

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第5期

Vol.39 No.5

**2018**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

餐饮行业细颗粒物(PM<sub>2.5</sub>)排放测算方法:以上海市为例 ..... 王红丽, 景盛翱, 楼晟荣, 陶士康, 乔利平, 李莉, 黄成, 林立, 陈长虹 (1971)

上海夏季PM<sub>2.5</sub>中有机物的组分特征、空间分布和来源 ..... 高雅琴, 王红丽, 景盛翱, 乔利平, 李莉, 朱书慧, 楼晟荣, 陶士康, 冯加良, 李想, 陈长虹 (1978)

北京南郊区PM<sub>2.5</sub>中水溶性无机盐季节变化及来源分析 ..... 高韩钰, 魏静, 王跃思 (1987)

基于样方法的天津市春季道路扬尘PM<sub>2.5</sub>中水溶性离子特征及来源解析 ..... 赵静琦, 姬亚芹, 张蕾, 王士宝, 李越洋 (1994)

广州秋季HONO污染特征及夜间来源分析 ..... 田智林, 杨闻达, 虞小芳, 张曼曼, 张贺伟, 程丁, 程鹏, 王伯光 (2000)

基于硫氧同位素研究南京北郊夏季大气中硫酸盐来源及氧化途径 ..... 韩珣, 任杰, 陈善莉, 王瑾瑾, 沈潇雨, 魏英, 郭照冰, 朱彬 (2010)

区县尺度机动车高分辨率排放清单建立方法及应用 ..... 樊守彬, 郭津津, 李雪峰 (2015)

典型工业生物质锅炉多环芳烃排放特征 ..... 林玉君, 白莉, 王焕香, 肖文, 刘军, 向运荣, 张春林 (2023)

多时间尺度HSPF模型参数不确定性研究 ..... 庞树江, 王晓燕, 马文静 (2030)

氮氧同位素联合稳定同位素模型解析水源地氮源 ..... 金赞芳, 张文辽, 郑奇, 朱晨阳, 李非里 (2039)

白洋淀水体挥发性有机物污染特征与风险评价 ..... 高秋生, 赵永辉, 焦立新, 田自强, 杨柳, 杨苏文, 崔志丹, 郝子峰 (2048)

太湖颗粒态有机质的荧光特征及环境指示意义 ..... 吕伟伟, 姚昕, 张保华, 刘延龙, 李元鹏 (2056)

长江口滩涂表层沉积物中微塑料的分布及沉降特点 ..... 朱晓桐, 衣俊, 强丽媛, 程金平 (2067)

桂林五里峡水库丰水期溶解有机碳特征 ..... 卢晓漩, 李强, 靳振江, 彭文杰, 房君佳, 黄炳惠, 宋昂 (2075)

青藏高原多年冻土区典型植被下河流溶解性有机碳的生物可利用性 ..... 马小亮, 刘桂民, 吴晓东, 徐海燕, 叶琳琳, 张晓兰, 白炜 (2086)

城郊与城镇河流中溶解性有机质与重金属的相关性 ..... 梁梦琦, 邵美玲, 曹昌丽, 纵亚男, 唐剑锋 (2095)

溶解性有机质在岩溶水系统中的迁移转化及影响因素分析 ..... 张连凯, 刘朋雨, 覃小群, 单晓静, 刘文, 赵振华, 姚昕, 邵明玉 (2104)

三峡库区澎溪河回水区溶解态金属离子来源和时空分布特征分析 ..... 赵晓松, 蔚建军, 付莉, 姜伟, 周川, 李波, Douglas Haffner, Christopher Weisener, 张磊 (2117)

澜沧江流域沉积物间隙水-上覆水营养盐特征与交换通量分析 ..... 望雪, 程豹, 杨正健, 刘德富, 徐雅倩 (2126)

蓄水期三峡水库香溪河沉积物-水系统营养盐分布特征 ..... 苏青青, 刘德富, 纪道斌, 宋林旭, 崔玉洁, 李欣, 陈秀秀, 刘心愿 (2135)

两种水生植物对上覆水和间隙水中各形态磷的影响 ..... 杨文斌, 高顺峰, 万锐, 孙祥, 王赢 (2145)

于桥水库沉积物-水界面氮磷剖面特征及交换通量 ..... 文帅龙, 龚琬晴, 吴涛, 郑小兰, 江雪, 李鑫, 钟继承 (2154)

岷江干流表层沉积物中磷形态空间分布特征 ..... 杨耿, 秦延文, 韩超南, 马迎群, 刘志超, 杨晨晨 (2165)

农业排水沟渠硝态氮吸收动力学特征及相关性分析 ..... 李如忠, 殷齐贺, 高苏蒂, 陈广州 (2174)

不同合成条件对ZnAl-LDHs覆膜改性生物陶粒除磷效果的影响 ..... 向洋, 张翔凌, 雷雨, 方晨佳, 袁野, 姜应和, 徐舟影 (2184)

真空紫外/过二硫酸盐去除饮用水中嗅味物质 ..... 孙昕, 史路肖, 张燧, 杨煜, 唐晓 (2195)

石墨烯负载铁锰氧化物活化过一硫酸盐降解金橙G ..... 夏文君, 刘锋, 郝尚斌, 黄天寅, 王忠明, 陈家斌 (2202)

载钼或铈生物炭吸附水体中As(V)的作用机制 ..... 李锦, 祖艳群, 李刚, 孙国新 (2211)

DOM不同相对分子质量组分在无机矿物上的吸附及其对卡马西平吸附的影响实验 ..... 梁雨, 何江涛, 张思 (2219)

污水处理厂中有机磷阻燃剂的污染特征 ..... 孙佳薇, 丁炜楠, 张占恩, 王俊霞, 顾海东 (2230)

低温污水前置强化混凝 ..... 刘海龙, 任宇霞, 张忠民 (2239)

印染废水反渗透脱盐系统运行性能及膜污堵特性 ..... 谭玉琚, 张泽田, 吴乾元, 姚颖, 胡洪营, 丘培文 (2249)

生物膜CANON反应器性能的优化:从FBBR到MBBR ..... 付昆明, 李慧, 周厚田, 仇付国 (2256)

两次污泥颗粒化过程中微生物群落的动态变化 ..... 高景峰, 张丽芳, 张树军, 高永青, 王时杰, 樊晓燕, 潘凯玲 (2265)

铝、铁、钛3种金属盐基混凝剂调理污泥的性能比较 ..... 王晓萌, 王鑫, 杨明辉, 张淑娟 (2274)

热、热碱处理对污泥溶胞和溶解性有机物的影响 ..... 代勤, 张文哲, 于潘芬, 易皓, 刘俊新, 肖本益 (2283)

曝气时间对比亚硝化颗粒污泥形成的影响 ..... 李冬, 郭跃洲, 曹美忠, 劳会妹, 李帅, 张杰 (2289)

中国城市污泥中汞含量的时空分布特征 ..... 王宁, 刘清伟, 职音, 程柳, 麻冰涓, 毛宇翔 (2296)

夏季太湖草/藻型湖区N<sub>2</sub>O生成与迁移特征及其影响因素 ..... 郑小兰, 文帅龙, 李鑫, 龚琬晴, 刘德鸿, 钟继承 (2306)

太湖藻型湖区CH<sub>4</sub>、CO<sub>2</sub>排放特征及其影响因素分析 ..... 贾磊, 蒲旖旎, 杨诗俊, 苏荣明珠, 秦志昊, 张弥 (2316)

内蒙古典型草原季节性冻土区土壤剖面CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O特征 ..... 李晋波, 姚楠, 李秀, 赵英, 张阿凤, 兰志龙, 范庭 (2330)

黄土高原成龄苹果园生态系统CO<sub>2</sub>通量特征 ..... 杨剑锋, 杨小妮, 王俊花, 段宇敏, 祁香宁, 张林森 (2339)

生物炭施用对紫色水稻土温室气体排放的影响 ..... 祁乐, 高明, 郭晓敏, 牛海东, 李婷, 孙涛, 曹群玲, 汤稼豪 (2351)

不同施肥处理对东北黑土温室气体排放的短期影响 ..... 李平, 郎漫, 李森, 魏玮, 李凯凯 (2360)

ITS高通量测序研究黄海微型真核浮游生物多样性及分布特征 ..... 张莉, 林佳宁, 张远, 王书平, 张晓娇 (2368)

不同排海方式城市尾水微生物扩散规律 ..... 郎秀璐, 宋志文, 徐爱玲, 牛成洁, 郭明月 (2380)

旅游活动对岩溶洞穴地下水中细菌群落的影响:以重庆丰都两个洞穴为例 ..... 吕现福, 贺秋芳, 王凤康, 赵瑞一, 张弘 (2389)

不同沼灌年限稻田土壤微生物群落分析 ..... 朱金山, 张慧, 马连杰, 廖敦秀, 杨星勇, 王龙昌, 王定勇 (2400)

生物炭对褐土理化特性及真菌群落结构的影响 ..... 阎海涛, 殷金玉, 丁松爽, 任天宝, 许家来, 宗浩, 高强, 刘国顺 (2412)

铅锌尾矿砂污染下的岩溶土壤微生物群落碳源代谢特征 ..... 房君佳, 李强, 刘畅, 靳振江, 梁月明, 黄炳惠, 卢晓漩, 彭文杰 (2420)

湖库沉积物好氧反硝化菌群脱氮特性及种群结构 ..... 康鹏亮, 张海涵, 黄廷林, 陈胜男, 商潘路, 冯稷, 贾克宇 (2431)

反硝化菌群的氮代谢与反硝化偶联机制 ..... 张泽宇, 王明霞, 程永毅, 周志峰 (2438)

广西西江流域土壤铅空间分布与污染评价 ..... 张云霞, 宋波, 陈同斌, 伏凤艳, 黄飞, 庞瑞, 潘惠妹 (2446)

三峡库区消落带农业活动对土壤汞变化的影响 ..... 陈秋禹, 孙松, 尹德良, 王永敏, 张成, 王定勇 (2456)

水稻不同生长时期不同组织中抗生内生菌的筛选与鉴定 ..... 王伯勋, 王学东, 段桂兰 (2464)

汞在酸性紫色水稻土的转化与水稻汞富集特征 ..... 李雨琴, 孙涛, 邓晗, 张成, 王永敏, 王定勇 (2472)

华北平原不同生产模式设施蔬菜生命周期环境影响评价 ..... 徐强, 胡克林, 李季, 韩卉, 杨合法 (2480)

基于细菌毒性测试与小鼠肺基因转录分析的PM<sub>2.5</sub>健康效应 ..... 宋鹏程, 陆书玉, 魏永杰, 陈倩倩, 罗丽娟 (2489)

中国PM<sub>2.5</sub>污染空间分布的社会经济影响因素分析 ..... 段杰雄, 翟卫欣, 程承旗, 陈波 (2498)

《环境科学》征订启事(2094) 《环境科学》征稿简则(2164) 信息(2183, 2411, 2445)

## 典型工业生物质锅炉多环芳烃排放特征

林玉君<sup>1</sup>, 白莉<sup>1</sup>, 王焕香<sup>1</sup>, 肖文<sup>1\*</sup>, 刘军<sup>1</sup>, 向运荣<sup>1</sup>, 张春林<sup>2</sup>

(1. 广东省环境监测中心, 广州 510308; 2. 暨南大学环境与气候研究院, 广州 511443)

**摘要:** 选择 13 个不同类型的工业生物锅炉, 利用气相色谱质谱联用技术, 对其排放的 15 种 PAHs 进行研究. 结果显示,  $\sum_{15}$  PAHs 排放量为  $0.02 \sim 27.8 \text{ g} \cdot \text{h}^{-1}$ , 排放浓度为  $0.77 \sim 3173 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ , 各锅炉之间的排放量与浓度水平差别较大, 最大排放量出现在 PAHs 含量与烟气流量均相对较高的第 4 号锅炉样品中, 最大排放浓度值出现在第 13 号锅炉样品中. 气相的 PAHs 是主要贡献源, 其占比为 45.9% ~ 100%, 颗粒相中的含量相对较低. 组成以萘、菲、荧蒹、芘等低中环 PAHs 为主, 各个生物质锅炉组成谱轮廓相近, 总体浓度水平  $C_{3,4\text{环}} > C_{5,6\text{环}}$ . 生物质燃烧源诊断参数 [荧蒹/(荧蒹 + 芘)] 除了第 4 号锅炉的气相样品为 0.4 外, 其余均大于 0.5.  $\text{O}_2$  与两相中的萘、菲、蒽等有明显的正相关性, CO 与萘及毒性相对较大的芘并[1,2,3-cd]芘、苯并[g,h,i]芘有明显相关性.

**关键词:** 生物质燃料; 工业锅炉; 多环芳烃; 排放; 成分谱

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)05-2023-07 DOI: 10.13227/j.hjxk.201709113

## Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Emitted from Typical Industrial Biomass Boilers

LIN Yu-jun<sup>1</sup>, BAI Li<sup>1</sup>, WANG Huan-xiang<sup>1</sup>, XIAO Wen<sup>1\*</sup>, LIU Jun<sup>1</sup>, XIANG Yun-rong<sup>1</sup>, ZHANG Chun-lin<sup>2</sup>

(1. Guangdong Environmental Monitoring Centre, Guangzhou 510308, China; 2. Institute for Environmental and Climate Research, Jinan University, Guangzhou 511443, China)

**Abstract:** This research selected 13 types of industrial biomass boilers and used GC-MS technology to investigate the characteristics of 15 polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) emitted from the boilers. The results show that the total emissions of the 15 PAHs was  $0.02 \sim 27.8 \text{ g} \cdot \text{h}^{-1}$ , and the concentration was  $0.77 \sim 3173 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ . There was a large different in the  $\sum_{15}$  PAHs concentration and emissions for each boiler. The maximum concentration appeared in the No. 13 boiler sample, and the maximum emissions appeared in the No. 4 boiler sample; these have relatively high concentrations of PAHs and large stack gas velocities. PAHs were found to be dominant in the gas phase, with a proportion of 45.9% ~ 100%. Acenaphthylene, phenanthrene, fluoranthene, and pyrene were the main PAHs. The spectral distribution profiles of the 15 PAHs were similar, and the general concentrations were  $C_{3,4\text{ rings}} > C_{5,6\text{ rings}}$ . Diagnostic ratios the fluoranthene to fluoranthene plus pyrene ( $\text{Flu}/(\text{Flu} + \text{Pyr})$ ) from biomass combustion were greater than 0.5, except for the No. 4 sample, which was 0.4. There were obvious positive interrelationships between  $\text{O}_2$  and acenaphthylene, acenaphthene, phenanthrene, and anthracene. In addition, there were obvious interrelationships between CO and indeno[1,2,3-cd]pyrene, benzo[g,h,i]perylene, and acenaphthene.

**Key words:** biomass fuel; industry boiler; PAHs; discharge; source profile

生物质能在世界能源消费中占非常重要的地位, 相对于燃油、燃煤锅炉而言, 以植物、有机废物等生物质为燃料的动力锅炉具有含硫量低、灰渣残留少、可持续资源利用率高、环境友好性优点<sup>[1,2]</sup>, 近年来生物质燃料作为清洁能源得到国家的大力推广<sup>[3]</sup>. 根据《生物质能发展“十三五”规划》, 截至 2015 年, 生物质成型燃料年利用量约 800 万 t, 生物质成型燃料和专用锅炉制造、燃料燃烧等技术日益成熟, 具备规模化、产业化等工业生产发展基础, 因此关于生物质燃料锅炉的污染物排放控制也逐渐得到重视.

多环芳烃 (polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) 是环境常见具有“三致”毒性的持久性有机

污染物, 其重要的来源之一就是生物质的燃烧. 据报道, 2007 年全球大气 PAHs 的产生量约 50.4 万 t, 其中民用和商用生物质燃烧途径产生的 PAHs 贡献量达 60.5%<sup>[4]</sup>. 目前我国对于生物质锅炉的污染物排放限制仅限于  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 、颗粒物等因子<sup>[5-7]</sup>, 科研报道也主要侧重于各类生物质燃烧的排放因子等模拟实验研究, 大部分研究针对只有颗粒相的 PAHs, 对于气相中的研究较少; 再者中国生物质锅炉污染物排放研究也主要集中在秸秆、落叶燃烧等

收稿日期: 2017-09-12; 修订日期: 2017-10-30

基金项目: 广东省环境保护专项 (2014HBZX-2-09)

作者简介: 林玉君 (1983 ~), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为环境有机污染物监测, E-mail: linyujun02@126.com

\* 通信作者, E-mail: 13640210298@139.com

家庭式小型污染源的 PAHs 排放, 而缺乏对于实际工业生物质燃料锅炉排放的多环芳烃研究<sup>[8-12]</sup>。

本文选取了 13 个不同类型的工业生物质燃料锅炉, 研究其排气烟道中颗粒相与气相里面 15 种美国环保署优控多环芳烃的污染特征, 分析其排放组成, 对比相关的污染排放水平, 了解工业生物质锅炉污染排放情况, 以期为污染源识别、健康风险评估和相关环保政策的制定提供依据。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 样品的采集与保存

选取广东省内 13 个典型生物质锅炉排气筒, 每个锅炉设置 1 个采样截面, 于 2016 年 1~6 月期间进行采样测试, 共 13 个样品。采样点的布设依据《固定污染源排气中颗粒物和气态污染物采样方法》(GB/T 16157-1996) 进行, 采样方法参照《环境空气和废气气相和颗粒物中多环芳烃的测定 气相色谱-质谱法》(HJ 646-2013) 的相关要求进行, 样品采用等速采样器(APEX XC-5000, 美国)采样, 13 个烟道的等速采样流速范围为 2.3~16.2 m·s<sup>-1</sup>, 其中第 1、5、7 号锅炉排气筒为矩形(烟道断面面积为 0.29~3 m<sup>2</sup>), 采用网格布点法布设采样点位; 其它排气筒为圆形烟道, 直径为 0.43~2.0 m, 采用同心圆布点法布设点位。每个烟道样品采集时间约 2 h, 采样体积为 1.62~2.29 m<sup>3</sup>。CO、O<sub>2</sub> 等气态污染物采用崂应 3012H 型自动烟尘(气)测试仪进行监测分析, 点位布设同 PAHs 样品的一致。

采样前, 石英纤维滤膜(Whatman 公司)用马弗炉 450℃灼烧 4 h, XAD-2 树脂(Supelco 公司)用丙酮、二氯甲烷、正己烷溶剂(色谱纯, CNW 公司)依次清洗干净, 真空干燥后备用。采样完成后将滤膜对折保存在铝箔袋中, XAD-2 树脂用密封玻璃瓶密封好, 低温保存运回实验室, 于 -20℃中避光保存。

### 1.2 样品前处理

将采样后的颗粒物样品(滤膜)和气态样品载体(XAD-2 树脂约 40 g)分别放入索氏抽提器中, 加入 0.4 μg 替代物(苊-d<sub>10</sub>, 1000 μg·mL<sup>-1</sup>, NSI 公司), 用 200 mL 二氯甲烷抽提 20 h, 抽提器水浴温度控制在 50℃左右, 回流速度控制在 4~5 次·h<sup>-1</sup>。提取液经无水硫酸钠(广州化学试剂厂, 450℃灼烧 4 h 后用)干燥, 旋转蒸发器上浓缩至约 2 mL。加入 5 mL 的正己烷, 再次浓缩至 1~2 mL 以转换至正己烷体系。

将以上样品转移至层析柱进行净化, 该柱规格为内径 1 cm, 从下往上依次装填 12 cm 3% 去活化硅胶(60~200 目, SILICYCLE 公司)、6 cm 3% 去活化氧化铝(Fluka 公司)、1 cm 无水硫酸钠, 控制流速约 2.0 mL·min<sup>-1</sup>, 依次用 10 mL 正己烷淋洗烷烃类化合物; 70 mL 二氯甲烷/正己烷(3:7, 体积比)淋洗收集该洗脱液, 用旋转蒸发器浓缩, 最后正己烷定容至 1 mL。加入内标物(萘-d<sub>8</sub>、苊-d<sub>10</sub>、蒽-d<sub>12</sub>、苝-d<sub>12</sub>、菲-d<sub>10</sub> 混合标准, 1000 μg·mL<sup>-1</sup>, AccuStandard 公司)0.5 μg, GC-MS 测定。

### 1.3 仪器分析

气相色谱-单四级杆质谱联用仪(岛津 GC QP2010 plus)分析条件如下:升温程序为 60℃(保留 2 min)20℃·min<sup>-1</sup>升至 220℃(保留 2 min), 5℃·min<sup>-1</sup>升至 240℃(保留 8 min), 10℃·min<sup>-1</sup>升至 300℃(保留 1 min), 色谱柱型号为 HP-5UI 30 m × 0.25 mm × 0.25 μm, 进样口温度 280℃, 传输线 280℃, 离子源温度 250℃。扫描方式为 SIM; 载气为氦气(99.999%), 恒流模式, 流速为 1.0 mL·min<sup>-1</sup>; 不分流进样, 进样量为 1 μL。

保留时间和特征离子碎片定性, 内标法定量。标准曲线配置浓度范围为 0.04~2.0 μg·mL<sup>-1</sup>, 多环芳烃标准物质(1000 μg·mL<sup>-1</sup>)购自 AccuStandard 公司。

### 1.4 QA/QC

实验室方法检出限为 0.01~0.05 μg·m<sup>-3</sup>; 实验室空白与运输空白中 15 种 PAHs 均低于检出限; 替代物的回收率范围为 90.4%~121%; 平行样的相对偏差为 0%~3.8%; 校正曲线相关系数 *R* 均大于 0.995, 以上指标符合《环境空气和废气气相和颗粒物中多环芳烃的测定 气相色谱-质谱法》(HJ 646-2013) 中的质量控制与保证要求, 满足质控要求。

## 2 结果与amp;讨论

### 2.1 PAHs 总排放情况

为排除锅炉中过量空气等因素对 PAHs 排放产生稀释等的影响, 参考《锅炉大气污染物排放标准》(GB 13271-2014), 文中 PAHs 污染物浓度均转化为基准氧含量为 9% 时的浓度, 13 个生物质锅炉中 15 种 PAHs 排放浓度与排放量具体见图 1。

#### 2.1.1 $\sum_{15}$ PAHs 排放特征

将 13 个生物质锅炉按照设计蒸吨数由大到小

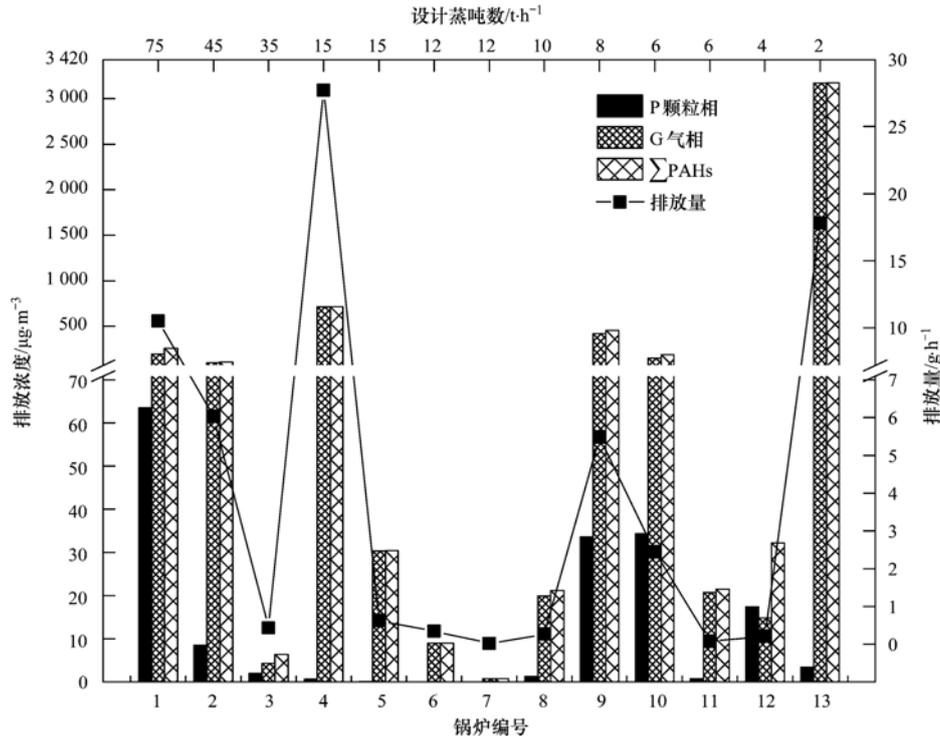


图 1 PAHs 排放浓度与排放量

Fig. 1 Concentration and emission of PAHs

依次排列编号, 其中  $\sum_{15}$  PAHs 排放量为  $0.02 \sim 27.8 \text{ g} \cdot \text{h}^{-1}$ , 排放浓度范围为  $0.77 \sim 3173 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ , 烟气流量与锅炉设计产能成正比. 第 4 号烟气样品因其相对较高的排放浓度和烟气流量成为排放量最大的生物质锅炉, PAHs 的排放量总体趋势为大型(第 1~2 号锅炉) > 小型(第 9~12 号锅炉) > 中型(第 5~8 号锅炉).

本研究结果显示, 各锅炉 PAHs 的排放量与其烟气流量和设计产能之间无明显规律, 这主要是每个锅炉之间的浓度水平差别较大, 使其排放量的差异也较大, 因此本文侧重研究各锅炉中 PAHs 排放浓度情况. 最大排放浓度出现在设计蒸吨数最小的第 13 号锅炉中, 这可能是由于该小型锅炉设计上存在燃烧空间和投料密度等问题导致燃料在相对有限的空间和不够充分的燃烧条件下, 使其不完全燃烧程度较高, 因而产生了较多的 PAHs. 生物质热解及热解产物之间的二次反应生成 PAHs, 而不完全燃烧是 PAHs 产生的主要途径, 但目前关于该途径 PAHs 的产生机制研究尚不充分<sup>[13~14]</sup>.

生物质锅炉 PAHs 的产生量是入料消耗量、锅炉类型、燃烧类型、燃料种类、含氧量等众多影响燃烧效率因素综合作用的结果<sup>[6,15~17]</sup>. 据调查可知, 本次研究的大型锅炉(第 1、2、3 号)以非成型

的甘蔗渣燃料为主, 其余中小型生物质锅炉除了 6 号锅炉燃料为非成型的自制咖啡渣外, 其余的均采用棒状或棍状的成型木屑或刨花燃料, 采用颗粒状成型燃料的第 5、7、8 号锅炉总体浓度水平要低于采用棒状燃料的第 9、11、12、13 号锅炉, 可能是因为颗粒状燃料在形状上的特点使得其燃烧效率比棒状的要高, 燃烧得更充分, 从而减少了 PAHs 的生成. Launhardt 等<sup>[18]</sup>和连进军等<sup>[19]</sup>的研究认为含水量在 15%~20% 左右的生物质燃料会产生较少的 PAHs, 而标准化生产的生物质成型燃料含水率一般要求为 <9%<sup>[20]</sup>, 因此可解释用咖啡渣作为燃料的第 6 号锅炉会有相对较低的 PAHs 产生. 此外, 13 个锅炉中排放浓度最小的是 3、6、7 号锅炉, 其燃烧模式分别是室燃炉、循环流化床、往复炉排, 其余的均为层燃或者链条炉, 在后两种燃烧模式下的 PAHs 排放浓度明显较高, 因此前 3 种燃烧模式是否更有利于减少 PAHs 的产生值得进一步探讨.

### 2.1.2 气-固两相 $\sum_{15}$ PAHs 排放浓度特征

为更好了解工业生物质锅炉  $\sum_{15}$  PAHs 排放情况, 将 PAHs 分为气相和颗粒相研究其分配组成. 从图 1 可见, 气相的 PAHs 排放浓度除了第 13 号锅炉相对偏高外, 其余的锅炉样品浓度范围为  $0.77 \sim 716 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、颗粒相的排放浓度为未检出 ~  $63.4$

$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . 图 2 给出了 13 个生物质锅炉的气-固两相  $\sum_{15}$  PAHs 排放所占质量分数. 总体来看, 气相的 PAHs 是主要贡献源, 其占比为 45.9% ~ 100%. 大型锅炉样品(第 1、2、3 号)气相中  $\sum_{15}$  PAHs 的占比分别为 75.8%、92.2%、67.8%; 除第 12 号锅炉的两相占比相当外, 其他中小型锅炉气相中  $\sum_{15}$  PAHs 的占比为 81.8% ~ 100%, 第 6 和 7 号锅炉中颗粒相的 PAHs 均低于检出限, 这两个锅炉中气相检出的 PAHs 贡献了全部的总量. 这与 Atkins 等<sup>[21]</sup>报道的锅炉燃烧温度 500 ~ 1100°C 或者生物燃料材质改变, 气相 PAHs 占比均大于 80% 的结果类似.

一般来说, 多环芳烃在气-固两相的分配受化合物的物理化学性质、温度、附着物数量及比表面积等因素有关, 而采样时的烟温则是对两相分配有较大的影响<sup>[16]</sup>. 本研究监测显示, 13 个锅炉采集时的烟温范围为 50 ~ 104°C, 通过对烟温与 PAHs 两相分配比的相关性研究表明, 其相关性系数为 0.094, 即烟温对气固分配比没有表现出明显的关联性, 这可能是由于工业烟气中 PAHs 的气固分配难达到平衡, 以及燃烧、烟道条件等其他因素协同影响的结果<sup>[22, 23]</sup>.

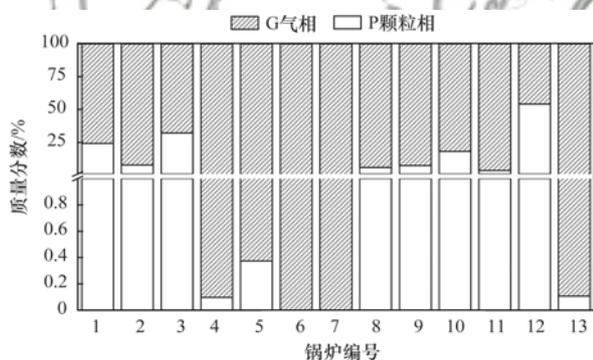


图 2 气-固两相 PAHs 质量分数

Fig. 2 Gas-particle partitioning of PAHs concentration

## 2.2 PAHs 排放组成特征

图 3 给出了 13 个生物质锅炉中总 PAHs 和两相中 15 种 PAHs 的占比情况. 其中 15 种 PAHs 检出率从 31% ~ 100% 不等, 菲、荧蒹、芘全部检出, 萘、菲、荧蒹、芘为  $\sum_{15}$  PAHs 主要组成因子, 质量分数范围分别为 0% ~ 61.6%、17.9% ~ 57.9%、6.12% ~ 35.6%、2.19% ~ 22.6%.

在气相的 PAHs 中, 萘、菲、荧蒹、芘含量较高, 为气相主要组成化合物, 检出率为 92.3% ~ 100%, 所占质量分数分别为 0% ~ 61.7%、20.4%

~ 58.5%、6.09% ~ 36.1%、2.19% ~ 26.5%, 苯并[a]芘、茚并[1,2,3-cd]芘、二苯并[a,h]荧蒹、苯并[g,h,i]芘这 4 种高环类 PAHs 检出率低于 8%, 各个气相样品中 15 种 PAHs 的组成特征轮廓总体相似. 颗粒相中检出的 PAHs 较气相中的少, 15 种 PAHs 检出率为 30.8% ~ 76.9%, 检出率较高的菲、荧蒹、芘、苯并[b]荧蒹同时也是质量分数较大的 PAHs, 其质量分数分别为 0% ~ 57.5%、0% ~ 40.8%、0% ~ 40.4%、0% ~ 100%, 高环的苯并[a]芘、茚并[1,2,3-cd]芘、二苯并[a,h]荧蒹、苯并[g,h,i]芘检出率和含量比气相的高, 约为 30.8% ~ 46.2%, 质量分数为 0% ~ 12.4%、0% ~ 11.2%、0% ~ 21.9%、0% ~ 12.3%. 颗粒相中 15 种 PAHs 的组成特征轮廓总体相似.

为统一比较各个锅炉的 PAHs 组成, 对数据进行归一化处理, 得到相应的生物质锅炉 PAH 成分组成谱(见图 4). 13 个工业生物质锅炉中, 以菲、荧蒹、萘、芘为主, 与 PAHs 主要贡献源气相的组成趋势一致. 低环类 PAHs 主要集中在气相中, 高环类 PAHs 如苯并[a]芘、茚并[1,2,3-cd]芘、二苯并[a,h]荧蒹、苯并[g,h,i]芘等则多在颗粒相中, 对于 3、4 环(如菲、萘、荧蒹、芘) PAHs 在两相中均有分布, 符合 PAHs 物理化学性质的分配规律. 气相的 PAHs 含量在  $\sum_{15}$  PAHs 中占主导地位, 含量大致趋势为  $C_{3\text{环}} > C_{4\text{环}} > C_{5,6\text{环}}$ ; 就颗粒相而言,  $C_{4\text{环}} > C_{3\text{环}} > C_{5,6\text{环}}$ , 这与文献[8, 9, 24]的研究报道相似.

与燃煤、石油和机动车等排放源不同, 一般认为生物质燃烧排放的 PAHs 中荧蒹与(荧蒹 + 芘)的比值大于 0.5<sup>[10, 25]</sup>. 在本研究中, 13 个颗粒相样品的比值为 0.5 ~ 1.0; 气相样品除了 4 号锅炉为 0.4 外, 其余的均大于 0.5, 与总 PAHs 比值情况类似. 总体来说本次监测的锅炉中 PAHs 基本符合该诊断因子, 验证了该诊断参数用于来源分析是具有一定的实际应用合理性.

## 2.3 PAHs 与无机因子 CO、O<sub>2</sub> 的相关性研究

由于 PAHs 和烟气中的无机因子 CO 均为不完全燃烧的产物, 燃烧条件又与含氧量等关系密切, 另一方面 PAHs 的监测方法较可用在线或便携式仪器直接分析的 CO 和 O<sub>2</sub> 繁琐, 因此若能通过实际的监测数据寻找出 CO、O<sub>2</sub> 和 PAHs 产生量的相关规律, 可利用 CO 和 O<sub>2</sub> 数据为 PAHs 的监测提供一定的指示作用, 旨在简化分析监测任务.

将经过含氧量折算后的 PAHs 浓度和对应的

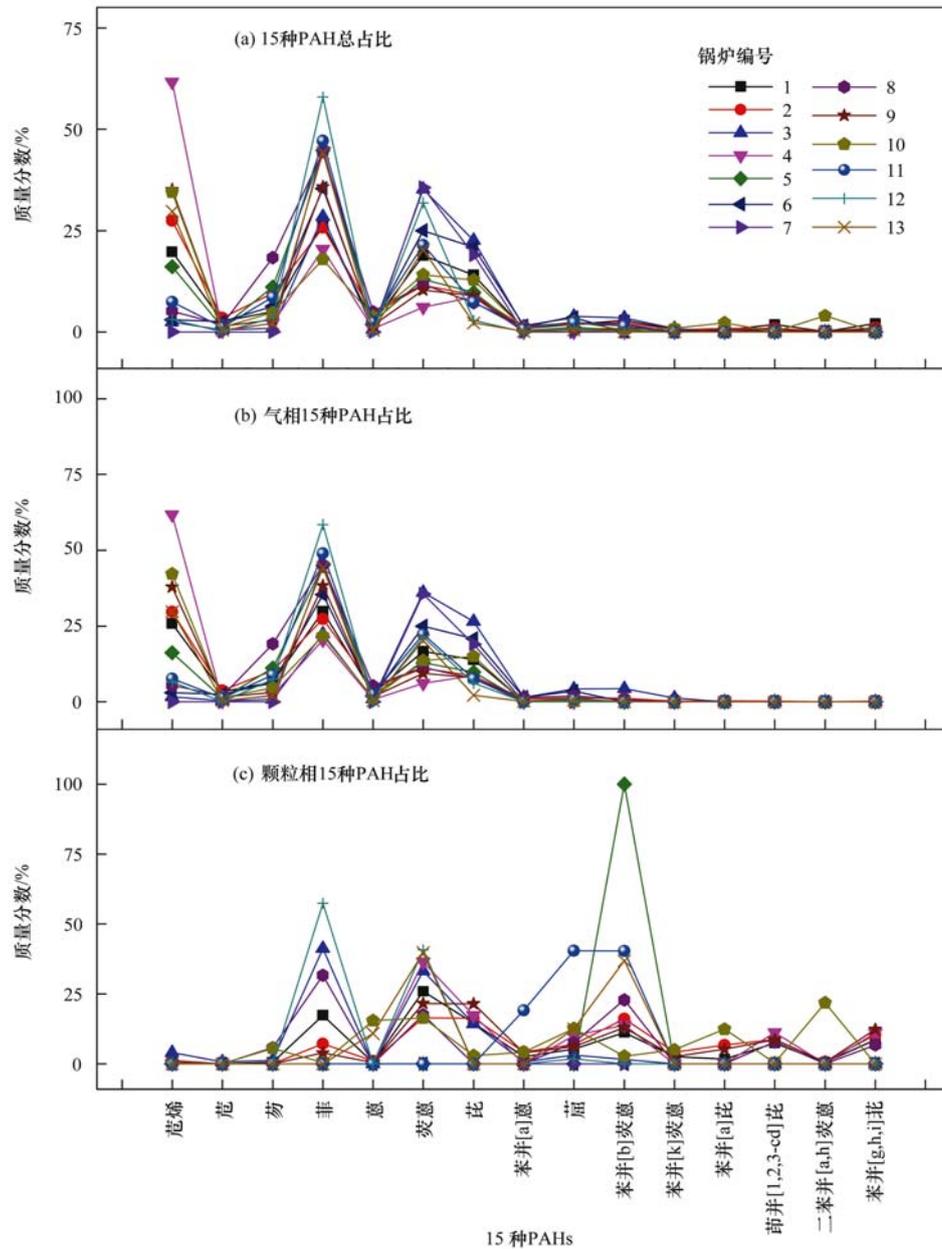


图3 15种PAHs组成占比

Fig. 3 Constituent proportion of the 15 PAHs

CO、O<sub>2</sub> 监测结果用 SPSS 13.0 软件进行 Pearson 相关性分析. 结果显示, 显著性 Sig. 数值小于 0.05 具有统计学意义的有以下两个方面: 一是含氧量与颗粒相的萘、芴, 气相的萘、菲、蒽、苯并[a]蒽、蒾有明显的正相关性, 相关性系数分别为 0.931、0.993、0.622、0.515、0.635、0.963、0.916; 二是 CO 与苊并[1,2,3-cd]比、苯并[g,h,i]比、两相中的芴有明显正相关性, 相关性系数分别为 0.729、0.891、0.995、0.545. 其余的相关性结果显著性 Sig. 数值均大于 0.05, 无统计学意义. 可见, 对于本研究的 13 个锅炉样品中, O<sub>2</sub> 和 CO 与相关性较

弱的或无统计学意义的 PAHs 关系不明显; 另一方面, O<sub>2</sub> 与相关性较强的 PAHs 关系比较密切, 特别是含量占比较大的菲、芴等因子, 而 CO 则表现出与毒性相对较强的高环类 PAHs 有较好的关联性, 这在一定程度上为生物质锅炉的技术改进提供了相关的应用方向, 也为 PAHs 排放浓度及其毒性含量等方面的预测与评估提供了可利用的指示性观察指标.

### 3 结论

(1) 13 个工业生物质锅炉中  $\sum_{15}$  PAHs 的浓度

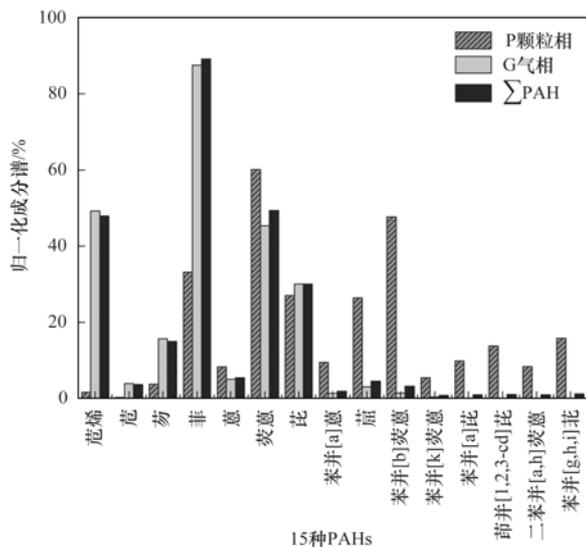


图4 13个工业生物锅炉中多环芳烃的成分谱

Fig. 4 Profiles of PAHs from the combustion in 13 biomass boilers

差别较大,其中  $\sum_{15} \text{PAHs}$  排放量为  $0.02 \sim 27.8 \text{ g} \cdot \text{h}^{-1}$ ,排放浓度范围为  $0.77 \sim 3173 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,生物质锅炉中 PAHs 污染排放及其燃烧条件、类型等需加强控制与优化研究。

(2) 13个锅炉排放的 PAHs 成分谱轮廓相似,以萘、菲、荧蒽、芘为主,气相的 PAHs 占比较大为  $45.9\% \sim 100\%$ ,是 PAHs 主要贡献源.低环的 PAHs 多分布在气相,高环的多分布在颗粒相且检出率较低,3、4环的 PAHs 浓度明显高于5、6环.生物质燃烧源诊断因子荧蒽/(荧蒽+芘)除了4号锅炉的气相样品为0.4外,其余均大于0.5,验证了该诊断参数用于来源分析是具有一定的应用合理性。

(3)  $\text{O}_2$  与含量占比较大的菲、萘等因子具有较明显正相关性,CO 与毒性相对较强的高环类 PAHs 有较好的关联性。

#### 参考文献:

- [1] Chandrasekaran S R, Hopke P K, Newtown M, *et al.* Residential-scale biomass boiler emissions and efficiency characterization for several fuels[J]. *Energy & Fuels*, 2013, **27** (8): 4840-4849.
- [2] 谢启强. 生物质成型燃料物理性能和燃烧特性研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2008.  
Xie Q Q. Studies on the physical performance and combustion characteristic of the biomass densification briquetting fuel[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2008.
- [3] 方平, 唐子君, 黄建航, 等. 生物质锅炉烟气污染物排放特性及其控制对策[J]. *环境科学与技术*, 2016, **39**(10): 155-160.  
Fang P, Tang Z J, Huang J H, *et al.* Emission characteristics of flue gas pollutants emitted from biomass boilers and its control strategies[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, **39** (10): 155-160.
- [4] Shen H Z, Huang Y, Wang R, *et al.* Global atmospheric emissions of polycyclic aromatic hydrocarbons from 1960 to 2008 and future predictions [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47**(12): 6415-6424.
- [5] GB 13271-2014, 锅炉大气污染物排放标准[S].  
GB 13271-2014, Emission standard of air pollutants for boiler [S].
- [6] 宋皎, 杨波. 生物质颗粒燃料燃烧特性及其污染物排放情况综述[J]. *生物质化学工程*, 2016, **50**(4): 60-64.  
Song J, Yang B. Combustion characteristics and pollutants emission of biomass pellet fuels [J]. *Biomass Chemical Engineering*, 2016, **50**(4): 60-64.
- [7] 赵欣, 李慧, 胡乃涛, 等. 生物质固体成型燃料燃烧的 NO 和 CO 排放研究[J]. *环境工程*, 2015, **33**(10): 50-54.  
Zhao X, Li H, Hu N T, *et al.* Research on the combustion emissions of NO and CO from biomass solid fuel [J]. *Environmental Engineering*, 2015, **33**(10): 50-54.
- [8] 黄帅, 黄欣怡, 吴水平, 等. 不同生物质燃烧排放多环芳烃及糖醇类化合物的模拟研究[J]. *环境科学*, 2015, **36**(10): 3573-3581.  
Huang S, Huang X Y, Wu S P, *et al.* Simulation study of the emission of polycyclic aromatic hydrocarbons and sugar alcohols from biomass burning [J]. *Environmental Science*, 2015, **36** (10): 3573-3581.
- [9] 王真真, 谭吉华, 毕新慧, 等. 三种农作物秸秆燃烧颗粒态多环芳烃排放特征[J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(4): 1065-1071.  
Wang Z Z, Tan J H, Bi X H, *et al.* Emission characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons from three types of agricultural straw burning smoke [J]. *China Environmental Science*, 2015, **36**(4): 1065-1071.
- [10] 张宜升, 张厚勇, 栾胜基, 等. 生物质露天焚烧及家庭燃用的多环芳烃排放特征研究[J]. *中国环境科学*, 2015, **35** (2): 387-395.  
Zhang Y S, Zhang H Y, Luan S J, *et al.* Emission characteristics of PAHs from open and residential biomass burning [J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(2): 387-395.
- [11] Shen G F, Tao S, Chen Y C, *et al.* Emission characteristics for polycyclic aromatic hydrocarbons from solid fuels burned in domestic stoves in rural China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47**(24): 14485-14494.
- [12] 张鹤丰. 中国农作物秸秆燃烧排放气态、颗粒态污染物排放特征的实验室模拟[D]. 上海: 复旦大学, 2009.  
Zhang H F. A laboratory study on emission characteristics of gaseous and particulate pollutants emitted from agricultural crop residue burning in China [D]. Shanghai: Fudan University, 2009.
- [13] McGrath T E, Wooten J B, Chan W G, *et al.* Formation of polycyclic aromatic hydrocarbons from tobacco: the link between low temperature residual solid (char) and PAH formation [J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2007, **45**(6): 1039-1050.
- [14] Neves D, Thunman H, Matos A, *et al.* Characterization and prediction of biomass pyrolysis products [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2011, **37**(5): 611-630.
- [15] Yang X Y, Geng C M, Sun X S, *et al.* Characteristics of

- particulate-bound polycyclic aromatic hydrocarbons emitted from industrial grade biomass boilers [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2016, **40**(2): 28-34.
- [16] 陈颖军. 家用蜂窝煤燃烧烟气中碳颗粒物和三环芳烃的排放特征[D]. 广州: 中国科学院研究生院(广州地球化学研究所), 2004.
- Chen Y J. Emission characteristics of carbonaceous particulate and polycyclic aromatic hydrocarbons from residential honeycomb-coal-briquette combustion[D]. Guangzhou: Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2004.
- [17] Gadi R, Singh D P, Saud T, *et al.* Emission estimates of particulate PAHs from biomass fuels used in Delhi, India [J]. *Human and Ecological Risk Assessment*, 2012, **18**(4): 871-887.
- [18] Launhardt T, Strehler A, Dumler-Gradl R, *et al.* PCDD/F-and PAH-emission from house heating systems [J]. *Chemosphere*, 1998, **37**(9-12): 2013-2020.
- [19] 连进军. 生物质燃烧烟雾和大气降尘中三环芳烃及其烷基取代物的研究[D]. 上海: 复旦大学, 2008.
- Lian J J. Study on polycyclic aromatic hydrocarbons and their alkyl derivatives in dustfall and smog emitted from biomass burning[D]. Shanghai: Fudan University, 2008.
- [20] DB44/T 1052-2012, 工业锅炉用生物质成型燃料[S].  
DB44/T 1052-2012, Biomass molded fuel of industrial boiler [S].
- [21] Atkins A, Bignal K L, Zhou J L, *et al.* Profiles of polycyclic aromatic hydrocarbons and polychlorinated biphenyls from the combustion of biomass pellets [J]. *Chemosphere*, 2010, **78**(11): 1385-1392.
- [22] Eriksson A C, Nordin E Z, Nyström R, *et al.* Particulate PAH emissions from residential biomass combustion: time-resolved analysis with aerosol mass spectrometry [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **48**(12): 7143-7150.
- [23] Vicente E D, Vicente A M, Bandowe B A M, *et al.* Particulate phase emission of parent polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and their derivatives (alkyl-PAHs, oxygenated-PAHs, azaarenes and nitrated PAHs) from manually and automatically fired combustion appliances [J]. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 2016, **9**(6): 653-668.
- [24] 于国光, 王铁冠, 吴大鹏. 薪柴燃烧源和燃煤源中三环芳烃的成分谱研究[J]. *生态环境*, 2007, **16**(2): 285-289.
- Yu G G, Wang T G, Wu D P. Study on fingerprints of PAHs from the combustion of bavin and coal [J]. *Ecology and Environment*, 2007, **16**(2): 285-289.
- [25] Yunker M B, Macdonald R W, Vingarzan R, *et al.* PAHs in the Fraser River basin: a critical appraisal of PAH ratios as indicators of PAH source and composition [J]. *Organic Geochemistry*, 2002, **33**(4): 489-515.



## CONTENTS

Estimation of Fine Particle (PM <sub>2.5</sub> ) Emission Inventory from Cooking: Case Study for Shanghai	WANG Hong-li, JING Sheng-ao, LOU Sheng-rong, <i>et al.</i> (1971)
Chemical Characterization, Spatial Distribution, and Source Identification of Organic Matter in PM <sub>2.5</sub> in summertime Shanghai, China	GAO Ya-qin, WANG Hong-li, JING Sheng-ao, <i>et al.</i> (1978)
Seasonal Variation and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Salts in PM <sub>2.5</sub> in the Southern Suburbs of Beijing	GAO Han-yu, WEI Jing, WANG Yue-si (1987)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Inorganic Ions in Road Dust PM <sub>2.5</sub> During Spring in Tianjin Using the Quadrat Sampling Method	ZHAO Jing-qi, JI Ya-qin, ZHANG Lei, <i>et al.</i> (1994)
HONO Pollution Characteristics and Nighttime Sources During Autumn in Guangzhou, China	TIAN Zhi-lin, YANG Wen-da, YU Xiao-fang, <i>et al.</i> (2000)
Sulfur Sources and Oxidation Pathways in Summer Aerosols from Nanjing Northern Suburbs Using S and O Isotopes	HAN Xun, REN Jie, CHEN Shan-li, <i>et al.</i> (2010)
Methods for Determining and Applications of High-Resolution Vehicle Emission Inventory at County Scale	FAN Shou-bin, GUO Jin-jin, LI Xue-feng (2015)
Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Emitted from Typical Industrial Biomass Boilers	LIN Yu-jun, BAI Li, WANG Huan-xiang, <i>et al.</i> (2023)
Research of Parameter Uncertainty for the HSPF Model Under Different Temporal Scales	PANG Shu-jiang, WANG Xiao-yan, MA Wen-jing (2030)
Contribution of Nitrogen Sources in Water Sources by Combining Nitrogen and Oxygen Isotopes and SIAR	JIN Zan-fang, ZHANG Wen-liao, ZHENG Qi, <i>et al.</i> (2039)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Volatile Organic Compounds in Baiyangdian Lake	GAO Qiu-sheng, ZHAO Yong-hui, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (2048)
Fluorescent Characteristics and Environmental Significance of Particulate Organic Matter in Lake Taihu, China	LÜ Wei-wei, YAO Xin, ZHANG Bao-hua, <i>et al.</i> (2056)
Distribution and Settlement of Microplastics in the Surface Sediment of Yangtze Estuary	ZHU Xiao-tong, YI Jun, QIANG Li-yuan, <i>et al.</i> (2067)
Water Chemistry and Characteristics of Dissolved Organic Carbon During the Wet Season in Wulixia Reservoir, SW China	LU Xiao-xuan, LI Qiang, JIN Zhen-jiang, <i>et al.</i> (2075)
Bioavailability of Dissolved Organic Carbon in Rivers for Typical Vegetation Types in the Permafrost Regions on the Qinghai-Tibet Plateau	MA Xiao-liang, LIU Gui-min, WU Xiao-dong, <i>et al.</i> (2086)
Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) and Relationship with Dissolved Heavy Metals in a Peri-urban and an Urban River	LIANG Meng-qi, SHAO Mei-ling, CAO Chang-li, <i>et al.</i> (2095)
Migration and Transformation of Dissolved Organic Matter in Karst Water Systems and an Analysis of Their Influencing Factors	ZHANG Lian-kai, LIU Peng-yu, QIN Xiao-qun, <i>et al.</i> (2104)
Source and Distribution of Dissolved Metal Ions in the Backwater Area of Pengxi River in Three Gorges Reservoir	ZHAO Xiao-song, YU Jian-jun, FU Li, <i>et al.</i> (2117)
Differences in Diffusive Fluxes of Nutrients from Sediment Between the Natural River Areas and Reservoirs in the Lancang River Basin	WANG Xue, CHENG Bao, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (2126)
Nutrient Distribution Characteristics of the Sediment-water System in the Xiangxi River During the Impoundment of TGR	SU Qing-qing, LIU De-fu, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (2135)
Effects of Submerged Macrophytes on Different Phosphorus Fractions in Overlying Water and Interstitial Water	YANG Wen-bin, GAO Shun-feng, WAN Rui, <i>et al.</i> (2145)
Distribution Characteristics and Fluxes of Nitrogen and Phosphorus at the Sediment-water Interface of Yuqiao Reservoir	WEN Shuai-long, GONG Wan-qing, WU Tao, <i>et al.</i> (2154)
Distribution of Phosphorus Fractions in Surface Sediments of Minjiang Mainstreams	YANG Geng, QIN Yan-wen, HAN Chao-nan, <i>et al.</i> (2165)
Nitrate Uptake Kinetics and Correlation Analysis in an Agricultural Drainage Ditch	LI Ru-zhong, YIN Qi-he, GAO Su-di, <i>et al.</i> (2174)
Influencing Factors for Phosphorus Removal by Modified Bio-ceramic Substrates Coated with ZnAl-LDHs Synthesized by Different Modification Conditions	XIANG Yang, ZHANG Xiang-ling, LEI Yu, <i>et al.</i> (2184)
Removal of Odorants in Drinking Water Using VUV/Persulfate	SUN Xin, SHI Lu-xiao, ZHANG Yi, <i>et al.</i> (2195)
Degradation of OG with Peroxymonosulfate Activated by a MnFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> -graphene Hybrid	XIA Wen-jun, LIU Feng, HAO Shang-bin, <i>et al.</i> (2202)
Mechanism of As(V) Removal from Water by Lanthanum and Cerium Modified Biochars	LI Jin, ZU Yan-qun, LI Gang, <i>et al.</i> (2211)
Adsorption of Dissolved Organic Matter with Different Relative Molecular Masses on Inorganic Minerals and Its Influence on Carbamazepine Adsorption Behavior	LIANG Yu, HE Jiang-tao, ZHANG Si (2219)
Pollution Characteristics of Organophosphorus Flame Retardants in a Wastewater Treatment Plant	SUN Jia-wei, DING Wei-nan, ZHANG Zhan-en, <i>et al.</i> (2230)
Enhanced Coagulation as a Pretreatment for Low Temperature Wastewater	LIU Hai-long, REN Yu-xia, ZHANG Zhong-min (2239)
Operating Characteristics and Fouling Characteristics of a RO Membrane System for Desalination of Dyeing Wastewater	TAN Yu-jun, ZHANG Ze-tian, WU Qian-yuan, <i>et al.</i> (2249)
Optimization of the Nitrogen Removal Performance on the CANON Process in a Biofilm Reactor: From FBBR to MBBR	FU Kun-ming, LI Hui, ZHOU Hou-tian, <i>et al.</i> (2256)
Microbial Community Dynamics During Two Sludge Granulation Processes	GAO Jing-feng, ZHANG Li-fang, ZHANG Shu-jun, <i>et al.</i> (2265)
Sludge Conditioning Performance of Polyaluminum, Polyferric, and Titanium Xerogel Coagulants	WANG Xiao-meng, WANG Xin, YANG Ming-hui, <i>et al.</i> (2274)
Effects of Heat and Heat-alkaline Treatments on Disintegration and Dissolved Organic Matter in Sludge	DAI Qin, ZHANG Wen-zhe, YU Pan-fen, <i>et al.</i> (2283)
Effect of Different Ratios of Anaerobic Time and Aeration Time on the Formation of Partial Nitrification Granules	LI Dong, GUO Yue-zhou, CAO Mei-zhong, <i>et al.</i> (2289)
Spatial and Temporal Variation of Mercury in Municipal Sewage Sludge in China	WANG Ning, LIU Qing-wei, ZHI Yin, <i>et al.</i> (2296)
Characteristics of N <sub>2</sub> O Release and Influencing Factors in Grass-type and Algae-type Zones of Taihu Lake During Summer	ZHENG Xiao-lan, WEN Shuai-long, LI Xin, <i>et al.</i> (2306)
Analysis of Greenhouse Gas Emission Characteristics and Their Influencing Factors in the Algae Zone of Lake Taihu	JIA Lei, PU Yi-ni, YANG Shi-jun, <i>et al.</i> (2316)
Dynamics of CO <sub>2</sub> and N <sub>2</sub> O in Seasonal Frozen Soil Profiles for a Typical Steppe in Inner Mongolia	LI Jin-bo, YAO Nan, LI Xiu, <i>et al.</i> (2330)
Characteristics of CO <sub>2</sub> Flux in a Mature Apple ( <i>Malus domestica</i> ) Orchard Ecosystem on the Loess Plateau	YANG Jian-feng, YANG Xiao-ni, WANG Jun-hua, <i>et al.</i> (2339)
Effects of Biochar Application Rates on Greenhouse Gas Emissions in the Purple Paddy Soil	QI Le, GAO Ming, GUO Xiao-min, <i>et al.</i> (2351)
Short-Term Effects of Different Fertilization Treatments on Greenhouse Gas Emissions from Northeast Black Soil	LI Ping, LANG Man, LI Miao, <i>et al.</i> (2360)
Eukaryotic Micro-plankton Community Diversity and Characteristics of Regional Distribution in the Yellow Sea by ITS High-throughput Sequencing	ZHANG Li, LIN Jia-ning, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (2368)
Influence of Different Patterns of Discharge on Microbial Diffusion in Municipal Treated Wastewater	LANG Xiu-lu, SONG Zhi-wen, XU Ai-ling, <i>et al.</i> (2380)
Impact of Tourism on Bacterial Communities of Karst Underground River: A Case Study from Two Caves in Fengdu, Chongqing	LÜ Xian-fu, HE Qiu-fang, WANG Feng-kang, <i>et al.</i> (2389)
Diversity of the Microbial Community in Rice Paddy Soil with Biogas Slurry Irrigation Analyzed by Illumina Sequencing Technology	ZHU Jin-shan, ZHANG Hui, MA Lian-jie, <i>et al.</i> (2400)
Effect of Biochar Amendment on Physicochemical Properties and Fungal Community Structures of Cinnamon Soil	YAN Hai-tao, YIN Quan-yu, DING Song-shuang, <i>et al.</i> (2412)
Carbon Metabolism Characteristics of the Karst Soil Microbial Community for Pb-Zn Mine Tailings	FANG Jun-jia, LI Qiang, LIU Chang, <i>et al.</i> (2420)
Denitrification Characteristics and Community Structure of Aerobic Denitrifiers from Lake and Reservoir Sediments	KANG Peng-liang, ZHANG Hai-han, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (2431)
Investigation of the Coupling Mechanism Between Naphthalene Degradation and Denitrification of a Naphthalene Degraded Bacterial Consortium Under Denitrification	ZHANG Ze-yu, WANG Ming-xia, CHENG Yong-yi, <i>et al.</i> (2438)
Spatial Distribution Study and Pollution Assessment of Pb in Soils in the Xijiang River Drainage of Guangxi	ZHANG Yun-xia, SONG Bo, CHEN Tong-bin, <i>et al.</i> (2446)
Effects of Agricultural Activities on Soil Mercury Changes in the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir	CHEN Qiu-yu, SUN Song, YIN De-liang, <i>et al.</i> (2456)
Screening and Identification of Arsenic-resistant Endophytic Bacteria from Different Rice Tissues ( <i>Oryza sativa</i> L.) in Different Growth Stages	WANG Bo-xun, WANG Xue-dong, DUAN Gui-lan (2464)
Characteristics of Mercury Transformation in Soil and Accumulation in Rice Plants in an Acidic Purple Paddy Soil Area	LI Yu-qin, SUN Tao, DENG Han, <i>et al.</i> (2472)
Life Cycle Environmental Impact Assessment on Different Modes of Greenhouse Vegetable Production in the North China Plain	XU Qiang, HU Ke-lin, LI Ji, <i>et al.</i> (2480)
Health Effects of PM <sub>2.5</sub> Based on Bacterial Toxicity Test and Transcriptional Analysis in Lungs of Mice	SONG Peng-cheng, LU Shu-yu, WEI Yong-jie, <i>et al.</i> (2489)
Socio-economic Factors Influencing the Spatial Distribution of PM <sub>2.5</sub> Concentrations in China: An Exploratory Analysis	DUAN Jie-xiong, ZHAI Wei-xin, CHENG Cheng-qi, <i>et al.</i> (2498)