, Meddings C, *et al.* Relationship of personal exposure to volatile organic compounds to home, work and fixed site outdoor concentrations[J]. *Science of the Total Environment*, 2011, **409**(3): 478-488.
- [19] Srivastava A, Sengupta B, Dutta S A. Source apportionment of ambient VOCs in Delhi City [J]. *Science of the Total Environment*, 2005, **343**(1-3): 207-220.
- [20] 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.
- [21] 张宝勇, 杨玉柱. 烹调油烟的组成与危害及防治方法探讨[J]. *四川食品与发酵*, 2006, **42**(2): 14-18.
- [22] Vairavamurthy A, Roberts J M, Newman L. Methods for determination of low molecular weight carbonyl compounds in the atmosphere: a review[J]. *Atmospheric Environmental. Part A. General Topics*, 1992, **26**(11): 1965-1993.
- [23] Kootstra P R, Herbold H A. Automated solid-phase extraction and coupled-column reversed-phase liquid chromatography for the trace-level determination of low-molecular-mass carbonyl compounds in air[J]. *Journal of Chromatography A*, 1995, **697**(1-2): 203-211.
- [24] USEPA. Compendium method TO- 11A, determination of formaldehyde in ambient air using adsorbent cartridge followed by high performance liquid chromatography (HPLC) [M]. (2nd ed.). US: EPA Cincinnati, 1999.
- [25] 冯艳丽. 广州室内室外空气中羰基化合物及其来源的初步研究[D]. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所, 2005. 3-4.
- [26] 余应新. 大气羰基化合物碳同位素及大气有机污染物研究[D]. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所, 2005. 4-5.
- [27] 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].
- [28] SCAQMD, Determination of particulate and VOC emissions from restaurant operations[M]. US: SCAQMD, 1997.
- [29] HJ 683-2014, 环境空气醛、酮类化合物的测定高效液相色谱法[S].
- [30] GB 18483-2001, 饮食业油烟排放标准[S].
- [31] Lee S Y. Emissions from street vendor cooking devices (charcoal grilling)[OL]. <http://www.epa.gov/nrmrl/pubs/600sr99048/600sr99048.pdf>, 2010-05-21.
- [32] 刘章现, 肖晓存, 杜玲枝, 等. 饮食业油烟净化技术与应用[J]. *环境污染治理技术与设备*, 2006, **7**(9): 103-106.

CONTENTS

Characterizing Beijing's Airborne Bacterial Communities in PM _{2.5} and PM ₁₀ Samples During Haze Pollution Episodes Using 16S rRNA Gene Analysis Method	WANG Bu-ying, LANG Ji-dong, ZHANG Li-na, <i>et al.</i> (2727)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Dustfall Trace Elements During Winter in Beijing	XIONG Qiu-lin, ZHAO Wen-ji, GUO Xiao-yu, <i>et al.</i> (2735)
Pollution Characteristics of Aldehydes and Ketones Compounds in the Exhaust of Beijing Typical Restaurants	CHENG Jing-chen, CUI Tong, HE Wan-qing, <i>et al.</i> (2743)
Emission Characteristics of Vehicle Exhaust in Beijing Based on Actual Traffic Flow Information	FAN Shou-bin, TIAN Ling-di, ZHANG Dong-xu, <i>et al.</i> (2750)
Chemical Compositions in PM _{2.5} and Its Impact on Visibility in Summer in Pearl River Delta, China	YANG Yi-hong, QU Qun, LIU Sui-xin, <i>et al.</i> (2758)
Health Risk Assessment of Tunnel Workers Based on the Investigation and Analysis of Occupational Exposure to PM ₁₀	XIANG Hua-li, YANG Jun, QIU Zhen-zhen, <i>et al.</i> (2768)
Analysis on Emission Inventory and Temporal-Spatial Characteristics of Pollutants from Key Coal-Fired Stationary Sources in Jiangsu Province by On-Line Monitoring Data	ZHANG Ying-jie, KONG Shao-fei, TANG Li-li, <i>et al.</i> (2775)
Hydrogen and Oxygen Isotopic Compositions of Precipitation and Its Water Vapor Sources in Eastern Qaidam Basin	ZHU Jian-jia, CHEN Hui, GONG Guo-li (2784)
Distribution Characteristics of Sedimentary Pigments in the Changjiang Estuary and Zhe-Min Coast and Its Implications	LI Dong, YAO Peng, ZHAO Bin, <i>et al.</i> (2791)
Nutrients Input Characteristics of the Yangtze River and Wangyu River During the "Water Transfers on Lake Taihu from the Yangtze River"	PAN Xiao-xue, MA Ying-qun, QIN Yan-wen, <i>et al.</i> (2800)
Pollution Characteristics of Surface Runoff of Typical Town in Chongqing City	WANG Long-tao, DUAN Bing-zheng, ZHAO Jian-wei, <i>et al.</i> (2809)
Effect of Water and Sediment Regulation on the Transport of Particulate Organic Carbon in the Lower Yellow River	ZHANG Ting-ting, YAO Peng, WANG Jin-peng, <i>et al.</i> (2817)
Concentration and Source of Dissolved Organic Carbon in Snowpits of the Tibetan Plateau	YAN Fang-ping, KANG Shi-chang, CHEN Peng-fei, <i>et al.</i> (2827)
Variations of Inorganic Carbon and Its Impact Factors in Surface-Layer Waters in a Groundwater-Fed Reservoir in Karst Area, SW China	LI Jian-hong, PU Jun-bing, YUAN Dao-xian, <i>et al.</i> (2833)
Modeling the Influencing Factors of Karstification and Karst Carbon Cycle in Laboratory	ZHAO Rui-yi, LÜ Xian-fu, DUAN Yi-fan (2843)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of HCHs and DDTs in Surface Water Bodies in Xinxiang	FENG Jing-lan, YU Hao, LIU Shu-hui, <i>et al.</i> (2849)
Comparison Study of the Alkanes in Different Aquifer Medium Under Qingmuguan Underground System	LIANG Zuo-bing, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (2857)
Spatial Distribution Characteristics of Different Species Mercury in Water Body of Changshou Lake in Three Gorges Reservoir Region	BAI Wei-yang, ZHANG Cheng, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (2863)
Influence of Marine Aquaculture Around Coal Power Plant on Mercury Species Change in Aquatic Ecological Environment	LIANG Peng, WANG Yuan-na, YOU Qiong-zhi, <i>et al.</i> (2870)
Using $\delta^{34}\text{S}\text{-SO}_4^{2-}$ and $\delta^{15}\text{N}\text{-NO}_3^-$, $\delta^{18}\text{O}\text{-NO}_3^-$ to Trace the Sources of Sulfur and Nitrate in Lihu Lake Underground Water, Guangxi, China	LI Rui, XIAO Qiong, LIU Wen, <i>et al.</i> (2877)
Ecological Effects of Algae Blooms Cluster; The Impact on Chlorophyll and Photosynthesis of the Water Hyacinth	LIU Guo-feng, HE Jun, YANG Yi-zhong, <i>et al.</i> (2887)
Influence of Natural Dissolved Organic Matter on the Passive Sampling Technique and Its Application	YU Shang-yun, ZHOU Yan-mei (2895)
Adhesion Force Analysis of Protein Fouling of PVDF Ultrafiltration Membrane Using Atomic Force Microscope	WANG Xu-dong, ZHOU Miao, MENG Xiao-rong, <i>et al.</i> (2900)
Influence of CNTs on Photodegradation of Salbutamol in Water Environment	WANG Qi, HAN Jia-ru, WEI Bo-fan, <i>et al.</i> (2906)
Preparation of $\beta\text{-In}_2\text{S}_3$ and Catalytic Degradation of Oxytetracycline Under Solar Light Irradiation	AI Cui-ling, ZHOU Dan-dan, ZHANG Rong-rong, <i>et al.</i> (2911)
Nitrogen Release Performance of Sediments in Drainage Pipeline	CHEN Hong, ZHUO Qiong-fang, XU Zhen-cheng, <i>et al.</i> (2918)
Analysis of Precipitation Formation in Biofilm CANON Reactor and Its Effect on Nitrogen Removal	FU Kun-ming, WANG Hui-fang, ZUO Zao-rong, <i>et al.</i> (2926)
Optimization of Energy Saving Measures with ABR-MBR Integrated Process	WU Peng, LU Shuang-jun, XU Yue-zhong, <i>et al.</i> (2934)
Abundance and Community Composition of Ammonia-Oxidizing Archaea in Two Completely Autotrophic Nitrogen Removal over Nitrite Systems	GAO Jing-feng, LI Ting, ZHANG Shu-jun, <i>et al.</i> (2939)
Formation Mechanism of Aerobic Granular Sludge and Removal Efficiencies in Integrated ABR-CSTR Reactor	WU Kai-cheng, WU Peng, XU Yue-zhong, <i>et al.</i> (2947)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Surface Soil of Pearl River Delta Economic Zone	DOU Lei, YANG Guo-yi (2954)
Risk Assessment of Heavy Metal Contamination in Farmland Soil in Du'an Autonomous County of Guangxi Zhuang Autonomous Region, China	WU Yang, YANG Jun, ZHOU Xiao-yong, <i>et al.</i> (2964)
Assessment of Heavy Metal Pollution and Its Health Risk of Surface Dusts from Parks of Kaifeng, China	DUAN Hai-jing, CAI Xiao-qiang, RUAN Xin-ling, <i>et al.</i> (2972)
Responses of Soil and Plant ^{15}N Natural Abundance to Long-term N Addition in an N-Saturated <i>Pinus massoniana</i> Forest in Southwest China	LIU Wen-jing, KANG Rong-hua, ZHANG Ting, <i>et al.</i> (2981)
Latitudinal Changes in Plant Stoichiometric and Soil C, N, P Stoichiometry in Loess Plateau	LI Ting, DENG Qiang, YUAN Zhi-You, <i>et al.</i> (2988)
Open-top Chamber for <i>in situ</i> Research on Response of Mercury Enrichment in Rice to the Rising Gaseous Elemental Mercury in the Atmosphere	CHEN Jian, WANG Zhang-wei, ZHANG Xiao-shan, <i>et al.</i> (2997)
Influence of Uranium in <i>Pteris vittata</i> L. Inoculated by Arbuscular Mycorrhizal Fungus	ZHENG Wen-jun, WANG Ming-yuan (3004)
Impact on the Microbial Biomass and Metabolic Function of Carbon Source by Black Soil During Rice Cultivation	ZHAO Zhi-rui, CUI Bing-jian, HOU Yan-lin, <i>et al.</i> (3011)
Effect of Decomposing Products of Immobilized Carries on Desorption of Pyrene in Contaminated Soil	TONG Dong-li, SHUANG Sheng-qing, LI Xiao-jun, <i>et al.</i> (3018)
Solidification/Stabilization of Chromite Ore Processing Residue (COPR) Using Zero-Valent Iron and Lime-Activated Ground Granulated Blast Furnace Slag	CHEN Zhong-lin, LI Jin-chunzi, WANG Bin-yuan, <i>et al.</i> (3026)
Stabilization of Cadmium Contaminated Soils by Ferric Ion Modified Attapulgite (Fe/ATP): Characterizations and Stabilization Mechanism	YANG Rong, LI Hong-bo, ZHOU Yong-li, <i>et al.</i> (3032)
Improving Agricultural Safety of Soils Contaminated with Polycyclic Aromatic Hydrocarbons by In Situ Bioremediation	JIAO Hai-hua, PAN Jian-gang, XU Sheng-jun, <i>et al.</i> (3038)
Competence of Cd Phytoremediation in Cd-OCDF Co-contaminated Soil Using <i>Mirabilis jalapa</i> L.	ZHANG Xing-li, ZOU Wei, ZHOU Qi-xing (3045)
Effects of Soil Moisture on Phytoremediation of As-Contaminated Soils Using As-Hyperaccumulator <i>Pteris vittata</i> L.	LIU Qiu-xin, YAN Xiu-lan, LIAO Xiao-yun, <i>et al.</i> (3056)
Effects of Phosphate Rock and Decomposed Rice Straw Application on Lead Immobilization in a Contaminated Soil	TANG Fan, HU Hong-qing, SU Xiao-juan, <i>et al.</i> (3062)
Residue and Degradation of Roxarsone in the System of Soil-Vegetable	SHAO Ting, YAO Chun-xia, SHEN Yuan-yuan, <i>et al.</i> (3068)
Acute Toxicity and Safety Assessment of Three Typical Organic Pollutants to Two Aquatic Organisms	YANG Yang, LI Ya-jie, CUI Yi-bin, <i>et al.</i> (3074)
Effects of Oil Pollutants on the Performance of Marine Benthonic Microbial Fuel Cells and Its Acceleration of Degradation	MENG Yao, FU Yu-bin, LIANG Sheng-kang, <i>et al.</i> (3080)
Microwave In-situ Regeneration of Cu-Mn-Ce/ZSM Catalyst Adsorbed Toluene and Distribution of Bed Temperature	HU Xue-jiao, BO Long-li, LIANG Xin-xin, <i>et al.</i> (3086)
Impact of Thermal Treatment on Biogas Production by Anaerobic Digestion of High-solid-content Swine Manure	HU Yu-ying, WU Jing, WANG Shi-feng, <i>et al.</i> (3094)
Impact of Phosphogypsum Wastes on the Wheat Growth and CO ₂ Emissions and Evaluation of Economic-environmental Benefit	LI Ji, WU Hong-sheng, GAO Zhi-qiu, <i>et al.</i> (3099)
Status Quo, Uncertainties and Trends Analysis of Environmental Risk Assessment for PFASs	HAO Xue-wen, LI Li, WANG Jie, <i>et al.</i> (3106)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2015年8月15日 第36卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 8 Aug. 15, 2015

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行