

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第4期

Vol.39 No.4

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

京津冀地区钢铁行业污染物排放清单及对PM_{2.5}影响 段文娇, 郎建全, 程水源, 贾佳, 王晓琦 (1445)

京津冀内陆平原地区PM_{2.5}浓度时空变化定量模拟 郝静, 孙成, 郭兴宇, 王卫, 刘方田, 党海燕 (1455)

成都市冬季相对湿度对颗粒物浓度和大气能见度的影响 刘凡, 谭钦文, 江霞, 蒋文举, 宋丹林 (1466)

华山地区PM_{2.5}中无机离子垂直分布特征 曹聪, 王格慧, 吴灿, 李建军, 刘浪, 李瑾, 余兴 (1473)

烟花爆竹集中燃放的大气细颗粒物(PM_{2.5})成分图谱 谢瑞加, 侯红霞, 陈永山 (1484)

长三角地区中小燃煤锅炉PM_{2.5}成分谱特征 徐健, 黄成, 李莉, 陈勇航, 楼晟荣, 乔利平, 王鸿宇 (1493)

民用燃煤排放分级颗粒物中重金属排放因子 严沁, 孔少飞, 刘海彪, 王伟, 吴剑, 郑明明, 郑淑容, 杨国威, 吴方琪 (1502)

冬、春季青岛大气气溶胶中乙二酸的分布特征及影响因素 张帅, 石金辉, 姚小红, 高会旺 (1512)

青岛大气降水中微量元素的浓度及溶解度 李茜, 石金辉, 李鹏志, 姚小红, 高会旺 (1520)

辽东湾大气中多环芳烃的含量组成及气粒分配 张玉凤, 宋永刚, 田金, 赵海勃, 杨爽, 吴金浩 (1527)

典型地区大气新型卤代阻燃剂污染特征、来源分析及人体暴露 李琦路, 杨孔, 李军, 张干 (1537)

苏州工业园区室内外颗粒物中多溴联苯醚污染特征及人体暴露水平 王俊霞, 顾海东, 张占恩, 钱飞跃 (1544)

上海市大气污染对感冒疾病相对危险度的影响 杨丝絮, 马玉霞, 周建丁, 周骥 (1552)

城镇化河流溶解性有机质的荧光特性与水质相关性:以宁波市北仑区芦江为例 曹昌丽, 梁梦琦, 何桂英, 纵亚男, 唐剑锋 (1560)

艾比湖区域景观格局与河流水质关系探讨 曹灿, 张飞, 阿依尼格·亚力坤, 朱世丹, 郭苗, 阿丽米热·塔力甫江, Kung Hsiangte (1568)

三峡澎溪河水华期间水体CH₄浓度及其通量变化特征初探 秦宇, 张渝阳, 李哲, 马健荣 (1578)

漓江段地表水体旱季硝酸盐动态变化特征及其来源 苗迎, 章程, 肖琼, 赵海娟, 李成习 (1589)

柳江流域饮用水源地重金属污染与健康风险评价 张清华, 韦永著, 曹建华, 于爽 (1598)

黄柏河流域梯级水库沉积物磷形态特征及磷释放通量分析 刘佳, 雷丹, 李琼, 王亮, 张平, 肖尚斌 (1608)

白洋淀典型持久性有机污染物污染特征与风险评估 高秋生, 焦立新, 杨柳, 田自强, 杨苏文, 安月霞, 贾海斌, 崔志丹 (1616)

典型有机氯农药在珠三角地区多介质环境中的归趋模拟 高梓闻, 徐月, 亦如瀚 (1628)

河道水旁路处理中试工艺中PPCPs的去除效果及机制 李力, 朱楦, 白瑶, 赵健, 曹之淇, 郭泓利, 李凌云, 左剑勇 (1637)

茶普生在氯消毒过程中的去除、转化与风险评价 樊鑫鑫, 杜尔登, 李佳琦, 赵顺利, 王聿琳, 彭明国 (1645)

真空紫外/氯处理饮用水典型致嗅物质 孙昕, 张焱, 史路肖, 陈笑涵, 唐晓 (1654)

热活化过硫酸盐降解三氯生 蒋梦迪, 张清越, 季跃飞, 陆隽鹤 (1661)

水体模拟颗粒物对四环素的吸附特性及基本规律 徐龙凤, 魏群山, 吕强, 唐立朋, 刘亚男, 柳建设 (1668)

海水优化ANAMMOX包埋固定化及其处理含海水污水的脱氮性能 单晓静, 于德爽, 李津, 陈光辉, 冯莉, 吕廷廷, 邵青 (1677)

外源甜菜碱投加增强高盐废水厌氧氨氧化脱氮性能 于德爽, 吴国栋, 李津, 周同, 王晓静 (1688)

硝化污泥富集及其强化高氨氮冲击的中试研究 盛晓琳, 崔灿灿, 王家德, 刘锐, 徐峰, 陈吕军 (1697)

分段进水对改良A²/O-BAF双污泥系统反硝化除磷脱氮的影响 南彦斌, 彭永臻, 曾立云, 赵智超, 刘宏, 李慧, 陈永志 (1704)

不同温度下应用比值控制实现连续流好氧颗粒污泥短程硝化 梁东博, 卞伟, 阚睿哲, 王文啸, 赵青, 孙艺齐, 李军 (1713)

智能化曝气控制A/O工艺活性污泥特性演化对内源反硝化脱氮的作用机制 徐旻昉, 胡湛波, 张穗生, 李昊航 (1720)

温度对一体式厌氧流化床膜生物反应器运行效能及微生物群落结构的影响 李玥, 胡奇, 高大文 (1731)

污泥臭氧原位减量工艺中抗生素的去除 汪鲁, 黄伟伟, 李彦刚, 强志民 (1739)

零价铁对污泥厌氧消化过程中四环素抗性基因水平转移的作用影响 杨帆, 徐雯丽, 钱雅洁, 刘振鸿, 薛罡, 高品 (1748)

环境因子对全自养脱氮颗粒污泥功能菌协同效应的影响 陈希, 钱飞跃, 王建芳, 高军军, 沈耀良, 贾珣 (1756)

后置固相反硝化滤池工艺沿程微生物特性 张千, 吉芳英, 徐璇 (1763)

复合菌株YH01+YH02强化SBR好氧反硝化脱氮及菌群结构分析 陈海升, 曹刚, 张迪, 黄郑郑, 莫测辉 (1773)

氮磷失衡下膨胀污泥性能及膨胀菌群落结构变化 贺雪濛, 丁丽丽, 张璐璐, 顾卓江, 任洪强 (1782)

1株铜绿假单胞菌对苊的降解特性及代谢途径 李想, 张雪英, 周俊, 宋军, 王建刚, 雍晓雨, 贾红华 (1794)

铜尾矿库坝面土壤微生物群落动态的驱动因子 李磊, 景炬辉, 刘晋仙, 柴宝峰 (1804)

垦殖对桂林会仙喀斯特湿地土壤养分与微生物活性的影响 黄科朝, 沈育伊, 徐广平, 黄玉清, 张德楠, 孙英杰, 李艳琼, 何文, 周龙武 (1813)

黄土丘陵区退耕还林还草对土壤细菌群落结构的影响 陈孟立, 曾全超, 黄懿梅, 倪银霞 (1824)

河岸带表层土壤的铁氨氧化(Feammox)脱氮机制的探究 丁帮环, 李正魁, 朱鸿杰, 陈湜, 覃云斌, 杨建华, 胡优优 (1833)

藏猪扰动作用下的高寒草甸土壤退化特征及微生物群落结构变化 展鹏飞, 肖德荣, 闫鹏飞, 刘振亚, 马金成, 陈志明, 格茸, 田伟, 王行 (1840)

深圳湾典型红树植物根表铁膜及其重金属富集特征 沈小雪, 李瑞利, 柴民伟, 邱国玉 (1851)

香港周边海域野生鱼体内DDTs和PCBs的含量分布和食用风险评估 苏杨, 鲍恋君, 曾永平 (1861)

偏远高山湿地土壤中PAHs污染特征:以神农架大九湖为例 胡天鹏, 邢新丽, 柯艳萍, 毛瑶, 黎荧, 郑煌, 喻月, 张家泉, 祁士华 (1872)

西南地区典型森林水库土壤和沉积物汞的迁移转化特征 孙涛, 马明, 王永敏, 安思危, 王定勇 (1880)

广西西江流域土壤镉含量特征及风险评估 宋波, 杨子杰, 张云霞, 王佛鹏, 周浪, 李黎, 钟雪梅 (1888)

长期施肥对旱地红壤及作物中砷累积的影响 张蓉, 余光辉, 李亚青 (1901)

三元土壤调理剂对田间水稻镉累积转运的影响 辜娇峰, 周航, 贾润语, 王倩倩, 李虹呈, 张平, 彭佩钦, 廖柏寒 (1910)

稻田土壤性质与水稻镉含量的定量关系 王梦梦, 何梦媛, 苏德纯 (1918)

钙基膨润土辅助对堆肥及土壤Cu、Zn形态转化和白菜吸收的影响 赵军超, 王权, 任秀娜, 李荣华, Mukesh Kumar Awasthi, Altaf Hussain Lahori, 张增强 (1926)

外源碳和氮输入对降水变化下土壤呼吸的短期影响 贺玉龙, 齐玉春, 彭琴, 董云社, 郭树芳, 闫钟清, 李兆林, 王丽芹 (1934)

模拟降水量减少对大豆-冬小麦轮作农田土壤呼吸的影响 王朝辉, 陈书涛, 孙鹭, 胡正华 (1943)

紫色土丘陵区农田源头沟渠一氧化氮排放的季节差异及影响因素 田琳琳, 任光前, 朱波 (1952)

季节非对称升温对喀斯特土壤CO₂释放的影响 唐国勇, 张春华, 刘方炎, 李昆, 马艳 (1962)

《环境科学》征订启事 (1472) 《环境科学》征稿简则 (1511) 信息 (1755, 1839, 1925)

长三角地区中小燃煤锅炉 PM_{2.5} 成分谱特征

徐健¹, 黄成^{2,3*}, 李莉^{2,3}, 陈勇航¹, 楼晟荣^{2,3}, 乔利平^{2,3}, 王鸿宇¹

(1. 东华大学环境科学与工程学院, 上海 201620; 2. 上海市环境科学研究院, 上海 200233; 3. 国家环境保护城市大气复合污染成因与防治重点实验室, 上海 200233)

摘要: 选取 7 台中小燃煤锅炉, 分析其排放的烟气中 PM_{2.5} 的排放因子、成分谱特征和除尘设施对不同粒径段的 PM_{2.5}、OC、EC 的去除效率. 研究发现: 除尘设施出口处的 PM_{2.5} 质量排放因子在 0.047 ~ 0.283 g·kg⁻¹ 之间, 平均为 (0.146 ± 0.081) g·kg⁻¹. SO₄²⁻ 在离子组分中的含量最为丰富, 其次为 NH₄⁺ 和 Ca²⁺; S 在元素组分中的含量最为丰富, 其次为 Al、Ca、Fe; OC、EC 的含量波动幅度较大, 各锅炉产生的 OC 和 EC 比值均大于 1. 在所测粒径的范围内, PM_{2.5} 的质量浓度呈单峰或双峰分布, 峰值点出现在 0.07 ~ 0.12 μm 处和 1 μm 以上 (双峰时); OC 的粒径分布呈双峰或三峰的特征, 峰值点分别出现在 0.04 μm 和 0.20 ~ 0.31 μm 处和 1 μm 以上 (三峰时). 除尘设施对 PM_{2.5}、OC、EC 质量浓度的整体去除效率分别为 66%、53% 和 23%.

关键词: 燃煤锅炉; PM_{2.5}; 排放因子; 化学成分谱; 去除效率

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)04-1493-09 DOI: 10.13227/j.hjkk.201707034

Chemical Composition Characteristics of PM_{2.5} Emitted by Medium and Small Capacity Coal-fired Boilers in the Yangtze River Delta Region

XU Jian¹, HUANG Cheng^{2,3*}, LI Li^{2,3}, CHEN Yong-hang¹, LOU Sheng-rong^{2,3}, QIAO Li-ping^{2,3}, WANG Hong-yu¹

(1. College of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China; 2. Shanghai Academy of Environmental Sciences, Shanghai 200233, China; 3. State Environment Protection Key Laboratory of Formation and Prevention of the Urban Air Complex Pollution, Shanghai 200233, China)

Abstract: Seven small and medium coal-fired boilers were selected to analyze the emission factors and chemical composition characteristics of PM_{2.5}, and the efficiency of the dust collection unit in removing PM_{2.5}, OC, and EC of different particle sizes. At the outlet of the dust collection unit, PM_{2.5} mass emission factor was around 0.047-0.283 g·kg⁻¹ with an average of (0.146 ± 0.081) g·kg⁻¹. SO₄²⁻ was the most abundant ionic component, followed by NH₄⁺ and Ca²⁺. S was the most abundant among all the elements, followed by Al, Ca, and Fe. The contents of OC and EC fluctuated greatly, and the ratio of OC and EC produced by each boiler was greater than one. In the range of the measured particle sizes, the mass concentration of PM_{2.5} showed a singlet or bimodal distribution, and the peak value appeared at 0.07-0.12 μm and greater than 1 μm in bimodal distribution. The mass concentration of OC showed a bimodal or trimodal distribution, and the peak value appeared at 0.04 μm, 0.20-0.31 μm, and greater than 1 μm in trimodal distribution. The efficiencies of the dust collection unit in removing PM_{2.5}, OC, and EC were 66%, 53%, and 23%, respectively.

Key words: coal-fired boilers; PM_{2.5}; emission factor; chemical composition; removal efficiency

以细颗粒物 (PM_{2.5}) 为代表的霾污染是当前我国面临的最严峻的大气污染问题^[1-3], PM_{2.5} 不仅会造成大气能见度降低, 同时也会对人体健康造成极大的危害, 诱发鼻炎、支气管炎、心肌梗塞等多种疾病^[4-6].

京津冀^[7,8]、长三角^[9-13]、珠三角^[14]、成渝^[15,16]等多个地区及城市的大气 PM_{2.5} 源解析结果表明, 燃煤是大气中 PM_{2.5} 的主要来源之一. 为了弄清燃煤锅炉的 PM_{2.5} 组分特征, 国内外学者已开展了多项研究. 李超等^[17] 和王书肖等^[18] 分别研究了工业燃煤锅炉中 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 的成分谱排放特征; 胡月琪等^[19] 和段雷等^[20] 等重点研究了燃煤锅

炉排放的 PM_{2.5} 中水溶性离子的排放特征. 李松等^[21] 和梁云平等^[22] 分别比较了不同类型燃煤锅炉 (电厂锅炉与工业锅炉、电厂锅炉与供热锅炉) 中颗粒物的排放特征; 耿春梅等^[23] 比较了燃煤锅炉和生物质锅炉的颗粒物排放特征, 并指出生物质锅炉存在 PM_{2.5} 占比高、污染物排放不达标现象; 陆炳等^[24] 采用稀释采样技术和再悬浮技术两种采样

收稿日期: 2017-07-05; 修订日期: 2017-09-14

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFC0201501); 上海市科委项目 (16dz1206306)

作者简介: 徐健 (1993 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为大气污染源排放清单, E-mail: xujian113@126.com

* 通信作者, E-mail: huangc@saes.sh.cn

方法建立了所得燃煤飞灰中颗粒物的成分谱,并比较了这两种方法建立的成分谱之间的特征及差异.但是,由于各地燃煤锅炉使用的燃料种类、运行工况和治理技术等存在一定的差异性,特别是长三角地区中小燃煤锅炉的相关研究报道仍相对较少.近年来,长三角地区为推进大气污染防治计划相继开始实施中小燃煤锅炉的清洁能源替代工作,摸清现役中小燃煤锅炉的PM_{2.5}成分谱特征,对于回顾评估清洁能源替代工作成效具有重要意义.为此,本研究在长三角地区选取了7台中小燃煤锅炉开展了PM_{2.5}成分谱特征的实测,并对其有机碳(OC)、无机碳(EC)等关键组分的粒径分布特征进行了分析,以期对长三角地区大气污染源排放清单和源解析研

究提供基础数据支撑.

1 材料与方法

1.1 测试锅炉选取

选取7台中小燃煤锅炉分析其PM_{2.5}的排放特征,各锅炉的基本信息见表1.所有测试锅炉均为链条炉,所用燃煤均为烟煤,与长三角地区主流的中小燃煤锅炉特点一致.其中蒸发量为2 t·h⁻¹和4 t·h⁻¹的锅炉各3台,10 t·h⁻¹的锅炉1台,末端治理设施分为湿法除尘和多管旋风除尘两种.同时,为反映无控制状态的锅炉排放特征,选取锅炉4和锅炉5,在其治理设施进口处开展了测量.锅炉的应用行业分别为电镀(2台)、制药(2

表1 测试锅炉参数

Table 1 Parameters of the tested boilers

编号	炉型及燃料类型	型号	蒸发量/t·h ⁻¹	除尘设施	所属行业
锅炉1	链条炉,烟煤	DZL2-0.98-A4	2	湿法除尘	电镀行业
锅炉2	链条炉,烟煤	DZL2-1.25-AII	2	多管旋风	制药行业
锅炉3	链条炉,烟煤	DZL2-1.25-AIII	2	多管旋风	电镀行业
锅炉4	链条炉,烟煤	DZL4-1.25-AII	4	湿法除尘	化工行业
锅炉5	链条炉,烟煤	DZL4-1.25-AII	4	湿法除尘	制药行业
锅炉6	链条炉,烟煤	DZL4-1.25-AII	4	湿法除尘	化工行业
锅炉7	链条炉,烟煤	SZL10-2.45-AII	10	湿法除尘	集中供热

台)、化工(2台)和集中供热(1台).

锅炉使用的燃煤均经不同产地煤炭混合配制而成,其工业分析和元素分析结果见表2.除锅炉7燃煤收到基的固定碳含量偏低和灰分含量偏高外,其他锅炉燃煤的水分、挥发分、固定碳和灰分的质量分数无较大差异,平均为(21.34 ± 3.13)%、

(24.62 ± 1.68)%、(38.06 ± 6.16)%和(16.40 ± 8.78)%.7台锅炉燃煤的平均低位发热量为(18.44 ± 2.17)MJ·kg⁻¹.燃煤锅炉的硫分、碳、氢和氮等元素含量也无明显差异,平均含量分别为(0.67 ± 0.26)%、(64.48 ± 5.26)%、(3.90 ± 0.29)%和(0.90 ± 0.05)%.

表2 燃煤的工业分析和元素分析/%

Table 2 Industrial and elemental analysis of coal for the tested boilers/%

编号	工业分析(收到基,质量分数)/%					元素分析(干燥基,质量分数)/%			
	水分	挥发分	固定碳	灰分	低位发热量/MJ·kg ⁻¹	硫分	C	H	N
锅炉1	25.80	21.48	34.30	18.42	15.29	0.78	55.99	3.46	0.82
锅炉2	21.00	24.91	44.41	9.68	20.73	0.44	70.12	4.11	0.91
锅炉3	23.30	24.88	42.56	9.26	19.63	0.92	69.57	4.13	0.98
锅炉4	17.70	26.78	40.03	15.49	19.80	1.09	64.06	4.05	0.91
锅炉5	20.70	25.27	43.09	10.94	20.32	0.41	67.75	4.12	0.90
锅炉6	23.60	25.49	34.54	16.37	16.89	0.56	59.47	3.51	0.90
锅炉7	17.30	23.56	27.52	34.61	16.45	0.49	64.40	3.94	0.91

1.2 采样和分析方法

燃煤锅炉PM_{2.5}采样采用的是目前广泛使用的稀释通道采样法,如李超等^[17]、王书肖等^[18]和耿春梅等^[23]均采用此方法对固定燃烧源进行了实测.稀释系统采用专为固定源排放测试设计的颗粒物二级稀释器(FPS-4000,芬兰Dekati公司),稀释采样系统的预切割头可去除2.5 μm以上的颗粒.对采

样枪加热保温,使其温度略高于烟气温度,以防止颗粒物在采样管道中的热泳沉积和冷凝.稀释通道对烟气进行二级稀释,其中一级稀释以接近烟气温度的零空气为稀释气,以确保烟气在稀释时不发生冷凝;之后经过停留时间管,模拟烟气的成核过程,根据采样流速,停留时间约为1~2 s;二级稀释采用零空气将烟气进一步稀释至环境

温度. 零空气由空压机提供, 并经由过滤单元以去除空气中的水分、颗粒物和有机物等. 采样系统如图 1 所示. 锅炉排放出的烟道气经过稀释后分别进入四通道颗粒物采样器、静电低压撞击器 (ELPI) 和在线黑碳测试仪. 四通道颗粒物采样器分别采用 2 组 Teflon 滤膜和 2 组石英滤膜; Teflon 滤膜用于称重获得颗粒物质量浓度并分析颗粒物中的元素组分, 石英滤膜用于分析颗粒物中的 OC、EC 组分和离子组分; ELPI 能对 7 nm ~ 10 μm 粒径段的颗粒物分 13 级进行采样和计数, 由于预切割头已对 2.5 μm 以上的颗粒物进行了预切割, 因此取 2.5 μm 以下的前 10 级颗粒物进行分析, 其中各级捕集器对应的切割粒径及几何平均直径见表 3; 在线黑碳测试仪则用于测量烟气

中黑碳的质量浓度. 此外, 采用 Testo 350 烟气分析仪实时测量烟气中的 SO₂、NO、NO₂、CO 等气态污染物浓度以及烟气温度和氧含量等参数. 皮托管流量计用于实时测量烟气流量.

采集后的样品需冷冻保存, 在实验室进行离子、元素和含碳组分的分析. 离子组分的主要分析步骤为利用超纯水超声提取石英滤膜上的颗粒物, 待颗粒物中的水溶性组分充分溶解, 再利用美国 Dionex ICS2000 型离子色谱仪分析阴、阳离子的质量分数. 元素组分的分析则是将 Teflon 滤膜上的颗粒物在高温高压下消解于强酸溶液中, 并利用电感耦合等离子发射光谱测定各种元素的质量分数. 碳质组分是基于石英滤膜, 利用 DRI 2001A 热/光碳分析仪, 采用热/光反射法 (TOR) 测量.

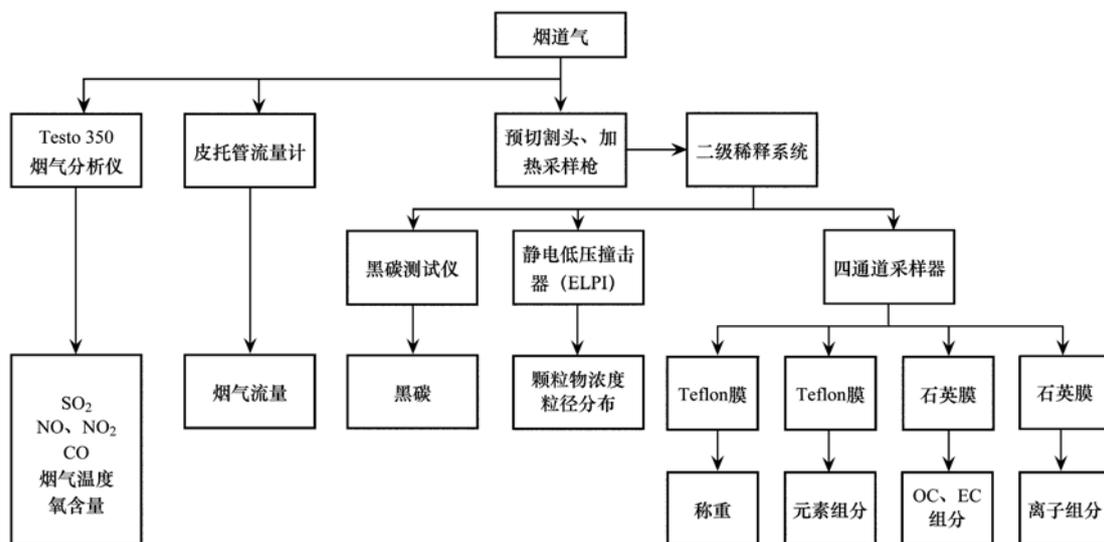


图 1 锅炉采样系统

Fig. 1 Sampling system of the boiler

表 3 ELPI 各级捕集器捕集的颗粒物几何平均直径

Table 3 Geometric mean diameter of particles captured by ELPI drip catcher at various stages

分级	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
切割粒径范围/μm	0.028	0.054	0.092	0.154	0.260	0.380	0.609	0.943	1.590	2.380
几何平均直径/μm	0.021	0.039	0.070	0.119	0.200	0.314	0.481	0.758	1.224	1.945

2 结果与讨论

2.1 PM_{2.5}排放因子

利用碳平衡法计算得到各个燃煤锅炉的 PM_{2.5} 排放因子, 并与其他文献实测的中小燃煤锅炉的结果^[17,18,25]进行对比, 结果见表 4. 颗粒物滤膜的平均采样时长为 (127 ± 36) min, 平均稀释比为 9.20 ± 0.55, 除测试了除尘设施出口的 PM_{2.5} 排放因子外, 同时也测试了锅炉 4 和锅炉 5 除尘设施进口处

以及锅炉 5 闷烧状态下的 PM_{2.5} 排放因子.

不考虑闷烧状态下的燃烧, 7 台锅炉除尘设施出口处的 PM_{2.5} 排放因子在 0.047 ~ 0.283 g·kg⁻¹ 之间, 平均为 (0.146 ± 0.081) g·kg⁻¹. 闷烧状态下, PM_{2.5} 排放因子则高达 0.600 g·kg⁻¹, 这是由于该状态下燃料并不能完全燃烧造成的. 按除尘方式来看, 本研究多管旋风除尘的 PM_{2.5} 排放因子与文献^[17,18]的结果较为一致, 湿法除尘的 PM_{2.5} 排放因子与文献^[25]的结果具有较好的一致性, 而低于文

献[18]的结果,这可能与文献[18]中燃煤的灰分较高有关。

对于过剩空气系数大于5的锅炉来说,除尘出口处的 $PM_{2.5}$ 排放因子平均为 $(0.179 \pm 0.069) g \cdot kg^{-1}$;而过剩空气系数在5以下的锅炉 $PM_{2.5}$ 排放因子仅为 $(0.061 \pm 0.020) g \cdot kg^{-1}$,即使是除尘进口处的 $PM_{2.5}$ 也仅为 $(0.096 \pm 0.001) g \cdot kg^{-1}$,远低于过剩空气系数较大的锅炉,可见过剩空气系数

越高, $PM_{2.5}$ 的排放因子也越高.同时,过剩空气系数大于5的状态下,除锅炉6以外,多管旋风除尘的 $PM_{2.5}$ 排放因子均高于湿法除尘。

比较锅炉4和锅炉5除尘设施进出口的 $PM_{2.5}$ 排放因子可知,两台锅炉对 $PM_{2.5}$ 的去除效率分别为66%和51%,这一结果要略高于《大气细颗粒物一次源排放清单编制技术指南(试行)》中给出的湿法除尘对 $PM_{2.5}$ 的去除效率(50%)。

表4 测试锅炉的 $PM_{2.5}$ 排放因子

Table 4 $PM_{2.5}$ emission factors of the tested boilers

编号	除尘设施	采样时长/min	稀释比	过剩空气系数	$PM_{2.5}$ 排放因子/ $g \cdot kg^{-1}$
锅炉1	湿法除尘	131	8.46	6.49	0.101 ± 0.002
锅炉2	多管旋风	193	9.00	8.67	0.194
锅炉3	多管旋风	115	10.07	5.87	0.184 ± 0.002
锅炉4	湿法除尘	138	9.91	5.29	0.136 ± 0.015
锅炉4	除尘器进口	55	9.70	5.87	0.395 ± 0.015
锅炉5	湿法除尘	104	9.14	14.51(闷烧)	0.600
锅炉5	湿法除尘	120	9.26	2.68	0.047 ± 0.006
锅炉5	除尘器进口	121	9.00	2.83	0.096 ± 0.001
锅炉6	湿法除尘	142	9.00	5.99	0.283 ± 0.120
锅炉7	湿法除尘	157	8.45	3.08	0.075 ± 0.005
	无				0.22 ± 0.08
文献[17]	多管旋风				0.15 ± 0.05
	多管旋风				0.21 ± 0.02
	无				0.219
文献[18]	多管旋风				0.209
	湿法除尘				0.486
文献[25]	湿法除尘				0.130

《大气细颗粒物一次源排放清单编制技术指南(试行)》中采用物料衡算法计算燃煤锅炉的 $PM_{2.5}$ 排放因子,计算公式如式(1)所示:

$$EF_{PM_{2.5}} = A_{ar} \times (1 - ar) \times f_{PM_{2.5}} \times (1 - \eta) \quad (1)$$

式中, $EF_{PM_{2.5}}$ 为燃煤锅炉的 $PM_{2.5}$ 排放因子; A_{ar} 为燃煤灰分; ar 为灰分进入底灰的比例,工业和供热层燃链条炉取85%; $f_{PM_{2.5}}$ 为排放源产生的总颗粒物中 $PM_{2.5}$ 所占比例,工业层燃炉取0.07,供热层燃炉取0.10; η 为污染控制技术对 $PM_{2.5}$ 的去除效率,湿法除尘取50%,多管旋风除尘取10%。

图2为本研究实测锅炉出口处的 $PM_{2.5}$ 排放因子与物料衡算结果的比较.由计算结果可见,物料衡算法计算得到的 $PM_{2.5}$ 排放因子远高于实测结果,锅炉1~6高出2~11倍,锅炉7由于灰分较高,计算结果更是高出34倍.可见,物料衡算法与实测的 $PM_{2.5}$ 排放因子之间存在较大的差异性,对燃煤锅炉的排放因子进行本地实测具有十分重要的意义。

2.2 $PM_{2.5}$ 化学成分分析

对在测试锅炉除尘出口处采集的颗粒物滤膜进

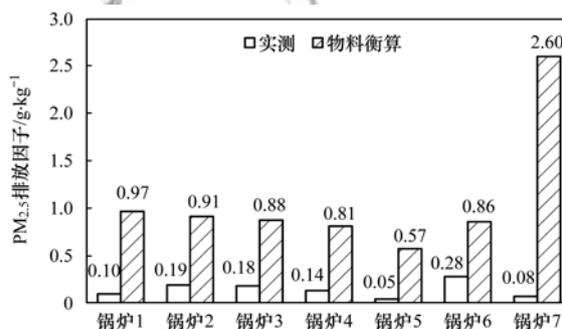


图2 实测的燃煤锅炉出口处 $PM_{2.5}$ 排放因子与物料衡算法的比较

Fig. 2 Comparison of $PM_{2.5}$ emission factors on the outlet of coal-fired boilers from measurement and mass balance calculation

行 $PM_{2.5}$ 化学成分分析,各成分的质量分数结果见表5.主要分析成分包括 F^- 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 等水溶性离子组分,Al、As、Ba、Br、Ca等元素组分以及碳质组分(OC和EC)。

从离子组分来看, SO_4^{2-} 在 $PM_{2.5}$ 中的含量最为丰富,其质量分数在12.6%~36.2%之间;其次为 NH_4^+ 和 Ca^{2+} ,两者的质量分数分别在0.2%~

6.8% 和 0.9% ~ 5.1% 之间; 除此之外, K⁺ 在 PM_{2.5} 中也有一定占比, 在 0.7% ~ 11.2% 之间; 除锅炉 6 外, F⁻、Cl⁻、NO₂⁻、NO₃⁻、Mg²⁺ 等其他离子的质量分数则基本在 0.5% 以下。

对锅炉燃煤过程中排放的 PM_{2.5} 进行元素分析, 结果显示: S 元素的含量最为丰富, 质量分数在 2.7% ~ 20.1% 之间, 这与燃煤中硫分较高的性质相符; 其次为 Al、Ca、Fe, 而 Cd、Ce、Co、Cr、Ge 等重金属元素的含量则最少。

各锅炉排放的 PM_{2.5} 中, OC、EC 的含量波动幅度较大, 分别在 3.1% ~ 40.7% 和 0.5% ~ 13.5% 之间。从比值来看, 各锅炉产生的 OC 和 EC 比值均大于 1, 与李超等^[17] 得出的结论一致。

可见, 一次硫酸盐是燃煤锅炉细颗粒物排放的

最主要成分, 其次为 OC、EC 等碳质组分, 这些组分对区域大气的 PM_{2.5} 污染有重要贡献。

2.3 PM_{2.5} 主要组分与其他研究比较

表 6 为本研究实测的 PM_{2.5} 组分中 OC、EC、SO₄²⁻、Al 和 Si 与其他文献的比较。按各组分含量来看, 本研究中经多管旋风除尘后的锅炉 2 的 OC 含量为 40.7%, 远高于其他研究结果, 分析锅炉 2 的测试工况发现, 锅炉 2 的过剩空气系数达到了 8.67, 远高于其他测试锅炉 (2.68 ~ 6.49, 除闷烧外), 导致锅炉 2 的燃烧效率相对于其他锅炉更低; 锅炉 3 的 OC 含量则与其他研究接近。经多管旋风除尘后测得的 EC 含量略低于文献 [18, 26] 中的结果, 但仍在文献 [17] 的含量范围内, 经湿法除尘后的 PM_{2.5} 组分中 EC 含量与其他研究则有较好的一

表 5 测试锅炉除尘出口处的颗粒物化学成分谱/%

Table 5 Chemical compositions of particles at the dust removal outlet of the tested boilers/%

项目	锅炉 1	锅炉 2	锅炉 3	锅炉 4	锅炉 5	锅炉 6	锅炉 7
OC	5.7 ± 0.3	40.7	8.1 ± 1.8	16.1 ± 6.6	16.0 ± 12.2	3.6	3.1
EC	1.2 ± 0.0	8.5	4.6 ± 0.8	13.5 ± 4.3	1.8 ± 1.4	3.4	0.5
F ⁻	0.0 ± 0.0	0.0	0.1 ± 0.0	0.0 ± 0.0	0.1 ± 0.0	0.5	0.0
Cl ⁻	0.1 ± 0.0	0.9	0.1 ± 0.0	0.2 ± 0.1	0.7 ± 0.9	9.3	0.1
NO ₂ ⁻	0.0 ± 0.0	0.0	0.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0	0.0	0.0
SO ₄ ²⁻	20.0 ± 10.3	12.6	17.6 ± 4.7	18.3 ± 1.6	26.1 ± 4.7	24.6	36.2
NO ₃ ⁻	0.7 ± 0.9	0.0	0.1 ± 0.0	0.2 ± 0.3	0.1 ± 0.0	0.1	0.2
Na ⁺	5.7 ± 6.2	1.0	1.6 ± 0.2	1.2 ± 0.5	2.6 ± 0.5	10.9	4.2
NH ₄ ⁺	0.8 ± 0.5	3.8	0.9 ± 0.1	6.8 ± 1.4	4.8 ± 2.5	0.2	6.2
K ⁺	11.2 ± 14.6	0.7	1.2 ± 0.3	0.8 ± 0.3	2.7 ± 1.4	1.9	2.6
Mg ²⁺	0.2 ± 0.1	0.1	0.4 ± 0.0	0.1 ± 0.0	0.3 ± 0.2	0.4	0.1
Ca ²⁺	2.3 ± 2.5	1.2	5.1 ± 0.1	0.9 ± 0.8	3.3 ± 2.0	2.8	1.1
Al	1.1 ± 0.1	1.8	3.6 ± 2.3	4.2 ± 2.2	2.2 ± 1.2	1.9	0.7
As	0.4 ± 0.1	0.1	0.1 ± 0.1	0.3 ± 0.2	0.2 ± 0.0	0.2	0.1
Ba	0.0 ± 0.0	0.0	0.1 ± 0.0	0.1 ± 0.0	0.1 ± 0.0	0.0	0.0
Br	0.0 ± 0.0	0.1	0.1 ± 0.0	0.0 ± 0.0	0.1 ± 0.1	0.0	0.0
Ca	2.3 ± 3.3	10.3	2.6 ± 1.9	8.6 ± 2.1	7.6 ± 5.4	0.0	1.6
Cd	0.0 ± 0.0	0.0	0.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0	0.0	0.0
Ce	0.0 ± 0.0	0.0	0.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0	0.0	0.0
Co	0.0 ± 0.0	0.0	0.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0	0.0	0.0
Cr	0.1 ± 0.0	0.1	0.1 ± 0.0	0.2 ± 0.1	0.2 ± 0.1	0.0	0.1
Cu	0.1 ± 0.0	0.1	0.1 ± 0.0	0.3 ± 0.2	0.2 ± 0.0	0.1	0.5
Fe	0.6 ± 0.3	1.6	2.1 ± 0.5	1.4 ± 0.2	2.9 ± 2.3	1.4	1.6
Ge	0.0 ± 0.0	0.0	0.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0	0.1 ± 0.0	0.0	0.0
K	0.4 ± 0.5	0.7	0.9 ± 0.1	1.3 ± 0.7	0.9 ± 0.6	0.6	0.0
Mg	0.4 ± 0.3	1.4	0.7 ± 0.5	1.5 ± 0.7	1.1 ± 0.8	0.0	0.4
Mn	0.0 ± 0.0	0.0	0.1 ± 0.0	0.1 ± 0.0	0.1 ± 0.0	0.1	0.0
Na	0.2 ± 0.3	2.7	1.3 ± 0.1	2.2 ± 1.1	2.4 ± 1.5	0.0	0.4
Ni	0.0 ± 0.0	0.0	0.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0	0.1 ± 0.0	0.0	0.1
P	0.1 ± 0.0	0.1	0.2 ± 0.0	1.6 ± 0.5	0.3 ± 0.1	0.5	1.7
Pb	1.0 ± 0.6	0.2	0.5 ± 0.2	1.6 ± 1.0	1.1 ± 0.4	0.6	1.4
S	14.1 ± 4.1	2.7	10.6 ± 2.9	15.4 ± 1.6	20.1 ± 0.6	13.2	11.1
Sr	0.0 ± 0.0	0.0	0.2 ± 0.1	0.1 ± 0.0	0.0 ± 0.0	0.0	0.0
Ti	0.1 ± 0.0	0.2	0.6 ± 0.1	0.6 ± 0.3	0.3 ± 0.2	0.8	0.1
V	0.0 ± 0.0	0.0	0.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0	0.0	0.0
Zn	4.1 ± 1.5	0.5	0.8 ± 0.2	1.9 ± 1.2	1.6 ± 0.5	0.9	1.5

表 6 实测的 $PM_{2.5}$ 化学成分谱与其他研究比较/%Table 6 Comparisons of $PM_{2.5}$ chemical compositions measured in this study and other studies/%

数据来源	锅炉类型	OC	EC	SO_4^{2-}	Al	Si
本研究	链条炉/多管旋风	8.1、40.7 ¹⁾	4.6~8.5	12.6~17.6	1.8~3.6	—
	链条炉/湿法除尘	3.1~16.1	0.5~13.5	18.3~36.2	0.7~4.2	—
文献[17]	燃煤锅炉	3.7~21.4	4.2~24.6	15.3~54.0	0.4~6.7	0.8~5.4
文献[18]	链条炉/无控制	9.0	4.8	54.1	0.3	0.2
	链条炉/多管旋风	13.9	17.9	20.4	2.3	2.1
	链条炉/湿法除尘	5.4	2.2~3.7	20.0~44.3	0.6~2.9	0.6~1.7
	链条炉/离心洗涤	13.8	3.1	35.8	0.4	1.9
文献[21]	链条炉/水膜除尘	8.5	—	24.3	4.1	—
文献[26]	链条炉/水膜除尘	13.8	3.1	3.9	14.4	15.4
	链条炉/多管旋风+冲击水浴除尘	6.8	2.5	3.9	13.5	13.7
	链条炉/多管旋风	13.7	13.6	4.0	14.9	15.3

1)分别为锅炉3和锅炉2的结果

致性。 SO_4^{2-} 和 Al 的含量与文献[17,18,21]的比对结果仍然较好,而文献[26]在这两种组分的含量上则与其他文献有一定的差异,表现为 SO_4^{2-} 含量偏低而 Al 含量偏高,结合各文献测得的 $PM_{2.5}$ 中 Si 含量的差异性,分析得出这可能与燃煤的煤质和测试工况有关:一方面文献[26]所测的 $PM_{2.5}$ 成分谱显示元素 Al 和 Si 的含量均在 13% 以上,远高于本研究和其他文献的结果;另一方面文献[26]烟气净化设备对 SO_2 的去除率较高,最高可达 93%,也是导致文献[26]中 SO_4^{2-} 含量较低的原因。

2.4 $PM_{2.5}$ 、OC、EC 的粒径分布特征

取 ELPI 前 10 级捕集器采集的颗粒物样品分析锅炉 1、3、4、6、7 除尘出口处的 $PM_{2.5}$ 及其碳质组分(OC 和 EC)的质量浓度粒径分布,结果如图 3 所示。由图 3(a)可知, $PM_{2.5}$ 的质量浓度呈单峰或双峰分布,锅炉 1、3、6、7 在 0.07 μm 处出现峰值,锅炉 4 的峰值则出现在 0.12 μm 处,这种细模态颗粒形成的主要机制是燃煤中超细无机矿物的气化-凝结过程;锅炉 3 和锅炉 6 在颗粒物粒径大于 1.00 μm 后质量浓度显著增高,这是内在矿

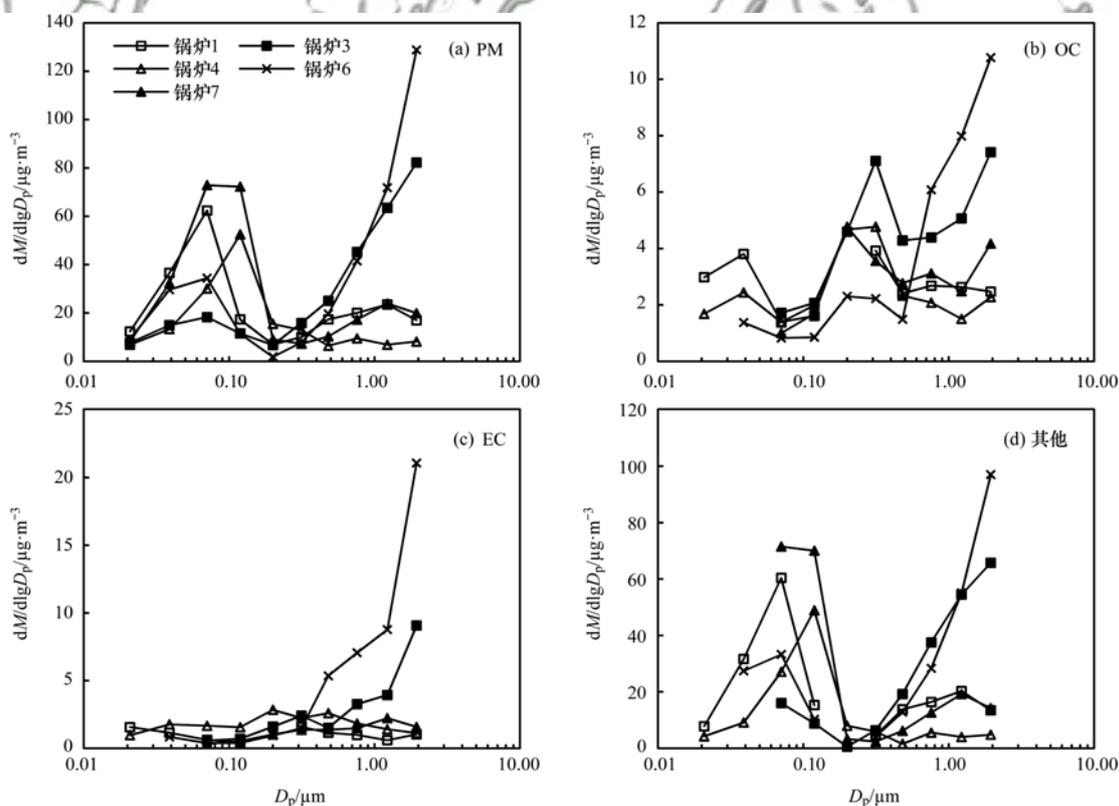


图 3 测试锅炉除尘出口处 $PM_{2.5}$ 及 OC、EC 的质量浓度粒径分布

Fig. 3 Mass size distribution of $PM_{2.5}$, OC, and EC at the boilers outlet of dust removal devices

物质的聚结和外矿物质的破碎共同作用的结果; 颗粒物的质量浓度最低值出现在 0.20 ~ 0.48 μm 粒径段范围内. 颗粒物中碳质组分及其他组分的粒径分布见图 3(b) ~ 3(d). OC 的粒径分布呈双峰或三峰的特征, 峰值点分别出现在 0.04 μm 和 0.20 ~ 0.31 μm 处, 粒径大于 1.00 μm 后, OC 呈现出上升或者下降的趋势. EC 的质量浓度分布在各锅炉之间有一定的差异性; 锅炉 1、4 和 7 的 EC 质量浓度在各粒径段分布较为均匀, 锅炉 3 和锅炉 6 在 0.31 μm 以下分布较为均匀, 高于 0.31 μm 后 EC 质量浓度显著升高, 这可能与锅炉的燃烧状态有关.

2.5 除尘设施对 PM_{2.5}、OC、EC 的去除率

以锅炉 4 为例, 探究其除尘设施进、出口的 PM_{2.5} 质量和粒子数浓度分布, 及其中 OC、EC 组分

的质量浓度分布, 结果见图 4. 由 2.1 节可知, 锅炉 4 的除尘设施对 PM_{2.5} 的整体去除效率为 66%, 从图 4(a) 来看, 对颗粒物的去除主要集中在粒径为 0.48 μm 以上的粗颗粒物模态, 去除效率能达到 77% ~ 95%; 对粒径小于 0.48 μm 的细模态颗粒的去除效率则在 45% 以下. 结合图 4(b) 的粒子数分布结果, 无论是除尘设施的进口还是出口, 粗模态颗粒的粒子数浓度均显著小于细模态颗粒, 除尘设施对粒子数的去除主要体现在 0.10 μm 以下的细模态颗粒.

除尘设施对 OC、EC 的整体去除效率分别为 53% 和 23%. 从去除前后的粒径分布来看, 除尘设施对粒径小于 0.07 μm 和大于 0.31 μm 的 OC 均有明显的去除效果, 对 EC 的去除则主要表现在粒径小于 0.07 μm 的部分.

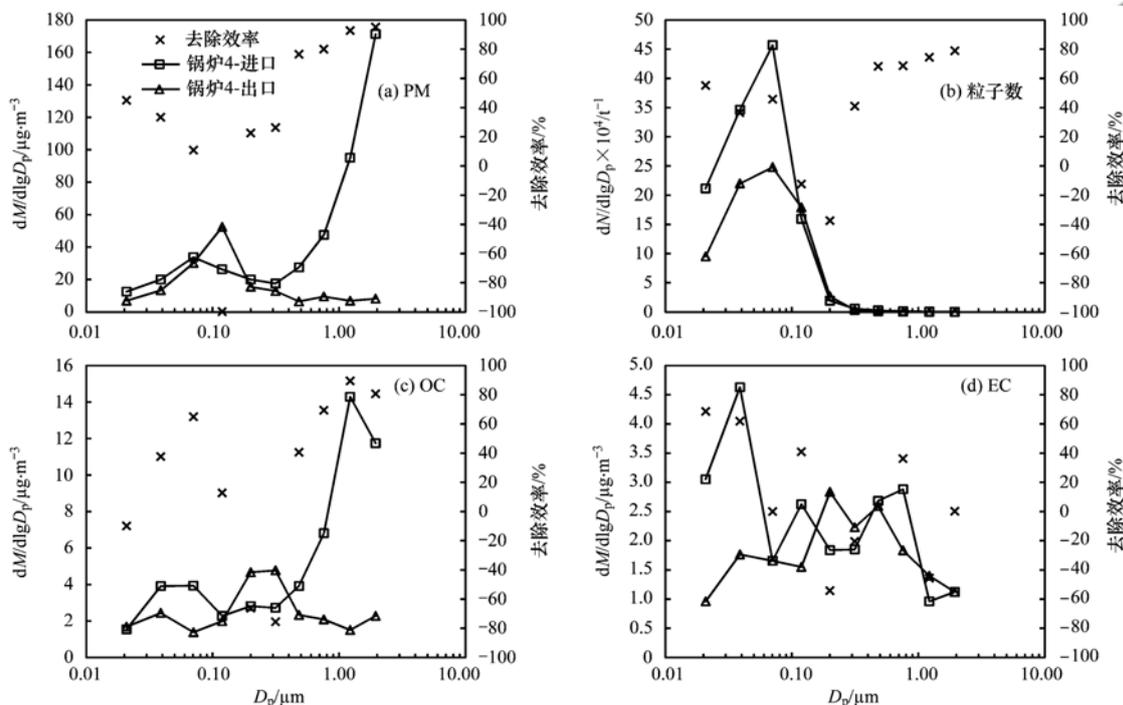


图 4 锅炉 4 除尘设施进出口 PM_{2.5} 及 OC、EC 的质量浓度粒径分布

Fig. 4 Mass size distribution of PM_{2.5}, OC, and EC at the inlet and outlet of dust removal devices of boiler 4

3 结论

(1) 实测了长三角地区 7 台 2 ~ 10 t·h⁻¹ 的燃煤锅炉, 其除尘设施出口处的 PM_{2.5} 排放因子在 0.047 ~ 0.283 g·kg⁻¹ 之间, 平均为 (0.146 ± 0.081) g·kg⁻¹. 该结果与国内相关研究具有较好的可比性. 而物料衡算法计算得到的 PM_{2.5} 排放因子与实测结果相比有一定的高估, 因此开展本地实测对提高排放清单的准确性具有重要的意义.

(2) 过剩空气系数是影响 PM_{2.5} 排放因子的重要因素. 过剩空气系数越高, PM_{2.5} 的排放因子也越高.

(3) 各锅炉排放的 PM_{2.5} 中, SO₄²⁻ 在离子组分中的含量最为丰富, 其质量分数在 12.6% ~ 36.2% 之间, 其次为 NH₄⁺ 和 Ca²⁺; 元素组分中, S 元素的含量最为丰富, 质量分数在 2.7% ~ 20.1% 之间, 其次为 Al、Ca、Fe; OC、EC 的含量波动幅度较大, 分别在 3.1% ~ 40.7% 和 0.5% ~ 13.5% 之间. 各

锅炉排放的 OC 和 EC 比值均大于 1.

(4) $PM_{2.5}$ 的质量浓度随粒径的不同呈单峰或双峰分布, 峰值点出现在 $0.07 \sim 0.12 \mu m$ 处; OC 的粒径分布呈双峰或三峰的特征, 峰值点分别出现在 $0.04 \mu m$ 和 $0.20 \sim 0.31 \mu m$ 处, 粒径大于 $1.00 \mu m$ 后, OC 呈现出上升或者下降的趋势. EC 的质量浓度在粒径小于 $0.48 \mu m$ 时无明显差异, 高于 $0.48 \mu m$ 后, 各锅炉之间有一定的差异性.

(5) 除尘设施对 $PM_{2.5}$ 、OC、EC 质量浓度的整体去除效率分别为 66%、53% 和 23%. 但在 $0.20 \mu m$ 处, $PM_{2.5}$ 、OC、EC 的质量浓度反而高于除尘进口处, 这可能是由于烟气中的超细颗粒经除尘器后碰撞、凝聚为积聚模态颗粒.

参考文献:

- [1] Sun Y, Song T, Tang G Q, *et al.* The vertical distribution of $PM_{2.5}$ and boundary-layer structure during summer haze in Beijing[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **74**: 413-421.
- [2] Wang Y S, Yao L, Wang L L, *et al.* Mechanism for the formation of the January 2013 heavy haze pollution episode over central and eastern China[J]. *Science China Earth Sciences*, 2014, **57**(1): 14-25.
- [3] 周敏, 陈长虹, 乔利平, 等. 2013 年 1 月中国中东部大气重污染期间上海颗粒物的污染特征[J]. *环境科学学报*, 2013, **33**(11): 3118-3126.
- Zhou M, Chen C H, Qiao L P, *et al.* The chemical characteristics of particulate matters in Shanghai during heavy air pollution episode in Central and Eastern China in January 2013 [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, **33**(11): 3118-3126.
- [4] 朱礼波. 兰州市不同细颗粒物中 PAHs 污染特征及其健康风险评价[D]. 兰州: 兰州大学, 2015.
- Zhu L B. The pollution characteristics and health risk assessment of PAHs in different fine particulate in Lanzhou[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2015.
- [5] 陶燕, 刘亚梦, 米生权, 等. 大气细颗粒物的污染特征及对人体健康的影响[J]. *环境科学学报*, 2014, **34**(3): 592-597.
- Tao Y, Liu Y M, Mi S Q, *et al.* Atmospheric pollution characteristics of fine particles and their effects on human health [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, **34**(3): 592-597.
- [6] Lu F, Xu D Q, Cheng Y B, *et al.* Systematic review and meta-analysis of the adverse health effects of ambient $PM_{2.5}$ and PM_{10} pollution in the Chinese population [J]. *Environmental Research*, 2015, **136**: 196-204.
- [7] 吴文景, 常兴, 邢佳, 等. 京津冀地区主要排放源减排对 $PM_{2.5}$ 污染改善贡献评估[J]. *环境科学*, 2017, **38**(3): 867-875.
- Wu W J, Chang X, Xing J, *et al.* Assessment of $PM_{2.5}$ pollution mitigation due to emission reduction from main emission sources in the Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(3): 867-875.
- [8] 路娜, 李治国, 周静博, 等. 2015 年石家庄市采暖期一次重污染过程细颗粒物在线来源解析[J]. *环境科学*, 2017, **38**(3): 884-893.
- Lu N, Li Z G, Zhou J B, *et al.* Online source analysis of particulate matter ($PM_{2.5}$) in a heavy pollution process of Shijiazhuang city during heating period in 2015 [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(3): 884-893.
- [9] 安静宇, 李莉, 黄成, 等. 2013 年 1 月中国东部地区重污染过程中上海市细颗粒物的来源追踪模拟研究[J]. *环境科学学报*, 2014, **34**(10): 2635-2644.
- An J Y, Li L, Huang C, *et al.* Source apportionment of the fine particulate matter in Shanghai during the heavy haze episode in eastern China in January 2013 [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, **34**(10): 2635-2644.
- [10] 王苏蓉, 喻义勇, 王勤耕, 等. 基于 PMF 模式的南京市大气细颗粒物源解析[J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(12): 3535-3542.
- Wang S R, Yu Y Y, Wang Q G, *et al.* Source apportionment of $PM_{2.5}$ in Nanjing by PMF [J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(12): 3535-3542.
- [11] 李莉, 安静宇, 严茹莎. 基于细颗粒物来源追踪技术的 2013 年 12 月上海市严重污染过程中 $PM_{2.5}$ 的源贡献分析[J]. *环境科学*, 2015, **36**(10): 3543-3553.
- Li L, An J Y, Yan R S. Source contribution analysis of the fine particles in Shanghai during a heavy haze episode in December, 2013 based on the particulate matter source apportionment technology [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(10): 3543-3553.
- [12] 叶文波. 宁波市大气可吸入颗粒物 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的源解析研究[J]. *环境污染与防治*, 2011, **33**(9): 66-69.
- Ye W B. Study on source apportionment of PM_{10} and $PM_{2.5}$ in ambient air of Ningbo [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2011, **33**(9): 66-69.
- [13] 严茹莎, 侯勇, 陆建宇, 等. 长三角区域燃煤排放污染物现状及其环境影响[J]. *环境影响评价*, 2016, **38**(6): 66-72.
- [14] 沈劲, 汪宇, 潘月云, 等. 广东省气象与源排放因素对 $PM_{2.5}$ 浓度影响的数值模拟研究[J]. *安全与环境工程*, 2017, **24**(1): 45-50.
- Shen J, Wang Y, Pan Y Y, *et al.* Numerical simulation of the impact of meteorology and emission on $PM_{2.5}$ concentration in Guangdong Province [J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2017, **24**(1): 45-50.
- [15] 陈源, 谢绍东, 罗彬. 成都市大气细颗粒物组成和污染特征分析(2012-2013 年) [J]. *环境科学学报*, 2016, **36**(3): 1021-1031.
- Chen Y, Xie S D, Luo B. Composition and pollution characteristics of fine particles in Chengdu from 2012 to 2013 [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(3): 1021-1031.
- [16] 张丹, 翟崇治, 周志恩, 等. 重庆市主城区不同粒径颗粒物水溶性无机组分特征[J]. *环境科学研究*, 2012, **25**(10): 1099-1106.
- Zhang D, Zhai C Z, Zhou Z E, *et al.* Characteristics of water-soluble inorganic ions in different size particles in Chongqing [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2012, **25**(10): 1099-1106.
- [17] 李超, 李兴华, 段雷, 等. 燃煤工业锅炉可吸入颗粒物的排放特征[J]. *环境科学*, 2009, **30**(3): 650-655.
- Li C, Li X H, Duan L, *et al.* Emission characteristics of PM_{10} from coal-fired industrial boiler [J]. *Environmental Science*,

- 2009, **30**(3): 650-655.
- [18] 王书肖, 赵秀娟, 李兴华, 等. 工业燃煤链条炉细粒子排放特征研究[J]. 环境科学, 2009, **30**(4): 963-968.
Wang S X, Zhao X J, Li X H, *et al.* Emission characteristics of fine particles from grate firing boilers [J]. Environmental Science, 2009, **30**(4): 963-968.
- [19] 胡月琪, 马召辉, 冯亚君, 等. 北京市燃煤锅炉烟气中水溶性离子排放特征[J]. 环境科学, 2015, **36**(6): 1966-1974.
Hu Y Q, Ma Z H, Feng Y J, *et al.* Emission characteristics of water-soluble ions in fumes of coal fired boilers in Beijing[J]. Environmental Science, 2015, **36**(6): 1966-1974.
- [20] 段雷, 马子轸, 李振, 等. 燃煤电厂排放细颗粒物的水溶性无机离子特征综述[J]. 环境科学, 2015, **36**(3): 1117-1122.
Duan L, Ma Z Z, Li Z, *et al.* Characteristics of water soluble inorganic ions in fine particles emitted from coal-fired power plants [J]. Environmental Science, 2015, **36**(3): 1117-1122.
- [21] 李松, 郎建奎, 程水源, 等. 典型固定燃烧源颗粒物成分谱特征研究[J]. 安全与环境学报, 2016, **16**(5): 312-319.
Li S, Lang J L, Cheng S Y, *et al.* Analysis of the profiles' characteristic features of the particulate matters in regard to the stationary coal combustion sources [J]. Journal of Safety & Environment, 2016, **16**(5): 312-319.
- [22] 梁云平, 王则武, 马召辉, 等. 燃煤锅炉湿法脱硫烟气中颗粒物排放特征[J]. 中国环境监测, 2016, **32**(5): 35-39.
Liang Y P, Wang Z W, Ma Z H, *et al.* Study on the particle matter emission characteristics of flue gas from coal-fired boilers equipped with wet desulphurization [J]. Environmental Monitoring in China, 2016, **32**(5): 35-39.
- [23] 耿春梅, 陈建华, 王歆华, 等. 生物质锅炉与燃煤锅炉颗粒物排放特征比较[J]. 环境科学研究, 2013, **26**(6): 666-671.
Geng C M, Chen J H, Wang X H, *et al.* Comparative study on the particle emission characteristics of biomass boiler with coal-fired industrial boiler[J]. Research of Environmental Sciences, 2013, **26**(6): 666-671.
- [24] 陆炳, 孔少飞, 韩斌, 等. 燃煤锅炉排放颗粒物成分谱特征研究[J]. 煤炭学报, 2011, **36**(11): 1928-1933.
Lu B, Kong S F, Han B, *et al.* Source profile of TSP and PM₁₀ from coal-fired boilers[J]. Journal of China Coal Society, 2011, **36**(11): 1928-1933.
- [25] 徐媛, 孙切, 高翔, 等. 供热锅炉颗粒物排放特征实测研究[J]. 环境科学与技术, 2016, **39**(5): 70-74.
Xu Y, Sun R, Gao X, *et al.* Experiment study on emission characteristics of particle from heat-only boilers [J]. Environmental Science & Technology, 2016, **39**(5): 70-74.
- [26] 商昱薇. 层燃工业锅炉细颗粒物 PM_{2.5} 排放特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
Shang Y W. Research on layer burning industrial boiler PM_{2.5} emissions characteristics [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.



CONTENTS

Air Pollutant Emission Inventory from Iron and Steel Industry in the Beijing-Tianjin-Hebei Region and Its Impact on PM _{2.5}	DUAN Wen-jiao, LANG Jian-lei, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (1445)
Simulation of the Spatio-temporally Resolved PM _{2.5} Aerosol Mass Concentration over the Inland Plain of the Beijing-Tianjin-Hebei Region	HAO Jing, SUN Cheng, GUO Xing-yu, <i>et al.</i> (1455)
Effect of Relative Humidity on Particulate Matter Concentration and Visibility During Winter in Chengdu	LIU Fan, TAN Qin-wen, JIANG Xia, <i>et al.</i> (1466)
Vertical Distributional Characteristics of Inorganic Ions of PM _{2.5} at Mt. Huashan, Inland China	CAO Cong, WANG Ge-hui, WU Can, <i>et al.</i> (1473)
Analysis of the Composition of Atmospheric Fine Particles (PM _{2.5}) Produced by Burning Fireworks	XIE Rui-jia, HOU Hong-xia, CHEN Yong-shan (1484)
Chemical Composition Characteristics of PM _{2.5} Emitted by Medium and Small Capacity Coal-fired Boilers in the Yangtze River Delta Region	XU Jian, HUANG Cheng, LI Li, <i>et al.</i> (1493)
Emission Factors of Heavy Metals in Size-resolved Particles Emitted from Residential Coal Combustion	YAN Qin, KONG Shao-fei, LIU Hai-biao, <i>et al.</i> (1502)
Distribution of Oxalate in Atmospheric Aerosols and the Related Influencing Factors in Qingdao, During Winter and Spring	ZHANG Shuai, SHI Jin-hui, YAO Xiao-hong, <i>et al.</i> (1512)
Concentrations and Solubility of Trace Elements in Atmospheric Precipitation in Qingdao	LI Qian, SHI Jin-hui, LI Peng-zhi, <i>et al.</i> (1520)
Occurrence and Gas-particle Partitioning of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Air of Liaodong Bay	ZHANG Yu-feng, SONG Yong-gang, TIAN Jin, <i>et al.</i> (1527)
Analysis of Sources, Pollution Characteristics, and Human Exposure to Atmospheric New Halogenated Flame Retardants in Selected Areas	LI Qi-lu, YANG Kong, LI Jun, <i>et al.</i> (1537)
Contamination Characterization and Human Exposure Levels to Polybrominated Diphenyl Ethers in Indoor and Outdoor Air in Industrial Park of Suzhou City	WANG Jun-xia, GU Hai-dong, ZHANG Zhan-en, <i>et al.</i> (1544)
Effect of Air Pollution on the Cold Disease in Shanghai	YANG Si-xu, MA Yu-xia, ZHOU Jian-ding, <i>et al.</i> (1552)
Fluorescent Dissolved Organic Matter and Its Correlation with Water Quality in a Urban River; A Case Study of the Lujiang River in Beilun, Ningbo	CAO Chang-li, LIANG Meng-qi, HE Gui-ying, <i>et al.</i> (1560)
Relationship Between Landscape Pattern and Water Quality in the Ebinur Lake Region	CAO Can, ZHANG Fei, Ayinigeer·Yalikun, <i>et al.</i> (1568)
CH ₄ Fluxes During the Algal Bloom in the Pengxi River	QIN Yu, ZHANG Yu-yang, LI Zhe, <i>et al.</i> (1578)
Dynamic Variations and Sources of Nitrate During Dry Season in the Lijiang River	MIAO Ying, ZHANG Cheng, XIAO Qiong, <i>et al.</i> (1589)
Heavy Metal Pollution of the Drinking Water Sources in the Lujiang River Basin, and Related Health Risk Assessments	ZHANG Qing-hua, WEI Yong-zhu, CAO Jian-hua, <i>et al.</i> (1598)
Characteristics of Phosphorus Fractions and Phosphate Diffusion Fluxes of Sediments in Cascade Reservoirs of the Huangbai River	LIU Jia, LEI Dan, LI Qiong, <i>et al.</i> (1608)
Occurrence and Ecological Risk Assessment of Typical Persistent Organic Pollutants in Baiyangdian Lake	GAO Qiu-sheng, JIAO Li-xin, YANG Liu, <i>et al.</i> (1616)
Simulating the Fate of Typical Organochlorine Pesticides in the Multimedia Environment of the Pearl River Delta	GAO Zi-wen, XU Yue, YI Ru-han (1628)
Mechanisms and Efficiencies of Removal of PPCPs by Pilot River Water Bypass Treatment Process	LI Li, ZHU Bing, BAI Yao, <i>et al.</i> (1637)
Chlorination of Naproxen; Removal, Transformation and Risk Assessment	FAN Xin-xin, DU Er-deng, LI Jia-qi, <i>et al.</i> (1645)
Removing Typical Odorants in Drinking Water by Vacuum Ultraviolet Combined with Chlorine	SUN Xin, ZHANG Yi, SHI Lu-xiao, <i>et al.</i> (1654)
Degradation of Triclosan by Heat Activated Persulfate Oxidation	JIANG Meng-di, ZHANG Qing-yue, JI Yue-fei, <i>et al.</i> (1661)
Adsorption of Tetracycline on Simulated Suspended Particles in Water	XU Long-feng, WEI Qun-shan, LÜ Qiang, <i>et al.</i> (1668)
Characteristics and Performance of Embedded ANAMMOX Bacteria in Treating Saline Wastewater	SHAN Xiao-jing, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (1677)
Enhanced Nitrogen Removal of ANAMMOX Treating Saline Wastewater With Betaine Addition	YU De-shuang, WU Guo-dong, LI Jin, <i>et al.</i> (1688)
Pilot-scale Experiment on Enrichment of Nitrifying Activated Sludge and Its Application in Enhancing a Wastewater Biological Treatment System Against Ammonia Shocking Loads	SHENG Xiao-lin, CUI Can-can, WANG Jia-de, <i>et al.</i> (1697)
Effect of Step Feed on Denitrifying Phosphorus and Nitrate Removal in a Modification of the Two Sludge A ² /O-BAF System	NAN Yan-bin, PENG Yong-zhen, ZENG Li-yun, <i>et al.</i> (1704)
Achieving Partial Nitrification in a Continuous-flow Aerobic Granular Sludge Reactor at Different Temperatures Through Ratio Control	LIANG Dong-bo, BIAN Wei, KAN Rui-zhe, <i>et al.</i> (1713)
Mechanism of Action of Activated Sludge Properties in Nitrogen Removal by Endogenous Denitrification Through an Intelligent Aeration-controlled A/O Process	XU Min-yang, HU Zhan-bo, ZHANG Sui-sheng, <i>et al.</i> (1720)
Effect of Temperature on the Performance and Microbial Community Structure in an Integrated Anaerobic Fluidized-bed Membrane Bioreactor Treating Benzothiazole Wastewater	LI Yue, HU Qi, GAO Da-wen (1731)
Removal of Antibiotics During In-situ Sludge Ozone-reduction Process	WANG Lu, BEN Wei-wei, LI Yan-gang, <i>et al.</i> (1739)
Effect of Zero Valent Iron on the Horizontal Gene Transfer of Tetracycline Resistance Genes During Anaerobic Sludge Digestion Process	YANG Fan, XU Wen-li, QIAN Ya-jie, <i>et al.</i> (1748)
Effects of Environmental Factors on the Synergy of Functional Bacteria in Completely Autotrophic Granular Sludge	CHEN Xi, QIAN Fei-yue, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (1756)
Microbiological Characteristics of a Post Solid-Phase Denitrification Biofilter Process	ZHANG Qian, JI Fang-ying, XU Xuan (1763)
Aerobic Denitrification and Microbial Community Shift in SBR Bioaugmented with Strains YH01 and YH02	CHEN Hai-sheng, CAO Gang, ZHANG Di, <i>et al.</i> (1773)
Performance, Sludge Characteristics, and the Microbial Community Dynamics of Bulking Sludge Under Different Nitrogen and Phosphorus Imbalances	HE Xue-meng, DING Li-li, ZHANG Lu-lu, <i>et al.</i> (1782)
Degradation Characteristics and Metabolic Pathway of a Pyrene-Degrading <i>Pseudomonas aeruginosa</i> Strain	LI Xiang, ZHANG Xue-ying, ZHOU Jun, <i>et al.</i> (1794)
Driving Factors of the Dynamics of Microbial Community in a Dam of Copper Mine Tailings	LI Cui, JING Ju-hui, LIU Jin-xian, <i>et al.</i> (1804)
Effects of Reclamation on Soil Nutrients and Microbial Activities in the Huixian Karst Wetland in Guilin	HUANG Ke-chao, SHEN Yu-yi, XU Guang-ping, <i>et al.</i> (1813)
Effects of the Farmland-to-Forest/Grassland Conversion Program on the Soil Bacterial Community in the Loess Hilly Region	CHEN Meng-li, ZENG Quan-chao, HUANG Yi-mei, <i>et al.</i> (1824)
Insight into the Mechanism of Feammox in the Surface Soils of a Riparian Zone	DING Bang-jing, LI Zheng-kui, ZHU Hong-jie, <i>et al.</i> (1833)
Soil Degradation-Associated Microbial Community Structure Changes in an Alpine Meadow Under Tibetan Pig Herding	ZHAN Peng-fei, XIAO De-rong, YAN Peng-fei, <i>et al.</i> (1840)
Characteristics of Iron Plaque and Its Heavy Metal Enrichment in Typical Mangrove Plants in Shenzhen Bay, China	SHEN Xiao-xue, LI Rui-li, CHAI Min-wei, <i>et al.</i> (1851)
Spatial Distribution of DDTs and PCBs in Wild Fish from Hong Kong Coastal Areas and Potential Human Health Risk Assessment	SU Yang, BAO Lian-jun, ZENG Eddy Y (1861)
Pollution Characteristics of PAHs in Soil from a Remote Mountain Wetland-Dajuhu Lake, Shengongjia	HU Tian-peng, XING Xin-li, KE Yan-ping, <i>et al.</i> (1872)
Migration and Transformation of Mercury in Unsubmerged Soil and Sediment at One Typical Forest Reservoir in Southwest China	SUN Tao, MA Ming, WANG Yong-min, <i>et al.</i> (1880)
Accumulation of Cd and Its Risks in the Soils of the Xijiang River Drainage Basin in Guangxi	SONG Bo, YANG Zi-jie, ZHANG Yun-xia, <i>et al.</i> (1888)
Effects of Long-term Fertilization Regimes on As Accumulation in Upland Red Earth and the Crops Growing on It	ZHANG Rong, YU Guang-hui, LI Ya-qing (1901)
Effects of a Tribasic Amendment on Cadmium and Arsenic Accumulation and Translocation in Rice in a Field Experiment	GU Jiao-feng, ZHOU Hang, JIA Run-yu, <i>et al.</i> (1910)
Quantitative Relationship Between Paddy Soil Properties and Cadmium Content in Rice Grains	WANG Meng-meng, HE Meng-yuan, SU De-chun (1918)
Effect of Ca-bentonite on Cu and Zn Forms in Compost and Soil, and Their Absorption by Chinese Cabbage	ZHAO Jun-chao, WANG Quan, REN Xiu-na, <i>et al.</i> (1926)
Effects of Short-term Exogenous Nitrogen and Carbon Input on Soil Respiration Under Changing Precipitation Pattern	HE Yun-long, QI Yu-chun, PENG Qin, <i>et al.</i> (1934)
Effects of Simulated Precipitation Reduction on Soil Respiration in a Soybean-Winter Wheat Rotation Cropland	WANG Zhao-hui, CHEN Shu-tao, SUN Lu, <i>et al.</i> (1943)
Seasonal Variation in Nitric Oxide Emission from an Agricultural Headwater Ditch in the Hilly Purple Soil Area and the Factors Influencing Emission	TIAN Lin-lin, REN Guang-qian, ZHU Bo (1952)
Effects of Seasonal Asymmetric Warming on Soil CO ₂ Release in Karst Region	TANG Guo-yong, ZHANG Chun-hua, LIU Fang-yan, <i>et al.</i> (1962)