

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第5期

Vol.37 No.5

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2015年12月北京市空气重污染过程分析及污染源排放变化	薛亦峰,周震,聂滕,潘涛,齐璐,聂磊,王占山,李云婷,李雪峰,田贺忠(1593)
北京 APEC 期间大气颗粒物中类腐殖酸的污染特征及来源	周雪明,仝雪娇,项萍,谭吉华,段菁春,何晓明,贺克斌,马永亮(1602)
利用 SPAMS 分析北京市硫酸盐、硝酸盐和铵盐季节变化特征及潜在源区分布	刘浪,张文杰,杜世勇,侯鲁健,韩斌,杨文,陈敏东,白志鹏(1609)
兰州城区大气 PM _{2.5} 污染特征及来源解析	王新,聂燕,陈红,王博,黄韬,夏敦胜(1619)
成都市西南郊区春季大气 PM _{2.5} 的污染水平及来源解析	林瑜,叶芝祥,杨怀金,张菊,殷蔚雯,李晓芬(1629)
中亚热带背景区重庆四面山大气气态总汞含量变化特征	刘伟明,马明,王定勇,孙涛,魏世强(1639)
固定源排放污染物健康风险评价方法的建立	陈强,吴焕波(1646)
北京市典型燃烧源颗粒物排放水平与特征测试	胡月琪,邬晓东,王琛,梁云平,马召辉(1653)
南京公园降尘中重金属污染水平及风险评价	王呈,钱新,李慧明,孙一轩,王金花(1662)
CoCuMnO ₂ 光催化氧化多组分 VOCs 特性及其动力学	孟海龙,卜龙利,刘嘉栋,高波,冯奇奇,谭娜,谢帅(1670)
大辽河感潮河段及近岸河口氮、磷的分布及潜在性富营养化	张雷,曹伟,马迎群,韩超南,秦延文,赵艳民,刘志超,杨晨晨(1677)
典型温冰川区湖泊的稳定同位素空间分布特征	史晓宜,蒲焘,何元庆,陆浩,牛贺文,夏敦胜(1685)
利用δ ¹⁵ N-NO ₃ ⁻ 和 δ ¹⁸ O-NO ₃ ⁻ 示踪北京城区河流硝酸盐来源	赵庆良,马慧雅,任玉芬,王效科,彭剑锋,贺成武,武俊良,刘梦贞,闫苗苗(1692)
柳江盆地浅层地下水硝酸盐分布特征及影响因素分析	王贺,谷洪彪,迟宝明,李海君,姜海宁(1699)
三峡库区小流域不同土地利用类型对氮素流失影响	陈成龙,高明,倪九派,谢德体,邓华(1707)
亚热带农区生态沟渠对农业径流中氮素迁移拦截效应研究	王迪,李红芳,刘锋,王毅,钟元春,何洋,肖润林,吴金水(1717)
平原河网典型污染物生物降解系数的研究	冯帅,李叙勇,邓建才(1724)
沉水植物对沉积物微生物群落结构影响:以洪泽湖湿地为例	张丁予,章婷曦,董丹萍,李德芳,王国祥(1734)
苏南水库硅藻群落结构特征及其控制因素	任杰,周涛,朱广伟,金颖薇,崔扬,许海,朱梦圆,夏明芳,陈伟民(1742)
河北衡水湖湿地汞污染现状及生态风险评价	王乃姗,张曼胤,崔丽娟,马牧源,颜亮,穆泳林,秦鹏(1754)
顺德水道土壤及沉积物中重金属分布及潜在生态风险评价	蔡怡敏,陈卫平,彭驰,王铁宇,肖荣波(1763)
台州电子垃圾拆解区水和沉积物中多溴联苯醚污染特征与生态风险	陈香平,彭宝琦,吕素平,陈强,张勇,黄长江,董巧香(1771)
乌江中上游段河水主要离子化学特征及控制因素	黄奇波,覃小群,刘朋雨,蓝芳宁,张连凯,苏春田(1779)
岩溶流域地下水 TOC 输出及影响因素分析:以重庆丰都雪玉洞地下河流域为例	王巧莲,蒋勇军,陈宇(1788)
广东英德宝晶宫洞穴滴水元素季节变化与影响因素	黄嘉仪,陈琳,陈琼,刘淑华,杨亮,童晓宁,贺海波,米小建,邓肖敏,彭小桃,李汉杰,杨琰,周厚云(1798)
基于 PCR-DGGE 和拟杆菌(<i>Bacteroides</i>) 16S rRNA 的岩溶地下水粪便污染源示踪研究:以重庆南山老龙洞地下河系统为例	张弘,蒋勇军,张远瞩,段逸凡,吕现福,贺秋芳(1805)
典型岩溶区地下河中溶解态脂类生物标志物来源解析及其变化特征	梁作兵,孙玉川,李建鸿,王尊波,谢正兰,张媚,廖昱,江泽利(1814)
钴活化过一硫酸盐氧化过程中卤代副产物的生成	刘阔,金浩,董为,季跃飞,陆隽鹤(1823)
天冬氨酸在氯化过程中生成消毒副产物二氯乙腈的研究	丁春生,李乃军,张涛,章梦青(1831)
臭氧氧化饮用水过程中可同化有机碳生成的影响因素	董秉直,张佳丽,何畅(1837)
污水管网典型混流制区域水量水质波动特征解析	程珣,张明凯,刘艳臣,施汉昌(1845)
HDTMA 改性沸石的制备及吸附废水中对硝基苯酚的性能和动力学	郭俊元,王彬(1852)
放射性废水处理中吸附铀的优势藻种筛选	李鑫,胡洪营,余骏一,赵文玉(1858)
微米 Fe ₃ O ₄ 磁粉调理-压力电场污泥脱水工艺过程研究	钱旭,王毅力,赵丽(1864)
间歇曝气 SBR 处理养猪沼液的短程脱氮性能	宋小燕,刘锐,税勇,川岸朋树,占新民,陈吕军(1873)
不同灌溉方式对华北平原冬小麦田土壤 CO ₂ 和 N ₂ O 排放通量的影响	郭树芳,齐玉春,尹飞虎,彭琴,董云社,贺云龙,闫钟清(1880)
卫河新乡市区段春季溶解 CH ₄ 与 N ₂ O 浓度特征	侯翠翠,张芳,李英臣,王奇博,刘赛(1891)
模拟氮沉降对内蒙古克什克腾草原 N ₂ O 排放的影响	杨涵越,张婷,黄永梅,段雷(1900)
土壤呼吸与土壤有机碳对不同秸秆还田的响应及其机制	曹湛波,王磊,李凡,付小花,乐毅全,吴纪华,陆兵,徐殿胜(1908)
黑土丘陵区小流域土壤有机质空间变异及分布格局	高凤杰,马泉来,韩文文,单培明,周军,张少良,张志民,王宏燕(1915)
耕作方式对紫色水稻土团聚体中有机质及重金属的分布特征影响	史琼彬,赵秀兰,常同举,卢吉文(1923)
北京东南郊典型地层重金属分布特征与潜在生态风险	赵倩,马琳,刘翼飞,何江涛,李广贺(1931)
准东煤田露天矿区土壤重金属污染现状评价及来源分析	刘巍,杨建军,汪君,王果,曹月娥(1938)
纳米 TiO ₂ 对土壤重金属释放及形态变化的影响	张金洋,王定勇,梁丽,李楚娟,张成,周雄,刘娟(1946)
纳米零价铁铜双金属对铬污染土壤中 Cr(VI) 的还原动力学	马少云,祝方,商执峰(1953)
低分子有机酸对硫杆菌活性的抑制作用及对土壤重金属脱除的影响	宋永伟,王鹤茹,曹艳晓,李飞,崔春红,周立祥(1960)
粒径和包裹物对纳米银在海洋微藻中的毒性影响	黄俊,衣俊,强丽媛,程金平(1968)
萱草修复石油烃污染土壤的根际机制和根系代谢组学分析	王亚男,程立娟,周启星(1978)
高温堆肥过程对猪粪来源抗生素抗性基因的影响	郑宁国,黄南,王卫卫,喻曼,陈晓旻,姚燕来,王卫平,洪春来(1986)
磺胺抗性消长与堆肥进程交互特征	林辉,汪建妹,孙万春,符建荣,陈红金,马军伟(1993)
《环境科学》征订启事(1830) 《环境科学》征稿简则(1977) 信息(1698,1851,1992)	

北京市典型燃烧源颗粒物排放水平与特征测试

胡月琪, 邬晓东, 王琛, 梁云平, 马召辉

(北京市环境保护监测中心, 大气颗粒物监测技术北京市重点实验室, 北京 100048)

摘要: 研究以自行建立的固定燃烧源烟气颗粒物与水溶性离子监测采样系统和FPS4000与ELPI+结合使用的颗粒物分级采样系统, 应用于北京市典型燃烧源烟气颗粒物排放监测。结果表明, 北京市燃烧源烟气中总颗粒物基准排放质量浓度最高达 $83.68 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 最低 $0.12 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 颗粒物粒数浓度在 $10^4 \sim 10^6 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$ 数量级上。北京市燃烧源颗粒物质量和数量浓度排放水平排序依次为: 供暖燃气锅炉 < 电厂燃煤锅炉 < 供暖燃煤锅炉。PM₁₀排放呈双峰或三峰分布, 峰值均在 $1 \mu\text{m}$ 以下。从粒数分析, PM₁₀中99.8%以上为PM_{2.5}, 并以PM_{0.1}为主, 占PM_{2.5}的83%以上, 但从质量上分析PM₁₀中PM_{2.5}与PM_{0.1}的比例大幅降低, PM_{2.5}占PM₁₀的82%左右, PM_{0.1}占PM_{2.5}的27%~33%。

关键词: 固定燃烧源; 颗粒物; 排放水平; 排放特征; 北京

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)05-1653-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.05.008

Testing of Concentration and Characteristics of Particulate Matters Emitted from Stationary Combustion Sources in Beijing

HU Yue-qi, WU Xiao-dong, WANG Chen, LIANG Yun-ping, MA Zhao-hui

(Beijing Key Laboratory of Airborne Particulate Matter Monitoring Technology, Beijing Municipal Environmental Protection Monitoring Center, Beijing 100048, China)

Abstract: A self-built monitoring sampling system on particulate matters and water soluble ions emitted from stationary combustion sources and a size separated sampling system on particulate matters based on FPS4000 and ELPI+ were applied to test particulate matters in fumes of typical stationary combustion sources in Beijing. The results showed that the maximum concentration of total particulate matters in fumes of stationary combustion sources in Beijing was $83.68 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ in standard smoke oxygen content and the minimum was $0.12 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$. And particle number concentration was in the $10^4 \sim 10^6 \text{ cm}^{-3}$ number of grade. Both mass and number concentration ranking order of particulate matters emitted from stationary combustion sources in Beijing was: heating gas fired boilers < power plant coal fired boilers < heating coal fired boilers. And two or three peaks existed under $1 \mu\text{m}$ of particulate size for both number size distribution and mass size distribution. The number concentration for PM_{2.5} accounted for over 99.8% of that for PM₁₀, and that for PM_{0.1} accounted for over 83% of that for PM_{2.5}. But the proportions of PM_{0.1} and PM_{2.5} in PM₁₀ were significantly lower in quality analysis, the proportion of PM_{2.5} in PM₁₀ was about 82%, and that of PM_{0.1} in PM_{2.5} was about 27%~33%.

Key words: stationary combustion sources; particulate matter; emission concentration; emission characteristics; Beijing

随着近年来北京市以大气环境首要污染物PM_{2.5}为特征的区域性复合型污染日益严重, 大气环境污染问题已引起公众的空前关注。空气中的PM_{2.5}及其中的有毒有害物质, 如重金属和PAHs等对人体呼吸系统、心血管系统、免疫系统等产生损伤作用^[1-5], 给人体健康带来巨大的危害和致病风险。

有研究认为以燃煤为主的火力发电和工业锅炉是导致区域性复合污染的主要原因之一^[6-8], 并已引起国内外学者对燃烧源细颗粒物排放研究的广泛关注。适用于燃烧源颗粒物排放与分布研究的稀释通道采样技术被国内外学者广泛使用^[9,10]。也有学者将图像处理技术和颗粒形态学技术应用到大气颗粒物环保检测领域, 并可同时获得颗粒物的浓度与粒径分布^[11,12]。岳勇等^[13]、鲁晟等^[14]利用冲击式颗粒物分级采样器研究了燃煤锅炉颗粒物排放的粒

径分布及去除效率。有研究认为Mg添加剂可抑制燃煤锅炉细颗粒物的排放, 但易受烟温影响^[15]。韦琳等^[2]利用稀释通道法和ELPI研究了水泥窑PM_{2.5}及其中的多环芳烃的排放浓度与排放特征。楼晟荣^[16]也利用稀释通道法和ELPI对中小锅炉细颗粒物的排放因子与分布特征进行了研究。

北京市新颁布的地方排放标准《锅炉大气污染物排放标准》(DB 11/139-2015)^[17]和《固定式燃气轮机大气污染物排放标准》(DB 11/847-2011)^[18]中规定的颗粒物允许排放限值均为 $5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 促使北京市燃煤锅炉排污单位普遍采用布袋除尘和/或静

收稿日期: 2015-11-17; 修订日期: 2015-12-08

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2013BAC17B01); 环境保护公益性行业科研专项(20140914)

作者简介: 胡月琪(1971~), 男, 主要研究方向为环境与污染源监测, E-mail: huyueqi@bjmcmc.com.cn

电除尘 + 湿法除尘脱硫脱硝等高效净化装置或进行“煤改气”改造,以期达标排放,从而有助于相关政策措施的推进与实施. 湿法脱硫除尘设施的使用,在控制 SO_2 和 NO_x 的排放以减少二次颗粒物的生成潜力,同时会降低一次颗粒物的排放^[19],但烟气脱硫和脱硝也会增加水溶性 $\text{PM}_{2.5}$ 的排放,并对细颗粒物的化学组成、粒径分布及其生成与去除机制等产生影响^[20].

随着“煤改气”的推进,清洁能源天然气的使用量在北京市整个能源结构中的比例不断增大. 目前鲜有开展针对天然气锅炉和采用严格污染控制措施的燃煤锅炉颗粒物排放水平与特征的研究. 本研究针对北京市典型燃烧源颗粒物排放水平及其排放特征进行实测分析,以探讨不同燃料锅炉、不同烟气净化措施对颗粒物的排放及粒径分布的影响,以期

为评估烟气净化工艺治理效果和分析大气环境颗粒物的来源与成因提供技术支撑和基础依据,从而为相关环境管理部门制定科学合理的颗粒物排放控制政策和能源政策提供技术支撑,对切实改善我国的大气环境质量具有重要的现实意义.

1 材料与方法

1.1 北京市典型燃烧源颗粒物排放水平测试

1.1.1 研究对象的选择

表 1 列示了作为研究对象的北京市 5 家燃煤锅炉、1 家燃气锅炉和 1 家燃气轮机组使用单位的污染源信息. 燃煤锅炉既有电厂锅炉,也有工业和供暖锅炉,包含了大、中、小不同吨位炉型,并涵盖了北京市目前使用的典型烟气湿法脱硫除尘净化工艺以及使用的不同脱硫剂.

表 1 测试锅炉及其脱硫系统信息表

Table 1 Information on operational parameters of tested boilers and desulfurization systems

序号	锅炉类型	锅炉型号	锅炉蒸发量/ $\text{t}\cdot\text{h}^{-1}$	脱硫设施	锅炉负荷/%
1	电厂燃煤锅炉	HG670/140-13	670	低氮燃烧 + SCR 脱硝 + 静电除尘 + 布袋除尘 + 石灰石/石灰-石膏湿法脱硫	90
2	供暖燃煤锅炉 1	DZL40-1.6-A II	40	湿法脱硫除尘一体净化工艺 (NaOH)	78
3	供暖燃煤锅炉 2	DZL64-1.6/130/70-A II	90	布袋除尘 + 湿法脱硫装置 (MgO)	85
4	工业燃煤锅炉	SHL20-1.25-A II	20	湿法脱硫除尘一体净化工艺 (NaOH + $\text{NH}_4\text{HCO}_3/1:4$)	80
5	供暖燃气锅炉	SZS14-1.25-115/70	20	高效低氮燃烧器	75
6	电厂燃气轮机组	M701F4 + DG303.9/13.58/68.2/3.73/44.2/0.68-M105	418	低氮燃烧 + SCR 脱硝	95

1.1.2 采样方法

图 1 为按照国标 GB/T 16157-1996 采集颗粒物的技术要求为基础^[21],结合 EPA Method 202 采集可凝聚颗粒物的方法原理,建立的固定燃烧源烟气颗粒物与水溶性离子监测采样系统. 在直接捕集烟气中一次可过滤颗粒物 (FPM) 后,再通过将烟气冷凝生成的一次可过滤的可凝聚颗粒物 (CPM-F) 用滤膜捕集,最后用超纯水吸收烟气中的水溶性组分. 超纯水样品和烟气冷凝过程中形成的冷凝水中的溶解性总固体 (CPM-DS1 与 CPM-DS2) 均作为可凝聚颗粒物 (CPM) 的一部分进行处理与分析^[21,22].

采样系统以意大利 TECORA 公司的二噁英采样系统为基础,辅以青岛市崂山应用技术研究所的 3012 型平行测速烟尘测试仪及其他相关辅助部件组成. 采样系统首先利用等速采样原理,烟气在抽气泵的作用下在烟道内通过滤膜捕集 FPM,透过滤膜的烟气通过加热至 120°C 的采样枪后,进入烟气冷凝器快速冷却,此时烟气中无机或有机蒸气冷凝

并通过均相成核或异相凝结,形成大量的微细颗粒物. 烟气冷凝过程中产生的冷凝水用收集瓶收集并监测烟气冷凝器出口烟温,产生的 CPM-F 通过滤膜捕集,最后烟气经低温冰水浴中的超纯水吸收液和干燥器后进入抽气泵,然后排出.

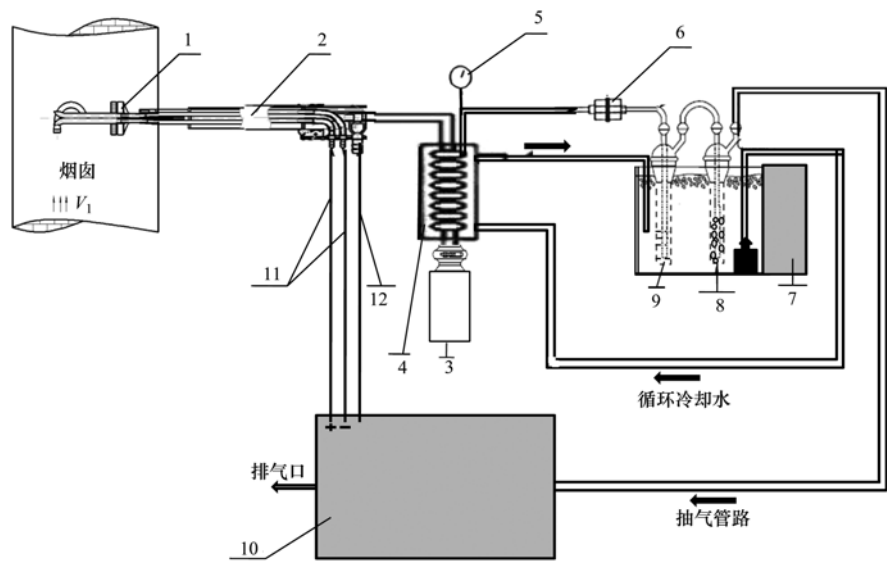
以图 1 所示的采样系统来进行采样,各燃烧源采样 3 ~ 6 组,每组采样时间 60 ~ 90 min,同时用德国德图公司的 Testo350 烟气分析仪监测采样期间烟温和烟气中的气态污染物浓度.

采样时使用的滤膜为直径 47 mm 的石英膜 (Whatman;1851047),采样和实验分析所用的超纯水为电导率 $<0.5\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 并经 $0.45\ \mu\text{m}$ 微孔滤膜过滤后的二次去离子水. 称重使用的分析天平为瑞士梅特勒公司的 MX5 型十万分之一电子天平.

1.1.3 烟气中颗粒物排放的计算

锅炉烟气中颗粒物排放的有关计算公式如下.

锅炉烟气中颗粒物的实测排放质量浓度计算公式为:



1. FPM 滤膜采样夹; 2. 加热采样枪; 3. 冷凝水收集瓶; 4. 烟气冷凝器; 5. 热电偶温度计; 6. CPM-F 滤膜采样夹; 7. 水浴温控与冷凝器循环水动力装置; 8. 烟气干燥器; 9. 超纯水吸收瓶; 10. 平行测速烟尘采样控制系统与烟气抽气装置; 11. S 型皮托管动静压连接管; 12. 采样枪加热电缆

图 1 固定燃烧源烟气颗粒物与水溶性离子监测采样系统示意

Fig. 1 Schematic of sampling system on PM and the water-soluble ions in fumes of fixed burning source

$$\rho_i = G'_i/V_{nd} \times 10^6$$

式中, ρ_i 为标准状态下颗粒物的实测排放质量浓度, $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$; G'_i 为颗粒物的质量, g ; V_{nd} 为标准状态下干采气体积, L .

锅炉烟气中颗粒物的基准排放质量浓度计算公式为^[17,18,21]:

$$\rho'_i = \rho_i \times [21 - \varphi(\text{O}_2)]/[21 - \varphi'(\text{O}_2)]$$

式中, ρ'_i 为标准状态下颗粒物的基准排放质量浓度, $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$; $\varphi'(\text{O}_2)$ 、 $\varphi(\text{O}_2)$ 分别为实测氧含量

(体积分数)与基准氧含量, %.

1.2 北京市典型燃烧源颗粒物排放特征测试

1.2.1 研究对象的选择

表 2 为相关研究对象的基本情况信息. 本文选用了大型燃煤电厂锅炉、集中供暖中型燃煤锅炉及一般供暖燃气锅炉作为研究对象,以探讨典型燃烧源颗粒物的排放特征. 燃煤锅炉主要选择使用比较广泛的煤粉炉和链条炉,同时兼顾了北京市使用日益广泛的烟气净化工艺设施.

表 2 测试锅炉的基本情况表

Table 2 General information of tested boilers

序号	锅炉类型	锅炉型号	蒸发量/ $\text{t}\cdot\text{h}^{-1}$	锅炉负荷/%	烟气净化设施
1	电厂燃煤锅炉 1	HG670/140-13	670	90	低氮燃烧 + SCR 脱硝 + 静电除尘 + 布袋除尘 + 石灰石/石灰-石膏湿法脱硫
2	电厂燃煤锅炉 2	HG410/9.8-YM15	410	80	(SNCR + SCR) 脱硝 + 静电除尘 + 石灰石/石灰-石膏湿法脱硫
3	供暖燃煤锅炉	QXL70-1.6/130/70-A II	100	78	SCR 脱硝 + 布袋除尘 + 石灰石/石灰湿法脱硫
4	供暖燃气锅炉	NBO-1000G	1	85	—

1.2.2 采样方法

图 2 为芬兰 Dekati 公司的 FPS4000 (Fine Particular Sampler) 细颗粒物混合稀释系统与 ELPI + (Electrical Low Pressure Impactor) 荷电低压电称撞击分级采样器结合使用的颗粒物分级采样系统.

FPS4000 是基于稀释采样原理,模拟了烟气排入大气环境时的稀释、冷却、凝结等过程,使在高温烟气状态下以气态形式排出,而在稀释和冷却过

程中生成、凝并的可凝聚颗粒物,再用颗粒物采样装置进行捕集和监测^[23],进而减少颗粒物的测试损失,也可有效防止湿法脱硫除尘系统后高湿烟气中的水汽凝结而干扰颗粒物的监测采样.

FPS4000 系统包含加热湍流稀释和射流混合稀释两级稀释,稀释比对颗粒物的影响较大,一级加热湍流稀释使洁净稀释空气与烟气在可控温度状态下 (一般 120°C 左右) 混合稀释,可避免烟气中水气冷

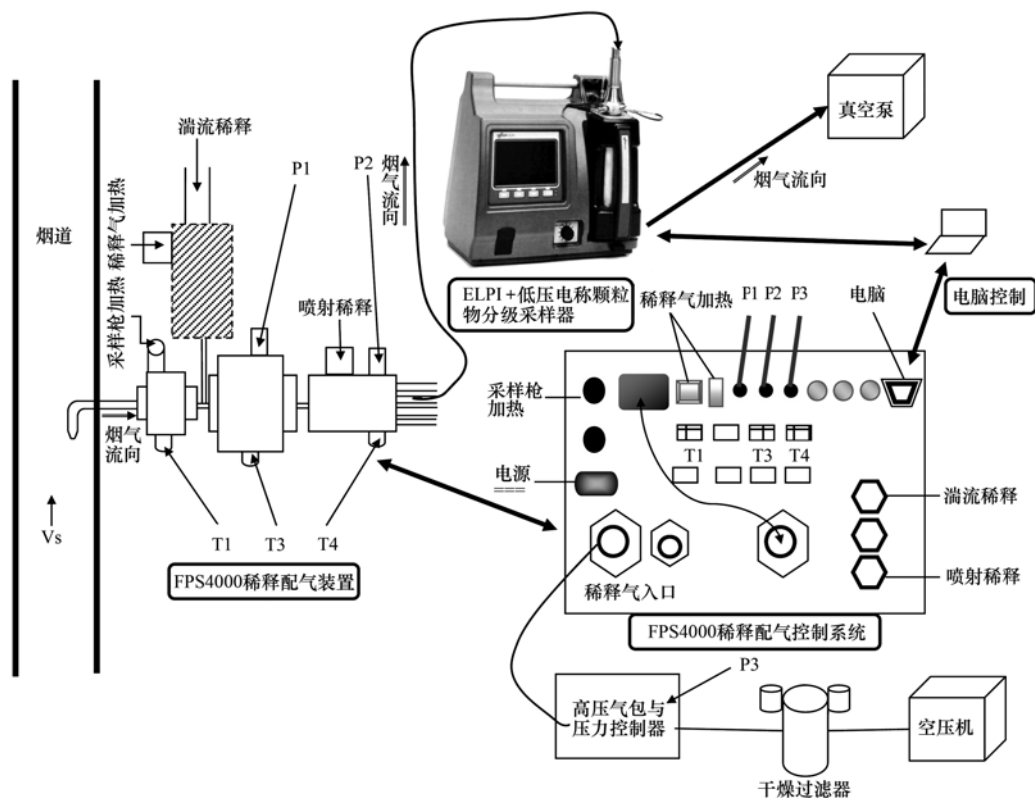


图2 FPS4000 与 ELPI+ 颗粒物分级采样系统

Fig. 2 Schematic of the size separated sampling system on PM based on FPS4000 and ELPI+

凝;二级射流混合稀释则是通过射流稀释器将烟气从第一级稀释器中抽出^[24],为了尽可能地模拟烟气排入环境时的实际排放情况,稀释后混合气温度接近常温(一般 $<40^{\circ}\text{C}$ 左右).FPS4000 系统烟气进气流量保持为 $10\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$,以保证颗粒物切割器的切割粒径.采样前应预测流速,并据此选用合适的采样嘴,使采样流量满足颗粒物等速采样要求.

烟气在进入 FPS4000 混合稀释系统之前,应先用颗粒物切割器去除粒径大于 $10\text{ }\mu\text{m}$ 的颗粒物,以避免烟气中大颗粒物在稀释通道内因重力沉降、热力迁移、扩散沉积以及颗粒物表面张力与黏滞性等作用下在稀释通道管壁沉积造成损失^[10,25],并影响混合稀释系统的使用.

经 FPS4000 稀释后的烟气通过 ELPI+ 单级电晕充电室时,电晕放电产生的离子使烟气中的颗粒物带电,随后逐级通过共 14 级的多级/串级惯性撞击式颗粒物分级切割器,不同粒径大小的带电颗粒物由于惯性不同,通过时会被不同级惯性撞击器集尘板上的滤膜捕获和收集^[24,26~28].经过分级后的带电颗粒物在 ELPI+ 每级均可实时通过精密电子测量计进行电量测量,并将测量的电荷量信号转化为颗粒物的粒数浓度^[29,30],进而可分析出固定源排

放颗粒物的粒数粒径分布情况.

ELPI+ 可将 $10\text{ }\mu\text{m}$ 以下颗粒物切割为 14 级,粒径从 $0.006\sim 10\text{ }\mu\text{m}$,并可实时测量 $6\text{ nm}\sim 10\text{ }\mu\text{m}$ 的颗粒物粒数浓度及其粒径分布,表 3 为 ELPI+ 的颗粒物粒径分级情况.如果同时将 ELPI+ 各级集尘板上的颗粒物进行称重分析,也可测定固定源排放的不同粒径段颗粒物的质量浓度及其质量粒径分布情况.

测试时,FPS4000 稀释气空压机气包出口压力需维持在 $(450\pm 1.5)\text{ kPa}$,以确保烟气按设定比率进行稀释.ELPI+ 出口处的压力需维持在 4 kPa 左右,使真空泵抽气流量保持为 $10\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$,以保证各级撞击器上颗粒物的切割粒径.

以 FPS4000 与 ELPI+ 相结合的颗粒物分级采样系统进行采样,研究锅炉烟气颗粒物排放数量浓度粒径分布特征,同时将 ELPI+ 各级撞击器集尘板上的滤膜进行称重,根据各级滤膜的增重与采气体积进一步分析锅炉烟气颗粒物排放质量浓度粒径分布特征.测试期间同时用德国德图公司的 Testo350 便携式烟气分析仪测试各锅炉排放烟气的烟温及相关气态污染物的排放浓度.

ELPI+ 不同级撞击器集尘板上放置的滤膜为芬

兰 Dekati 公司的 ϕ 25 mm 聚碳酸酯纤维滤膜,滤膜在使用前后置于干燥器内、室温平衡 24 h 后称量至衡重. 称重使用的分析天平为瑞士梅特勒公司的 MX5 型十万分之一电子天平.

表 3 ELPI + 低压电称撞击分级采样仪的粒径分级

Table 3 Grading of particle size in electrical low pressure impactor			
级别	颗粒物类别	粒径范围 / μm	颗粒物 Stocks 粒径 / μm
1	PM _{0.1}	0.006 ~ 0.017	0.010
2		0.017 ~ 0.026	0.022
3		0.026 ~ 0.056	0.039
4		0.056 ~ 0.094	0.073
5	PM _{0.1} ~ PM _{1.0}	0.094 ~ 0.155	0.121
6		0.155 ~ 0.261	0.201
7		0.261 ~ 0.381	0.315
8		0.381 ~ 0.612	0.483
9		0.612 ~ 0.946	0.761
10	PM _{1.0} ~ PM _{2.5}	0.946 ~ 1.600	1.230
11		1.600 ~ 2.390	1.956
12	PM _{2.5} ~ PM ₁₀	2.390 ~ 3.990	3.088
13		3.990 ~ 6.670	5.159
14		6.670 ~ 9.890	8.122

1.2.3 采样时间与稀释比

研究发现,北京市典型燃烧源烟气中总颗粒物含量不高,普遍低于 $100\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$. 同时由于烟气稀释比对颗粒物的粒数浓度与粒径分布均有一定影响^[31],为使测试结果具有可比性,降低烟气稀释比对颗粒物的粒数浓度与粒径分布的影响,本研究将烟气稀释比均设定为 20.

为保证测试结果的重复性和可靠性,每个源测试 3 次. 供暖燃煤锅炉和供暖燃气锅炉测试时间为 1 h,由于测试时间短及颗粒物排放水平较低,14 级滤膜上未获得有效的颗粒物增重;而电厂燃煤锅炉测试时间为 22 ~ 24 h,取得了 3 组有效的 14 级粒径细颗粒物质量浓度结果.

2 结果与讨论

2.1 北京市典型燃烧源颗粒物排放水平

图 3 为测试的北京市典型燃烧源颗粒物排放的质量浓度. 研究表明:锅炉烟气中总颗粒物基准排放浓度最高为 $83.68\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$,最低仅 $0.12\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$,总体上看,锅炉总颗粒物排放浓度:电厂燃气轮机组 < 供暖燃气锅炉 < 电厂燃煤锅炉 < 工业与供暖燃煤锅炉.

从图 3 中可看出:电厂燃煤锅炉总颗粒物平均实测排放质量浓度为 $13.20\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$,平均基准排放质量浓度为 $13.98\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$,FPM 仅占总颗粒物

的 7.4%,为 $0.98\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 左右,而 CPM 占总颗粒物比例高达 92.6%,但烟温较高为 88°C . 我国现行国家标准针对锅炉烟气中颗粒物排放浓度限值只包括 FPM,因此对于电厂燃煤锅炉而言,其脱硫除尘净化设施对粗颗粒物基本去除,FPM 排放浓度远低于北京市地方排放浓度限值,但总颗粒物排放浓度却超过了排放标准,CPM 对总颗粒物的贡献明显.

工业与供暖燃煤锅炉总颗粒物平均实测排放质量浓度为 $35.92\sim66.32\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$,平均基准排放质量浓度为 $31.84\sim83.68\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$,显著高于电厂燃煤锅炉. 其中 FPM 基准排放质量浓度与北京市地方排放浓度限值基本接近,占总颗粒物的比例在 29.2% ~ 55.7%,但总颗粒物基准排放浓度均超过了北京市地方排放浓度限值要求,而烟温显著低于电厂燃煤锅炉.

相关研究认为:随着烟气排放温度的降低大部分水溶性离子不同程度地由气态向颗粒物凝聚富集,使 FPM 在总颗粒物中的比例上升,而 CPM 的比例下降;且烟气脱硫除尘净化工艺与脱硫产物的水中溶解度及其去除方式对烟气中水溶性离子和颗粒物的排放水平有显著影响^[21].

从图 3 中发现,供暖燃气锅炉为节能需要,上水在进入锅炉之前先与锅炉排放的热烟气进行热交换后再进入炉膛,因此其烟温较低为 56°C ,总颗粒物主要以 FPM 为主,其平均基准排放浓度为 $0.95\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$,略低于电厂燃煤锅炉;电厂燃气轮机组烟气含氧量和烟温均较高,分别为 13.9% 和 90°C ,FPM 平均基准排放浓度仅为 $0.12\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$. 供暖燃气锅炉与电厂燃气轮机组 FPM 排放均较低,并显著低于北京市地方排放浓度限值,且采用高效低氮燃烧器或 SCR 脱硝,CPM 增重有限,称量误差影响放大,因此无有效 CPM 浓度数据.

2.2 北京市典型燃烧源 PM₁₀浓度水平

表 4 为测试的北京市典型燃烧源 PM₁₀ 数浓度排放情况表. 从中可以看出,北京市燃煤锅炉烟气排放的颗粒物粒数浓度在 $10^5\sim10^6$ 个 $\cdot\text{cm}^{-3}$ 数量级上,其中 2 个电厂燃煤锅炉排放的 PM₁₀,其平均粒数浓度分别为 2.74×10^5 个 $\cdot\text{cm}^{-3}$ 和 1.28×10^5 个 $\cdot\text{cm}^{-3}$,平均质量浓度分别为 $0.97\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $0.64\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$;而供暖燃煤锅炉排放的平均颗粒物粒数浓度为 1.00×10^6 个 $\cdot\text{cm}^{-3}$,电厂燃煤锅炉排放的 PM₁₀ 粒数浓度比供暖燃煤锅炉排放的低一个数量级.

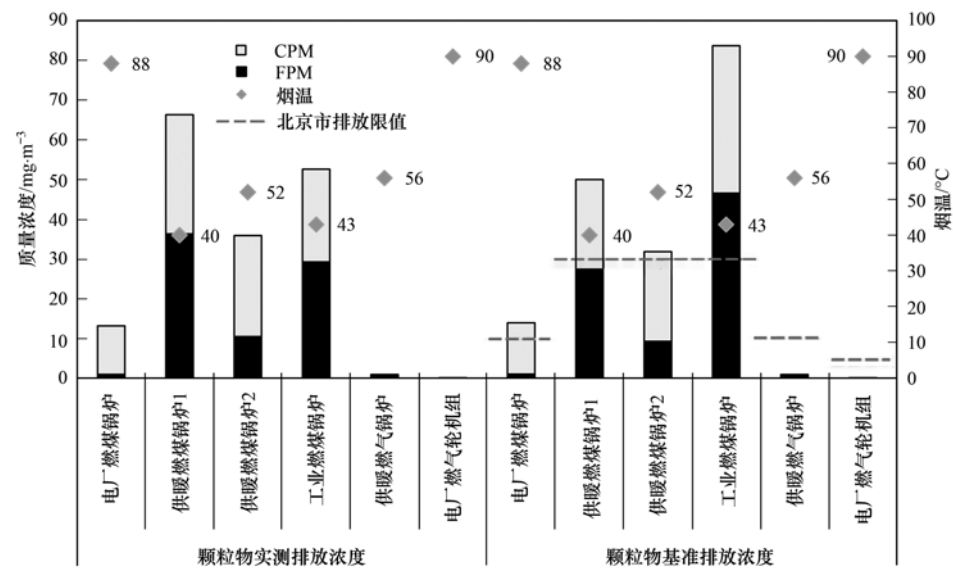


图3 锅炉烟气中颗粒物排放质量浓度

Fig. 3 Mass concentrations of the PM in flues emitted from boilers

表4 测试锅炉PM₁₀排放情况表

Table 4 General information of PM₁₀ emitted from the tested boilers

序号	锅炉类型	平均数量浓度 /个·cm ⁻³	平均PM ₁₀ 质量 浓度/mg·m ⁻³	烟温 /°C
1	电厂燃煤锅炉1	2.74 × 10 ⁵	0.97	88
2	电厂燃煤锅炉2	1.28 × 10 ⁵	0.64	81
3	供暖燃煤锅炉	1.00 × 10 ⁶	—	46
4	供暖燃气锅炉	4.57 × 10 ⁴	—	140

研究发现供暖燃气锅炉烟气排放的PM₁₀粒数浓度在10⁴个·cm⁻³数量级上,为4.57 × 10⁴个·cm⁻³,比燃煤锅炉低1~2个数量级,可见因供暖燃气锅炉使用清洁能源(天然气),其烟气中颗粒物排放质量浓度和数量浓度均显著低于燃煤锅炉的排放水平。

易红宏等^[32]的研究表明电厂锅炉产生的PM₁₀的粒数浓度在10⁶~10⁷个·cm⁻³数量级上,在李超等^[27]的研究中,工业锅炉产生和经过烟气净化设施后排放的PM₁₀的粒数浓度均在10⁶~10⁷个·cm⁻³数量级上,总体粒数浓度降低效率约25%~70%。但净化设施基本只有旋风除尘器、电除尘器或湿式除尘器等单一除尘装置,而目前北京市严格的污染控制措施,使大多数燃煤锅炉均安装了静电/布袋除尘+湿法脱硫+脱硝装置,除尘效果非常显著,本研究无论是供暖还是电厂燃煤锅炉其排放的PM₁₀粒数浓度均比相关文献降低了1~2个数量级,颗粒物排放水平下降明显,电厂燃煤锅炉甚至接近于供暖燃气锅炉排放。按照本研究燃煤锅炉PM₁₀排放数量浓度推算,北京市燃煤锅炉烟气净化设施PM₁₀去除率可达90%~

99%,这与相关研究的结论一致^[6,27,33,34]。

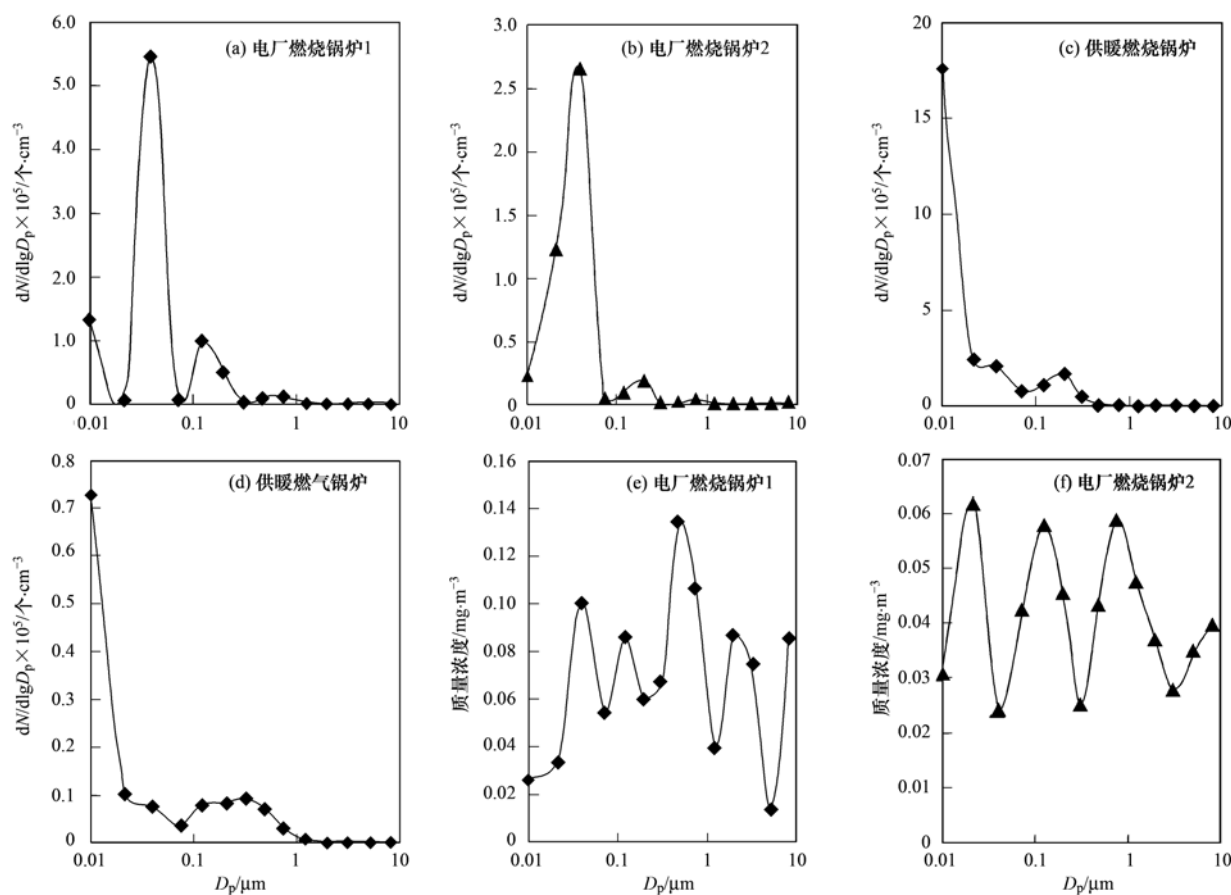
2.3 北京市典型燃烧源PM₁₀分布特征

图4为测试锅炉烟气排放的粒数浓度和质量浓度随粒径变化分布情况。

由图4(a)、图4(b)可见,电厂燃煤锅炉排放的颗粒物数量浓度主要集中在PM_{0.1}内,并随粒径变化呈三峰分布形态,其颗粒物排放数量在0.006~0.094 μm之间有一明显峰值,其次在0.094~0.612 μm之间有另一个较小峰值,在0.612~1.600 μm之间还有一个不太明显峰值,研究发现北京市电厂燃煤锅炉排放的颗粒物粒数浓度峰值分别出现在0.039、0.121和0.761 μm处。从图4(e)、4(f)发现:电厂燃煤锅炉1排放颗粒物质量随粒径变化在0.02~0.14 mg·m⁻³之间波动,而电厂燃煤锅炉2颗粒物质量随粒径变化在0.02~0.06 mg·m⁻³之间波动,并与数量浓度随粒径变化分布基本相同,峰值分别出现在0.022、0.121和0.761 μm处。与粗颗粒物相比,细颗粒物数量浓度要多很多,而质量浓度大致相当。

由图4(c)看出,供暖燃煤锅炉排放的颗粒物数量浓度也主要集中在PM_{0.1}内,并随粒径变化呈双峰分布形态,其颗粒物排放数量在0.006~0.094 μm之间即PM_{0.1}粒径段有一明显峰值,其次在0.094~0.612 μm之间粒径段也有一个较小峰值。

供暖燃煤锅炉与电厂燃煤锅炉粒径分布特征存在一定差异,电厂燃煤锅炉在0.612~1.600 μm之间还有一个不太明显峰值。可能是由于电厂燃煤锅炉烟气净化设施高效及其有效的运行管理与监督,

图4 锅炉烟气排放 PM_{10} 粒数浓度和质量浓度粒径分布Fig. 4 Number and mass size distribution of PM_{10} emitted from the tested boilers

且烟温较高,烟气中水溶性离子浓度较低并以气态形式存在^[21],以及湿法脱硫除尘对颗粒物的聚合与形成机制产生了影响^[20],使电厂燃煤锅炉烟气在冷却稀释过程中,部分气态水溶性离子等物质向颗粒态凝聚,而供暖燃煤锅炉因烟温低,原已为颗粒态的水溶性离子等则通过凝并过程使粒径增大而数量减少,导致 $0.612 \sim 1.600 \mu\text{m}$ 处出现峰值差异。

由图4(d)可看出,与供暖燃煤锅炉相似,供暖燃气锅炉排放的颗粒物数量浓度也主要集中在 $PM_{0.1}$ 内,并随粒径变化也呈双峰分布形态,其颗粒物排放数量在 $0.007 \sim 0.094 \mu\text{m}$ 之间即 $PM_{0.1}$ 粒径段有一明显峰值,其次在 $0.094 \sim 1.600 \mu\text{m}$ 之间较大粒径段还有一个峰值。

有研究报道了燃煤锅炉烟气净化设施后颗粒物的质量浓度粒径分布呈双峰分布^[26,27,35],峰值分别在 $0.1 \mu\text{m}$ 和 $2.0 \mu\text{m}$ 。本研究电厂燃煤锅炉质量浓度粒径分布呈三峰分布,峰值均在 $1.0 \mu\text{m}$ 以下。文献[27,36,37]提出燃煤锅炉排放的颗粒物数量浓度主要集中在 $<1 \mu\text{m}$ ($0.07 \sim 0.20 \mu\text{m}$) 的积聚模式,并主要呈单峰分布。本研究发现燃煤锅炉排放

的颗粒物数量浓度随粒径变化呈三峰或双峰分布,峰值均往细粒径方向下移。这可能是由于烟气采样时混合稀释时间短以及测试燃煤锅炉采用布袋除尘+湿法脱硫+SCR脱销烟气净化设施后,颗粒物的形状、表面张力及黏滞性等发生改变从而对颗粒物的形成与聚合机制产生了影响导致的结果。

2.4 PM_{10} 中各粒径段颗粒物的比例

表5为测试锅炉排放的 PM_{10} 中各粒径段颗粒物粒数或质量分数。从中可见,以 PM_{10} 中颗粒物粒数浓度来看,无论是电厂燃煤锅炉或者供暖燃煤锅炉,还是供暖燃气锅炉, $PM_{2.5}$ 均占 PM_{10} 的 99.8% 以上, $PM_{1.0}$ 占 $PM_{2.5}$ 的 99.7%, 而 $PM_{0.1}$ 占 $PM_{2.5}$ 的 83% 以上,可见 PM_{10} 的颗粒物粒数浓度主要取决于 $PM_{2.5}$ 的粒数浓度,而 $PM_{2.5}$ 的粒数浓度主要取决于 $PM_{1.0}$ 的粒数浓度,并最终主要取决于 $PM_{0.1}$ 的粒数浓度。但从电厂燃煤锅炉 PM_{10} 中颗粒物的质量比例来看, $PM_{2.5}$ 占 PM_{10} 的 82% 以上, $PM_{1.0}$ 占 $PM_{2.5}$ 的 82% 左右,而 $PM_{0.1}$ 仅占 $PM_{2.5}$ 的 27% ~ 33% 左右,可见 PM_{10} 的颗粒物质量浓度虽仍主要取决于 $PM_{2.5}$ 的质量浓度,而 $PM_{2.5}$ 的质量浓度主要取决于 $PM_{1.0}$

的质量浓度,但所占比重均大幅下降,特别是 $PM_{0.1}$ 的质量占比下降更明显。

表5 测试锅炉排放的 PM_{10} 各粒径段颗粒物比例¹⁾/%

Table 5 Ratios of PM number or mass between two adjacent sizes of PM_{10} emitted from the tested boilers/%

序号	锅炉类型	$PM_{0.1}/PM_{2.5}/\%$	$PM_{1.0}/PM_{2.5}/\%$	$PM_{2.5}/PM_{10}/\%$
1	电厂燃煤锅炉 1	85.51 (27.00 [*])	99.96 (81.98 [*])	99.94 (84.05 [*])
2	电厂燃煤锅炉 2	93.96 (33.57 [*])	99.93 (82.09 [*])	99.89 (82.25 [*])
3	供暖燃煤锅炉	92.66	99.95	99.99
4	供暖燃气锅炉	83.88	99.70	99.98

1)带*数据为各粒径段颗粒物质量分数

3 结论

(1)北京市典型燃烧源烟气中总颗粒物基准排放浓度最高为 $83.68 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$,最低仅 $0.12 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$,总体上看总颗粒物质量浓度排放水平依序为:电厂燃气轮机组<供暖燃气锅炉<电厂燃煤锅炉<工业与供暖燃煤锅炉。单从 FPM 基准排放浓度看,电厂燃煤锅炉与电厂燃气轮机组和供暖燃气锅炉排放水平相当,均低于 $1 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$,但总颗粒物排放水平显著高于燃气锅炉和燃气轮机组。

(2)北京市典型燃烧源烟气中排放的颗粒物粒数浓度在 $10^4 \sim 10^6 \text{ 个}\cdot\text{cm}^{-3}$ 数量级上,颗粒物数量浓度排放水平依序为:供暖燃气锅炉<电厂燃煤锅炉<供暖燃煤锅炉。

(3)燃气锅炉排放的 PM_{10} 中颗粒物粒数浓度在 $10^4 \text{ 个}\cdot\text{cm}^{-3}$ 数量级上,比燃煤锅炉低 1~2 个数量级,从粒数浓度分析,其 PM_{10} 中 99.8% 以上为 $PM_{2.5}$,而 $PM_{2.5}$ 中 83% 以上为 $PM_{0.1}$,且其粒数粒径分布特征与供暖燃煤锅炉十分相似并呈双峰分布,峰值分别出现在 100 nm 以下和 100 nm ~ 1 μm 之间。

(4)北京市电厂燃煤锅炉排放的 PM_{10} 中颗粒物粒数浓度在 $10^5 \text{ 个}\cdot\text{cm}^{-3}$ 数量级上,较供暖燃煤锅炉大致低一个数量级,其质量浓度和粒数浓度粒径分布特征均呈三峰分布,峰值均出现在 1 μm 以下;从粒数浓度分析,其 PM_{10} 中 99.8% 以上为 $PM_{2.5}$,而 $PM_{2.5}$ 中 85% 以上为 $PM_{0.1}$,但从质量浓度分析,其 PM_{10} 中 82% 以上为 $PM_{2.5}$,而 $PM_{2.5}$ 中只有 27% ~ 33% 左右为 $PM_{0.1}$ 。

参考文献:

- [1] Zhang M S, Song Y, Cai X H. A health-based assessment of particulate air pollution in urban areas of Beijing in 2000-2004 [J]. Science of the Total Environment, 2007, **376**(1-3): 100-108.
- [2] 韦琳,唐海龙,郭盈盈,等. 水泥窑 $PM_{2.5}$ 排放特征及其 PAHs 风险分析[J]. 中国环境科学, 2014, **34**(5): 1113-

1118.

- [3] Neuberger M, Schimek M G, Horak Jr F, *et al.* Acute effects of particulate matter on respiratory diseases, symptoms and functions: epidemiological results of the Austrian Project on Health Effects of Particulate Matter (AUPHEP) [J]. Atmospheric Environment, 2004, **38**(24): 3971-3981.
- [4] Pope III C A, Dockery D W. Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect [J]. Journal of Air & Waste Management Association, 2006, **56**(6): 709-742.
- [5] Wilson J G, Kingham S, Pearce J, *et al.* A review of intraurban variations in particulate air pollution: Implications for epidemiological research [J]. Atmospheric Environment, 2005, **39**(34): 6444-6462.
- [6] 贺晋瑜,燕丽,雷宇,等. 我国燃煤电厂颗粒物排放特征 [J]. 环境科学研究, 2015, **28**(6): 862-868.
- [7] Fu X, Wang S X, Zhao B, *et al.* Emission inventory of primary pollutants and chemical speciation in 2010 for the Yangtze River Delta region, China [J]. Atmospheric Environment, 2013, **70**: 39-50.
- [8] Ohlström M O, Lehtinen K E J, Moisio M, *et al.* Fine-particle emissions of energy production in Finland [J]. Atmospheric Environment, 2000, **34**(22): 3701-3711.
- [9] 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.
- [10] Hildemann L M, Cass G R, Markowski G R. A dilution stack sampler for collection of organic aerosol emissions: design, characterization and field tests [J]. Aerosol Science and Technology, 1989, **10**(1): 193-204.
- [11] 刘红丽,张伟,李昌禧. 室内可吸入颗粒物浓度与粒径分布检测方法的研究 [J]. 仪器仪表学报, 2009, **30**(2): 340-344.
- [12] Mora C F, Kwan A K H, Chan H C. Particle size distribution analysis of coarse aggregate using digital image processing [J]. Cement and Concrete Research, 1998, **28**(6): 921-932.
- [13] 岳勇,陈雷,姚强,等. 燃煤锅炉颗粒物粒径分布和痕量元素富集特性实验研究 [J]. 中国电机工程学报, 2005, **25**(18): 74-79.
- [14] 鲁晟,姚德飞. 燃煤电厂烟气中颗粒物粒径分布特征研究 [J]. 环境污染与防治, 2010, **32**(8): 62-65.
- [15] Ninomiya Y, Wang Q Y, Xu S Y, *et al.* Effect of additives on the reduction of $PM_{2.5}$ emissions during pulverized coal combustion [J]. Energy & Fuels, 2009, **23**(7): 3412-3417.

- [16] 楼晟荣. 中小燃煤锅炉 $PM_{2.5}$ 排放特征实测研究[J]. 环境科学学报, 2014, **34**(12): 3119-3125.
- [17] DB 11/139-2015, 锅炉大气污染物排放标准[S].
- [18] DB 11/847-2011, 固定式燃气轮机大气污染物排放标准[S].
- [19] Meij R, Te Winkel B. The emissions and environmental impact of PM_{10} and trace elements from a modern coal-fired power plant equipped with ESP and wet FGD [J]. Fuel Processing Technology, 2004, **85**(6-7): 641-656.
- [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.
- [21] 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.
- [22] 裴冰. 燃煤电厂可凝结颗粒物的测试与排放[J]. 环境科学, 2015, **36**(5): 1544-1549.
- [23] 王铮, 薛建明, 许月阳, 等. 燃煤电厂 $PM_{2.5}$ 超细颗粒物排放测试方法研究[J]. 环境工程技术学报, 2013, **3**(2): 133-137.
- [24] 史燕红, 吴华成, 周卫青, 等. 燃煤电厂烟气 $PM_{2.5}$ 常见采样方法的存在问题分析[J]. 华北电力技术, 2015, (3): 43-47.
- [25] 李兴华, 曹阳, 蒋靖坤, 等. 固定源 $PM_{2.5}$ 稀释采样器的研制[J]. 环境科学学报, 2015, **35**(10): 3309-3315.
- [26] 刘小伟, 姚洪, 乔瑜, 等. 燃煤电站锅炉颗粒物排放特征的实验研究[J]. 工程热物理学报, 2008, **29**(6): 1055-1058.
- [27] 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.
- [28] 刘双喜, 秦孔建, 阮旭, 等. 利用 ELPI 测量柴油机颗粒粒子分布的试验研究[A]. 见: 中国汽车工程学会燃料与润滑油分会, 第 13 届年会论文集[C]. 芜湖: 中国汽车工程学会, 2008. 252-256.
- [29] 李孟良, 王计广, 徐月云, 等. 机动车 $PM_{2.5}$ 排放因子研究[R]. 北京: 北京市环境保护局, 2012. 5-7.
- [30] 张学敏, 张永亮, 姚宗路, 等. 不同进料方式燃烧器对生物质燃料颗粒物排放特征的影响[J]. 农业工程学报, 2014, **30**(12): 200-207.
- [31] 贺克斌, 杨复沫, 段凤魁, 等. 大气颗粒物与区域复合污染[M]. 北京: 科学出版社, 2011. 72-85.
- [32] 易红宏, 郝吉明, 段雷, 等. 电厂除尘设施对 PM_{10} 排放特征的影响研究[J]. 环境科学, 2006, **27**(10): 1921-1927.
- [33] Zhao Y, Wang S X, Nielsen C P, *et al.* Establishment of a database of emission factors for atmospheric pollutants from Chinese coal-fired power plants[J]. Atmospheric Environment, 2010, **44**(12): 1515-1523.
- [34] Yi H H, Guo X M, Hao J M, *et al.* Characteristics of inhalable particulate matter concentration and size distribution from power plants in China[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2006, **56**(9): 1243-1251.
- [35] 周科, 聂剑平, 张广才, 等. 湿法烟气脱硫燃煤锅炉烟气颗粒物的排放特性研究[J]. 热力发电, 2013, **42**(8): 81-85, 89.
- [36] 孙在, 谢小芳, 杨文俊, 等. 煤燃烧超细颗粒物的粒径分布及数浓度排放特征试验[J]. 环境科学学报, 2014, **34**(12): 3126-3132.
- [37] 张松松, 路义萍, 杜谦, 等. 工业锅炉 $PM_{2.5}$ 产排特性试验研究[J]. 环境科学学报, 2014, **34**(4): 843-848.

CONTENTS

Exploring the Severe Haze in Beijing During December, 2015: Pollution Process and Emissions Variation	XUE Yi-feng, ZHOU Zhen, NIE Teng, <i>et al.</i> (1593)
Pollution Characteristics and Source of HULIS in the Fine Particle During the Beijing APEC	ZHOU Xue-ming, QI Xue-jiao, XIANG Ping, <i>et al.</i> (1602)
Seasonal Variation Characteristics and Potential Source Contribution of Sulfate, Nitrate and Ammonium in Beijing by Using Single Particle Aerosol Mass Spectrometry	LIU Lang, ZHANG Wen-jie, DU Shi-yong, <i>et al.</i> (1609)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} in Lanzhou City	WANG Xin, NIE Yan, CHEN Hong, <i>et al.</i> (1619)
Pollution Level and Source Apportionment of Atmospheric Particles PM _{2.5} in Southwest Suburb of Chengdu in Spring	LIN Yu, YE Zhi-xiang, YANG Huai-jin, <i>et al.</i> (1629)
Variation Characteristics of Total Gaseous Mercury at Simian Mountain Background Station in Mid-subtropical Region	LIU Wei-ming, MA Ming, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (1639)
Establishment of Method for Health Risk Assessment of Pollutants from Fixed Sources	CHEN Qiang, WU Huan-bo (1646)
Testing of Concentration and Characteristics of Particulate Matters Emitted from Stationary Combustion Sources in Beijing	HU Yue-qi, WU Xiao-dong, WANG Chen, <i>et al.</i> (1653)
Pollution Evaluation and Risk Assessment of Heavy Metals from Atmospheric Deposition in the Parks of Nanjing	WANG Cheng, QIAN Xin, LI Hui-ming, <i>et al.</i> (1662)
CoCuMnO ₂ Photocatalyzed Oxidation of Multi-component VOCs and Kinetic Analysis	MENG Hai-long, BO Long-li, LIU Jia-dong, <i>et al.</i> (1670)
Distribution of Nitrogen and Phosphorus in the Tidal Reach and Estuary of the Daliao River and Analysis of Potential Eutrophication	ZHANG Lei, CAO Wei, MA Ying-qun, <i>et al.</i> (1677)
Spatial Distribution of Stable Isotope from the Lakes in Typical Temperate Glacier Region	SHI Xiao-yi, PU Tao, HE Yuan-qing, <i>et al.</i> (1685)
$\delta^{15}\text{N-NO}_3^-$ and $\delta^{18}\text{O-NO}_3^-$ Tracing of Nitrate Sources in Beijing Urban Rivers	ZHAO Qing-liang, MA Hui-ya, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (1692)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Nitrate Pollution in Shallow Groundwater of Liujiang Basin	WANG He, GU Hong-biao, CHI Bao-ming, <i>et al.</i> (1699)
Nitrogen Losses Under the Action of Different Land Use Types of Small Catchment in Three Gorges Region	CHEN Cheng-long, GAO Ming, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (1707)
Interception Effect of Ecological Ditch on Nitrogen Transport in Agricultural Runoff in Subtropical China	WANG Di, LI Hong-fang, LIU Feng, <i>et al.</i> (1717)
Biodegradation Coefficients of Typical Pollutants in the Plain Rivers Network	FENG Shuai, LI Xu-yong, DENG Jian-cai (1724)
Influence of Submerged Plants on Microbial Community Structure in Sediment of Hongze Lake	ZHANG Ding-yu, ZHANG Ting-xi, DONG Dan-ping, <i>et al.</i> (1734)
Community Structure Characteristics of Diatom in Reservoirs Located in the South of Jiangsu Province, China and Its Control Factors	REN Jie, ZHOU Tao, ZHU Guang-wei, <i>et al.</i> (1742)
Contamination and Ecological Risk Assessment of Mercury in Hengshuihu Wetland, Hebei Province	WANG Nai-shan, ZHANG Man-yin, CUI Li-juan, <i>et al.</i> (1754)
Spatial Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soils and Sediments in Shunde Waterway, Southern China	CAI Yi-min, CHEN Wei-ping, PENG Chi, <i>et al.</i> (1763)
Pollution Characteristics and Ecological Risk of PBDEs in Water and Sediment from an Electronic Waste Dismantling Area in Taizhou	CHEN Xiang-ping, PENG Bao-qi, LÜ Su-ping, <i>et al.</i> (1771)
Major Ionic Features and Their Controlling Factors in the Upper-Middle Reaches of Wujiang River	HUANG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, <i>et al.</i> (1779)
Export of Total Organic Carbon (TOC) from Karst Watershed and Its Influencing Factors; An Example from Xueyudong Underground River System, Chongqing	WANG Qiao-lian, JIANG Yong-jun, CHEN Yu (1788)
Seasonal Variations and Controlling Factors of the Element Contents in Drip Waters Collected from the Baojingong Cave in Guangdong Province	HUANG Jia-yi, CHEN Lin, CHEN Qiong, <i>et al.</i> (1798)
Tracing the Fecal Contamination Sources Based on <i>Bacteroides</i> 16S rRNA PCR-DGGE in Karst Groundwater; Taking Laolongdong Underground River System, Nanshan, Chongqing as an Example	ZHANG Hong, JIANG Yong-jun, ZHANG Yuan-zhu, <i>et al.</i> (1805)
Sources and Variation Characteristics of Dissolved Lipid Biomarkers in a Typical Karst Underground River	LIANG Zuo-bing, SUN Yu-chuan, LI Jian-hong, <i>et al.</i> (1814)
Formation of Halogenated By-products in Co ²⁺ Activated Peroxymonosulfate Oxidation Process	LIU Kuo, JIN Hao, DONG Wei, <i>et al.</i> (1823)
Aspartic Acid Generated in the Process of Chlorination Disinfection By-product Dichloroacetonitrile	DING Chun-sheng, LI Nai-jun, ZHANG Tao, <i>et al.</i> (1831)
Influencing Factors of Assimilable Organic Carbon (AOC) Formation in Drinking Water During Ozonation Process	DONG Bing-zhi, ZHANG Jia-li, HE Chang (1837)
Wastewater Quantity and Quality Fluctuation Characteristics of Typical Area of Hybrid Sewage System	CHENG Xun, ZHANG Ming-kai, LIU Yan-chen, <i>et al.</i> (1845)
Preparation of HDTMA-modified Zeolite and Its Performance in Nitro-phenol Adsorption from Wastewaters	GUO Jun-yuan, WANG Bin (1852)
Selection of Suitable Microalgal Species for Sorption of Uranium in Radioactive Wastewater Treatment	LI Xin, HU Hong-ying, YU Jun-yi, <i>et al.</i> (1858)
Magnetic Fe ₃ O ₄ Microparticles Conditioning-Pressure Electro-osmotic Dewatering (MPEOD) of Sewage Sludge	QIAN Xu, WANG Yi-li, ZHAO Li (1864)
Stability of Short-cut Nitrification Nitrogen Removal in Digested Piggery Wastewater with an Intermittently Aerated Sequencing Batch Reactor	SONG Xiao-yan, LIU Rui, SHUI Yong, <i>et al.</i> (1873)
Effect of Irrigation Patterns on Soil CO ₂ and N ₂ O Emissions from Winter Wheat Field in North China Plain	GUO Shu-fang, QI Yu-chun, YIN Fei-hu, <i>et al.</i> (1880)
Characteristics of Dissolved CH ₄ and N ₂ O Concentrations of Weihe River in Xinxiang Section in Spring	HOU Cui-cui, ZHANG Fang, LI Ying-chen, <i>et al.</i> (1891)
Effect of Stimulated N Deposition on N ₂ O Emission from a <i>Stipa krylovii</i> Steppe in Inner Mongolia, China	YANG Han-yue, ZHANG Ting, HUANG Yong-mei, <i>et al.</i> (1900)
Response of Soil Respiration and Organic Carbon to Returning of Different Agricultural Straws and Its Mechanism	CAO Zhan-bo, WANG Lei, LI Fan, <i>et al.</i> (1908)
Spatial Variability and Distribution Pattern of Soil Organic Matter in a Mollisol Watershed of China	GAO Feng-jie, MA Quan-lai, HAN Wen-wen, <i>et al.</i> (1915)
Effects of Tillage on Distribution of Heavy Metals and Organic Matter Within Purple Paddy Soil Aggregates	SHI Qiong-bin, ZHAO Xiu-lan, CHANG Tong-ju, <i>et al.</i> (1923)
Distribution Characteristics and Potential Ecological Hazards Assessment of Soil Heavy Metals in Typical Soil Profiles in Southeast Suburb of Beijing	ZHAO Qian, MA Lin, LIU Yi-fei, <i>et al.</i> (1931)
Contamination Assessment and Sources Analysis of Soil Heavy Metals in Opencast Mine of East Junggar Basin in Xinjiang	LIU Wei, YANG Jian-jun, WANG Jun, <i>et al.</i> (1938)
Effect of Nano-TiO ₂ on Release and Speciation Changes of Heavy Metals in Soil	ZHANG Jin-yang, WANG Ding-yong, LIANG Li, <i>et al.</i> (1946)
Reduction Kinetics of Cr(VI) in Chromium Contaminated Soil by Nanoscale Zerovalent Iron-copper Bimetallic	MA Shao-yun, ZHU Fang, SHANG Zhi-feng (1953)
Inhibition of Low Molecular Organic Acids on the Activity of <i>Acidithiobacillus</i> Species and Its Effect on the Removal of Heavy Metals from Contaminated Soil	SONG Yong-wei, WANG He-ru, CAO Yan-xiao, <i>et al.</i> (1960)
Contribution of Particle Size and Surface Coating of Silver Nanoparticles to Its Toxicity in Marine Diatom <i>Skeletonema costatum</i>	HUANG Jun, YI Jun, QIANG Li-yuan, <i>et al.</i> (1968)
Rhizospheric Mechanisms of <i>Hemerocallis middendorffii</i> Trautv. et Mey. Remediating Petroleum-contaminated Soil and Metabonomic Analyses of the Root Systems	WANG Ya-nan, CHENG Li-juan, ZHOU Qi-xing (1978)
Effects of Thermophilic Composting on Antibiotic Resistance Genes (ARGs) of Swine Manure Source	ZHENG Ning-guo, HUANG Nan, WANG Wei-wei, <i>et al.</i> (1986)
Interaction Between Sulfonamide Antibiotics Fates and Chicken Manure Composting	LIN Hui, WANG Jian-mei, SUN Wan-chun, <i>et al.</i> (1993)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年5月15日 第37卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 5 May 15, 2016

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

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国 内 定 价: 120.00 元

国外发行代号: M 205

国 内 外 公 开 发 行