

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.10  
第41卷 第10期

目次

青岛春节期间大气污染特征及烟花燃放一、二次贡献分析 ..... 方天歌, 姚小红, 孟赫, 陈春强 (4345)

基于在线观测的天津市 PM<sub>2.5</sub> 污染特征及来源解析 ..... 肖致美, 徐虹, 李立伟, 李鹏, 元洁, 唐邈, 杨宁, 郑乃源, 陈魁 (4355)

2017~2018年北京大气 PM<sub>2.5</sub> 中水溶性无机离子特征 ..... 李欢, 唐贵谦, 张军科, 刘琴, 闫广轩, 程萌田, 高文康, 王迎红, 王跃思 (4364)

北京南部城区 PM<sub>2.5</sub> 中碳质组分特征 ..... 董贵明, 唐贵谦, 张军科, 刘琴, 闫广轩, 程萌田, 高文康, 王迎红, 王跃思 (4374)

成都市冬季3次灰霾污染过程特征及成因分析 ..... 冯小琼, 陈军辉, 尹寒梅, 徐雪梅, 熊文朋, 梅林德, 钱骏, 刘政 (4382)

南京北郊黑碳气溶胶分布特征及来源 ..... 谢锋, 林煜棋, 宋文怀, 鲍孟盈, 章炎麟 (4392)

2019年10~12月京津冀及周边“2+26”城市重污染减排效果评估 ..... 朱媛媛, 高愈霄, 汪巍, 鲁宁, 许荣, 刘冰, 李健军 (4402)

保定市大气污染变化趋势及特征 ..... 苟银寅, 张凯, 李金娟, 吕文丽, 竹双, 黎洁, 何珊珊, 郑悦, 支敏康 (4413)

郑州市 VOCs 组分排放清单及其臭氧生成潜势 ..... 卢轩, 张瑞芹, 韩跃钢 (4426)

郑州市少数民族运动会期间 O<sub>3</sub> 及 VOCs 污染特征的演变和评估 ..... 赵金帅, 于世杰, 王楠, 马双良, 王维思, 尹沙沙, 李一丹, 张栋, 张瑞芹 (4436)

我国木器涂料及汽车涂料中挥发性有机物特征 ..... 柯云婷, 孙宇航, 成海荣, 刘锐源, 黄皓旻, 范丽雅, 叶代启 (4446)

典型脱硫工艺对燃煤锅炉烟气颗粒物的影响 ..... 张进生, 吴建会, 吕瑞鹤, 宋丹林, 黄凤霞, 张裕芬, 冯银厂 (4455)

不同居民燃煤炉具大气污染物排放差异性及其减排分析 ..... 张熠晨, 薛陈利, 刘杰, 钟连红, 薛亦峰 (4462)

天津市2017年移动源高时空分辨率排放清单 ..... 刘庚, 孙世达, 孙露娜, 金嘉欣, 房键旭, 宋鹏飞, 王婷, 吴琳, 毛洪钧 (4470)

四川省基于第二次污染源普查数据的人为源大气污染源排放清单及特征 ..... 徐晨曦, 陈军辉, 李媛, 何敏, 冯小琼, 韩丽, 刘政, 钱骏 (4482)

抗大气复合污染的城市森林植物初步筛选 ..... 李品, 卫妍妍, 冯兆忠 (4495)

宝鸡市绿植叶片重金属空间分布及污染特征 ..... 张军, 梁青芳, 高煜 (4504)

潮汕地区入海河流及水生生物中 PPCPs 分布特征及风险评估 ..... 秀措, 王尘辰, 吕永龙, 陆轶峰, 王聪, 张梦, 曹祥会 (4514)

泉州山美水库及入库河流沉积物中多溴二苯醚的时空分异和降解分析 ..... 韩文亮, 刘豫, 冯凯文 (4525)

长江上游典型山地农业小流域浅层地下水硝态氮时空变异特征及影响因素 ..... 江南, 周明华, 李红, 李子阳, 章熙峰, 朱波 (4539)

沱江流域典型农业小流域氮和磷排放特征 ..... 王宏, 徐娅玲, 张奇, 林超文, 翟丽梅, 刘海涛, 蒲波 (4547)

基于 DPeRS 模型的海河流域面源污染潜在风险评估 ..... 冯爱萍, 王雪蕾, 徐逸, 黄莉, 吴传庆, 王昌佐, 王洪亮 (4555)

降水空间异质性和非点源关键源区识别面积变化的影响 ..... 高晓曦, 左德鹏, 马广文, 徐宗学, 胡小红, 李佩君 (4564)

硅藻群落指示的近50年来大理西湖湖泊生态系统演变规律 ..... 张晨雪, 徐敏, 董一凡, 王荣, 方凤满 (4572)

海陆交互带土壤及河流沉积物中镉含量及形态分布特征 ..... 王芳婷, 陈植华, 包科, 赵信文, 孟宪萌, 黄长生 (4581)

内蒙古河套灌区排水干沟微塑料赋存特征及质量估算 ..... 王志超, 杨帆, 杨文焕, 李卫平, 杨建林, 秦一鸣, 李河 (4590)

透水/不透水格局特征对汇水单元径流污染的影响 ..... 姜智绘, 廖云杰, 谢文霞, 李佳, 房志达, 赵洪涛, 李叙勇 (4599)

铁铜双金属有机骨架 MIL-101(Fe, Cu) 活化双氧水降解染料性能 ..... 梁贺, 刘锐平, 安晓强, 刘会娟 (4607)

纳米 Cu<sup>0</sup>@Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 活化 PMS 降解对-硝基苯酚的协同反应机制 ..... 石清清, 蒲生彦, 杨犀 (4615)

紫外活化过硫酸盐降解水中三氯蔗糖动力学和机制 ..... 余韵, 陆金鑫, 吕贞, 彭明国, 徐彬煜, 杜尔登, 郑璐 (4626)

污水生物处理工艺低温下微生物种群结构 ..... 尚越飞, 王申, 宗倪, 杜海洲, 张鑫, 齐嵘, 杨敏 (4636)

不同 DN 与 PN-ANAMMOX 耦合工艺处理中晚期垃圾渗滤液的微生物群落分析 ..... 陆明羽, 李祥, 黄勇, 殷记强, 方文焯 (4644)

全程自养颗粒污泥快速启动及混合营养型脱氮性能分析 ..... 齐泽坤, 王建芳, 钱飞跃, 刘雨馨, 乔伟, 李小蝶 (4653)

不同低碳氮比废水中好氧颗粒污泥的长期运行稳定性 ..... 袁强军, 张宏星, 陈芳媛 (4661)

潮土细菌及真菌群落对化肥减量配施有机肥和秸秆的响应 ..... 吴宪, 王蕊, 胡荷, 修伟明, 李刚, 赵建宁, 杨殿林, 王丽丽, 王欣奕 (4669)

不同轮作模式下作物根际土壤养分及真菌群落组成特征 ..... 孙倩, 吴宏亮, 陈阜, 康建宏 (4682)

酒糟生物炭短期施用对贵州黄壤氮素有效性及细菌群落结构多样性的影响 ..... 张萌, 刘彦伶, 魏全全, 苟久兰 (4690)

稻油不同轮作模式对农田甲烷和氧化亚氮排放的影响 ..... 陈友德, 赵杨, 高杜娟, 罗先富, 崔婷, 童中权, 吴家梅 (4701)

解淀粉芽孢杆菌生物有机肥防控土壤氮挥发 ..... 杨亚红, 薛莉霞, 孙波, 张宝, 庄绪亮, 庄国强, 白志辉 (4711)

外源磷对镉胁迫下水稻生长及镉累积转运的影响 ..... 霍洋, 仇银燕, 周航, 胡雨丹, 邓鹏辉, 魏宾纭, 辜娇峰, 刘俊, 廖柏寒 (4719)

水稻不同生育期 As 胁迫下 As 累积关键生育期 ..... 邓鹏辉, 蔡雅琴, 周航, 刘雅, 杨文俊, 辜娇峰, 廖柏寒 (4726)

铅锌矿区玉米中重金属污染特征及健康风险评价 ..... 周艳, 王金忠, 李群, 黄剑波, 张胜田, 龙涛, 邓绍坡 (4733)

浙江省台州市电子垃圾拆解地多溴联苯醚浓度水平分布特征和迁移趋势 ..... 魏抱楷, 柳晨, 王英, 金军 (4740)

重庆市酉阳县南部农田土壤重金属污染评估及来源解析 ..... 王锐, 邓海, 严明书, 何忠库, 周皎, 梁绍标, 曾琴琴 (4749)

重庆市畜禽粪便及菜田土壤中四环素类抗生素生态风险评价 ..... 彭秋, 王卫中, 徐卫红 (4757)

《环境科学》征订启事 (4435) 《环境科学》征稿简则 (4445) 信息 (4606, 4625, 4732)

# 不同居民燃煤炉具大气污染物排放差异性及其减排分析

张熠晨<sup>1,2</sup>, 薛陈利<sup>1,2</sup>, 刘杰<sup>1,2</sup>, 钟连红<sup>2\*</sup>, 薛亦峰<sup>2\*</sup>

(1. 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048; 2. 北京市环境保护科学研究院, 国家城市环境污染控制工程技术研究中心, 北京 100037)

**摘要:** 为探究不同类型炉具的大气污染物排放差异, 本研究选择 5 种常见的新型居民燃煤炉具(方型煤炉具、折流换热炉具、炕暖炊一体化炉具、气化正烧及气化反烧炉具)在实验室内进行模拟燃烧和大气污染物排放水平监测, 定量评估不同炉具的环境效果, 识别污染排放水平差异的影响因素及原因, 从而提出炉具研发设计等污染减排的改进建议。结果表明: ①不同炉具大气污染物排放差异较大, 炕暖炊一体的炉具污染排放强度最大, 3 种大气污染物(SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>和颗粒物)的排放强度为 2.9 kg·t<sup>-1</sup>, 是平均值的 1.6 倍; 应用方型煤技术的炉具大气污染物排放强度最低, 是平均值的 65%。②不同炉具在不同燃烧阶段其气态污染物排放也呈现出明显的差异和特征。旺火阶段方型煤炉具 NO<sub>x</sub> 排放浓度为 0.49 mg·m<sup>-3</sup>, 相较于其他类型炉具降低了 45%~72%; 气化反烧炉具的 SO<sub>2</sub> 排放浓度为 1.38 mg·m<sup>-3</sup>, 相较于其他类型炉具最高降低了 28%。③影响炉具大气污染物排放因素包括应用技术及燃烧类型, 采用方型煤及气化反烧技术的炉具环境效益较好, 但两类炉具的经济成本分别达到 2.0 万元和 1.8 万元, 明显高于其他类型炉具。④考虑不同炉具污染排放差异, 建议采取差异化的经济政策和严格的排放和产品标准, 推广使用节能环保型炉具, 降低燃煤炉具大气污染物排放。

**关键词:** 居民燃煤炉具; 大气污染; 排放浓度; 排放因子; 污染控制对策

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)10-4462-08 DOI: 10.13227/j.hjkk.202002188

## Investigation on the Emission Difference of Air Pollutants from Common Residential Coal Stoves and Suggestions for Emission Reduction

ZHANG Yi-chen<sup>1,2</sup>, XUE Chen-li<sup>1,2</sup>, LIU Jie<sup>1,2</sup>, ZHONG Lian-hong<sup>2\*</sup>, XUE Yi-feng<sup>2\*</sup>

(1. College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China; 2. National Engineering Research Center of Urban Environmental Pollution Control, Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection, Beijing 100037, China)

**Abstract:** To explore the difference in the emission of air pollutants from coal stoves, five new and common residential coal stoves (square briquette, baffled heat exchange, heating and cooking integrated gasification positive burning, and gasification reverse burning stove) were selected. The emission level of major air pollutants was determined using simulated combustion in the laboratory for quantitatively evaluating the environmental effects of different coal stoves. Moreover, the factors and reasons for the differences were identified, and suggestions for the reduction of emission were proposed. The results showed that: ① the emissions of air pollutants from different coal stoves were significantly different; the heating and cooking integrated stove had the largest emission intensity (2.9 kg·t<sup>-1</sup>) of air pollutants (SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, and TSP), which was 1.6 times of the average value, and the square briquette stove had the lowest emission level, which was 65% of the average value. ② The emissions of gaseous pollutants from the coal stoves in different combustion stages also showed evident differences. In the high-fire stage, the NO<sub>x</sub> emission concentration of the square briquette stove was 0.49 mg·m<sup>-3</sup>, which was 45%~72% lower than that of the other stoves; the SO<sub>2</sub> emission concentration of the gasification reverse burning stove was 1.38 mg·m<sup>-3</sup>, which was 28% lower than that of the other stoves. ③ The application technology and combustion type were the main factors affecting the emission levels of the coal stoves. The stove with square briquette technology and gasification reverse burning technology could have great environmental benefit. However, the cost of the two stoves was 20 and 18 thousand yuan, respectively, which was clearly higher than that of the other types of stoves. ④ Considering the difference in the emission of air pollutants from the different stoves, it was suggested to adopt differentiated economic policy and strict emission and product standards, promoting the use of energy-saving and environment-friendly coal stoves to reduce the emission of air pollutants from coal-fired stoves.

**Key words:** residential coal stoves; air pollution; emission concentration; emission factors; control measure

燃煤过程会释放出大量的污染物, 包括颗粒物、二氧化硫(SO<sub>2</sub>)、氮氧化物(NO<sub>x</sub>)、挥发性有机物(VOCs)、一氧化碳(CO)、多环芳烃(PAHs)、多氯联苯(PCBs)和二噁英(PCDD/Fs)<sup>[1-5]</sup>等有害物质, 给周边环境及人体健康造成严重影响<sup>[6]</sup>。燃煤发电、燃煤工业锅炉和居民燃煤等燃煤污染源是中国城市大气污染物排放的主要贡献来源<sup>[7]</sup>, 在采暖季, 居

民燃煤源排放的大气污染物因在静稳天气中难以扩散而大量累积<sup>[8]</sup>, 对大气PM<sub>2.5</sub>污染贡献可达15%~

收稿日期: 2020-02-26; 修订日期: 2020-04-21

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0211406)

作者简介: 张熠晨(1997~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为大气污染控制, E-mail: zycyc6814@163.com

\* 通信作者, E-mail: zhonghianhong@cee.cn; xueyifeng@cee.cn

27%<sup>[9~12]</sup>. 因此,控制居民燃煤大气污染排放,对于中国大气环境质量改善具有重要的作用.

国内外学者在居民燃煤对于大气环境质量的影响、排放定量表征等方面开展大量的研究,陆雅静等<sup>[13]</sup>对石家庄市居农村居民散煤燃烧排放量进行了估算;毋波波等<sup>[14]</sup>研究了1995~2015年京津冀居民燃煤消耗历史活动水平,分析了大气污染物排放特征及空间分布情况;刘亚男等<sup>[15,16]</sup>通过检测民用煤燃料燃烧排放的大气污染物碳质组分、VOCs及水溶性无机离子组成,总结了民用煤燃烧的污染排放特征;Zhi<sup>[17]</sup>研究了民用煤炉的碳颗粒排放特性;Cui等<sup>[18]</sup>研究了贵州省居民燃煤产生的汞排放率,量化了居民住宅区的汞排放量. 此前研究更多集中在老式的燃煤炉具,随着大气污染控制措施的不断推进,北方地区使用的燃煤炉具有所改进,新式居民燃煤炉具在山东、辽宁、内蒙古和河北等地区得到一定的推广和应用,但对于不同新式居民燃煤炉具大气污染物排放差异及影响因素等方面的研究较少.

因此,为探究不同居民燃煤炉具大气污染物排放差异,本研究选择5种常见和新式的居民燃煤炉具在实验室内进行模拟燃烧实验,对其污染排放水

平进行实际监测并对其所产生的环境效益进行评估. 通过分析不同炉具的污染排放差异,识别其影响因素及原因,结合不同炉具的经济成本,提出炉具设计改进等污染减排建议,以期降低居民燃煤大气污染排放工作提供参考和支撑.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究对象

居民燃煤炉具类型较多,目前市场有多达上百种的炉具型号,采用不同燃烧和技术类型. 按照燃烧类型可分为正烧炉具及反烧炉具. 为探讨不同的技术类型和燃烧类型炉具大气污染物排放差异,本研究根据课题组在农村地区的实地调研和问卷调查结果,选择5种常见的、新式的居民燃煤炉具(方型煤炉具、折流换热炉具、炕暖炊一体化炉具及气化燃烧炉具)进行实验室模拟燃烧实验,不同炉具结构如图1所示,具体技术信息如表1所示. 5种燃煤炉具排放类型一致,除方型煤炉具外,其他4种炉具的颗粒物会通过进料时对炉膛的搅动排入大气. 具有二次送风设计的炉具能够使燃烧更加充分,减少大气污染物的排放.

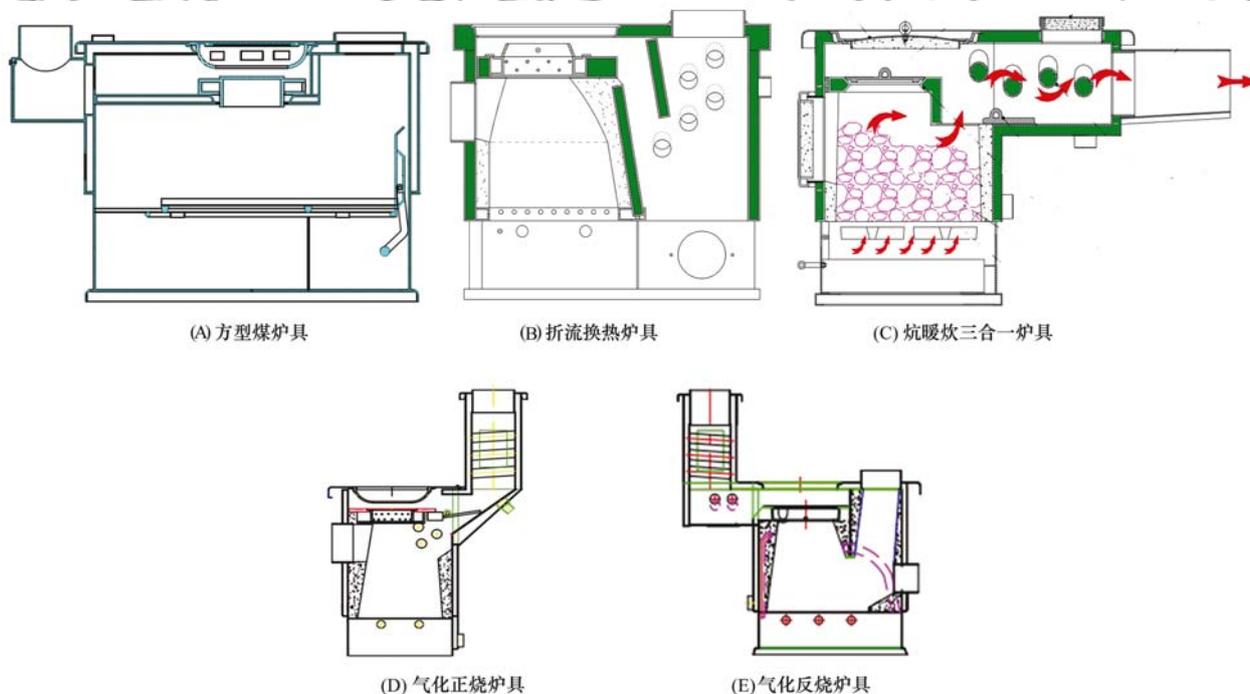


图1 5种居民燃煤炉具示意

Fig. 1 Schematic diagram of five coal-fired stoves

### 1.2 实验室模拟燃烧平台

本研究采用美国环境保护署(EPA)推荐的烟罩法<sup>[19]</sup>进行实验,实验室模拟燃烧平台设置(图2)在北京市环境保护科学研究院实验室房间内,包括集气罩、稀释管道、阀门、过滤器、风机和排气筒等. 依

次对选定的5种炉具进行模拟燃烧实验,每个炉具进行2~3组实验和大气污染物排放监测. 具体操作流程为:在炉膛内放入适量的煤后,用液化石油气引燃,引燃时间为5~15 min,引燃结束后,旺火燃烧40~80 min,然后封闭炉门,封火燃烧,12 h为一循

环. 在燃烧过程中通过风机的引风作用将洁净空气与高浓度烟气一同吸入烟气集气罩中,使其在烟道内混合均匀,并在监测段进行颗粒物及气态污染物采样. 根据文献[20]的要求,5种炉具统一使用硫分0.3%、灰分25%、挥发分11%和发热量 $24 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的型煤.

### 1.3 大气污染物监测及分析方法

本研究使用稀释采样法<sup>[21, 22]</sup>,即烟气与空气混

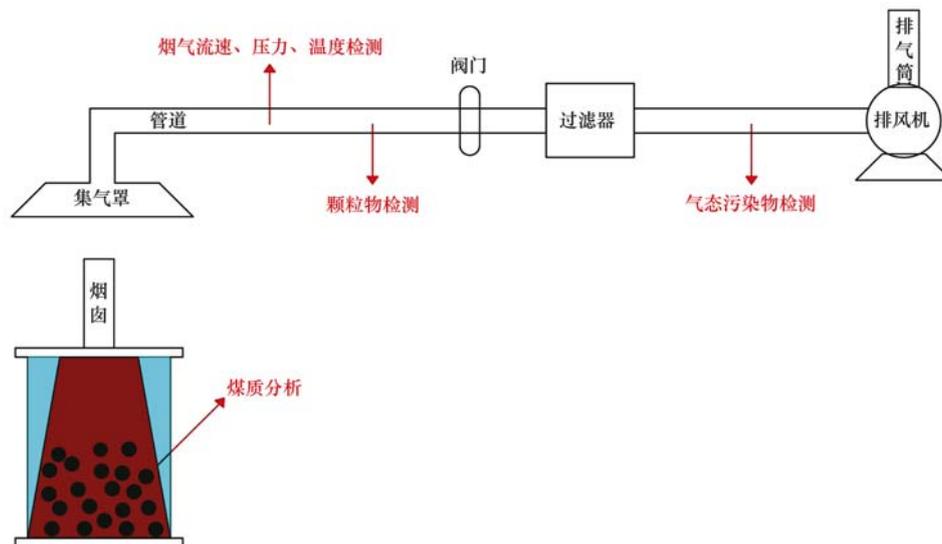


图2 居民燃煤实验室模拟燃烧平台

Fig. 2 Schematic diagram of simulated combustion platform of resident coal stove in the laboratory

合经过稀释降温后再对大气污染物进行测量的方法,避免了直接从烟气中采样时流速不稳、高温高污染浓度等情况的干扰. 具体大气污染物监测及分析方法如表2. 对于颗粒物,本研究采用清华大学研发的“IV501 双级虚拟撞击颗粒物采样器”进行连续采样,使用37 mm 滤膜对颗粒物进行收集,基于不同粒径颗粒物惯性大小差异对颗粒物进行分级. 采样前校正仪器,并将采样所用的石英膜置于马弗炉中 $600^\circ\text{C}$ 焙烧4 h,冷却后置于干燥器平衡24 h,称重后放入铝箔中待用. 采样结束后,将滤膜置于膜盒中,密封冷藏保存至分析. 对于气态污染物,使用了美国 Thermo Fisher 公司研发的  $\text{NO}-\text{NO}_2-\text{NO}_x$  分析仪(42i)、 $\text{SO}_2$  分析仪(43i)和  $\text{CO}$  分析仪(48i)进行连续监测.

表2 主要大气污染物监测及分析方法

大气污染物	仪器名称	仪器方法
$\text{NO}_x$	$\text{NO}-\text{NO}_2-\text{NO}_x$ 分析仪	化学发光法
$\text{SO}_2$	$\text{SO}_2$ 分析仪	脉冲荧光法
$\text{CO}$	$\text{CO}$ 分析仪	红外吸收法
颗粒物	IV501 双级虚拟撞击颗粒物采样器	虚拟撞击原理

### 1.4 排放因子核算

采用排放因子这一指标来表征不同炉具大气污

表1 5种常用新式居民燃煤炉具技术和燃烧类型

Table 1 Specific information of five new and common residential coal stoves

炉具	技术类型	燃烧类型	特点
A	方型煤技术	反烧	横向平推式进料方式
B	折流换热技术	正烧	二次风设计、折流套版结构
C	炊暖炕一体化技术	正烧	二次风设计
D	气化燃烧技术	正烧	气化燃烧、二次风设计
E	气化燃烧技术	反烧	气化燃烧、二次风设计

染物排放差异. 根据监测得到的大气污染物排放浓度,结合烟量及燃料消耗量等参数,核算得到不同炉具大气污染物的排放因子<sup>[23]</sup>. 如公式(1)所示:

$$EF = (M \times L) / (W \times 10^{-3}) \quad (1)$$

式中,EF 为污染物的排放因子,  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ;  $M$  为大气污染物的质量浓度,  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ;  $L$  为标准状况下烟量,  $\text{m}^3$ ;  $W$  为所消耗的燃煤质量,  $\text{kg}$ .

### 1.5 炉具经济成本核算

本研究采用的方法模型为在不考虑政府补贴和税惠情况下的经济成本计算方法,根据实地调研得到的各类经济成本数据,核算得到不同炉具经济成本,如公式(2)所示:

$$C = C_p + (C_e + C_m) \times i \quad (2)$$

式中, $C$  表示经济成本;  $C_p$  表示购置成本;  $C_e$  表示燃料成本;  $C_m$  表示维护成本;  $i$  为使用年限.

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同炉具大气污染物排放差异

根据监测结果,不同炉具大气污染物排放强度具有明显的差异,如图3(a)所示. 5种炉具3种大气污染物( $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 和TSP)排放强度之和分别为1.20、1.80、2.88、1.82及1.47  $\text{kg}\cdot\text{t}^{-1}$ ,平均值为

$1.83 \text{ kg}\cdot\text{t}^{-1}$ , 相较于老式煤炉的污染排放有明显下降<sup>[24]</sup>, 这是因为 5 种新式炉具在燃烧方式、配风设计及炉膛结构等方面进行了更新. 5 种新式炉具中, 炕暖炊一体的正烧炉具 C 污染排放强度最大, 可达  $2.88 \text{ kg}\cdot\text{t}^{-1}$ , 是平均值的 1.6 倍, 与其燃烧效率较低

有关. 方型煤技术的横向反烧炉具 A 污染排放强度最小, 为  $1.20 \text{ kg}\cdot\text{t}^{-1}$ , 是平均值的 65%, 其应用方型煤技术及横向反烧技术使燃煤充分燃烧, 提高了燃烧效率, 降低了燃烧温度, 从而降低了大气污染物的排放强度.

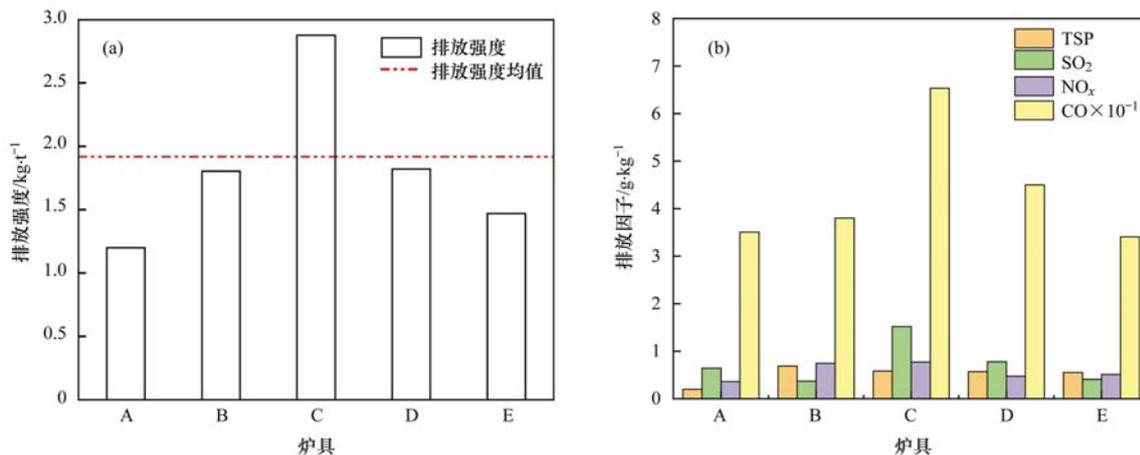


图3 不同燃煤炉具大气污染物排放差异

Fig. 3 Difference in emission of air pollutants from different coal-fired stoves

如图 3(b) 所示, 炉具 C 燃烧效率低, 不仅表现出较高的 CO 排放因子 ( $65.3 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ),  $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_x$  排放因子也是 5 种炉具中最高的. 炉具 E 采用气化技术和反烧技术, 有效地提高了燃烧效率, 产生了低排放的效果, 因此其 CO 及  $\text{SO}_2$  排放因子较小, 分别为  $34.0 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  及  $0.40 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ . 方型煤炉具 A 采用横向反烧的燃烧方式有效地提高了燃烧效率, 降低了燃烧温度, 有效减少了  $\text{NO}_x$  及 CO 的排放, 排放因子分别为  $0.36 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  及  $36.4 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ . 方型煤炉具 A 的颗粒物排放强度明显低于其他炉具, 产生显著差异的原因是炉具采用的方型煤特有的蜂窝煤煤型及平推式进料方式, 有利于降低燃烧温度, 在进料过程中对炉膛的扰动低, 使得颗粒物排放强度最小. 其他类型炉具的总颗粒物 (TSP) 的排放因子在  $0.47 \sim 0.68 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  之间, 方型煤炉具仅有  $0.19 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 减排效果可达 60% 以上, 减排效果明显; 5 种炉具的  $\text{PM}_{10}$  和  $\text{PM}_{2.5}$  平均排放强度分别为  $0.41 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  及  $0.18 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  占 TSP 的比例分别为 91% 和 79%, 颗粒物粒径主要集中在  $2.5 \mu\text{m}$  以下, 以细颗粒物为主, 且 5 种炉具  $\text{PM}_{10}$  和  $\text{PM}_{2.5}$  排放差异与 TSP 表现出较高的一致性.

## 2.2 不同燃烧阶段 $\text{SO}_2$ 和 $\text{NO}_x$ 的排放变化

炉具在不同燃烧阶段其气态污染物排放也呈现出明显的差异和特征. 不同类型的炉具在点火、旺火和封火阶段的  $\text{SO}_2$  及  $\text{NO}_x$  排放情况如图 4(a) 及图 4(c) 所示, 可以看到, 旺火阶段  $\text{SO}_2$  及  $\text{NO}_x$  污染物排放水平较高, 与该阶段燃烧比较充分有关, 也说明

了燃烧类型是影响污染排放最重要的因素. 气化反烧炉具和方煤炉具在点火、旺火及封火阶段都表现出较低的气态污染物排放水平.

在旺火阶段,  $\text{NO}_x$  及  $\text{SO}_2$  污染物排放浓度相对较高. 如图 4(d) 所示, 5 种炉具在旺火阶段的  $\text{SO}_2$  排放量均值为  $0.49 \sim 1.62 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  之间, 方型煤炉具 A 在旺火阶段的  $\text{SO}_2$  排放水平最低, 为  $0.49 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ , 炕暖炊炉具 C 的  $\text{SO}_2$  排放水平最高, 平均排放浓度为  $1.62 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ , 最高实时浓度可达  $2.50 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  [图 4(c)]. 如图 4(b) 所示, 5 种炉具在旺火阶段的  $\text{NO}_x$  排放量均值为  $1.38 \sim 1.88 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  之间, 其中气化反烧炉具 E 的  $\text{NO}_x$  污染物排放水平较低,  $\text{NO}_x$  的平均排放浓度为  $1.38 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ , 折流换热炉具的  $\text{NO}_x$  排放水平较高, 最高实时浓度可达  $4.12 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  [图 4(a)]. 煤中含硫量是影响  $\text{SO}_2$  生成的最主要的因素<sup>[25]</sup>, 旺火燃烧阶段燃料消耗量最大, 另外高温下燃料中的硫更易于被氧化, 导致了  $\text{SO}_2$  的排放量在旺火燃烧阶段大幅提高; 有研究表明<sup>[26,27]</sup>, 热氮在低温条件下难以形成, 在炉膛温度达到  $1000^\circ\text{C}$  以上后, 热氮的释放速率快速上升, 而民用燃煤炉具的旺火燃烧阶段炉内温度处于热氮形成的温度范围, 因此造成了大量的  $\text{NO}_x$  污染物排放.

通过不同燃烧阶段气态污染物排放浓度分布情况可以看到, 5 种炉具在不同阶段表现出环境效益的差异, 气化反烧炉具 E 在点火、旺火及封火燃烧过程中的  $\text{NO}_x$  排放强度均属较低水平, 封火阶段的

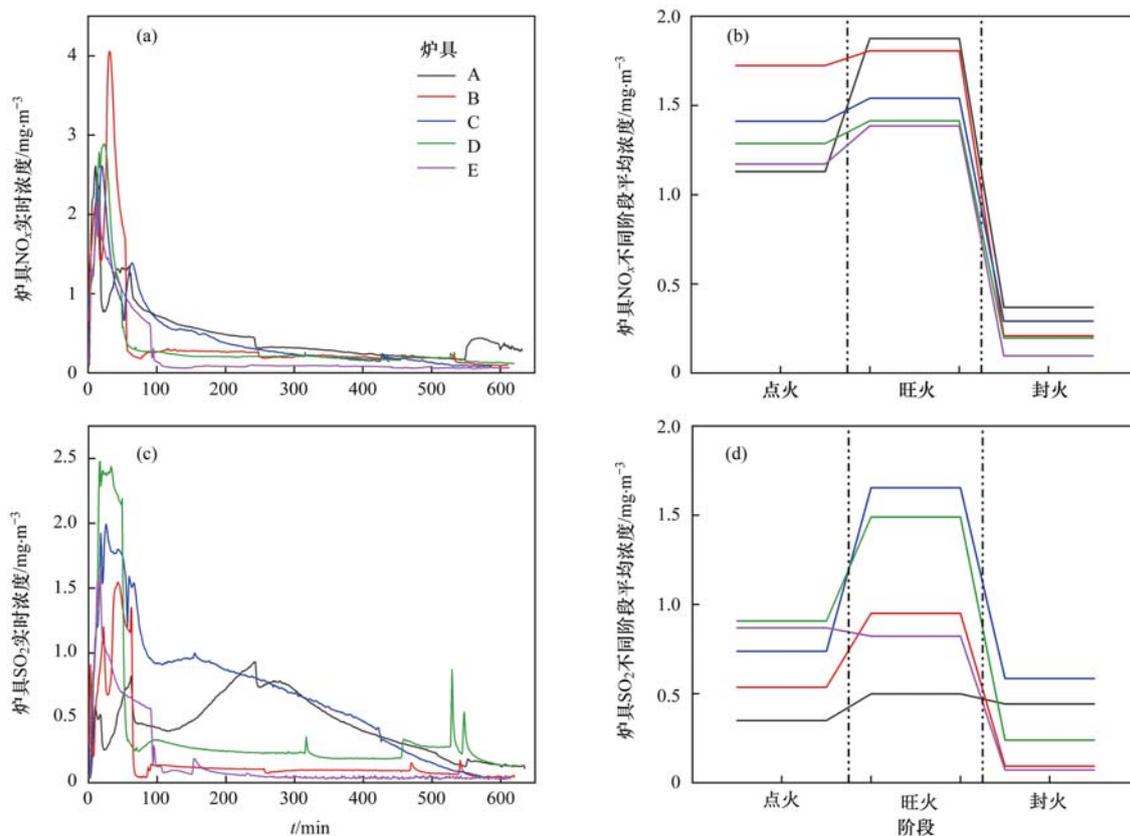


图4 炉具不同燃烧阶段气态污染物排放差异

Fig. 4 Difference in emission of gaseous pollutants at different combustion stages of residential coal stoves

SO<sub>2</sub> 排放强度属最低水平; 方型煤横向反烧炉具 A 在点火及旺火燃烧过程中的 SO<sub>2</sub> 排放强度属较低水平. 排放差异与炉具的炉膛设计、燃烧技术及温度控制和优化具有很大的关系.

### 2.3 炉具排放差异的影响因素分析

炉具的技术类型和燃烧类型是影响其大气污染物排放的重要因素, 不同技术类型和燃烧类型炉具主要大气污染物排放水平如图 5 所示. 如图 5(a) 所示, 在不同技术类型中, 方型煤技术类型的炉具排放水平最低, 这是由于方型煤技术炉具采用了长方形的燃烧室结构、横向推进的燃烧方式, 3 次进风供

氧的结构设计使燃料燃烧更加充分; 炕暖炊一体化技术类型的炉具排放水平最高, 其 SO<sub>2</sub> 的排放因子达到了 1.56 g·kg<sup>-1</sup>, 远高于其他技术类型炉具. 对于 TSP, 方型煤技术炉具技术排放水平最低, 仅有 0.23 g·kg<sup>-1</sup>, 这是因为炉具特有的平推式进料使在进行燃料的添加时无需搅动炉膛内的燃烧环境, 可避免炉灰因烟囱负压带入到大气当中, 对燃烧过程中产生的颗粒物排放进行了有效减排, 同时反烧的燃烧方式减少了挥发分的析出, 有效降低了颗粒物的排放. 方型煤炉具的 NO<sub>x</sub> 排放水平也是最低, 仅为 0.36 g·kg<sup>-1</sup>, 这是因为其特有的炉具结构

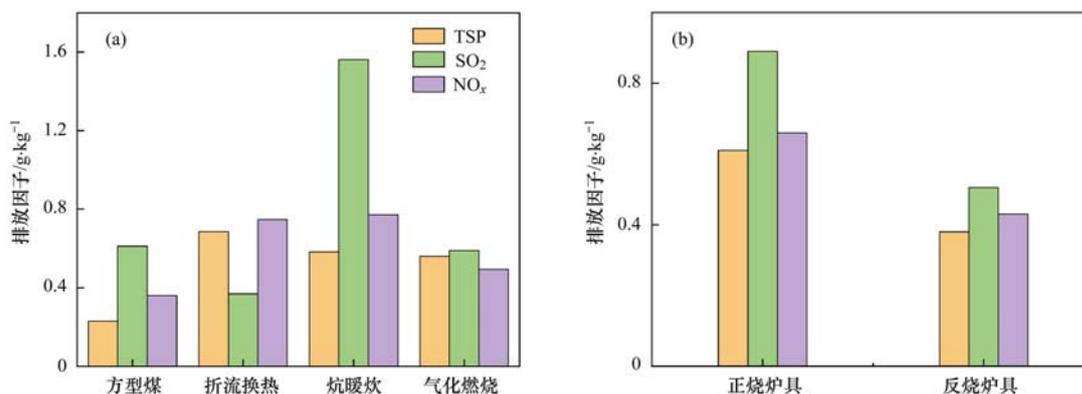


图5 不同燃烧和技术类型炉具大气污染物排放水平

Fig. 5 Difference in emission of air pollutants from coal-fired stoves with different combustion modes

使燃烧温度降低,有效地控制了热氮的产生。

如图 5(b)所示,5 种炉具的燃烧类型可分为正烧及反烧,使用反烧技术的炉具大气污染物的排放水平明显优于使用正烧技术的炉具。对 3 类主要大气污染物的减排效果都尤为明显,正烧炉具的颗粒物污染物(TSP)排放水平为  $0.61 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,反烧炉具的排放水平为  $0.38 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,减排效果可以达到 38%;正烧炉具的  $\text{SO}_2$  排放水平为  $0.89 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,反烧炉具的排放水平为  $0.51 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,减排效果达到 43%;正烧炉具的  $\text{NO}_x$  排放水平为  $0.66 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,反烧炉具的排放水平为  $0.43 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,减排效果为 35%。这是由于反烧炉具相较于正烧炉具,有效控制了挥发分的析出速度,提高了燃料利用率,在降低燃料成本的同时,对大气污染物的排放进行了有效减排。

## 2.4 不同炉具经济成本和环境效益分析

炉具购置及使用成本是居民选择炉具重要考虑因素。根据在京津冀区域内居民燃煤状况调查,对 5 种炉具的炉具购置成本、使用成本进行分析,不同炉具的经济成本对比如表 3 所示。在炉具 8 a 的使用寿命年限内,应用折流换热技术的炉具 B 因其炉具购置成本低,维护保养方法简单,所用煤加工方便,获得了较好的经济效益,经济成本可低至 1.4 万元。应用了方型煤技术的炉具 A 因为购置成本较高,炉具内部结构复杂,维护保养费用较高,同时使用了固定规格的方形蜂窝洁净煤,制作相对复杂,燃料投资成本较高,从而导致其经济成本最高(约 2.0 万元)。两种应用气化燃烧技术的炉具 D 及炉具 E 由于维护保养费用较高,经济成本较高,分别为 1.6 万元及 1.8 万元。

表 3 不同炉具的经济成本

Table 3 Economic cost of different coal stoves

炉具	购置成本/元	燃料投资成本 /元 $\cdot(\text{a}\cdot\text{m}^2)^{-1}$	运行维护成本 /元 $\cdot\text{a}^{-1}$	经济成本/万元
A	2 000	21.6	50	2.0
B	750	16.1	35	1.4
C	475	18.5	35	1.6
D	1 000	18.0	45	1.6
E	1 700	19.5	45	1.8

结合 2.1 节中 5 种炉具大气污染物排放强度和经济效益分析结果,可以看到气化燃烧反烧炉具及横向反烧的方型煤炉具环境效益较好,但购置和使用的经济成本相对较高,需要适当提高补贴力度。折流换热炉具经济成本较低,但环境效益较差。

此外,本研究对于炉具安装除尘除烟装置的可行性也进行了讨论,根据对各大炉具厂家的调研,目前生产的各类型号居民燃煤炉具并未配置除尘装置,这是因为除尘除烟装置的安装成本较高且会增加烟道压力损失使烟气排出困难导致增加不必要的安全隐患等因素,暂不具备面向市场的可行性。

综合来看,为达到污染物减排的最终目的,炉具厂商在保证经济成本的情况下应尽可能生产方型煤技术及气化反烧技术炉具,并增设对居民燃煤炉具安装除尘除烟装置方向的研究;同时政府应在保证补贴力度的情况下大力推广方型煤炉及气化反烧炉等环境效益好的炉具。

## 3 炉具污染减排改进建议

综合上述不同炉具大气污染物排放差异和特点,为降低居民燃煤炉具大气污染排放水平,应改进炉具设计、选择适宜的技术类型和燃烧类型,提高燃烧效率,提高大气污染物去除效率。具体建议如下。

(1) 采用气化反烧的燃烧类型 根据 2.3 节中不同燃烧类型的污染排放差异对比,可以发现正烧煤炉大气污染物排放水平较高,但反烧可有效减少挥发分的析出,控制大气污染物的排放,颗粒物、 $\text{SO}_2$  及  $\text{NO}_x$  污染物的减排效果分别达到了 38%、43% 及 35%,减排效果明显。因此,在炉具研发方面,应尽量减少正烧的使用和设计,推广和应用气化反烧类型。

(2) 采用蜂窝煤作为燃料和使用平推式进料方式 根据 2.1 及 2.3 节中对颗粒物污染物(TSP、 $\text{PM}_{10}$ 及  $\text{PM}_{2.5}$ )的排放差异分析,方型煤炉具的颗粒物污染物排放水平明显低于其他炉具,减排达到 60% 以上,这与其蜂窝煤燃料及相对应的平推式的进料方式有关。使用蜂窝煤作为燃料可以降低燃烧温度,减少炉膛内的扰动从而有效地减少污染物的排放水平,而蜂窝煤独有的平推式进料方式在清灰阶段对炉膛燃烧影响较小,避免了炉灰因烟囱负压排入大气,能够有效减少颗粒物的排放。

(3) 适当对环保型的炉具进行补贴 通过炉具成本分析可以看到,具有良好环境效益的方型煤炉具及气化反烧炉具的经济成本达到 2.0 万元及 1.8 万元,较为昂贵。因此为取得良好的减排效果,需要制定相关环保炉具的产品标准,对使用环保型的炉

具进行适度补贴,逐步淘汰和退出不符合标准的炉具。

#### 4 结论

(1)获得了5种炉具主要大气污染物排放强度及不同燃烧阶段的排放差异。炕暖炊一体的炉具大气污染物排放水平最高,主要大气污染物的排放强度达到 $2.88 \text{ kg}\cdot\text{t}^{-1}$ ,应用方型煤炉具整体大气污染物排放水平较低,为 $1.20 \text{ kg}\cdot\text{t}^{-1}$ ,颗粒物减排效果可达60%以上。

(2)研究了5种炉具在不同燃烧阶段的 $\text{SO}_2$ 及 $\text{NO}_x$ 的排放情况。炉具在点火阶段的污染物排放量快速上升,在旺火阶段达到污染物排放量峰值,最后在封火阶段排放量持续下降直至燃烧过程结束,其中气化反烧炉具在燃烧全过程中的 $\text{NO}_x$ 排放强度较低;方型煤横向反烧炉具A燃烧全过程中的 $\text{SO}_2$ 排放强度较低。

(3)识别了炉具污染排放差异的影响因素,包括炉具应用技术及燃烧类型。在应用技术方面,应用的方型煤技术可将颗粒物污染物(TSP)减排至 $0.23 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,可将 $\text{NO}_x$ 减排至 $0.36 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。在燃烧类型方面,采用反烧的燃烧类型对 $\text{NO}_x$ 、 $\text{SO}_2$ 及颗粒物污染物(TSP)大气污染物的减排效果在34%~43%之间,可以使炉具产生较好的环境效益。

(4)探讨了炉具的经济成本和环境效益。方型煤技术炉具及气化反烧炉具的环境效益最好,经济成本却较高,但属于可接受范围,在广泛使用炉具的地区可通过政府补贴加以推广。

(5)提出了炉具污染减排的改进建议。炉具应尽量采用反烧的燃烧类型,根据燃料情况改进进料方式(减少搅动),条件适宜的情况下使用蜂窝煤炉具,有助于燃料充分燃烧,降低污染物排放;同时政府部门应制定相关环保炉具的产品标准,对环保效益好的炉具加大补贴力度,逐步淘汰和退出不符合标准的炉具。

#### 参考文献:

- [ 1 ] Zhang Y X, Schauer J J, Zhang Y H, *et al.* Characteristics of particulate carbon emissions from real-world chinese coal combustion [J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, **42** (14): 5068-5073.
- [ 2 ] Wang G H, Huang L M, Zhao X, *et al.* Aliphatic and polycyclic aromatic hydrocarbons of atmospheric aerosols in five locations of Nanjing urban area, China [J]. *Atmospheric Research*, 2006, **81**(1): 54-66.
- [ 3 ] 许姗姗, 刘文新, 陶澍. 全国多环芳烃年排放量估算[J]. *农业环境科学学报*, 2005, **24**(3): 476-479.
- Xu S S, Liu W X, Tao S. Estimation of annual emission of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, **24**(3): 476-479.
- [ 4 ] 田福林. 受体模型应用于典型环境介质中多环芳烃、二噁英和多氯联苯的来源解析研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
- [ 5 ] Lin L F, Lee W J, Li H W, *et al.* Characterization and inventory of PCDD/F emissions from coal-fired power plants and other sources in Taiwan [J]. *Chemosphere*, 2007, **68** (9): 1642-1649.
- [ 6 ] Teoldi F, Lodi M, Benfenati E, *et al.* Air quality in the Olona Valley and in vitro human health effects [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **579**: 1929-1939.
- [ 7 ] 段文娇, 周颖, 李纪峰, 等. 邯郸市PM<sub>2.5</sub>污染特征及来源解析[J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(10): 4108-4116.
- Duan W J, Zhou Y, Li J F, *et al.* PM<sub>2.5</sub> pollution characteristics and source apportionment in Handan urban area [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(10): 4108-4116.
- [ 8 ] 周静博, 任毅斌, 洪纲, 等. 利用 SPAMS 研究石家庄市冬季连续灰霾天气的污染特征及成因[J]. *环境科学*, 2015, **36** (11): 3972-3980.
- Zhou J B, Ren Y B, Hong G, *et al.* Characteristics and formation mechanism of a multi-day haze in the winter of Shijiazhuang using a Single Particle Aerosol Mass Spectrometer (SPAMS) [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(11): 3972-3980.
- [ 9 ] 钟连红, 刘晓, 李志凯, 等. 北京居民生活用煤大气污染控制思路与对策[J]. *环境保护*, 2015, **43**(3): 77-78.
- Zhong L H, Liu X, Li Z K, *et al.* The thoughts and control countermeasures of air pollution caused by coal products consuming from Beijing residents [J]. *Environmental Protection*, 2015, **43**(3): 77-78.
- [ 10 ] 赵文慧, 李令军, 鹿海峰, 等. 2015~2017年北京及周边平房燃煤散烧及其污染排放遥感测算[J]. *环境科学*, 2019, **40**(4): 1594-1603.
- Zhao W H, Li L J, Lu H F, *et al.* Estimation of coal consumption and the emission of related contaminants in the plain area around Beijing during 2015-2017 [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(4): 1594-1603.
- [ 11 ] Tian S L, Pan Y P, Wang Y S. Size-resolved source apportionment of particulate matter in urban Beijing during haze and non-haze episodes [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, **16**(1): 1-19.
- [ 12 ] 杨妍妍, 李金香, 梁云平, 等. 应用受体模型(CMB)对北京市大气PM<sub>2.5</sub>来源的解析研究[J]. *环境科学学报*, 2015, **35** (9): 2693-2700.
- Yang Y Y, Li J X, Liang Y P, *et al.* Source apportionment of PM<sub>2.5</sub> in Beijing by the chemical mass balance [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(9): 2693-2700.
- [ 13 ] 陆雅静, 倪爽英, 陈睿, 等. 石家庄市2017年农村居民燃煤散烧排放量估算[J]. *科学技术与工程*, 2019, **19**(11): 321-327.
- Lu Y J, Ni S Y, Chen R, *et al.* Estimation of air pollutants emission from coal combustion in the rural areas of Shijiazhuang in 2017 [J]. *Science Technology and Engineering*, 2019, **19** (11): 321-327.
- [ 14 ] 毋波波, 薛亦峰, 钟连红, 等. 京津冀居民燃煤大气污染排放特征及控制对策[J]. *环境保护*, 2017, **45**(21): 27-31.
- Wu B B, Xue Y F, Zhong L H, *et al.* Emission characteristic and control strategy for residential coal combustion in the Beijing - Tianjin - Hebei region [J]. *Environmental Protection*, 2017, **45** (21): 27-31.
- [ 15 ] 刘亚男, 钟连红, 韩力慧, 等. 民用燃料烟气中气态污染物及水溶性无机离子的排放[J]. *中国环境科学*, 2019, **39** (8): 3225-3232.

- Liu Y N, Zhong L H, Han L H, *et al.* Emission of gaseous pollutants and water-soluble inorganic ions from civil fuel flue gas [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39** (8): 3225-3232.
- [16] 刘亚男, 钟连红, 闫静, 等. 民用燃料燃烧碳质组分及 VOCs 排放特征[J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(4): 1412-1418.  
Liu Y N, Zhong L H, Yan J, *et al.* Carbon compositions and VOCs emission characteristics of civil combustion fuels [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(4): 1412-1418.
- [17] Zhi G R, Chen Y J, Feng Y L, *et al.* Emission characteristics of carbonaceous particles from various residential coal-stoves in China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, **42**(9): 3310-3315.
- [18] Cui Z K, Li Z G, Zhang Y Z, *et al.* Atmospheric mercury emissions from residential coal combustion in Guizhou province, Southwest China [J]. *Energy & Fuels*, 2019, **33** (3): 1937-1943.
- [19] ISO 19869: 2019, Clean cookstoves and clean cooking solutions-Field testing methods for cookstoves[S].
- [20] DB 11/097-2014, 低硫煤及制品[S].
- [21] Lee S W, Herage T, Dureau R, *et al.* Measurement of PM<sub>2.5</sub> and ultra-fine particulate emissions from coal-fired utility boilers [J]. *Fuel*, 2013, **108**: 60-66.
- [22] 张琦, 李庆, 蒋靖坤, 等. 一套民用固体燃料燃烧大气污染物排放测试系统的搭建和评测[J]. *环境科学学报*, 2016, **36**(9): 3393-3399.  
Zhang Q, Li Q, Jiang J K, *et al.* A measurement system to characterize air pollutant emissions from residential solid fuel combustion[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(9): 3393-3399.
- [23] 陈国伟, 单明, 李佳蓉, 等. 北京农村地区燃煤污染物的排放测试[J]. *环境工程学报*, 2018, **12**(2): 597-603.  
Chen G W, Shan M, Li J R, *et al.* Emission factors test and pollutant discharge of raw coal fuel burning in Beijing countryside [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2018, **12** (2): 597-603.
- [24] 环境保护部. 民用煤大气污染物排放清单编制技术指南(试行) [EB/OL]. [http://kjs.mee.gov.cn/jszczyzn/201610/t20161031\\_366543.shtml](http://kjs.mee.gov.cn/jszczyzn/201610/t20161031_366543.shtml), 2016-10-31.
- [25] 陈传敏, 赵长遂, 赵毅, 等. O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 气氛下燃煤过程中 SO<sub>2</sub> 排放特性实验[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2006, **36** (4): 546-550.  
Chen C M, Zhao C S, Zhao Y, *et al.* Experiments of SO<sub>2</sub> emission characteristics during coal combustion under O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> atmosphere [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2006, **36**(4): 546-550.
- [26] 李芳, 毕明树. 燃煤过程中 NO<sub>x</sub> 的生成机理及控制技术[J]. *工业锅炉*, 2005, (6): 32-35.  
Li F, Bi M S. NO<sub>x</sub> formation and control technology in the process of coal combustion [J]. *Industrial Boiler*, 2005, (6): 32-35.
- [27] Jin J, Zhang Z X, Li R Y. Study on the NO<sub>x</sub> release rule along the boiler during pulverized coal combustion [J]. *Frontiers of Energy and Power Engineering in China*, 2007, **1**(1): 91-95.

## CONTENTS

Analysis of Pollution Characteristics and Primary, Secondary Contributions of Firework Burnings in Qingdao During the Spring Festival .....	FANG Tian-ge, YAO Xiao-hong, MENG He, <i>et al.</i> (4345)
Characterization and Source Apportionment of PM <sub>2.5</sub> Based on the Online Observation in Tianjin .....	XIAO Zhi-mei, XU Hong, LI Li-wei, <i>et al.</i> (4355)
Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in PM <sub>2.5</sub> in Beijing During 2017-2018 .....	LI Huan, TANG Gui-qian, ZHANG Jun-ke, <i>et al.</i> (4364)
Characteristics of Carbonaceous Species in PM <sub>2.5</sub> in Southern Beijing .....	DONG Gui-ming, TANG Gui-qian, ZHANG Jun-ke, <i>et al.</i> (4374)
Characteristics and Formation Mechanism of Three Haze Pollution Processes in Chengdu in Winter .....	FENG Xiao-qiong, CHEN Jun-hui, YIN Han-mei, <i>et al.</i> (4382)
Distribution Characteristics and Source of Black Carbon Aerosols in the Northern Suburbs of Nanjing .....	XIE Feng, LIN Yu-chi, SONG Wen-huai, <i>et al.</i> (4392)
Assessment of Emergency Emission Reduction Effect During the Heavy Air Pollution Episodes in Beijing, Tianjin, Hebei, and Its Surrounding Area(“2+26” Cities) from October to December 2019 .....	ZHU Yuan-yuan, GAO Yu-xiao, WANG Wei, <i>et al.</i> (4402)
Variational Trend and Characteristics of Air Pollution in Baoding City .....	GOU Yin-yin, ZHANG Kai, LI Jin-juan, <i>et al.</i> (4413)
Emission Inventory of VOCs Components in Zhengzhou and Their Ozone Formation Potential .....	LU Xuan, ZHANG Rui-qin, HAN Luo-kai (4426)
Evolution and Evaluation of O <sub>3</sub> and VOCs in Zhengzhou During the National Traditional Games of Ethnic Minorities Period .....	ZHAO Jin-shuai, YU Shi-jie, WANG Nan, <i>et al.</i> (4436)
Characteristics of Volatile Organic Compounds in Wood Coatings and Automotive Coatings in China .....	KE Yun-ting, SUN Yu-hang, CHENG Hai-rong, <i>et al.</i> (4446)
Influence of Typical Desulfurization Process on Flue Gas Particulate Matter of Coal-fired Boilers .....	ZHANG Jin-sheng, WU Jian-hui, LÜ Rui-he, <i>et al.</i> (4455)
Investigation on the Emission Difference of Air Pollutants from Common Residential Coal Stoves and Suggestions for Emission Reduction .....	ZHANG Yi-chen, XUE Chen-li, LIU Jie, <i>et al.</i> (4462)
Mobile Source Emission Inventory with High Spatiotemporal Resolution in Tianjin in 2017 .....	LIU Geng, SUN Shi-da, SUN Lu-na, <i>et al.</i> (4470)
Emission Inventory and Characteristics of Anthropogenic Air Pollution Sources Based on Second Pollution Source Census Data in Sichuan Province .....	XU Chen-xi, CHEN Jun-hui, LI Yuan, <i>et al.</i> (4482)
Preliminary Screening for the Urban Forest Against Combined Air Pollution .....	LI Pin, WEI Yan-yan, FENG Zhao-zhong (4495)
Spatial Distribution and Pollution Characteristics of Heavy Metals in Plant Leaves in Baoji City .....	ZHANG Jun, LIANG Qing-fang, GAO Yu (4504)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of PPCPs in Surface Water and Aquatic Organisms in Chaoshan Coastal Area along the South China Sea .....	XIU Cuo, WANG Chen-chen, LÜ Yong-long, <i>et al.</i> (4514)
Spatiotemporal Differentiation and Degradation Analysis of Polybrominated Diphenyl Ethers in Sediments of Shanmei Reservoir and Its Inflowing River, Quanzhou, China .....	HAN Wen-liang, LIU Yu, FENG Kai-wen (4525)
Spatial-temporal Variations and the Regulators of Nitrate Status in Shallow Groundwater of the Typical Mountainous Agricultural Watershed in the Upper Reaches of the Yangtze River .....	JIANG Nan, ZHOU Ming-hua, LI Hong, <i>et al.</i> (4539)
Emission Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in a Typical Agricultural Small Watershed in Tuojiang River Basin .....	WANG Hong, XU Ya-ling, ZHANG Qi, <i>et al.</i> (4547)
Assessment of Potential Risk of Diffuse Pollution in Haihe River Basin Based Using DPERS Model .....	FENG Ai-ping, WANG Xue-lei, XU Yi, <i>et al.</i> (4555)
Impact of Spatial Heterogeneity of Precipitation on the Area Change in Critical Source Area of Non-point Sources Pollution .....	GAO Xiao-xi, ZUO De-peng, MA Guang-wen, <i>et al.</i> (4564)
Sedimentary Diatom Records Reveal the Succession of Ecosystem in Lake Xihu, Dali over the Past 50 Years .....	ZHANG Chen-xue, XU Min, DONG Yi-fan, <i>et al.</i> (4572)
Content and Distribution of Cadmium in Soil and Fluvial Sediments in the Sea-Land Interaction Zone .....	WANG Fang-ting, CHEN Zhi-hua, BAO Ke, <i>et al.</i> (4581)
Occurrence Characteristics and Quality Estimation of Microplastics in Drainage Ditches in Hetao Irrigation District of Inner Mongolia .....	WANG Zhi-chao, YANG Fan, YANG Wen-huan, <i>et al.</i> (4590)
Influence of Pervious/Impervious Pattern on Runoff and Pollution in Parcel-based Catchment .....	JIANG Zhi-hui, LIAO Yun-jie, XIE Wen-xia, <i>et al.</i> (4599)
Activating Efficiency of Iron-copper Bimetallic Organic Framework MIL-101(Fe, Cu) Toward H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> for Degradation of Dyes .....	LIANG He, LIU Rui-ping, AN Xiao-qiang, <i>et al.</i> (4607)
Synergistic Reaction Mechanism of Cu <sup>0</sup> @Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> Activated PMS for Degradation of <i>p</i> -nitrophenol .....	SHI Qing-qing, PU Sheng-yan, YANG Xi (4615)
Kinetics and Mechanism of Sucralose Degradation in Water Using UV-activated Persulfate Process .....	YU Yun, LU Jin-xin, LÜ Zhen, <i>et al.</i> (4626)
Microbial Community Structure for Sewage Wastewater Treatment Plants in Winter .....	SHANG Yue-fei, WANG Shen, ZONG Ni, <i>et al.</i> (4636)
Microbial Community Analysis of Different DN and PN-ANAMMOX Coupling Modes for Mature Landfill Leachate Treatment .....	LU Ming-yu, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (4644)
Analysis of Rapid Start-up and Mixed Nutritional Nitrogen Removal Performance of Complete Autotrophic Granular Sludge .....	QI Ze-kun, WANG Jian-fang, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (4653)
Long-term Stability of Aerobic Granular Sludge Under Low Carbon to Nitrogen Ratio .....	YUAN Qiang-jun, ZHANG Hong-xing, CHEN Fang-yuan (4661)
Response of Bacterial and Fungal Communities to Chemical Fertilizer Reduction Combined with Organic Fertilizer and Straw in Fluvo-aquic Soil .....	WU Xian, WANG Rui, HU He, <i>et al.</i> (4669)
Characteristics of Soil Nutrients and Fungal Community Composition in Crop Rhizosphere Under Different Rotation Patterns .....	SUN Qian, WU Hong-liang, CHEN Fu, <i>et al.</i> (4682)
Effects of Short-term Application of Moutai-flavor Vinasse Biochar on Nitrogen Availability and Bacterial Community Structure Diversity in Yellow Soil of Guizhou Province .....	ZHANG Meng, LIU Yan-ling, WEI Quan-quan, <i>et al.</i> (4690)
Effects of Different Rotation Patterns of Oil-Rice on Methane and Nitrous Oxide Emissions in Rice Fields .....	CHEN You-de, ZHAO Yang, GAO Du-juan, <i>et al.</i> (4701)
<i>Bacillus amyloliquefaciens</i> Biofertilizer Mitigating Soil Ammonia Volatilization .....	YANG Ya-hong, XUE Li-xia, SUN Bo, <i>et al.</i> (4711)
Effects of Exogenous Phosphorus on Rice Growth and Cadmium Accumulation and Transportation Under Cadmium Stress .....	HUO Yang, QIU Yin-yan, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (4719)
Key Stage of As Accumulation in Rice Under As Stress at Different Growth Stages .....	DENG Peng-hui, CAI Ya-qin, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (4726)
Heavy Metal Contamination and Health Risk Assessment of Corn Grains from a Pb-Zn Mining Area .....	ZHOU Yan, WAN Jin-zhong, LI Qun, <i>et al.</i> (4733)
Polybrominated Diphenyl Ether in E-waste Dismantling Sites in Taizhou City, Zhejiang Province: Concentration, Distribution, and Migration Trend .....	WEI Bao-kai, LIU Chen, WANG Ying, <i>et al.</i> (4740)
Assessment and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Farmland Soils in Southern Youyang County, Chongqing .....	WANG Rui, DENG Hai, YAN Ming-shu, <i>et al.</i> (4749)
Ecological Risk Assessment of Tetracycline Antibiotics in Livestock Manure and Vegetable Soil of Chongqing .....	PENG Qiu, WANG Wei-zhong, XU Wei-hong (4757)