

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

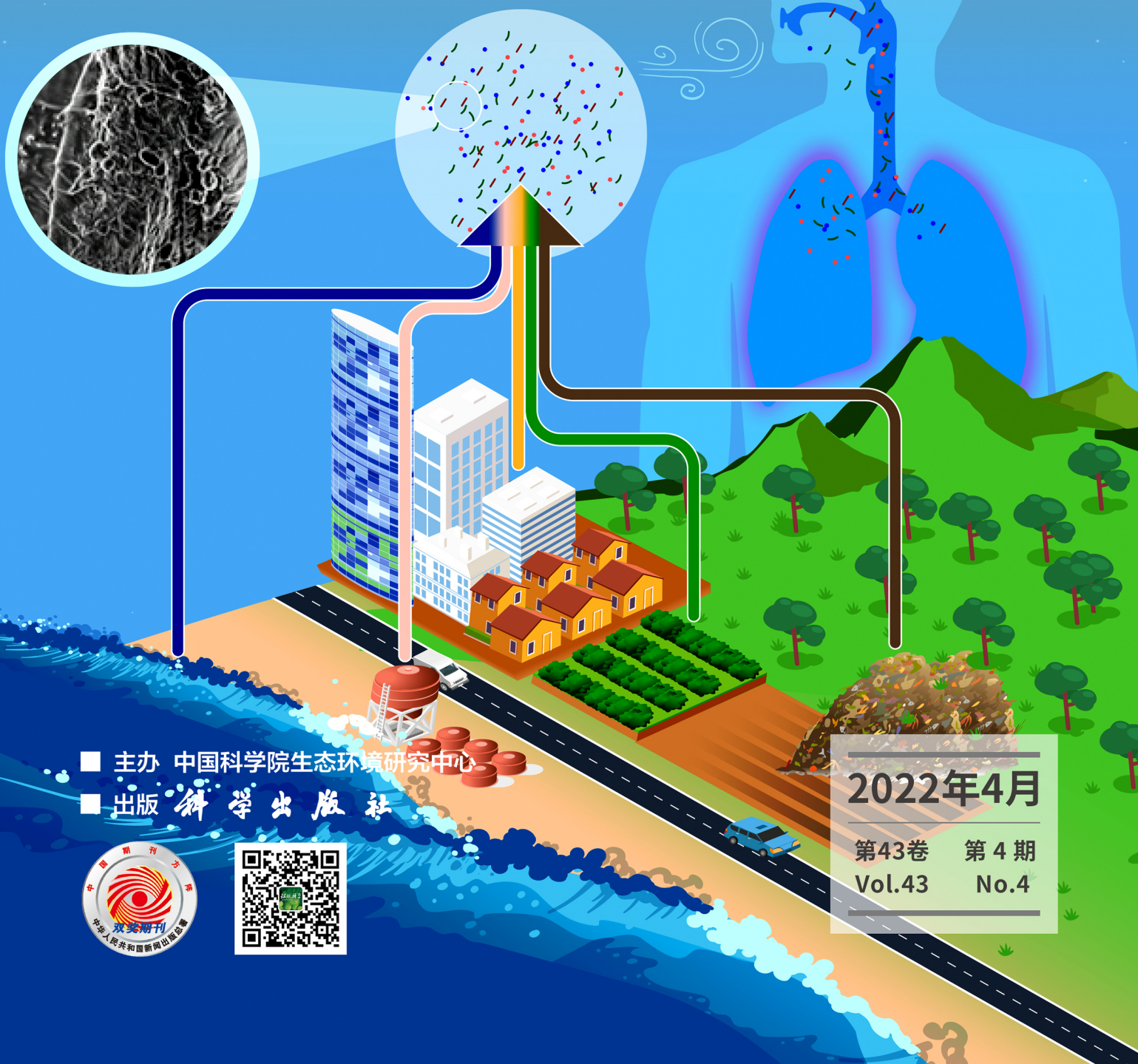
ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

大连海岸带夏、秋季大气沉降(微)塑料的赋存特征及其表面生物膜特性

涂晨, 田媛, 刘颖, 张馨宁, 骆永明



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年4月

第43卷 第4期
Vol.43 No.4

目次

2015~2019年河南省PM _{2.5} 时空特征与驱动因素分析	葛昱序, 刘岩, 杨洪, 郭恒亮 (1697)
郑州市大气PM _{2.5} 中重金属的污染特征、来源及健康风险评估: 基于高分辨数据	曲光辉, 孙俊苹, 王申博, 姜楠, 李利萍, 刘洋, 陈红阳, 马双良 (1706)
宁波市春节期间水溶性离子污染来源和特征分析	杨梦蓉, 潘勇, 黄仲文, 张晶晶, 黄显军, 何萌萌, 肖航 (1716)
上海城区PM _{2.5} 中有机组分及硝基芳香化合物分布特征	庄旻, 马英歌, 程玉璜, 周敏, 戴海夏, 黄成, 郁建珍, 朱书慧, 乔利平, 童张法 (1725)
南京北郊大气细粒子硝基苯酚类化合物污染特征与来源	陈美娟, 钱姿合, 顾陈娟, 张书萌, 刘智艺, 王新峰, 盖鑫磊 (1738)
春节与疫情管控期间珠三角VOCs的组成和来源变化	江明, 袁鸾, 温丽容, 张莹, 方洪波, 杨满芽, 李成柳 (1747)
重庆市主要工业源VOCs组分排放清单及其臭氧生成潜势	李陵, 李振亮, 方维凯, 王晓宸, 蒲茜, 汪凌韬, 袁睿, 张卫东, 翟崇治 (1756)
珠三角石化园区VOCs排放特征及影响评价	张雪驰, 沙青娥, 陆梦华, 王毓铮, 饶思杰, 明桂英, 李勤勤, 吴淑珠, 郑君瑜 (1766)
基于隧道测试的机动车VOCs排放特征及源解析	刘鑫会, 朱仁成, 金博强, 梅慧, 祖雷, 尹沙沙, 张瑞芹, 胡京南 (1777)
基于多通道分布式VOCs在线监测质谱系统精准识别企业污染源	韦啸, 张永杰, 王沛涛, 洪燕, 夏瑞, 高伟 (1788)
基于SOA和O ₃ 生成潜势的杭州市PM _{2.5} 和O ₃ 协同控制	林旭, 严仁婧, 金嘉佳, 许凯儿 (1799)
超低排放燃煤电厂中湿式电除尘器对可凝结颗粒物排放特性的影响	王鹏程, 袁畅, 梁胜文, 蒋鹭翔, 成海容, 许睿光, 虞晓晗, 王祖武 (1808)
西安市住宅室内空气污染物实测分析与叠加效应	王秀茹, 樊灏, 范洁, 沈振兴 (1814)
大连海岸带夏、秋季大气沉降(微)塑料的赋存特征及其表面生物膜特性	涂晨, 田媛, 刘颖, 张馨宁, 骆永明 (1821)
基于在线观测本地因子的长三角家禽养殖氨排放时空分布特征	高宗源, 徐昶, 倪远之, 沈根祥, 苗文亮, 王振旗, 付侃, 钱晓雍, 曹国民 (1829)
西宁市农牧源氨排放清单及其分布特征	杨益, 姬亚芹, 高玉宗, 林孜, 林宇, 马妍 (1844)
“三水”统筹视角下京津冀地区城市水生态环境保护策略分析	廖雅, 侯晓妹, 任晓红 (1853)
中国居民饮用水镉暴露非致癌风险的年龄分层权重	秦宁, 阿依博塔·吐尔逊别克, 刘运炜, 侯荣, 徐翔宇, 官家丞, 段小丽 (1863)
新疆博尔塔拉河流域平原区地表水与地下水水化学特征及转化关系	雷米, 周金龙, 张杰, 陈亚鹏, 滕杰, 吴彤, 徐东升, 孙英, 纪媛媛 (1873)
珠江源区小黄泥河流域地表水水化学组成特征及控制因素	涂春霖, 尹林虎, 和成忠, 寸得欣, 马一奇, 令狐昌卫 (1885)
河套灌区浅层地下水NO ₃ ⁻ -N时空变化及驱动因素	袁宏颖, 杨树青, 张万峰, 王波, 韩天凯, 丁雪华 (1898)
盐城地区地下水溶质来源及其成因分析	王建, 张华兵, 许君利, 李永山 (1908)
白洋淀不同水体氢氧同位素特征及其指示意义	王雨山, 尹德超, 祁晓凡, 徐蓉桢 (1920)
东部地区大型湖库有色可溶性有机物来源组成及潜在驱动因素	陈丽丽, 肖启涛, 俞晓琴, 陈慧敏, 周蕾, 周永强, 韩龙飞 (1930)
松花湖沉积物溶解性有机质荧光光谱特性	程云轩, 赵可, 张越, 张渝婷, 焦立新 (1941)
区域土地利用类型对水源水中溶解性有机物丰度和荧光组分的影响	高静, 蒲晓, 张玉虎, 程红光, 张瑞宁, 刘训良, 董雪, 许新瑶 (1950)
南北水调东线枢纽湖泊表层水体甲烷释放特征及潜在影响因素	朱俊羽, 彭凯, 李宇阳, 俞晓琴, 陈慧敏, 周蕾, 周永强, 丁艳青 (1958)
千岛湖水体中邻苯二甲酸酯(PAEs)的分布特征及健康风险评价	弥启欣, 国晓春, 卢少勇, 邓义祥, 卢洪斌, 李响, 刘晓贺, 陈金明 (1966)
蓝藻越冬期湖湾沉积物磷吸附特征和释放风险	靳郑海, 涂成琪, 王书航, 陈俊伊, 卢昶雨, 黄威 (1976)
基于植物多样性的北京市湿地生态质量评价	李果, 孙光, 赵梓伊, 刘冬梅, 肖能文, 赵志平, 罗遵兰 (1988)
小清河专项治理对莱州湾环境和浮游植物的影响	张晶晶, 王玉珏, 李凡, 刘珂, 王英, 于洋, 高彦洁, 肖晓彤, 吕振波 (1997)
不同曝气方式对人工湿地细菌多样性、代谢活性及功能的影响	王飞鹏, 黄亚玲, 张瑞瑞, 岳琛, 李飞翔, 张超月, 穆景利 (2007)
南宁市老城区降雨径流溯源及污染特征分析	岳桢桢, 李一平, 周玉璇, 郑可, 于珊, 伍彬 (2018)
老化作用对微塑料吸附铅的影响及其机制	王俊杰, 陈晓晨, 李权达, 金成俊, 黄艺佳, 范露健, 张剑宇, 刘宪华, 徐开钦 (2030)
碳化泡沫负载Co ₃ O ₄ 活化过硫酸盐降解罗丹明B	王渊源, 阎鑫, 艾涛, 李卓, 牛艳辉 (2039)
低总氮浓度下Fe ²⁺ 促进ANAMMOX生物膜反应器脱氮	郑旭文, 秦嘉富, 汪晓军, 陈浩川, 朱梓静, 陈振国 (2047)
污水管道增强通风作用下臭气气液传质特性	杨洲, 张志强, 杨静, 卢金锁 (2055)
长江经济带工业区土壤重金属污染特征与评价	张义, 周心功, 曾晓敏, 冯娇, 刘玉荣 (2062)
中国北方典型设施菜地土壤稀土元素分布特征及环境意义	王祖伟, 刘雅明, 王子璐, 苗钰婷 (2071)
贵州省典型铅锌矿区潜在有毒元素(PTEs)物源甄别、生态风险评价及控制因素	张富贵, 彭敏, 贺灵, 马宏宏 (2081)
地质高背景与污染叠加区不同土地利用方式下土壤重金属分布特征	王雪雯, 刘鸿雁, 顾小凤, 涂宇, 于恩江, 吴攀 (2094)
矿区周边农田土壤重金属分布特征及污染评价	王海洋, 韩玲, 谢丹妮, 胡慧娟, 刘志恒, 王祯 (2104)
农田-泥炭藓系统重金属富集特征与生态风险评价	朱迪, 张朝晖, 王智慧 (2115)
安顺市土壤pH空间变异及影响因素分析	陈清霞, 陆晓辉, 涂成龙 (2124)
方解石基组配钝化剂与低积累玉米协同修复效果	任超, 任或仲, 李竞天, 王浩, 朱利文, 肖建辉, 赵瑞, 杜倩倩 (2133)
伯克氏菌Y4对水稻幼苗损伤和镉吸收的影响	张雅荟, 刘月敏, 王常荣, 刘雅萍, 庞杰, 黄永春, 刘仲齐, 张长波 (2142)
我国长江中下游平原典型稻田含碳温室气体通量变化特性	刘硕, 甄晓杰, 刘钢, 冯兆忠 (2151)
地膜覆盖和生物炭添加对菜地N ₂ O排放的影响	胡剑, 江长胜, 陈鑫童, 熊艳芳, 郝庆菊 (2163)
氮肥运筹对稻田CH ₄ 和N ₂ O排放的影响	郑梅群, 刘娟, 姜培坤, 吴家森, 李永夫, 李松果 (2171)
松花江下游滨岸带典型植被根际土壤细菌群落结构与功能多样性	王露莹, 孙慧珍, 杨雪 (2182)
棉秆还田对咸水滴灌棉田土壤酶活性和细菌群落结构多样性的影响	周永学, 陈静, 李远, 侯振安, 阎伟 (2192)
pH对水稻土全程氨氧化细菌丰度和群落结构组成影响	马瑞, 赵永鹏, 王智慧, 蒋先军 (2204)
生物炭对紫色土坡耕地侵蚀性耕层土壤有机碳的影响	张健乐, 曾小英, 史东梅, 倪书辉, 夏蕊, 王荣浩 (2209)
有机肥替代化肥对旱地黄壤有机碳矿化及活性有机碳的影响	林仕芳, 王小利, 段建军, 皮义均, 郭琴波, 龙大勇, 徐彬, 杨宏伟 (2219)
九龙江河口潮滩湿地土壤有机碳储量、活性组分及稳定性沿淹水梯度的分布特征	黄小清, 全川, 罗敏, 杨洋, 谭凤凤, 潘哲妍, 刘娜, 陈欣, 黄佳芳 (2226)
碳中和战略下煤矿区生态碳汇体系构建及功能提升展望	刘祥宏, 阎永军, 刘伟, 黄占斌 (2237)
《环境科学》征订启事(1929)	
《环境科学》征稿简则(1975)	
信息(1996, 2029, 2080)	

超低排放燃煤电厂中湿式电除尘器对可凝结颗粒物排放特性的影响

王鹏程¹, 袁畅¹, 梁胜文², 蒋鹭翔¹, 成海容¹, 许睿光², 庾晓晗¹, 王祖武^{1*}

(1. 武汉大学资源与环境科学学院, 武汉 430000; 2. 武汉市环境监测中心, 武汉 430000)

摘要: 为了解不同负荷下超低排放燃煤电厂中湿式电除尘器(WESP)对可凝结颗粒物(CPM)排放特性的影响, 基于US EPA Method 202 搭建了 CPM 采样装置, 分析了某安装有 WESP 的超低排放燃煤电厂烟气中 CPM 的排放水平, 评估了机组负荷对 CPM 排放浓度的影响以及 WESP 对 CPM 中各组分的脱除效率. 结果表明, 在 75% 负荷和 100% 负荷条件下, 超低排放电厂 CPM 的排放量分别为 $27.27 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $28.71 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, WESP 对 CPM 的脱除效率分别为 35.59% 和 27.59%. SO_4^{2-} 是 CPM 中水溶性离子的主要成分, 在不同负荷条件下 SO_4^{2-} 在 CPM 中无机组分的质量分数达到了 65% 以上; WESP 对于 CPM 中 Cl^- 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Na^+ 等无机离子的脱除效率可以达到 30%~50%, 但会使 CPM 中 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 浓度有所增加.

关键词: 燃煤电厂; 可凝结颗粒物(CPM); 湿式电除尘(WESP); 负荷; 排放特性

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)04-1808-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.202106229

Effect of WESP on Emission Characteristics of Condensable Particulate Matter from Ultra-low Emission Coal-fired Power Plants

WANG Peng-cheng¹, YUAN Chang¹, LIANG Sheng-wen², JIANG Lu-xiang¹, CHENG Hai-rong¹, XU Rui-guang², TUO Xiao-han¹, WANG Zu-wu^{1*}

(1. School of Resources and Environmental Science, Wuhan University, Wuhan 430070, China; 2. Environmental Monitoring Center of Wuhan, Wuhan 430000, China)

Abstract: In order to study the effect of wet electrostatic precipitators(WESP) on emission characteristics of condensable particulate matter (CPM) from ultra-low emission coal-fired power plants that are under different capacity conditions, a set of CPM sampling devices was built based on US EPA Method 202, and an ultra-low emission coal-fired power plant was detected. This study evaluated the emission level of the CPM from the flue gas of coal-fired power plants, the effects of different unit capacity conditions on the CPM emission concentrations, and the removal efficiency of WESP for different components of the CPM. The results suggested that the emission concentrations of the CPM from ultra-low emission power plants were $27.27 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ and $28.71 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ under the conditions of 75% and 100% capacity, respectively. The removal efficiencies of WESP for the CPM were 35.59% and 27.59%, respectively. SO_4^{2-} was the main component of water-soluble ions of the CPM. The proportion of SO_4^{2-} in inorganic components of the CPM reached more than 65% under different capacity conditions. In addition, the removal efficiency of WESP for Cl^- , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , and other inorganic ions reached 30%-50%, but the mass concentrations of SO_4^{2-} and NO_3^- increased.

Key words: coal-fired power plant; condensable particulate matter(CPM); wet electrostatic precipitator(WESP); capacity; emission characteristic

“多煤少气”是中国能源储备的一大特征, 这也就导致了在国内很长一段时间燃煤电厂都处于火电领域的主导地位^[1,2]. 燃煤电厂被认为是颗粒物(PM)排放的主要来源之一^[3,4]. 随着国内“超低排放”相关管制措施的推行, 燃煤烟气中 SO_2 、 NO_x 和可过滤颗粒物(FPM)的排放量已经降低到了一个较低的水平, 其中可过滤颗粒物(FPM)的排放水平已经降低到了 $5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 以下^[5~12]. 然而, 排放烟气中除了上述常规污染物之外, 还存在可凝结颗粒物(condensable particulate matter, CPM)这类非常规污染物^[1,4~7]. CPM 在烟道中通常呈气态, 但离开烟道进入空气冷却后会迅速冷凝或反应形成微细的固态或液态的物质, 对环境造成危害.

CPM 是燃煤电厂颗粒物排放组分中不可忽视的一部分^[7], 已受到国内外学者的日益关注. 裴冰^[8]的研究对未经过超低排放改造的燃煤电厂排放烟气进行了采样, 发现排放烟气中的 CPM 和

FPM 浓度基本持平. 胡月琪等^[9]的研究发现 FPM 的平均排放量只有 $0.98 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 而 CPM 的平均排放量为 $12.26 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 占总颗粒物的比例高达 92.6%. Song 等^[10]和 Li 等^[11]的研究分别对几家超低排放燃煤电厂进行了采样, 发现超低排放燃煤电厂的 CPM 排放量要比普通燃煤电厂低, 但 CPM 的排放浓度高于 FPM, 在 TPM 中占比很大. Yuan 等^[12]的研究采用 US EPA Method 202 对武汉市部分燃烧源排放的 CPM 进行了采样分析, 发现 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 NH_4^+ 和 NO_3^- 是 CPM 中的主要水溶性离子, 占离子总数的 90% 以上; 从安装有湿法烟气脱硫(WFGD)的固定源排放的 CPM 远高于安装

收稿日期: 2021-06-28; 修订日期: 2021-09-23

基金项目: 武汉市科技局基础研究项目(2019020702011487); 国家重点研发计划项目(2017YFC0212603)

作者简介: 王鹏程(1997~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为污染源颗粒物排放, E-mail: 2020202050105@whu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: zwwang@whu.edu.cn

有半干式烟气脱硫(SDFGD)的固定源,不同的脱硫装置对 CPM 去除效果有所差异. Wang 等^[13]和 Wu 等^[14]的研究对几家超低排放燃煤电厂的 CPM 进行了采样分析,发现 SO_4^{2-} 是 CPM 水溶性离子中占比最高的,可以达到 60%~80%; CPM 中的无机部分主要贡献于形成大气中 $\text{PM}_{2.5}$ 的水溶性离子.

现有的研究多集中在 CPM 的排放水平及其化学组成的分析,对燃煤电厂运行条件和除尘设备都对 CPM 排放浓度影响的研究相对较少. 在国内外学者研究的基础上,本研究利用基于美国 EPA Method 202 搭建的 CPM 采样系统,对国内某超低排放燃煤电厂烟气进行采样,分析了不同负荷条件下 WESP 对烟气 CPM 的排放特性的影响以及 WESP 对 CPM 各组分的去除效果,以期对减少 CPM 的排放提供基础资料.

1 材料与方法

1.1 CPM 采样系统

CPM 采样系统采用美国国家环保署推荐的 EPA Method 202A 装置. 采样系统通过管线依次连接采样枪、FPM 采样头、烟气冷凝系统、CPM 滤膜夹、烟气干燥系统和烟气采样器(TH-880F),其示意如图 1 所示. 采样所使用采样头为封装一体 FPM 采样头,CPM 滤膜为 Whatman 47 mm 石英纤维滤膜.

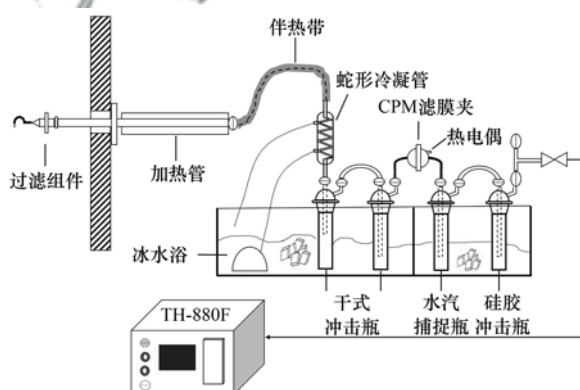


图 1 CPM 采样装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of CPM sampling device

1.2 样品的采集和分析方法

1.2.1 样品的采集方法

采样系统按照颗粒物等速采样原理,每个采样点设置 3 个平行样,每次取样持续 1 h,采样流量大约在 20~30 $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$. 含尘烟气在烟道中先通过 FPM 滤膜捕集 FPM; 穿过 FPM 滤膜的烟气再经过加热至 120℃ 的采样枪后,依次进入蛇形冷凝管以及两个干式冲击瓶(0℃ 冰浴)中. 冲击瓶后设置的

CPM 滤膜可进一步捕集随烟气中不溶于水的细颗粒物,滤膜后接有热电偶,采样过程中始终保持 CPM 滤膜出口处温度低于 30℃. 样品采集后立即用氮气吹拂整个采样系统,氮气吹拂流量控制在约 14 $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$,吹扫时间至少为 1 h. 每次采样后用超纯水、正己烷和丙酮分别润洗采样管和冲击瓶. 取样结束后,将 FPM 采样头、CPM 滤膜、收集的冷凝水和润洗液及时送回实验室处理分析.

1.2.2 CPM 和 FPM 的质量浓度

将 CPM 滤膜称重后剪碎放入去离子水中超声提取滤膜上 CPM 的无机成分,再用正己烷提取滤膜上 CPM 的有机成分,提取过程各重复 3 次. 将采样过程中收集到的冷凝水和超纯水润洗液合并后倒入分液漏斗中,加入 30 mL 正己烷进行萃取,萃取过程一共重复 3 次. 将正己烷萃取得到的有机溶液从分液漏斗上口倒出,与正己烷、丙酮润洗液以及 CPM 滤膜中的有机组分合并记为 $\text{CPM}_{\text{有机}}$,剩余溶液从下口倒出后与 CPM 滤膜中的无机组分混合并记为 $\text{CPM}_{\text{无机}}$. 将 $\text{CPM}_{\text{无机}}$ 放置烘箱内在 105℃ 条件下蒸发至不少于 10 mL 液体,在通风厨中风干,将残留物置于装有无水硫酸钙的干燥箱中干燥 24 h 后称量至恒重,得到 CPM 中无机组分的质量;将 $\text{CPM}_{\text{有机}}$ 在通风厨中干燥至不少于 10 mL (不可超过 30℃),再放入恒温恒湿干燥皿中干燥至恒重,得到 CPM 中的有机组分的质量. 无机和有机组分的质量之和代表 CPM 的总质量.

同样地,将 FPM 采样头外表面用蘸有丙酮的脱脂棉于通风橱内擦拭清洗后,再置于干燥器中平衡 24 h 后称量至恒重,其增重为 FPM 的质量. 最后结合烟气流量可计算出烟气中 CPM 和 FPM 及其各组分的质量浓度. 质量浓度计算公式为:

$$\rho_i = (G_i/V_{\text{nd}}) \times 10^6$$

式中, ρ_i 为标准状态下颗粒物或污染物的实测排放量, $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; G_i 为颗粒物或污染物的质量, g; V_{nd} 为标准状态下干采气体积, L.

此外,实验要求所有平行样测试结果之间相对标准偏差不大于 15%,最终测试结果取平均值.

1.2.3 无机组分

本研究使用 Metrohm 883 离子色谱仪 IC-MS 对样品中的 4 种阴离子(F^- 、 Cl^- 、 NO_3^- 和 SO_4^{2-})和 5 个阳离子(NH_4^+ 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 和 K^+)等水溶性离子进行测定. 阴离子色谱柱的型号为 Metrosep A Supp5250/4.0,阳离子色谱柱的型号为 Metrosep C4-150/4.0. 仪器的量程范围为 $(0 \sim 100) \times 10^{-6}$. 测量前使用标准溶液进行了多点校准,并且确定相关系数高于 0.999 后再开始进样测量.

1.3 测试的固定源信息

本研究选取了国内某超低排放燃煤电厂,该燃煤电厂机组为 $2 \times 1\,000\text{ MW}$ 超超临界凝气式燃煤发电机组,配置 2 台 $3\,033\text{ t}\cdot\text{h}^{-1}$ 超临界变压直流锅炉,具有不低于额定容量 $35\% \sim 100\%$ 的调峰能力,机组年利用小时数 $5\,500\text{ h}$. 同步建设有 SCR 烟气脱硝、电袋除尘器、湿式石灰石膏法烟气脱硫和湿式电除尘器等烟气净化设施. 该机组烟气净化装置流程和实验采样点如图 2 所示.

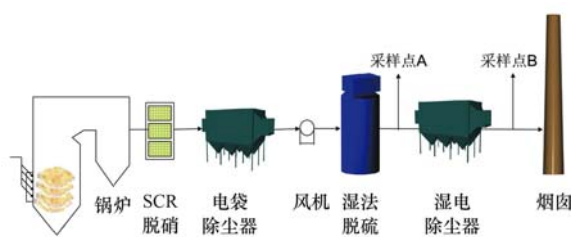


图 2 电厂机组烟气净化装置及采样点示意

Fig. 2 Schematic diagram of power plant unit flue gas purification device and sampling point

为了解该燃煤电厂湿式电除尘装置对颗粒物的排放特性的影响,在湿电除尘器前和烟囱前分别设置了采样点 A 和 B (图 2). 在 75% 和 100% 的锅炉负荷条件下进行了采样,采样过程中锅炉负荷保持稳定,燃煤煤种不变. 燃烧煤种的煤质参数如表 1 所示.

表 1 燃烧煤种基本信息

Table 1 Basic information of coals

项目	ω (全水分) /%	ω (灰分) /%	ω (挥发分) /%	ω (全硫) /%	热值 $/\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$
参数	14.14	15.91	26.80	0.69	21 560

1.4 质量控制

为确保采样结果的准确可靠,采样系统中的 FPM 采样头、冷凝水收集瓶、烧杯和烟气冷凝器等采样仪器在采样前应分别用超纯水和正己烷进行清洗,烘干后使用. CPM 滤膜使用前需置于 300°C 马弗炉内烘烤 1 h 后备用. 采样系统必须经气密性检查,合格后方可开始采样. 称重前需进行实验室分析天平校正程序. 空白滤膜和空白超纯水需进行相同的处理和分析过程,并分别对采样膜和冷凝水样品的质量和离子组分进行校核. 每个采样点需采 3 个平行样,且平行样之间测试结果相对偏差 $\leq 20\%$. 装有采样膜的膜盒、冷凝液、超纯水和正己烷润洗液需放置于低温洁净的冷藏箱中保存,并尽快送实验室进行分析.

2 结果与讨论

2.1 超低排放燃煤电厂中 CPM 的排放水平

图 3 是不同负荷条件下烟气出口处可过滤颗粒

物和可凝结颗粒物排放量. 从中可以看出,在 75% 和 100% 负荷条件下,CPM 的排放量分别是 $27.27\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $28.71\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$; FPM 的排放量为 $4.85\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $3.27\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$. 有研究表明随着负荷的增加,燃煤锅炉生成的颗粒物会随之增加^[15],但本研究的结果显示随着负荷的增加,CPM 的排放量并无明显的变化. 这是因为在不同负荷条件下燃煤电厂的烟气流量会发生变化,烟气净化装置对 CPM 的脱除效率也会随着负荷发生改变,以上因素的共同作用使得 CPM 的排放量并不会随负荷的变化产生较大的差异^[15,16]. 由图 3 可知,在不同负荷条件下烟气出口处 FPM 的排放量均低于 $5\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$,而 CPM 的排放量分别是 FPM 的 5.62 倍和 9.39 倍,远高于 FPM. 这表明经过超低排放改造的电厂烟气中 FPM 的排放量已经达到超低排放要求,但其 CPM 的排放水平依然较高,超过了超低排放要求,CPM 对 TPM 的贡献更加显著,应当加以重视.

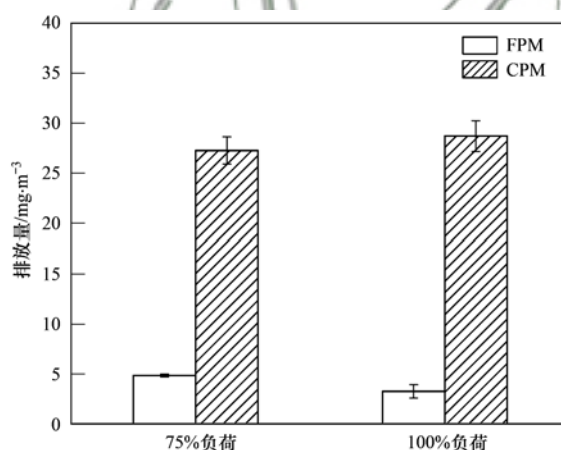


图 3 不同负荷下 WESP 出口处 FPM 和 CPM 的排放量

Fig. 3 Emission concentration of FPM and CPM at the outlet of WESP under different capacities

2.2 WESP 对 CPM 的脱除效率

2.2.1 锅炉负荷对 WESP 脱除 CPM 效率的影响

图 4 是不同负荷条件下 WESP 进口和出口处 CPM 的排放量. 从中可以看出,在 75% 的负荷条件下 WESP 前后 CPM 的排放量分别为 $42.34\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $27.27\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$; 在 100% 负荷条件下 WESP 前后 CPM 的排放量分别为 $40.71\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $28.71\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$. 结果表明, WESP 在 75% 和 100% 负荷下对 CPM 的脱除效率分别为 35.59% 和 27.59% ,在不同负荷条件下 WESP 对 CPM 脱除效率并没有很大的差异,但总体脱除效率都比较低. 这主要是因为 CPM 是以气态的形式存在于烟气中^[17], WESP 对于粒径较大的固态颗粒物具有较高的脱除效率,但对于在经过 WESP 处理的过程中处于气态的 CPM 脱

除效率会相对较差. 在 75% 负荷条件下, WESP 进口和出口处 CPM 有机组分的浓度分别为 $26.38 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $18.34 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$; 无机组分的浓度分别为 $15.70 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $8.92 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$; 在 100% 负荷条件下, WESP 进口和出口处 CPM 有机组分的浓度分别为 $26.29 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $19.76 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$; 无机组分的浓度分别为 $14.42 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $8.95 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$. 相应地, 在 75% 和 100% 负荷条件下 WESP 对 CPM 中有机组分的脱除效率分别为 30.45% 和 24.82%; 而 WESP 对 CPM 中无机组分的脱除效率更为显著, 在 75% 和 100% 负荷条件下分别为 43.16% 和 37.97%. 这可能是因为烟气在 WESP 中一直处于低温高湿的条件, 温度接近 50°C [18], 无机组分更容易在水蒸气存在的情况下发生反应, 生成无机盐类 [19], 从而被 WESP 去除, 而有机组分则更多是以气态的形式存在, 所以去除率较低.

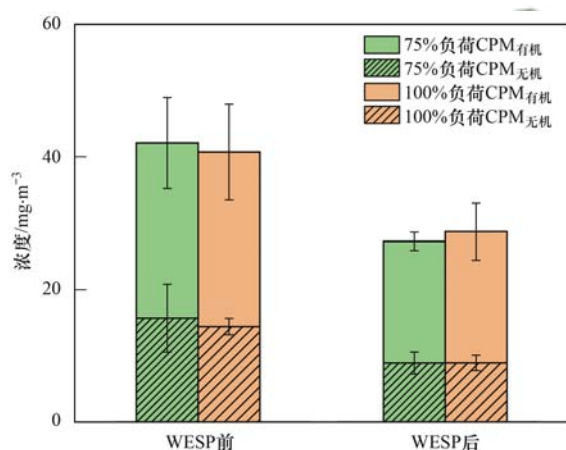


图4 不同负荷下 WESP 进口和出口处 CPM 排放量

Fig. 4 Emission concentration of CPM at the inlet and outlet of WESP under different loads

2.2.2 WESP 对 CPM 中水溶性离子的脱除效率

图 5 是不同负荷下该超低排放电厂排放的 CPM 中水溶性离子组分的质量分数. 从中可以看出两种负荷条件下, SO_4^{2-} 均占据水溶性离子的主要部分, 在 75% 负荷和 100% 负荷条件下排放量分别为 $4.06 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $4.59 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 占水溶性离子总浓度的 67.61% 和 73.14%. 这与文献 [20~22] 的研究结果相近. 在本研究中 F^- 也占有一定的质量分数, 75% 负荷和 100% 负荷下的质量分数分别达到了 18.1% 和 14.1%, 这与 Li [23] 的研究结果相近. 燃煤中的氟经过高温燃烧分解, 少量没有分解的氟残留在炉渣中, 剩余的氟主要以气态形式随着烟气流动 [24], 这也就使得在 CPM 水溶性离子中收集到较多的 F^- .

图 6 是不同负荷下 WESP 前后 CPM 中水溶性离子的浓度. 从中可以看到, 在经过 WESP 之后, 两

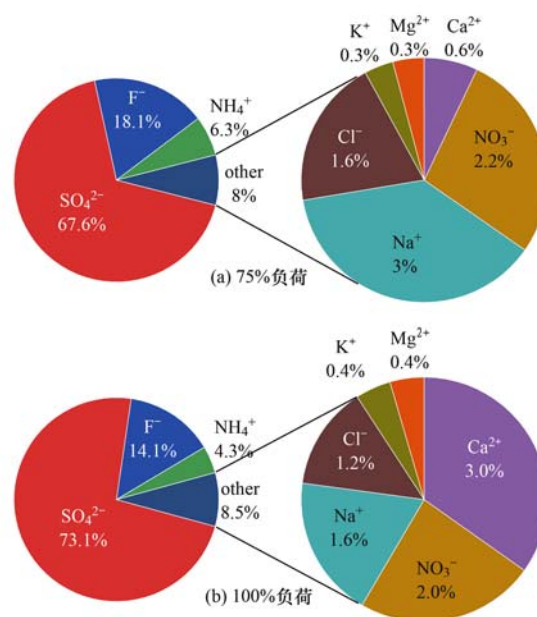


图5 不同负荷下烟气出口处水溶性离子各组分质量分数

Fig. 5 Proportions of water-soluble ions at the outlet of the chimney under different capacities

种负荷条件下 CPM 中大多数水溶性离子的浓度都有所下降, 其中, 75% 负荷条件下, Cl^- 浓度由 $0.25 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 下降到 $0.07 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$; 100% 负荷条件下 Cl^- 浓度由 $0.28 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 下降到 $0.07 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 脱除效率分别达到 73.0% 和 74.2%. 这可能是由于含氯的化合物在煤燃烧的过程中会转化为易挥发的 HCl 气体并随烟气进行迁移 [13], 在 WESP 低温高湿的条件下, 一部分 HCl 气体会和水蒸气发生反应最后在 WESP 中被去除; 同时经过 WESP 之后的烟气温度降低、湿度增加, HCl 气体会发生冷凝从而被 FPM 滤膜所捕集 [20,25], 也会使得 CPM 中的 Cl^- 浓度减少. WESP 对于 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Na^+ 等其他无机离子也有 30%~50% 的脱除效率. 主要是因为这 4 种阳离子均来源于 $\text{PM}_{0.3}$ [26], WESP 通过施加高压电场可以使粉尘荷电, 一部分 $\text{PM}_{0.3}$ 在荷电之后被捕集, 从而使得这 4 种阳离子被去除. NH_4^+ 浓度由 $0.32 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 降低到 $0.27 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 脱除效率只有 16.12%, 这主要是因为 NH_4^+ 主要前体物是烟气中的 NH_3 , WESP 对气态的 NH_3 并没有很好的脱除效率 [27]. 此外, 在两种负荷条件下烟气经过 WESP 后, CPM 中的水溶性离子 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 的浓度都有所增加, 与前人的研究结果一致 [20,28]. 这主要是因为 WESP 电晕放电时会产生一些活性物质, 这些活性物质的存在会将烟气中的 NO 和 SO_2 氧化成 NO_2 和 SO_3 [29], 并且 WESP 前后的温度均低于 200°C , SO_3 在这种条件下会进一步转化形成 H_2SO_4 气溶胶 [30], 从而导致这两种水溶性离子在经过 WESP 之后浓度

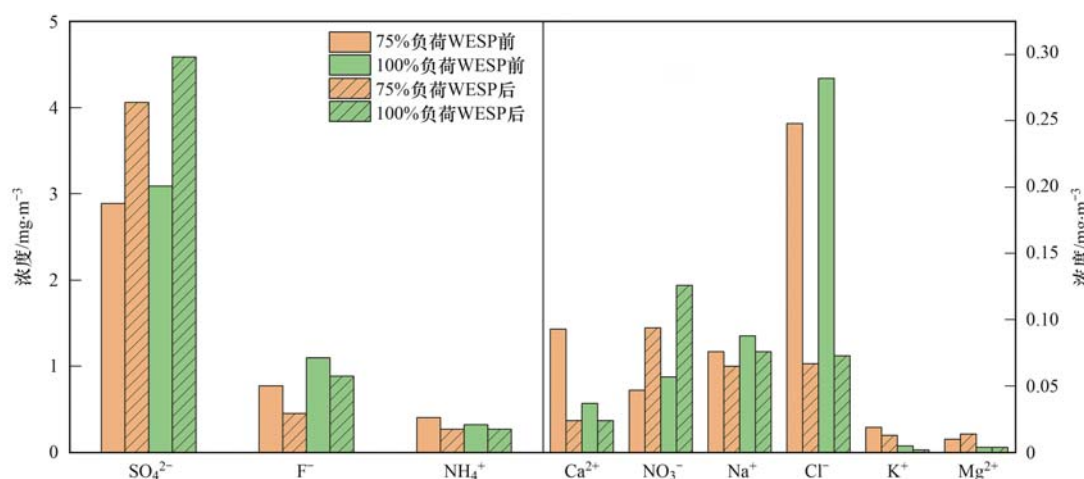


图6 不同负荷下WESP进口和出口处CPM中水溶性离子浓度

Fig. 6 Concentration of water-soluble ion mass concentrations from CPM at the inlet and outlet of WSEP under different capacities

的增加。

3 结论

(1)在超低排放电厂中,随着锅炉负荷的增加,烟气中FPM和CPM的排放量均减少,CPM在TPM中占比增加。在75%负荷和100%负荷条件下,CPM的排放量分别是 $27.27 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $28.71 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,分别为FPM的5.62倍和9.39倍。

(2) SO_4^{2-} 是燃煤电厂排放CPM中主要的水溶性离子,在75%负荷和100%负荷的条件下,分别占CPM中水溶性离子的67.61%和73.14%;而 F^- 分别占18.1%和14.1%;其他离子仅占CPM的水溶性离子组分不到20%。

(3)该超低排放电厂在75%和100%负荷下,WESP对CPM的脱除效率分别为35.59%和27.59%。WESP对于 Cl^- 的脱除效率可以达到73%,对 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Na^+ 等无机离子脱除效率可以达到30%~50%。但CPM中 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 浓度经WESP后略有增加。

参考文献:

- [1] 朱法华,李军状.我国燃煤电厂 SO_3 和可凝结颗粒物控制存在问题与建议[J].环境影响评价,2019,41(3):1-5.
Zhu F H, Li J Z. Questions and suggestions on the control of SO_3 and condensable particulate matter from coal-fired power plants in China[J]. Environmental Impact Assessment, 2019, 41(3): 1-5.
- [2] 朱法华.超低排放:国家专项行动下的技术突破[J].中国电力,2017,50(3):9-10.
- [3] 史文峥,杨萌萌,张绪辉,等.燃煤电厂超低排放技术路线与协同脱除[J].中国电机工程学报,2016,36(16):4308-4318.
Shi W Z, Yang M M, Zhang X H, et al. Ultra-low emission technical route of coal-fired power plants and the cooperative removal[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(16): 4308-4318.
- [4] 朱法华,张静怡,徐振.我国工业烟气治理现状、困境及建

议[J].中国环保产业,2020,(10):13-16.

- Zhu F H, Zhang J Y, Xu Z. Current situation and predicament of China's industrial flue gas treatment and relevant suggestions [J]. China Environmental Protection Industry, 2020, (10): 13-16.
- [5] 李博,王卫良,姚宣,等.煤电减排对中国大气污染物排放控制的影响研究[J].中国电力,2019,52(1):110-117.
Li B, Wang W L, Yao X, et al. Study on the effects of emission reduction in coal-fired power industry on China's air pollutant emission control[J]. Electric Power, 2019, 52(1): 110-117.
- [6] Huang R T, Wu H, Yang L J. Investigation on condensable particulate matter emission characteristics in wet ammonia-based desulfurization system[J]. Journal of Environmental Sciences, 2020, 92(6): 95-105.
- [7] 毛节泰,张军华,王美华.中国大气气溶胶研究综述[J].气象学报,2002,60(5):625-634.
Mao J T, Zhang J H, Wang M H. Summary comment on research of atmospheric aerosol in China[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2002, 60(5): 625-634.
- [8] 裴冰.固定源排气中可凝结颗粒物排放与测试探讨[J].中国环境监测,2010,26(6):9-12.
Pei B. Discussion on the emission issues and testing of condensable particulate matter from exhaust gas of stationary source[J]. Environmental Monitoring in China, 2010, 26(6): 9-12.
- [9] 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.
- [10] Song J W, Lu S Y, Wu Y J, et al. Migration and distribution characteristics of organic and inorganic fractions in condensable particulate matter emitted from an ultralow emission coal-fired power plant[J]. Chemosphere, 2020, 243, doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.125346.
- [11] Li J W, Li X D, Li M, et al. Influence of air pollution control devices on the polycyclic aromatic hydrocarbon distribution in flue gas from an ultralow-emission coal-fired power plant[J]. Energy & Fuels, 2016, 30(11): 9572-9579.
- [12] Yuan C, Wang Z W, Cheng H R, et al. Characteristics of water-soluble ions in condensable particulate matter emitted from stationary sources in Wuhan[J]. Fuel, 2021, 295, doi: 10.

- 1016/j. fuel. 2021. 120626.
- [13] Wang K H, Yang L, Li J Z, *et al.* Characteristics of condensable particulate matter before and after wet flue gas desulfurization and wet electrostatic precipitator from ultra-low emission coal-fired power plants in China[J]. *Fuel*, 2020, **278**, doi: 10.1016/j. fuel. 2020. 118206.
- [14] Wu Y J, Xu Z Y, Liu S Q, *et al.* Emission characteristics of PM_{2.5} and components of condensable particulate matter from coal-fired industrial plants [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **796**, doi: 10.1016/j. scitotenv. 2021. 148782.
- [15] 李洋, 罗林, 吴建群, 等. 1000 MW 燃煤机组负荷变化对颗粒物排放的影响规律[J]. *洁净煤技术*, 2021, **27**(6): 1-7.
Li Y, Wu L, Wu J Q, *et al.* Impact of load change on PM emission from an 1000 MW coal-fired unit [J]. *Clean Coal Technology*, 2021, **27**(6): 1-7.
- [16] 马达夫, 张守玉, 何翔, 等. 煤粉锅炉超低负荷运行的技术问题和应对措施[J]. *动力工程学报*, 2019, **39**(10): 784-791, 803.
Ma D F, Zhang S Y, He X, *et al.* Technical problems occurring in ultra-low load operation of pulverized coal-fired boilers and the solutions[J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2019, **39**(10): 784-791, 803.
- [17] 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.
Pei B. Determination and emission of condensable particulate matter from coal-fired power plants[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(5): 1544-1549.
- [18] 邓建国, 王刚, 张莹, 等. 典型超低排放燃煤电厂可凝结颗粒物特征和成因[J]. *环境科学*, 2020, **41**(4): 1589-1593.
Deng J G, Wang G, Zhang Y, *et al.* Characteristics of condensable particulate matter in ultra-low emission coal-fired power plants[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(4): 1589-1593.
- [19] Wang G H, Zhang R Y, Gomez M E, *et al.* Persistent sulfate formation from London fog to Chinese haze[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, **113**(48): 13630-13635.
- [20] 祁建民, 孙和泰, 黄治军, 等. 超低排放燃煤电厂 SO₃ 和可凝结颗粒物迁移规律研究[J]. *热力发电*, 2021, **50**(4): 72-77.
Qi J M, Sun H T, Huang Z J, *et al.* Migration characteristics of SO₃ and condensable particulate matters in ultra-low emission coal-fired power plants[J]. *Thermal Power Generation*, 2021, **50**(4): 72-77.
- [21] 胡月琪, 王铮, 郭建辉, 等. 超低排放典型燃烧源颗粒物及水溶性离子排放水平与特征[J]. *环境科学*, 2021, **42**(5): 2159-2168.
Hu Y Q, Wang Z, Guo J H, *et al.* Emission concentration and characteristics of particulate matter and water-soluble ions in exhaust gas of typical combustion sources with ultra-low emission [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(5): 2159-2168.
- [22] Li J W, Qi Z F, Li M, *et al.* Physical and chemical characteristics of condensable particulate matter from an ultralow-emission coal-fired power plant[J]. *Energy & Fuels*, 2017, **31**(2): 1778-1785.
- [23] 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.
- [24] 王广猛. 燃煤电厂中氟的赋存状态及迁移特性[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
- [25] Peng Y, Shi N, Wang T, *et al.* Investigating the effect of flue gas temperature and excess air coefficient on the size distribution of condensable particulate matters[J]. *Fuel*, 2021, **298**: doi: 10.1016/j. fuel. 2021. 120866.
- [26] Yu D X, Xu M H, Yao H, *et al.* Use of elemental size distributions in identifying particle formation modes [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2007, **31**(2): 1921-1928.
- [27] 杨柳, 张斌, 王康慧, 等. 超低排放路线下燃煤烟气可凝结颗粒物在 WFGD、WESP 中的转化特性[J]. *环境科学*, 2019, **40**(1): 121-125.
Yang L, Zhang B, Wang K H, *et al.* Conversion characteristics of combustible particles from coal-fired flue gas in WFGD and WESP[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(1): 121-125.
- [28] 杨柳, 何晴, 盛重义. 燃煤电厂颗粒物中硫酸根与硝酸根离子的转化规律[J]. *环境科学*, 2021, **42**(10): 4678-4686.
Yang L, He Q, Sheng Z Y. Conversion characterizations of sulfate ion and nitrate ion in particulate matters from coal-fired power plants[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(10): 4678-4686.
- [29] Mok Y S, Nam I S. Modeling of pulsed corona discharge process for the removal of nitric oxide and sulfur dioxide[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2002, **85**(1): 87-97.
- [30] Zheng C H, Wang Y F, Liu Y, *et al.* Formation, transformation, measurement, and control of SO₃ in coal-fired power plants[J]. *Fuel*, 2019, **241**: 327-346.

CONTENTS

Analysis on Spatial-temporal Characteristics and Driving Factors of PM _{2.5} in Henan Province from 2015 to 2019	GE Qi-xu, LIU Yan, YANG Hong, <i>et al.</i>	(1697)
Pollution Characterization, Source Identification, and Health Risks of Atmospheric Particle-Bound Heavy Metals in PM _{2.5} in Zhengzhou City: Based on High-resolution Data	QU Guang-hui, SUN Jun-ping, WANG Shen-bo, <i>et al.</i>	(1706)
Source Analysis and Composition Characteristics of Water-soluble Ions During Spring Festival in Ningbo	YANG Meng-rong, PAN Yong, HUANG Zhong-wen, <i>et al.</i>	(1716)
Characteristics of Nitroaromatic Compounds in PM _{2.5} in Urban Area of Shanghai	ZHUANG Min, MA Ying-ge, CHENG Yu-huang, <i>et al.</i>	(1725)
Characteristics and Sources of Nitrated Phenols in Atmospheric Fine Particles of Northern Suburban Nanjing	CHEN Mei-juan, QIAN Zi-he, GU Chen-juan, <i>et al.</i>	(1738)
Variety of the Composition and Sources of VOCs During the Spring Festival and Epidemic Prevention in the Pearl River Delta	JIANG Ming, YUAN Luan, WEN Li-rong, <i>et al.</i>	(1747)
Speciated Emission Inventory of VOCs from Industrial Sources and Their Ozone Formation Potential in Chongqing	LI Ling, LI Zhen-liang, FANG Wei-kai, <i>et al.</i>	(1756)
Volatile Organic Compound Emission Characteristics and Influences Assessment of a Petrochemical Industrial Park in the Pearl River Delta Region	ZHANG Xue-chi, SHA Qing-e, LU Meng-hua, <i>et al.</i>	(1766)
Characteristics and Source Apportionment of Vehicular VOCs Emissions in a Tunnel Study	LIU Xin-hui, ZHU Ren-cheng, JIN Bo-qiang, <i>et al.</i>	(1777)
Accurate Identification of Pollution Sources in a Chemical Enterprise Based on a Distributed Multi-channel VOCs Online Monitoring Mass Spectrometry System	WEI Xiao, ZHANG Yong-jie, WANG Pei-tao, <i>et al.</i>	(1788)
Coordinated Control of PM _{2.5} and O ₃ in Hangzhou Based on SOA and O ₃ Formation Potential	LIN Xu, YAN Ren-chang, JIN Jia-jia, <i>et al.</i>	(1799)
Effect of WESP on Emission Characteristics of Condensable Particulate Matter from Ultra-low Emission Coal-fired Power Plants	WANG Peng-cheng, YUAN Chang, LIANG Sheng-wen, <i>et al.</i>	(1808)
Measurement Analysis and Superposed Effect of Residential Indoor Air Pollutants in Xi'an	WANG Xiu-ru, FAN Hao, FAN Jie, <i>et al.</i>	(1814)
Occurrence of Atmospheric (Micro)plastics and the Characteristics of the Plastic Associated Biofilms in the Coastal Zone of Dalian in Summer and Autumn	TU Chen, TIAN Yuan, LIU Ying, <i>et al.</i>	(1821)
Spatiotemporal Distribution of Ammonia Emissions from Poultry Farming in the Yangtze River Delta Based on Online Monitoring Derived Local Emission Factors	GAO Zong-yuan, XU Chang, NI Yuan-zhi, <i>et al.</i>	(1829)
Agricultural Ammonia Emission Inventory and Its Distribution in Xining City	YANG Yi, JI Ya-qin, GAO Yu-zong, <i>et al.</i>	(1844)
Analysis of the Urban Water Eco-environment Protection Strategy in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from "Three Waters" Overall Planning	LIAO Ya, HOU Xiao-shu, REN Xiao-hong	(1853)
Non-carcinogenic Risk Assessment of Cadmium Exposure Through Drinking Water in Chinese Residents Based on Age-stratification Weight	QIN Ning, Ayibota Tuexunbieke, LIU Yun-wei, <i>et al.</i>	(1863)
Hydrochemical Characteristics and Transformation Relationship of Surface Water and Groundwater in the Plain Area of Bortala River Basin, Xinjiang	LEI Mi, ZHOU Jin-long, ZHANG Jie, <i>et al.</i>	(1873)
Hydrochemical Composition Characteristics and Control Factors of Xiaohuangni River Basin in the Upper Pearl River	TU Chun-lin, YIN Lin-hu, HE Cheng-zhong, <i>et al.</i>	(1885)
Temporal and Spatial Variation Characteristics and Driving Factors of Nitrogen of Shallow Groundwater in Hetao Irrigation District	YUAN Hong-ying, YANG Shu-qing, ZHANG Wan-feng, <i>et al.</i>	(1898)
Provenance of Groundwater Solute and Its Controlling Factors in Yancheng Area	WANG Jian, ZHANG Hua-bing, XU Jun-li, <i>et al.</i>	(1908)
Hydrogen and Oxygen Isotopic Characteristics of Different Water and Indicative Significance in Baiyangdian Lake	WANG Yu-shan, YIN De-chao, QI Xiao-fan, <i>et al.</i>	(1920)
Optical Composition and Potential Driving Factors of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Large Lakes and Reservoirs in the Eastern Region of China	CHEN Li-li, XIAO Qi-tao, YU Xiao-qin, <i>et al.</i>	(1930)
Fluorescence Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter in Songhua Lake Sediment	CHENG Yun-xuan, ZHAO Ke, ZHANG Yue, <i>et al.</i>	(1941)
Abundance and Fluorescent Components of Dissolved Organic Matter Affected by Land Use in a Drinking Water Source	GAO Jing, PU Xiao, ZHANG Yu-hu, <i>et al.</i>	(1950)
Emission of Methane from a Key Lake in the Eastern Route of the South-to-North Water Transfer Project and the Corresponding Driving Factors	ZHU Jun-yu, PENG Kai, LI Yu-yang, <i>et al.</i>	(1958)
Distribution Characteristics and Ecological and Health Risk Assessment of Phthalic Acid Esters in Surface Water of Qiandao Lake, China	MI Qi-xin, GUO Xiao-chun, LU Shao-yong, <i>et al.</i>	(1966)
Phosphorus Adsorption Characteristics and Loss Risk in Sediments of Lake Bay During the Overwinter Period of Cyanobacteria	JIN Zheng-hai, TU Cheng-qi, WANG Shu-hang, <i>et al.</i>	(1976)
Ecological Quality Assessment of the Wetlands in Beijing: Based on Plant Diversity	LI Guo, SUN Guang, ZHAO Zi-yi, <i>et al.</i>	(1988)
Effects of Pollution Control of Xiaqing River on Environment Factors and Phytoplankton Community in the Laizhou Bay	ZHANG Jing-jing, WANG Yu-jue, LI Fan, <i>et al.</i>	(1997)
Effects of Different Aeration Treatments on Bacterial Diversity, Metabolic Activity, and Function in Constructed Wetlands	WANG Fei-peng, HUANG Ya-ling, ZHANG Rui-rui, <i>et al.</i>	(2007)
Analysis on the Source Tracing and Pollution Characteristics of Rainfall Runoff in the Old Urban Area of Nanning City	YUE Zhen-wu, LI Yi-ping, ZHOU Yu-xuan, <i>et al.</i>	(2018)
Effects of Aging on the Cd Adsorption by Microplastics and the Relevant Mechanisms	WANG Jun-jie, CHEN Xiao-chen, LI Qian-da, <i>et al.</i>	(2030)
Carbonized Foam Supported Co ₃ O ₄ Activated Peroxymonosulfate Towards Rhodamine B Degradation	WANG Yuan-yuan, YAN Xin, AI Tao, <i>et al.</i>	(2039)
Promoting Nitrogen Removal in ANAMMOX Biofilm Reactor by Fe ²⁺ Under Low Nitrogen Concentration	ZHENG Xu-wen, QIN Jia-fu, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i>	(2047)
Investigation on Oxygen Gas-liquid Mass Transfer in Sewage Pipelines Under Enhanced Ventilation	YANG Zhou, ZHANG Zhi-qiang, YANG Jing, <i>et al.</i>	(2055)
Characteristics and Assessment of Heavy Metal Contamination in Soils of Industrial Regions in the Yangtze River Economic Belt	ZHANG Yi, ZHOU Xin-quan, ZENG Xian-min, <i>et al.</i>	(2062)
Distribution and Environmental Significance of Rare Earth Elements in Typical Protected Vegetable Soil, Northern China	WANG Zu-wei, LIU Ya-ming, WANG Zi-lu, <i>et al.</i>	(2071)
Sources Identification, Ecological Risk Assessment, and Controlling Factors of Potentially Toxic Elements in Typical Lead-Zinc Mine Area, Guizhou Province, Southwest China	ZHANG Fu-gui, PENG Min, HE Ling, <i>et al.</i>	(2081)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in Soils Affected by Different Land Use Types in a Superimposed Pollution Area with High Geological Background	WANG Xue-wen, LIU Hong-yan, GU Xiao-feng, <i>et al.</i>	(2094)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in Farmland Soils Around Mining Areas and Pollution Assessment	WANG Hai-yang, HAN Ling, XIE Dan-ni, <i>et al.</i>	(2104)
Concentration Characteristics of Heavy Metals in Farmland-Sphagnum System and Ecological Risk Assessment	ZHU Di, ZHANG Zhao-hui, WANG Zhi-hui	(2115)
Spatial Variation and Influencing Factors of Soil pH in Anshun City	CHEN Qing-xia, LU Xiao-hui, TU Cheng-long	(2124)
Synergistic Repair Effect of Calcite-Based Passivator and Low-Accumulation Maize	REN Chao, REN Yu-zhong, LI Jing-tian, <i>et al.</i>	(2133)
Effects of <i>Burkholderia</i> sp. Y4 on Cadmium Damage and Uptake in Rice Seedlings	ZHANG Ya-hui, LIU Yue-min, WANG Chang-rong, <i>et al.</i>	(2142)
Changing Characteristics of Carbon-Based Greenhouse Gas Fluxes in Paddy Field in the Middle-Lower Yangtze Plain in China	LIU Shuo, ZHEN Xiao-jie, LIU Gang, <i>et al.</i>	(2151)
Effects of Plastic Film Mulching and Biochar Application on N ₂ O Emission from a Vegetable Field	HU Jian, JIANG Chang-sheng, CHEN Xin-tong, <i>et al.</i>	(2163)
Effects of Nitrogen Fertilizer Management on CH ₄ and N ₂ O Emissions in Paddy Field	ZHENG Mei-qun, LIU Juan, JIANG Pei-kun, <i>et al.</i>	(2171)
Structure and Functional Diversity of Bacterial Community in Rhizosphere Soil of Typical Vegetation in the Riparian Zone Along the Downstream of Songhua River	WANG Lu-ying, SUN Hui-zhen, YANG Xue	(2182)
Effects of Cotton Stalk Returning on Soil Enzyme Activity and Bacterial Community Structure Diversity in Cotton Field with Long-term Saline Water Irrigation	ZHOU Yong-xue, CHEN Jing, LI Yuan, <i>et al.</i>	(2192)
Effect of pH on the Abundance and Community Structure of Comammox <i>Nitrospira</i> in Paddy Soils	MA Rui, ZHAO Yong-peng, WANG Zhi-hui, <i>et al.</i>	(2204)
Effects of Biochar on Soil Organic Carbon of Eroded Cultivated Layer of Slope Farmland in Purple Hilly Area	ZHANG Jian-le, ZENG Xiao-ying, SHI Dong-mei, <i>et al.</i>	(2209)
Effects of Organic Fertilizer Replacing Chemical Fertilizer on Organic Carbon Mineralization and Active Organic Carbon in Dryland Yellow Soil	LIN Shi-fang, WANG Xiao-li, DUAN Jian-jun, <i>et al.</i>	(2219)
Soil Organic Carbon Storage, Active Component Contents, and Stability Along a Flooding Gradient in the Tidal Wetland of the Jiulong River Estuary	HUANG Xiao-qing, TONG Chuan, LUO Min, <i>et al.</i>	(2226)
System Construction and the Function Improvement of Ecological Carbon Sink in Coal Mining Areas Under the Carbon Neutral Strategy	LIU Xiang-hong, YAN Yong-jun, LIU Wei, <i>et al.</i>	(2237)