

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.1
第41卷 第1期

目次

近20年来中国PM_{2.5}污染演变的时空过程 时燕, 刘瑞梅, 罗毅, 杨昆 (1)

2007~2016年上海颗粒物浓度特征与气候背景异同分析 郑庆锋, 史军, 谈建国, 段玉森, 林燕芬, 徐卫忠 (14)

夏季大气PM_{2.5}中元素特征及源解析:以华中地区平顶山-随州-武汉为例 刘威杰, 石明明, 程敏, 黎荧, 朱戈昊, 邢新丽, 孔少飞, 张家泉, 祁士华 (23)

呼包鄂地区冬季、夏季PM_{2.5}污染特征 李伊明, 刘佳媛, 史国良, 皇甫延琦, 张昕, 杨奕, 冯银厂 (31)

2019年元旦前后石家庄市重污染过程PM_{2.5}污染特征及来源解析 周静博, 段菁春, 王建国, 杨鹏, 刘煥武, 李梅, 靳伟 (39)

基于模型模拟的成都市PM_{2.5}污染来源解析 许艳玲, 易爱华, 薛文博 (50)

北京市PM_{2.5}中砷污染特征 石绍萱, 杨艳蓉, 秦娟娟, 周雪明, 段菁春, 谭吉华, 陈荣志 (57)

夏秋季宁波市气态元素汞(GEM)污染特征及潜在源区贡献分析 易辉, 林佳梅, 蔡秋亮, 王克强, 陈进生, 佟磊, 李建荣, 肖航 (65)

安阳市大气PM_{2.5}中水溶性离子季节特征及来源解析 孙有昌, 姜楠, 王申博, 段时光, 张瑞芹 (75)

新乡市夏冬季节PM_{2.5}稳定碳同位素特征分析 闫广轩, 宋鑫, 张靖雯, 张朴真, 王力鹏, 张佳羽, 杨争, 曹治国, 樊静, 王跃思, 刘子锐 (82)

基于颗粒物化学组分粒径分布特征的源解析方法构建与评估 梁永莉, 田瑛泽, 刘童, 冯银厂 (90)

超低排放改造后燃煤电厂细颗粒物排放特征 王润芳, 马大卫, 姜少毅, 朱仁斌, 何军, 张本耀 (98)

京津冀地区城市臭氧污染趋势及原因探讨 余益军, 孟晓艳, 王振, 周崑, 于红霞 (106)

安阳市近地面臭氧污染特征及气象影响因素分析 杨健, 尹沙沙, 于世杰, 王丽娟, 张瑞芹, 郝建尤, 苏方成, 齐艳杰 (115)

长江三角洲2017年机动车IVOCs排放清单构建及其对SOA的生成影响 王倩, 黄凌, 王杨君, 殷司佳, 张琪, 易鑫, 李莉 (125)

华东典型城市非道路移动机械排气烟度 鲁君, 胡馨遥, 杨强, 唐伟, 夏阳, 井宝莉, 陈昫, 黄成 (133)

国内外储油库VOCs排放现状与标准分析 胡玮, 任碧琪, 黄玉虎, 秦建平, 卞吉玮, 吴清柱 (139)

四乙基愈创木酚液相·OH氧化SOA产率及特征分析:初始浓度的影响 庄雨, 陈彦彤, 李旭东, 马帅帅, 赵竹子, 叶招莲, 盖鑫磊 (146)

乌鞘岭南、北坡降水稳定同位素特征及水汽来源对比 徐秀婷, 贾文雄, 朱国锋, 马兴刚, 张昱, 袁瑞丰, 张志远, 石阳 (155)

长江源多年冻土区地下水氢氧稳定同位素特征及其影响因素 汪少勇, 何晓波, 丁永建, 常福宣, 吴锦奎, 胡召富, 王利辉, 杨贵森, 邓明珊 (166)

巴尔喀什湖流域水化学和同位素空间分布及环境特征 沈贝贝, 吴敬禄, 吉力力·阿不都外力, A. S. Saparov, Gulnura Isanova (173)

城市湖泊水环境整治对改善水质的影响:以蠡湖近30年水质变化为例 田伟, 杨周生, 邵克强, 潘辉, 胡洋, 白承荣, 姜星宇, 高光, 汤祥明 (183)

典型药物及个人护理品在黄东海海域水体中的检测、分布规律及其风险评估 陈贤, 张彩杰, 杨桂朋, 张婧, 刘梦 (194)

长江南京段水源水中有机磷酸酯的污染特征与风险评估 李栋, 张圣虎, 张芹, 王博, 卜元卿, 赵欣, 李辉, 宋宁慧, 郭瑞昕 (205)

雄安新区-白洋淀冬季冰封期水体溶解性有机物的空间分布、光谱特征及来源解析 周石磊, 孙悦, 张艺冉, 蒋永丰, 尹璐, 黄廷林, 李再兴, 罗晓, 战江, 王函 (213)

白洋淀表层沉积物元素的空间特征、风险评价及来源分析 汪敬忠, 刘卓, 魏浩, 吴玉会, 占水娥, 朱迟, 张益森 (224)

松花江表层沉积物PAEs分布特征及生态风险评估 王欢, 杨永哲, 王海燕, 董伟羊, 闫国凯, 常洋, 李泽文, 赵远哲, 凌宇 (232)

鄱阳湖湖口-长江段沉积物中微塑料与重金属污染物的赋存关系 李文华, 简敏菲, 刘淑丽, 江玉梅, 邓艳彬, 朱琳 (242)

臭氧对生物活性炭中微生物及出水消毒副产物的影响 刘宝明, 王夕希, 张晓夏, 顾艳芳, 李雨平, 阮文权, 缪恒峰, 潘杨 (253)

兰州市西固区儿童饮用水重金属暴露及健康风险精细化评估 陈月芳, 孙善伟, 段小丽, 许锦荣, 王娟, 康艺瑾, 梁为纲, 曹素珍 (262)

镁铁层状双金属氢氧化物对磷酸盐的吸附作用及对内源磷释放的控制效果及机制 吴俊麟, 林建伟, 詹艳慧, 程永前, 柏晓云, 辛慧敏, 常明玥 (273)

一硫代磷酸盐在介质上的吸附特征及机制 廖丹雪, 单慧媚, 彭三曦, 潘敖然, 黄健, 陈辉, 赵超然 (284)

酸碱复合改性海泡石亚结构特征及其对Cd(II)吸附性能 谢厦, 徐应明, 闫翠侠, 罗文文, 孙约兵 (293)

脱氮菌剂在低溶解氧黑臭水体中氮代谢特征 赵志瑞, 刘硕, 李铎, 李海萍, 李方红, 张佳瑶, 白志辉 (304)

宏基因组方法分析医药化工废水厂中抗生素耐药菌及抗性基因 陈红玲, 张兴桃, 王晴, 姚沛琳 (313)

淀粉废水处理系统中活性污泥的微生物群落结构及多样性分析 赵婷婷, 乔凯, 王蕾, 张伟, 竺建荣, 唐一, 胡滨, 王香莲, 杨静, 景在涛 (321)

基于SBR-ABR实现PN-SAD耦合工艺的运行与优化调控 陈重军, 张敏, 姜滢, 郭萌蕾, 谢嘉玮, 谢军祥, 沈耀良 (330)

基于间歇饥饿的SNAD工艺运行 李冬, 刘志诚, 徐贵达, 王玉颖, 张杰 (337)

反硝化-高效部分亚硝化-厌氧氨氧化工艺处理老龄垃圾渗滤液 陈小珍, 汪晓军, Karasuta Chayangkun, 周松伟, 钟中, 陈振国, 陈晓坤 (345)

硝化微颗粒污泥快速培养及其亚硝化功能快速实现 刘文如, 宋家俊, 王建芳, 沈耀良 (353)

高频曝停下曝时间对亚硝化颗粒污泥性能的影响 张杰, 劳会妹, 李冬, 魏子清 (360)

中国东北沈抚地区土壤中PBDEs的残留、来源及风险评估 向鑫鑫, 鲁垠涛, 阮起扬, 赖德, 孙绍斌, 姚宏, 张战胜 (368)

某焦化场地非均质包气带中多环芳烃(PAHs)来源及垂向分布特征 孟祥帅, 吴萌萌, 陈鸿汉, 岳希, 陶抒远 (377)

北京蔬菜地土壤中抗生素抗性基因与可移动元件的分布特征 张汝凤, 宋渊, 高浩泽, 程首涛, 孙艳梅, 王旭明 (385)

长期施肥和耕作下紫色土坡耕地土壤C、N、P和K化学计量特征 杜映妮, 李天阳, 何丙辉, 贺小容, 付适 (394)

亚热带稻田土壤碳氮磷生态化学计量学特征 宋佳龄, 盛浩, 周萍, 段良霞, 周清, 张杨珠 (403)

宛山荡农田土壤氮迁移过程反硝化与厌氧氨氧化 陈志浩, 覃云斌, 丁帮璟, 胡伏优, 陈伟, 李正魁 (412)

秸秆炭还田对滴灌棉田土壤微生物代谢功能及细菌群落组成的影响 王晶, 马丽娟, 刘泽华, 闵伟, 侯振安 (420)

基于PMF模型的九龙江流域农田土壤重金属来源解析 黄华斌, 林承奇, 胡恭任, 于瑞莲, 郝春莉, 陈枫桦 (430)

塔里木盆地东南缘绿洲区土壤砷空间分布及农作物砷富集特征 陈云飞, 周金龙, 曾妍妍, 王松涛, 杜江岩, 孙英, 顾思博 (438)

广西典型碳酸盐岩区农田土壤-作物系统重金属生物有效性及迁移富集特征 马宏宏, 彭敏, 刘飞, 郭飞, 唐世琪, 刘秀金, 周亚龙, 杨柯, 李括, 杨峥, 成杭新 (449)

不同钝化剂对微碱性土壤镉、镍形态及小麦吸收的影响 张静静, 朱爽阁, 朱利楠, 柳海涛, 杨金康, 化党领 (460)

不同钝化剂对鸡粪堆肥重金属钝化效果及其腐熟度指标的影响 栾润宇, 高珊, 徐应明, 纪文凝, 闫翠侠, 孙约兵 (469)

黄土丘陵区退耕草地土壤呼吸及其组分对氮磷添加的响应 周俊杰, 陈志飞, 杨全, 赖帅彬, 王智, 徐炳成 (479)

炉渣与生物炭施加对福州平原水稻田温室气体排放的后续影响 蓝兴福, 王晓彤, 周雅心, 金强, 许旭萍, 王维奇 (489)

《环境科学》征订启事(89) 《环境科学》征稿简则(97) 信息(303, 329, 344)

超低排放改造后燃煤电厂细颗粒物排放特征

王润芳¹, 马大卫², 姜少毅¹, 朱仁斌^{1*}, 何军², 张本耀²

(1. 中国科学技术大学极地环境与全球变化安徽省重点实验室, 合肥 230026; 2. 国网安徽省电力有限公司电力科学研究院, 合肥 230601)

摘要: 超低排放改造后, 燃煤电厂细颗粒物排放特征发生了变化, 为定量评估颗粒物中各组分的排放特征及环保设备对细颗粒物的影响, 选取了3台超低排放机组为研究对象, 利用DGI分级撞击采样器对湿法烟气脱硫装置(WFGD)、湿式静电除尘器(WESP)进、出口颗粒物取样并用多种指标分析研究. 结果表明, 3台机组出口处排放的PM₁、PM_{2.5}和PM₁₀质量浓度范围分别为0.25~0.38、0.31~0.42和0.42~0.57 mg·m⁻³, 两种改造工艺下排放的PM₁₀质量浓度相当, 但是颗粒物粒径分布和成分组成存在差异, 相比FP1和FP2机组, FP3机组PM_{2.5}/PM₁₀比值最高, 可能原因是FP3机组安装了WESP, 对粒径2.5 μm以上的颗粒有更好地脱除效果. FP2和FP3机组排放的PM_{2.5}中水溶性离子总浓度分别为0.20 mg·m⁻³和0.06 mg·m⁻³, FP2机组排放水溶性离子以Ca²⁺和SO₄²⁻为主, FP3机组以NH₄⁺和SO₄²⁻为主. FP2机组WFGD进出口颗粒物分析结果显示, WFGD过程会通过夹带含石灰石、石膏的脱硫浆液增加水溶性离子排放. 在WFGD后加WESP能有效去除PM_{2.5}、PM₁₀颗粒物, 降低水溶性离子对大气环境的影响.

关键词: 燃煤电厂; 超低排放; 湿式电除尘; 细颗粒物; 水溶性离子; 微形貌分析

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)01-0098-08 DOI: 10.13227/j.hjkx.201904162

Fine Particulate Emission Characteristics of an Ultra-Low Emission Coal-Fired Power Plant

WANG Run-fang¹, MA Da-wei², JIANG Shao-yi¹, ZHU Ren-bin^{1*}, HE Jun², ZHANG Ben-yao²

(1. Anhui Province Key Laboratory of Polar Environment and Global Change, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China; 2. State Grid Anhui Electric Power Corporation Research Institute, Hefei 230601, China)

Abstract: Since the introduction of ultra-low emissions, the characteristics of particulate matter (PM) emissions from coal-fired power plants have changed. We quantitatively evaluate the emission characteristics of each component in PM and the impact of purification equipment by analyzing three ultra-low emission units of coal-fired power plants (FP1, FP2, and FP3). A DGI was used to sample particles from the wet flue gas desulfurization (WFGD) unit and wet electrostatic precipitator (WESP) inlet and outlet, which were then analyzed by various methods. The results showed that the mass concentrations of PM₁, PM_{2.5}, and PM₁₀ discharged from the outlets of the three units were 0.25-0.38, 0.31-0.42, and 0.42-0.57 mg·m⁻³, respectively, and that the mass concentration of PM₁₀ discharged under the two kinds of units was equivalent. However, there were differences in the particle size distribution and composition of the particles. In comparison to the FP1 and FP2 units, the PM_{2.5}/PM₁₀ ratio of the FP3 unit was the highest. A possible reason for this is that the unit was equipped with a WESP, which can better remove particle sizes of 2.5 μm or more. The total concentrations of water-soluble ions in PM_{2.5} discharged from the FP2 and FP3 units were 0.20 and 0.06 mg·m⁻³, respectively. The water-soluble ions emitted from the FP2 unit were mainly Ca²⁺ and SO₄²⁻, whereas those mainly emitted from the FP3 unit were NH₄⁺ and SO₄²⁻. Analysis of the PM from the WFGD import and export of the FP2 unit showed that the WFGD process increased the water-soluble ion discharge by entraining the desulfurization slurry containing limestone and gypsum. Addition of a WESP after WFGD can effectively remove PM_{2.5} and PM₁₀ particles and reduce the influence of water-soluble ions on the atmospheric environment.

Key words: coal-fired power plant; ultra-low emissions; wet electrostatic precipitators; fine particulate matter; water-soluble ions; micromorphology analysis

近年来, 我国经济蓬勃发展, 随着生活水平的提高, 公众对大气污染改善的需求也日益增长^[1]. PM_{2.5}是目前我国主要的大气污染物, 其主要来源是工业生产的一次排放以及气态污染物的二次转化^[2]. 中国是能源消费大国, 在能源消费构成中煤炭占比高达61.8%, 而接近50%的煤炭用于火力发电^[3], 燃煤电厂是大量初级PM和二次PM前体(SO₂和NO_x)的重要来源之一^[4,5], 因此燃煤电厂的污染物排放治理尤为关键. 国家环保部于2011年7月发布了《火电厂大气污染物排放标准》(GB

13223-2011), 对燃煤锅炉的烟尘、二氧化硫和氮氧化物的质量浓度排放上限定为30、100和100 mg·m⁻³^[6]. 为了达到污染物排放的标准, 绝大多数燃煤电厂进行了烟气脱硫、脱硝和除尘的改造. 随着日益严峻的环保要求, 2014年9月国家发改委出

收稿日期: 2019-04-17; 修订日期: 2019-08-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(41576181, 41776190); 国家电网有限公司管理咨询项目(81120018002)

作者简介: 王润芳(1994~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为燃煤电厂大气污染及环境影响评价, E-mail: wrf2017@mail.ustc.edu.cn

* 通信作者, E-mail: zhurb@ustc.edu.cn

台了《煤电节能减排升级与改造行动计划(2014-2020年)》,称为“超低排放改造”,进一步将烟尘、二氧化硫和氮氧化物排放的质量浓度降低为10、35和 $50 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ [7]。超低排放改造的关键在于烟尘的达标排放,技术路线主要分为两种[8]:第一种基于烟气末端治理理念,技术路线主要包括选择性催化还原装置(SCR)、干式静电除尘器(ESP)、湿法烟气脱硫装置(WFGD)和湿式静电除尘器(WESP),该技术路线主要特点是采用了WESP,保证烟尘达标排放;第二种基于污染物协同控制理念,技术路线主要包括SCR、低温电除尘器,协同除尘脱硫塔,该技术路线主要通过改造脱硫塔内部结构和增加高效除雾装置提高脱硫塔的协同除尘能力,达到烟尘达标排放的目的。

在实施超低排放改造后,国内大部分电厂实现了烟尘排放质量浓度的显著降低,一定程度上改善了空气质量[9]。国内外学者对超低排放改造后烟气处理设备的颗粒物脱除性能已开展了大量研究。阮仁晖等[10]监测了京津冀某660 MW超低排放发电机组SCR、ESP、WFGD和WESP进出口的颗粒物质量浓度,结果表明SCR和WFGD会增加 PM_{10} 的排放,WESP对 PM_{10} 、 $\text{PM}_{1 \sim 2.5}$ 和 $\text{PM}_{2.5 \sim 10}$ 均有较高地脱除效率。马子轸等[2]研究了燃煤电厂产生和排放的 $\text{PM}_{2.5}$ 中水溶性离子的特征,发现煤粉炉和循环流化床产生的 $\text{PM}_{2.5}$ 中水溶性离子以 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 为主,但是循环流化床排放的水溶性离子浓度大大低于煤粉炉。张成等[11]对重庆市4个燃煤电厂汞排放特征及排放量进行了研究,结果表明4个电厂的汞脱除率为72.89%~96.05%,大气汞年排放量为2.24~156.65 kg。Córdoba[12]研究了WFGD过程中发生的主要物理化学过程,发现从SCR中逃逸的过量的 NH_3 部分被FGD中的石膏浆料吸收,石膏浆料通过附着在颗粒物上被排放进入大气,从而增加初级 $\text{PM}_{2.5}$ 排放并同时改变颗粒物的粒度分布和化学性质。

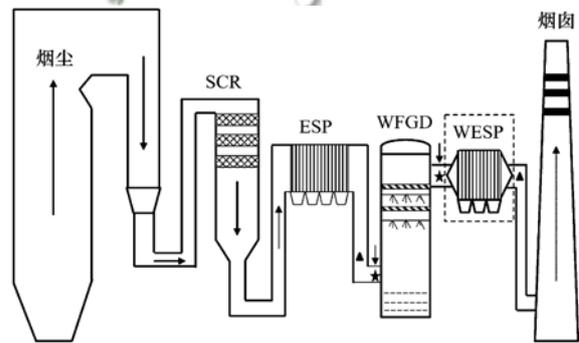
综上所述,目前国内的研究主要是针对不同设备对颗粒物的脱除效率或单一污染元素的研究,少有对不同类型机组细颗粒物中各组分的定量研究及重点讨论不同环保设备对其影响。本文通过DGI颗粒物分级采集装置,分析了安徽省3个满足超低排放改造要求的燃煤电厂PM浓度和尺寸分布的特

征,利用离子色谱仪、扫描电镜和X射线能谱分析仪器测试了不同粒径PM的化学组成,定量评估了两种改造工艺下机组排放的颗粒物中各组分的排放特征,同时评价了不同环保设备对颗粒物的影响,以期为超低排放技术的进一步优化提供帮助,以及后期大气污染控制技术的开发与政策的制订提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究对象

选取安徽省3台超超临界燃煤发电机组(FP1、FP2和FP3)作为研究对象,FP1为1000MW机组,FP2为660MW机组,FP3为1000MW机组。FP1和FP2为超低排放改造机组,烟气净化设备主要包括SCR(3层催化剂)、ESP(分别为双室5电场和双室4电场)和高效脱硫除尘一体化WFGD(1层合金托盘,6层喷淋层,2层屋脊式+1层管式除雾器),FP3为新建同步实现超低排放机组,主要包括SCR(3层催化剂)、ESP(双室4电场)、高效WFGD(配置6层喷淋层,2层屋脊式+1层管式除雾器)和WESP(双室1电场)。采样期间,3台机组均 $\geq 75\%$ 负荷运行,采样点位置如图1所示,FP1、FP2机组在WFGD进、出口处采样,FP3机组在WFGD进口和WESP出口处采集样品(WFGD和WESP之间无取样孔),在各采样点采取3个平行样。



五角星为FP1机组采样点,箭头为FP2机组采样点,

三角形为FP3机组采样点

图1 采样点位置示意

Fig. 1 Sampling sites

3台机组的燃煤均来自淮南、淮北地区煤炭,脱硫入口处灰分分析如表1所示,采样期间机组的平均负荷以及在线监测的总排口 SO_2 和 NO_x 排放浓度和各设备进、出口的烟尘浓度如表2所列。

表1 燃煤灰分分析

Table 1 Ash analysis of coal

| 机组 | $\text{Na}_2\text{O}/\%$ | $\text{MgO}/\%$ | $\text{Al}_2\text{O}_3/\%$ | $\text{SiO}_2/\%$ | $\text{SO}_3/\%$ | $\text{K}_2\text{O}/\%$ | $\text{CaO}/\%$ | $\text{TiO}_2/\%$ | $\text{Fe}_2\text{O}_3/\%$ |
|-----|--------------------------|-----------------|----------------------------|-------------------|------------------|-------------------------|-----------------|-------------------|----------------------------|
| FP1 | 0.26 | 0.14 | 10.65 | 21.43 | 1.57 | 0.63 | 2.25 | 8.70 | 2.17 |
| FP2 | 0.09 | 0.29 | 18.76 | 22.77 | 0.36 | 0.46 | 5.37 | 1.25 | 3.56 |
| FP3 | 0.02 | 0.13 | 13.80 | 25.35 | 0.35 | 0.76 | 1.78 | 0.98 | 2.99 |

表 2 3 个燃煤机组各项参数

Table 2 Parameters of three coal-fired units

| 机组 | 机组负荷 /MW | 测试负荷 /MW | SO ₂ 排放浓度 /mg·m ⁻³ | NO _x 排放浓度 /mg·m ⁻³ | 烟尘浓度/mg·m ⁻³ | | |
|-----|-------------|-------------|---|---|-------------------------|---------|---------|
| | | | | | WFGD 进口 | WFGD 出口 | WESP 出口 |
| FP1 | 1 000 | 940 | 16.10 | 26.92 | 7.13 | 2.28 | / |
| FP2 | 660 | 502 | 12.54 | 17.18 | 10.51 | 2.45 | / |
| FP3 | 1 000 | 999 | 14.45 | 42.56 | 60.42 | / | 7.32 |

1.2 采样技术

采样仪器为非稀释法 DGI 颗粒物 PM₁₀ 分级撞击采样仪,依据等速取样原理选用相应尺寸的烟气采样头,烟气经过 PM₁₀ 旋风切割器去除空气动力学粒径大于 10 μm 的飞灰颗粒,随后进入 DGI 分级撞击采样装置,由于惯性原理依次以粒径大于 10 μm、2.5 ~ 10 μm、1 ~ 2.5 μm 和小于 1 μm 被分为 4 级,收集到采样器内部的聚碳酸酯膜上^[13]. 根据采样机组的在线监测数据确定采样时间,出口处 PM 的采样时间为 3 ~ 4 h,进口处采样时间为 5 ~ 30 min,采集后的聚碳酸酯膜存放在滤膜盒中带回实验室分析.

本次采样是非稀释法采样,由于脱硫装置出口处烟气温度一般低于 50℃ 且湿度较大,烟枪、切割器和撞击采样器均有加热保温装置,防止烟尘携带的水汽和酸雾冷凝^[14-16]. 因此,此次采样可收集烟气中的可过滤颗粒物,无法收集可凝结气态物质转化的颗粒物.

1.3 分析方法

采用称重法分析烟气中不同粒径颗粒物的浓度^[17],取样前后的聚碳酸酯膜均在恒温恒湿环境(温度 26℃,相对湿度 45%)干燥 48 h 以上,用高精度百万分之一天平(Sartorius M2P)获得采样前后膜片质量.用陶瓷剪刀剪取聚碳酸酯膜二分之一样品放于比色管中,用超纯水定容后放入超声波清洗仪中超声 30min,在超声波清洗仪中加入冰袋防止过热,超声后用 0.22 μm 混纤-水系过滤头过滤,得到待测样品溶液,用离子色谱仪(dionex ICS-2100)测量样品中阴离子(NO₃⁻、NO₂⁻、SO₄²⁻和 Cl⁻)和阳离子(NH₄⁺、K⁺、Na⁺、Ca²⁺和 Mg²⁺)浓度^[18,19]. 本实验所用到的聚碳酸酯膜本底的水溶性离子中 Na⁺、Cl⁻ 浓度略高,可能受高纯水的影响,其余均低于仪器检测限.利用扫描电镜和 X 射线能谱 SEM-EDX(GeminiSEM 500)分析样品颗粒的形貌特征和元素成分,聚碳酸酯膜本底的 X 射线能谱元素分析显示只 C 和 O 被检出.

2 结果与讨论

2.1 细颗粒物质量浓度分级测试分析

3 台机组排放的各粒径颗粒物质量浓度如图 2

所示. FP3 机组 WFGD 进口处的颗粒物质量浓度远大于 FP1 和 FP2 机组,但是 3 个机组出口处排放的颗粒物质量浓度相差不大,PM₁、PM_{2.5} 和 PM₁₀ 质量浓度范围分别为 0.25 ~ 0.38、0.31 ~ 0.42 和 0.42

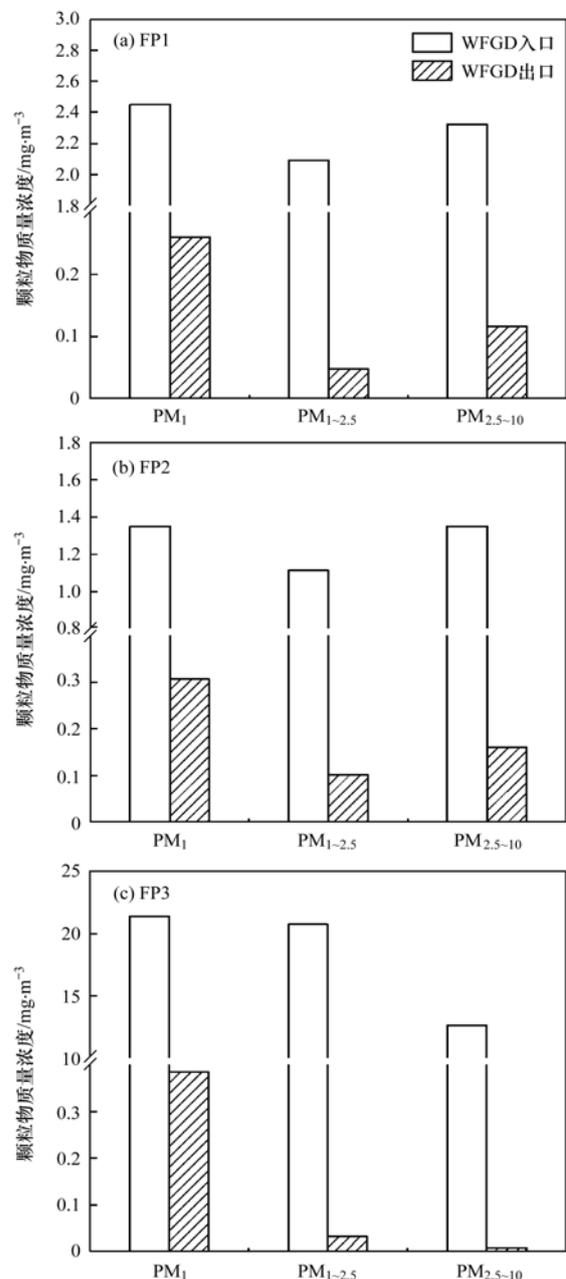


图 2 3 台机组 WFGD 入口和 WFGD/WESP 出口颗粒物质量浓度分布

Fig. 2 Particle number distribution at the WFGD inlet and the WFGD/WESP outlet of three units

$\sim 0.57 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 排放浓度均低于 $0.6 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 通过燃煤电站超低排放技术改造可显著降低细颗粒物排放水平^[20, 21]. FP1 和 FP2 机组 WFGD 均为超低排放改造后脱硫除尘一体化技术的吸收塔, 对 PM_{10} 的脱除效率分别达到 93.82% 和 85.09%. 由于 FP3 电厂 WFGD 出口处无测孔, 无法分析该机组的 WFGD 脱除效率. 对 3 个机组出口处的颗粒物粒径分级进行比较, 从图 2 还可以看出, FP1 和 FP2 机组出口处 PM_{10} 中各粒径颗粒物质量浓度从大到小依次是 $\text{PM}_1 > \text{PM}_{2.5-10} > \text{PM}_{1-2.5}$, FP3 机组出口处 PM_{10} 中各粒径颗粒物质量浓度从大到小依次是 $\text{PM}_1 > \text{PM}_{1-2.5} > \text{PM}_{2.5-10}$. 可以看出相比于 FP1 和 FP2 两个机组, FP3 机组 $\text{PM}_{2.5-10}$ 的占比显著降低, 说明经过 WFGD 及 WESP 能高效去除 $\text{PM}_{2.5-10}$ 的颗粒物^[21].

$\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度与 PM_{10} 质量浓度的比率 ($\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$) 通常用于评估不同技术路线对颗粒物去除效率的影响^[22]. 如图 3 所示, 3 个电厂出口处颗粒物中 $2.5 \mu\text{m}$ 以下特别是 $1 \mu\text{m}$ 以下颗粒物所占比均较大, 表明目前国内超低排放改造后的燃煤电厂最后排放进入大气中的 PM 主要是 $2.5 \mu\text{m}$ 以下的颗粒物, 当前环保设备可能对清除 $1 \mu\text{m}$ 以下颗粒物尚未有很好的办法. FP3 机组的 WESP 出口处的 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 比值最高, 达到 98.28%, 与其他研究中的结果相近^[23], 进一步表明 WESP 能有效去除 $\text{PM}_{2.5-10}$ 的颗粒, 对 $2.5 \mu\text{m}$ 以下颗粒物脱除效果差^[24, 25], 其原因可能是 PM_1 粒径段的颗粒物因荷

电困难, 只能通过扩散荷电的方式带电, 因此除尘效率不高.

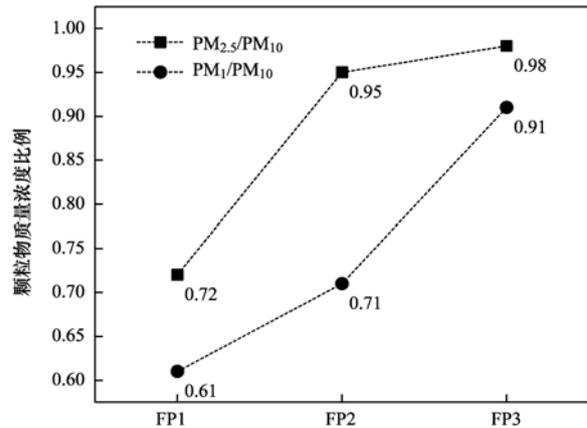
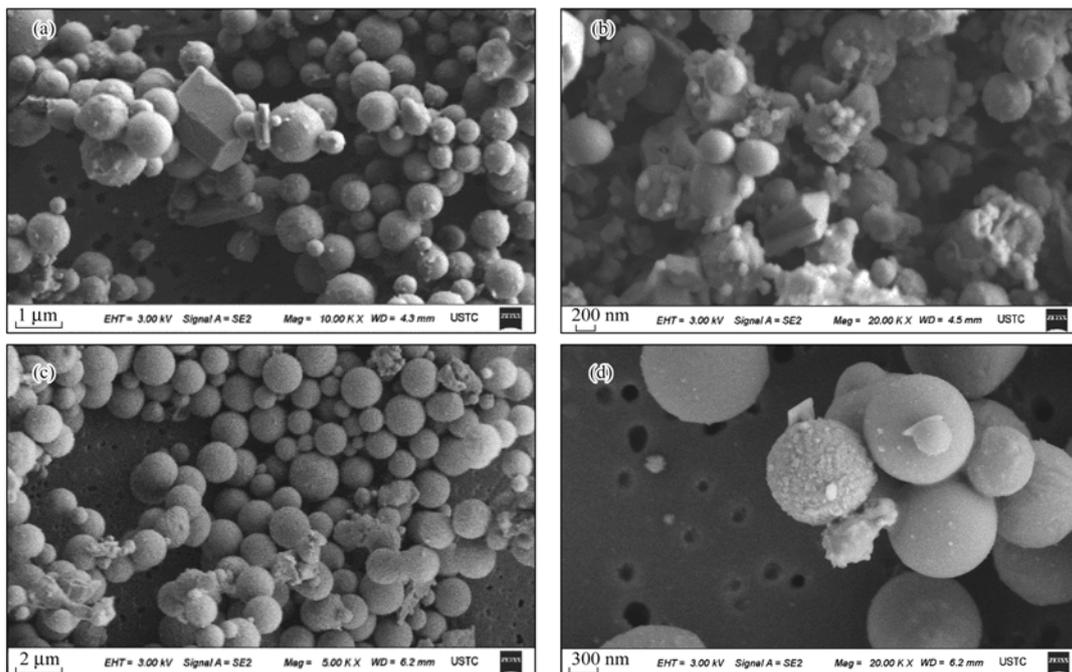


图 3 3 台机组出口处颗粒物质量浓度比值

Fig. 3 Concentration ratio of particulate matter at WFGD/WESP outlet of three units

2.2 颗粒物 SEM-EDX 分析

对 FP2、FP3 机组 WFGD 进口和 WFGD/WESP 出口处 PM 样品进行了 SEM-EDX 分析, 通过其形态改变及元素变化进一步分析 WFGD 和 WESP 对颗粒物排放特征的影响. 如图 4(a) 和 4(b) 所示, FP2 机组 WFGD 入口处的样品呈规则的球形, 很多细小的颗粒聚集成球状或附着在大颗粒表面, 可能是由于 ESP 充电过程使细颗粒的电聚集, 从而导致超细颗粒附着在颗粒表面上. FP2 机组 WFGD 出口处的样品主要呈规则球形, 有很多细小颗粒集结成不规则块状, 存在较多柱状颗粒. 如图 5 中 EDX 能谱分析结果



(a) FP2 电厂 WFGD 入口, (b) FP2 电厂 WFGD 出口, (c) FP3 电厂 WFGD 入口, (d) FP3 电厂 WESP 出口

图 4 电厂颗粒物 SEM 图像

Fig. 4 SEM images of sampled fine particles

显示,WFGD 出口和入口的颗粒物中, Si、Al、O 和 C 元素为主要成分,质量分数总和占 90% 以上,说明球形颗粒来自燃煤中的硅铝酸盐组成,这与表 1 中结果相呼应. WFGD 出口颗粒物中除 C、O、Na 和 Si 的质量分数降低,其它元素均高于进口处,特别是 S 和 Ca 的质量分数升高,说明出口处增加的大量柱状颗粒为石膏晶体^[26, 27]. 可能是由于 WFGD 过程中添加 CaO 以去除烟气中的 SO₂,未完全反应的 CaCO₃ 以及生成的产物 CaSO₄ 没有被完全回收,随烟气排入大气,与以往的研究结果类似^[28, 29].

如图 4(c) 和 4(d) 所示,FP3 机组 WFGD 入口

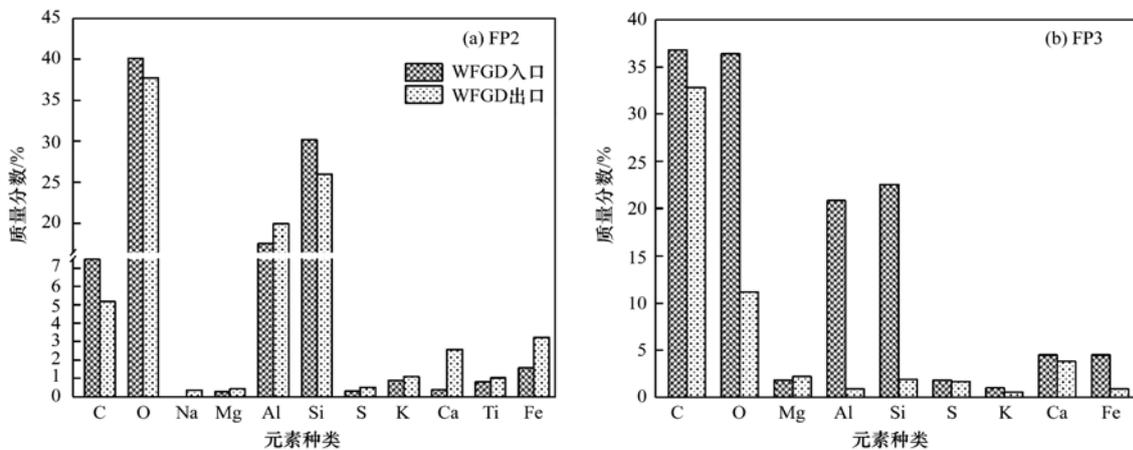


图 5 电厂颗粒物 SEM-EDX 能谱分析

Fig. 5 Chemical compositions of particulate matter from power plant by the SEM-EDX

2.3 细颗粒物的离子组成解析

FP2 和 FP3 机组 WFGD 进口和 WFGD/WESP 出口处水溶性离子组成如图 6 所示,FP2 机组排放的 PM_{2.5} 中水溶性离子总浓度在 WFGD 进出口处分别为 0.09 和 0.20 mg·m⁻³,出口处排放的水溶性离子占 PM_{2.5} 的 49.40%. 在 WFGD 过程中,PM₁₀ 中 3 个粒径分级中的水溶性离子总浓度均增加,其中 PM_{2.5-10} 增加比例最高,其次是 PM_{1-2.5},PM₁ 增比最低. 对于测试的大部分离子,在通过 WFGD 之后均发生了增加. SO₄²⁻ 是主要的阴离子,在各分级粒径中增加 0.5~8 倍,在 PM_{2.5-10} 中增加比例最大. 其它浓度出现大幅增加的阴离子包括 NO₂⁻ 和 NO₃⁻. Ca²⁺ 是主要的阳离子,在 PM₁₀ 中浓度增加 7 倍,其它阳离子包括 NH₄⁺、Mg²⁺、K⁺ 和 Na⁺,以相似的比例增加. 超低排放运行机组由于追求过低的 NO_x 排放浓度,导致氨逃逸超标严重^[32],生成的亚微米粒径硫酸氢铵可能会造成出口 NH₄⁺、NO₂⁻ 和 NO₃⁻ 较大幅度增加和脱硫废水中氨氮含量超标严重等现象. 其中少量的 Mg²⁺ 和 K⁺ 也呈现出相似比例的增长,可能归因于石灰石中的杂质^[12]. Ca²⁺ 和 SO₄²⁺ 浓度同时出现增加,而 CaSO₄ 是 WFGD 过程主要的产

处的颗粒物主要成球状,细颗粒聚集体较少,少量细颗粒附着在大颗粒表面. WESP 出口处的样品主要是规则球形颗粒,存在部分细颗粒聚集体和少量柱状颗粒. 能谱分析结果如图 5 显示,FP3 机组 WFGD 入口处的主要成分与 FP2 相似,为 O、C、Si 和 Al 元素,WESP 出口处的元素除 Mg 的质量分数上升,其它元素的质量分数均下降,其中 Si 和 Al 质量分数下降将近 10 倍. Si 和 Al 是燃煤电厂烟气颗粒物中主要标型元素,WESP 中收尘极被水膜覆盖,有效避免了振打引起的二次扬尘,有效脱除因屋脊式除雾器因烟气流速过大而造成的雾滴夹带^[30,31].

物,因此说明 WFGD 后排放的颗粒物中夹带有石灰石、石膏浆料. 结合 SEM-EDX 的分析结果,表明 WFGD 过程会增加 PM₁₀ 中可溶性离子的含量,从而影响电厂排放 PM₁₀ 的特征,其主要的方式包括夹带石膏浆料^[33]. 而且 WFGD 入口处,PM₁、PM_{1-2.5} 和 PM_{2.5-10} 中 Ca²⁺ 的质量浓度随粒径的增大逐渐降低,WFGD 出口处则相反,浓度随着粒径的增大而增加,可能是由于 PM₁₀ 中更粗的颗粒更易于夹带石膏浆料.

FP3 机组 PM_{2.5} 中水溶性离子总质量浓度在 WFGD 进口处为 0.06 mg·m⁻³,WESP 出口处为 0.04 mg·m⁻³. WFGD 进口处的水溶性离子中阳离子主要以 Ca²⁺ 和 NH₄⁺ 为主,阴离子以 SO₄²⁻ 和 NO₃⁻ 为主,3 个粒径分级中水溶性离子质量浓度差别不大. 在 WESP 出口处,相比 WFGD 进口,Cl⁻、Ca²⁺ 和 SO₄²⁻ 质量浓度略升高,其他离子质量浓度均下降,总质量浓度下降. 由于缺乏 WFGD 出口处的数据,无法准确判断 WESP 对离子的影响情况. FP3 机组与 FP2 机组的 WFGD 工艺相同,两台机组使用的脱硫还原剂石灰石 XRF 成分分析差异不大. 从 FP2 机组结果可知 WFGD 会增加水溶性离子排放,FP3 机

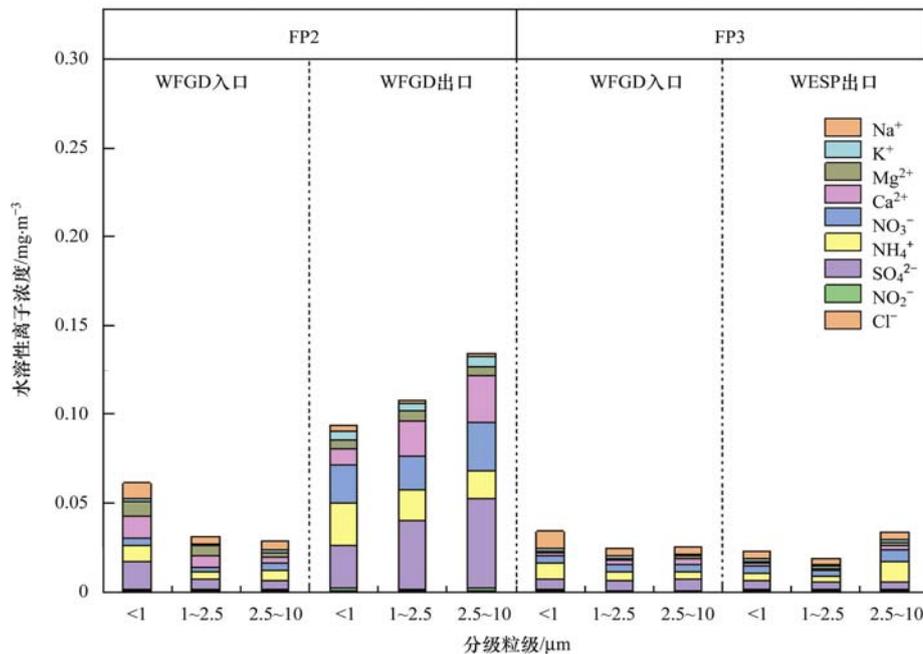


图6 机组进出口分级颗粒物水溶性离子浓度分布

Fig. 6 Ionic composition of particulate matter at the outlet of two units

组和FP2机组WFGD进口处的水溶性离子浓度特征相似,而FP3机组在经过WFGD和WESP后水溶性离子质量浓度远低于FP2机组,推测WESP对WFGD中增加的水溶性离子有一定的去除效果。

WFGD在实践中由于受到喷淋液滴数密度、除雾器设计及烟气流速等因素的限制,对于亚微米超细颗粒脱除效率较低^[31]。近年来,雾、霾天气频发,大气污染物排放形势日趋严峻。我国的燃煤电厂虽通过超低排放改造使SO₂、NO_x及烟尘排放总量大幅下降^[34],但细颗粒物排放仍需重视,PM_{2.5}和PM₁颗粒物对人体健康影响较大,其中可富集Ca²⁺、NH₄⁺、SO₄²⁻和NO₃⁻等离子,可能通过远距离传输引起城市人群呼吸道、心血管和脑血管等疾病,需引起足够的重视,建议有条件的电厂增加WESP和相变凝聚器,实现细颗粒团聚脱除^[35]。

3 结论

(1)测试的3台机组FP1、FP2和FP3最终排放的PM₁₀质量浓度相当,均低于0.6 mg·m⁻³。两种不同改造工艺下PM₁₀中细颗粒占均较高,需要引起重视。

(2)FP2机组排放的水溶性离子以Ca²⁺和SO₄²⁻为主,WFGD过程会增加PM₁₀中水溶性离子的质量浓度,其中Ca²⁺和SO₄²⁻增比最高,夹带脱硫浆液是WFGD增加水溶性离子浓度的主要原因。

(3)FP3机组排放的水溶性离子以NH₄⁺和SO₄²⁻为主,Ca²⁺质量浓度较低,出口处颗粒物以硅

铝酸盐球状颗粒为主,较少石膏颗粒。FP3机组排放的颗粒物成分组成与FP2机组存在差异的原因可能是FP2机组配备了WESP,WFGD+WESP能有效去除PM_{2.5}和PM₁₀颗粒物,降低水溶性离子特别是石灰石和石膏夹带造成的Ca²⁺和SO₄²⁺对大气环境的影响。

致谢:感谢国网安徽省电力科学研究院和电厂工作人员协助完成采样工作。

参考文献:

- [1] 张程,于兴娜,安俊琳,等.南京北郊不同大气污染程度下气溶胶化学组分特征[J].环境科学,2017,38(12):4932-4942.
Zhang C, Yu X N, An J L, et al. Aerosol chemical characteristics for different air pollution levels in north suburban Nanjing[J]. Environmental Science, 2017, 38(12): 4932-4942.
- [2] 马子珍,李振,蒋靖坤,等.燃煤电厂产生和排放的PM_{2.5}中水溶性离子特征[J].环境科学,2015,36(7):2361-2366.
Ma Z Z, Li Z, Jiang J K, et al. Characteristics of water-soluble inorganic ions in PM_{2.5} emitted from coal-fired power plants[J]. Environmental Science, 2015, 36(7): 2361-2366.
- [3] 国家统计局能源统计司.中国能源统计年鉴2013[M].北京:中国统计出版社,2013.
- [4] 沙桐,马晓燕,王健颖,等.长江三角洲冬季电厂排放对大气污染的影响[J].中国环境科学,2018,38(9):3288-3297.
Sha T, Ma X Y, Wang J Y, et al. The impact of power plant emission on air pollution during winter over Yangtze River Delta [J]. China Environmental Science, 2018, 38(9): 3288-3297.
- [5] Wang Q Q, Sun Y L, Jiang Q, et al. Chemical composition of aerosol particles and light extinction apportionment before and during the heating season in Beijing, China [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2015, 120(24): 12708-12722.

- [6] GB 13223-2011, 火电厂大气污染物排放标准[S].
- [7] 国家发展改革委, 环境保护部, 国家能源局. 关于印发《煤电节能减排升级与改造行动计划(2014-2020年)》的通知[EB/OL]. http://www.ndrc.gov.cn/gzdt/201409/t20140919_626240.html, 2014-09-12.
- [8] 王树民, 刘吉臻. 燃煤电厂烟气污染物近零排放工程实践分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, **36**(22): 6140-6147.
Wang S M, Liu J Z. Investigation of near-zero air pollutant emission characteristics from coal-fired power plants [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, **36**(22): 6140-6147.
- [9] 王彦超, 蒋春来, 贺晋瑜, 等. 京津冀大气污染传输通道城市燃煤大气污染减排潜力[J]. 中国环境科学, 2018, **38**(7): 2401-2405.
Wang Y C, Jiang C L, He J Y, *et al.* Air pollutant emissions reduction potential from burning coal in cities of air pollution transmission channel in Beijing-Tianjin-Hebei area [J]. China Environmental Science, 2018, **38**(7): 2401-2405.
- [10] 阮仁晖, 谭厚章, 段钰锋, 等. 超低排放燃煤电厂颗粒物脱除特性[J]. 环境科学, 2019, **40**(1): 126-134.
Ruan R H, Tan H Z, Duan Y F, *et al.* Particle removal characteristics of an ultra-low emission coal-fired power plant [J]. Environmental Science, 2019, **40**(1): 126-134.
- [11] 张成, 张雅惠, 王永敏, 等. 重庆市燃煤电厂汞排放特征及排放量[J]. 环境科学, 2017, **38**(2): 495-501.
Zhang C, Zhang Y H, Wang Y M, *et al.* Characteristics of mercury emissions from coal-fired power plants in Chongqing [J]. Environmental Science, 2017, **38**(2): 495-501.
- [12] Córdoba P. Status of flue gas desulphurisation (FGD) systems from coal-fired power plants: overview of the physico-chemical control processes of wet limestone FGDs [J]. Fuel, 2015, **144**: 274-286.
- [13] 李小龙, 周道斌, 段玖祥, 等. 超低排放下燃煤电厂颗粒物排放特征分析研究[J]. 中国环境监测, 2018, **34**(3): 45-50.
Li X L, Zhou D B, Duan J X, *et al.* Characteristics of particle emission from coal-fired power plants under the ultra low emission standard [J]. Environmental Monitoring in China, 2018, **34**(3): 45-50.
- [14] 王超. 燃煤细颗粒物及痕量元素排放控制特性的试验研究与现场测试[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
- [15] 王超, 刘小伟, 徐义书, 等. 660 MW 燃煤锅炉细微颗粒物中微量与痕量元素的分布特性[J]. 化工学报, 2013, **64**(8): 2975-2981.
Wang C, Liu X W, Xu Y S, *et al.* Distribution characteristics of minor and trace elements in fine particulate matters from a 660 MW coal-fired boiler [J]. CIESC Journal, 2013, **64**(8): 2975-2981.
- [16] 常倩云, 杨正大, 郑成航, 等. 高湿烟气中超低浓度细颗粒物测试方法研究[J]. 中国环境科学, 2017, **37**(7): 2450-2459.
Chang Q Y, Yang Z D, Zheng C H, *et al.* Research on ultra-low concentration particle measurement in high humidity flue gas [J]. China Environmental Science, 2017, **37**(7): 2450-2459.
- [17] 邹淞宇, 刘含笑, 方小伟, 等. 燃煤电厂 PM_{2.5} 重量法 (PM₁₀、DGI) 实测案例及方法总结[J]. 山东化工, 2017, **46**(20): 70-71.
Zou S Y, Liu H X, Fang X W, *et al.* The methods summary and test cases for PM_{2.5} gravimetric methods (PM₁₀、DGI) of coal-fired power plant [J]. Shandong Chemical Industry, 2017, **46**(20): 70-71.
- [18] Li Z, Jiang J K, Ma Z Z, *et al.* Influence of flue gas desulfurization (FGD) installations on emission characteristics of PM_{2.5} from coal-fired power plants equipped with selective catalytic reduction (SCR) [J]. Environmental Pollution, 2017, **230**: 655-662.
- [19] 段雷, 马子珍, 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.
- [20] 帅伟, 李立, 崔志敏, 等. 基于实测的超低排放燃煤电厂主要大气污染物排放特征与减排效益分析[J]. 中国电力, 2015, **48**(11): 131-137.
Shuai W, Li L, Cui Z M, *et al.* Analysis of primary air pollutant emission characteristics and reduction efficiency for ultra-low emission coal-fired power plants based on actual measurement [J]. Electric Power, 2015, **48**(11): 131-137.
- [21] 张军, 郑成航, 张涌新, 等. 某 1000MW 燃煤机组超低排放电厂烟气污染物排放测试及其特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, **36**(5): 1310-1314.
Zhang J, Zheng C H, Zhang Y X, *et al.* Experimental investigation of ultra-low pollutants emission characteristics from a 1000MW coal-fired power plant [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, **36**(5): 1310-1314.
- [22] Sui Z F, Zhang Y S, Peng Y, *et al.* Fine particulate matter emission and size distribution characteristics in an ultra-low emission power plant [J]. Fuel, 2016, **185**: 863-871.
- [23] Ruan R, Xu X, Tan H, *et al.* Emission characteristics of particulate matter from two ultra-low emission coal-fired industrial boilers in Xian, China [J]. Energy & Fuels, 2019, **33**(3): 1944-1954.
- [24] 李清毅, 胡达清, 张军, 等. 超低排放脱硫塔和湿式静电对烟气污染物的协同脱除[J]. 热能动力工程, 2017, **32**(8): 138-143.
Li Q Y, Hu D Q, Zhang J, *et al.* Synergistic removal of WFGD and WESP on gas pollutants with Ultra low emission [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2017, **32**(8): 138-143.
- [25] 王仕龙. 燃煤电厂电除尘 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 的排放控制 II: 电除尘电源改造与 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 的排放 (以 660 MW 机组为例) [J]. 科技导报, 2014, **32**(33): 34-38.
Wang S L. PM₁₀ and PM_{2.5} emission control by electrostatic precipitator (ESP) for coal-fired power plants II: Evaluation of ESP Upgrading in Terms of PM₁₀ and PM_{2.5} Emission Reduction with a 660 MW generator [J]. Science & Technology Review, 2014, **32**(33): 34-38.
- [26] 吕建焱, 李定凯. 添加 CaO 对煤粉燃烧后一次颗粒物特性影响的研究[J]. 热能动力工程, 2006, **21**(4): 373-377.
Lü J Y, Li D K. A study of the effect of CaO addition on primary particle characteristics after pulverized coal combustion [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2006, **21**(4): 373-377.
- [27] 王琿, 宋蕾, 姚强, 等. 电厂湿法脱硫系统对烟气中细颗粒物脱除作用的实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, **28**(5): 1-7.
Wang H, Song Q, Yao Q, *et al.* Experimental study on removal effect of wet flue gas desulfurization system on fine particles from a coal-fired power plant [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, **28**(5): 1-7.
- [28] 赵志锋, 杜谦, 董鹤鸣, 等. 湿法脱硫装置对燃煤锅炉 PM_{2.5}

- 排放特征的影响[J]. 化工学报, 2017, **68**(11): 4261-4271.
- Zhao Z F, Du Q, Dong H M, *et al.* Influence of wet flue gas desulfurization devices on PM_{2.5} emission characteristics of coal-fired boilers[J]. CIESC Journal, 2017, **68**(11): 4261-4271.
- [29] Liu S T, Yang H K, Zhang Z B, *et al.* Emission characteristics of fine particles from wet flue gas desulfurization system using a cascade of double towers[J]. Aerosol and Air Quality Research, 2018, **18**(7): 1901-1909.
- [30] 刘含笑, 姚宇平, 郦建国, 等. 燃煤电厂 WESP 颗粒物脱除机制及排放特征研究[J]. 中国电力, 2017, **50**(12): 178-184.
- Liu H X, Yao Y P, Li J G, *et al.* Research of PM removal mechanism and emission characteristics for WESP in a coal-fired power plant[J]. Electric Power, 2017, **50**(12): 178-184.
- [31] 尤良洲, 王丰吉, 胡姐, 等. 高效除尘除雾器在超低排放中应用的技术经济分析[J]. 中国电力, 2018, **51**(8): 162-166, 179.
- You L Z, Wang F J, Hu D, *et al.* Technical and economic analysis on the application of high efficiency dust precipitator in ultra-low emission units [J]. Electric Power, 2018, **51**(8): 162-166, 179.
- [32] 马大卫, 何军, 张其良, 等. SCR 脱硝系统性能及空气预热器阻力上升分析[J]. 中国电力, 2019, **52**(6): 187-192.
- Ma D W, He J, Zhang Q L, *et al.* Analysis and research on SCR system performance and resistance increase of air preheater in ultra-low emission unit[J]. Electric Power, 2019, **52**(6): 187-192.
- [33] 欧阳丽华, 庄焯, 刘科伟, 等. 燃煤电厂湿烟囱降雨成因分析[J]. 环境科学, 2015, **36**(6): 1975-1982.
- Ouyang L H, Zhuang Y, Liu K W, *et al.* Analysis on mechanism of rainout carried by wet stack of thermal power plant [J]. Environmental Science, 2015, **36**(6): 1975-1982.
- [34] 何军, 马大卫, 王正风, 等. 安徽省煤电机组超低排放改造及 CEMS 验收问题分析[J]. 中国电力, 2018, **51**(7): 170-177.
- He J, Ma D W, Wang Z F, *et al.* Analysis of the ultra-low emission transformation and CEMS acceptance of coal-fired power plant in Anhui Province [J]. Electric Power, 2018, **51**(7): 170-177.
- [35] 王述浩, 李水清, 段璐, 等. 相变凝聚器内蒸汽凝结与细颗粒团聚规律研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, **37**(24): 7230-7236.
- Wang S H, Li S Q, Duan L, *et al.* Study on the coagulation of vapor condensates and fine particulates in a phase-change agglomerator[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, **37**(24): 7230-7236.



CONTENTS

| | | |
|--|---|---------|
| Spatiotemporal Variations of PM _{2.5} Pollution Evolution in China in Recent 20 Years | SHI Yan, LIU Rui-mei, LUO Yi, <i>et al.</i> | (1) |
| Characteristics of Aerosol Particulate Concentrations and Their Climate Background in Shanghai During 2007-2016 | ZHENG Qing-feng, SHI Jun, TAN Jian-guo, <i>et al.</i> | (14) |
| Characteristics and Sources of Elements in PM _{2.5} During Summer for Three Typical Cities in Pingdingshan-Suizhou-Wuhan, Central China | LIU Wei-jie, SHI Ming-ming, CHENG Cheng, <i>et al.</i> | (23) |
| PM _{2.5} Pollution Characteristics During Winter and Summer in the Hohhot-Baotou-Ordos Region, China | LI Yi-ming, LIU Jia-yuan, SHI Guo-liang, <i>et al.</i> | (31) |
| Analysis of Pollution Characteristics and Sources of PM _{2.5} During Heavy Pollution in Shijiazhuang City Around New Year's Day 2019 | ZHOU Jing-bo, DUAN Jing-chun, WANG Jian-guo, <i>et al.</i> | (39) |
| Modeling Studies of Source Contributions to PM _{2.5} in Chengdu, China | XU Yan-ling, YI Ai-hua, XUE Wen-bo | (50) |
| Chemical Characteristics of Arsenic in PM _{2.5} in Beijing | SHI Shao-xuan, YANG Yan-rong, QIN Juan-juan, <i>et al.</i> | (57) |
| Pollution Characteristics and Potential Source Contributions of Gaseous Elemental Mercury (GEM) During Summer and Autumn in Ningbo City | YI Hui, LIN Jia-mei, CAI Qiu-liang, <i>et al.</i> | (65) |
| Seasonal Characteristics and Source Analysis of Water-Soluble Ions in PM _{2.5} of Anyang City | SUN You-chang, JIANG Nan, WANG Shen-bo, <i>et al.</i> | (75) |
| Analysis of Stable Carbon Isotope Characteristics of PM _{2.5} in Summer and Winter Season in Xinxiang City | YAN Guang-xuan, SONG Xin, ZHANG Jing-wen, <i>et al.</i> | (82) |
| Construction and Evaluation on Size Resolved Source Apportionment Methods Based on Particle Size Distribution of Chemical Species | LIANG Yong-li, TIAN Ying-ze, LIU Tong, <i>et al.</i> | (90) |
| Fine Particulate Emission Characteristics of an Ultra-Low Emission Coal-Fired Power Plant | WANG Run-fang, MA Da-wei, JIANG Shao-yi, <i>et al.</i> | (98) |
| Driving Factors of the Significant Increase in Surface Ozone in the Beijing-Tianjin-Hebei Region, China, During 2013-2018 | YU Yi-jun, MENG Xiao-yan, WANG Zhen, <i>et al.</i> | (106) |
| Characteristic of Surface Ozone and Meteorological Parameters Analysis in Anyang City | YANG Jian, YIN Sha-sha, YU Shi-jie, <i>et al.</i> | (115) |
| Emission Inventory of Intermediate Volatility Organic Compounds from Vehicles in the Yangtze River Delta in 2017 and the Impact on the Formation Potential of Secondary Organic Aerosols | WANG Qian, HUANG Ling, WANG Yang-jun, <i>et al.</i> | (125) |
| Exhaust Smoke of Non-Road Vehicles in Typical Cities of Eastern China | LU Jun, HU Qing-yao, YANG Qiang, <i>et al.</i> | (133) |
| Emission Status and Standards of Volatile Organic Compounds from Chinese and Foreign Bulk Petroleum Terminals | HU Wei, REN Bi-qi, HUANG Yu-hu, <i>et al.</i> | (139) |
| Secondary Organic Aerosol Mass Yield and Characteristics from 4-ethylguaiaacol Aqueous ·OH Oxidation: Effects of Initial Concentration | ZHUANG Yu, CHEN Yan-tong, LI Xu-dong, <i>et al.</i> | (146) |
| Stable Isotope Characteristics and Vapor Source of Precipitation in the South and North Slopes of Wushaoling Mountain | XU Xiu-ting, JIA Wen-xiong, ZHU Guo-feng, <i>et al.</i> | (155) |
| Characteristics and Influencing Factors of Stable Hydrogen and Oxygen Isotopes in Groundwater in the Permafrost Region of the Source Region of the Yangtze River | WANG Shao-yong, HE Xiao-bo, DING Yong-jian, <i>et al.</i> | (166) |
| Hydrochemical and Isotopic Characteristics of the Lake Balkhash Catchment, Kazakhstan | SHEN Bei-bei, WU Jing-lu, JILILI Abuduwaili, <i>et al.</i> | (173) |
| Effect of a Comprehensive Improvement Project on Water Quality in Urban Lakes: A Case Study of Water Quality Variation in Lihu Lake Over the Past 30 Years | TIAN Wei, YANG Zhou-sheng, SHAO Ke-qiang, <i>et al.</i> | (183) |
| Detection Method, Distribution, and Risk Assessment of Pharmaceuticals and Personal Care Products in the Yellow Sea and the East China Sea | CHEN Xian, ZHANG Cai-jie, YANG Gui-peng, <i>et al.</i> | (194) |
| Occurrence and Risk Assessment of Organophosphate Esters in Source Water of the Nanjing Section of the Yangtze River | LI Dong, ZHANG Sheng-hu, ZHANG Qin, <i>et al.</i> | (205) |
| Spatial Distribution, Spectral Characteristics, and Sources Analysis of Dissolved Organic Matter from Baiyangdian Lake in Xiong'an New District During the Winter Freezing Period | ZHOU Shi-lei, SUN Yue, ZHANG Yi-ran, <i>et al.</i> | (213) |
| Spatial Characteristics, Risk Assessment, and Source Analysis of Elements in Surface Sediments from the Baiyangdian Lake | WANG Jing-zhong, LIU Zhou, WEI Hao, <i>et al.</i> | (224) |
| Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Phthalate Esters in Surface Sediments of the Songhua River | WANG Huan, YANG Yong-zhe, WANG Hai-yan, <i>et al.</i> | (232) |
| Occurrence Relationship Between Microplastics and Heavy Metals Pollutants in the Estuarine Sediments of Poyang Lake and the Yangtze River | LI Wen-hua, JIAN Min-fei, LIU Shu-li, <i>et al.</i> | (242) |
| Effect of Ozonation on Microorganism in the Biological Activated Carbon and Disinfection By-Products in the Effluent | LIU Bao-ming, WANG Xi-xi, ZHANG Xiao-xia, <i>et al.</i> | (253) |
| Refined Assessment of Exposure and Health Risks of Heavy Metals in Water for the Children in Xigu District, Lanzhou | CHEN Yue-fang, SUN Shan-wei, DUAN Xiao-li, <i>et al.</i> | (262) |
| Adsorption of Phosphate on Mg/Fe Layered Double Hydroxides (Mg/Fe-LDH) and Use of Mg/Fe-LDH as an Amendment for Controlling Phosphorus Release from Sediments | WU Jun-lin, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> | (273) |
| Characteristics and Mechanism of Monothioarsenate Adsorption on Sand, Sediment, and Goethite | LIAO Dan-xue, SHAN Hui-mei, PENG San-xi, <i>et al.</i> | (284) |
| Substructure Characteristics of Combined Acid-Base Modified Sepiolite and Its Adsorption for Cd(II) | XIE Sha, XU Ying-ming, YAN Cui-xia, <i>et al.</i> | (293) |
| Characteristics of Nitrogen Metabolism by Denitrifying Bacterial Agents in Low Dissolved Oxygen Black Odor Water | ZHAO Zhi-rui, LIU Shuo, LI Duo, <i>et al.</i> | (304) |
| Metagenomic Analysis of Antibiotic Resistant Bacteria and Resistance Genes in a Pharmaceutical and Chemical Wastewater Treatment Plant | CHEN Hong-ling, ZHANG Xing-tao, WANG Qing, <i>et al.</i> | (313) |
| Measurements of Bacterial Community and Biodiversity from Activated Sludge for a Wastewater Treatment Containing Starch | ZHAO Ting-ting, QIAO Kai, WANG Lei, <i>et al.</i> | (321) |
| Process Control and Operation Optimization of PN-SAD Coupling Process Based on SBR-ABR | CHEN Chong-jun, ZHANG Min, JIANG Ying, <i>et al.</i> | (330) |
| Effects of Intermittent Starvation on the Operation of the SNAD Process | LI Dong, LIU Zhi-cheng, XU Gui-da, <i>et al.</i> | (337) |
| Nitrogen Removal from Mature Landfill Leachate via Denitrification-Partial Nitrification-ANAMMOX Based on a Zeolite Biological Aerated Filter | CHEN Xiao-zhen, WANG Xiao-jun, Karasuta Chayangkun, <i>et al.</i> | (345) |
| Rapid Achievement of Nitrifying Micro-granular Sludge and Its Nitrification Function | LIU Wen-ru, SONG Jia-jun, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> | (353) |
| Effect of On/Off Aeration Time Ratio Under High Frequency On/Off Aeration on Performance of Nitrosated Granular Sludge | ZHANG Jie, LAO Hui-mei, LI Dong, <i>et al.</i> | (360) |
| Occurrence, Distribution, Source, and Health Risk Assessment of Polybrominated Diphenyl Ethers in Surface Soil from the Shen-Fu Region, Northeast China | XIANG Xin-xin, LU Yin-tao, RUAN Qi-yang, <i>et al.</i> | (368) |
| Vertical Pollution Characteristics and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Heterogeneous Unsaturated Zone Under a Coking Plant | MENG Xiang-shuai, WU Meng-meng, CHEN Hong-han, <i>et al.</i> | (377) |
| Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes and Mobile Genetic Elements in Beijing Vegetable Base Soils | ZHANG Ru-feng, SONG Yuan, GAO Hao-ze, <i>et al.</i> | (385) |
| Stoichiometric Characteristics of Purple Sloping Cropland Under Long-term Fertilization and Cultivation | DU Ying-ni, LI Tian-yang, HE Bing-hui, <i>et al.</i> | (394) |
| Ecological Stoichiometry of Carbon, Nitrogen, and Phosphorus in Subtropical Paddy Soils | SONG Jia-ling, SHENG Hao, ZHOU Ping, <i>et al.</i> | (403) |
| Denitrification and Anaerobic Ammonium Oxidation in Soil Nitrogen Migration Process in a Farmland of Wanshandang Lake | CHEN Zhi-hao, QIN Yun-bin, DING Bang-jing, <i>et al.</i> | (412) |
| Effects of Straw Biochar on Soil Microbial Metabolism and Bacterial Community Composition in Drip-irrigated Cotton Field | WANG Jing, MA Li-juan, LONG Ze-hua, <i>et al.</i> | (420) |
| Source Appointment of Heavy Metals in Agricultural Soils of the Julong River Basin Based on Positive Matrix Factorization | HUANG Hua-bin, LIN Cheng-ni, HU Gong-qi, <i>et al.</i> | (430) |
| Spatial Distribution of Soil Arsenic and Arsenic Enrichment in Crops in the Oasis Region of the Southeastern Tarim Basin | CHEN Yun-fei, ZHOU Jin-long, ZENG Yan-yan, <i>et al.</i> | (438) |
| Bioavailability, Translocation, and Accumulation Characteristic of Heavy Metals in a Soil-Crop System from a Typical Carbonate Rock Area in Guangxi, China | MA Hong-hong, PENG Min, LIU Fei, <i>et al.</i> | (449) |
| Effects of Different Amendments on Fractions and Uptake by Winter Wheat in Slightly Alkaline Soil Contaminated by Cadmium and Nickel | ZHANG Jing-jing, ZHU Shuang-ge, ZHU Li-nan, <i>et al.</i> | (460) |
| Effect of Different Passivating Agents on the Stabilization of Heavy Metals in Chicken Manure Compost and Its Maturity Evaluating Indexes | LUAN Run-yu, GAO Shan, XU Ying-ming, <i>et al.</i> | (469) |
| Response of Soil Respiration and Its Components to Nitrogen and Phosphorus Addition in Farming-Withdrawn Grassland in the Semiarid Loess Hilly-Gully Region | ZHOU Jun-jie, CHEN Zhi-fei, YANG Quan, <i>et al.</i> | (479) |
| Subsequent Effects of Slag and Biochar Application on Greenhouse Gas Emissions from Paddy Fields in the Fuzhou Plain | LAN Xing-fu, WANG Xiao-tong, ZHOU Ya-xin, <i>et al.</i> | (489) |