

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

基于高分影像的城市水体遥感综合分级方法

杨子谦, 刘怀庆, 吕恒, 李云梅, 朱利, 周亚明, 李玲玲, 毕顺



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年5月

第42卷 第5期
Vol.42 No.5

目次

北京冬季 PM _{2.5} 中有机气溶胶的化学特征和来源解析	徐楠, 王甜甜, 李晓, 唐荣志, 郭松, 胡敏 (2101)
北京地区 2019 年 2~3 月供暖结束后两次污染过程特征分析	尹晓梅, 蒲维维, 王继康, 刘湘雪, 乔林 (2110)
北京 2019 年冬季一次典型霾污染特征与成因分析	廉涵阳, 杨欣, 张普, 陈义珍, 杨小阳, 赵好希, 何友江, 赵丹婷 (2121)
青岛沿海地区夏季和冬季新粒子生成特征对比	孙悦, 朱玉姣, 孟赫, 刘兵, 刘玉虹, 董灿, 姚小红, 王文兴, 薛丽坤 (2133)
太原市城乡居民采暖季室内灰尘中重金属的污染特征及其生态风险评价	黄浩, 徐子琪, 严俊霞, 赵秀阁, 王丹璐 (2143)
西安市新装修公共场所空气污染物浓度分析及健康风险评价	范洁, 樊灏, 沈振兴, 党文鹏, 郑伟, 王志华, 付毅 (2153)
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	胡月琪, 王铮, 郭建辉, 冯亚君, 丁萌萌, 颜旭 (2159)
合肥市夏季大气颗粒物中微生物群落的高通量测序分析	姜少毅, 孙博文, 代海涛, 王润芳, 马大卫, 朱仁斌 (2169)
郑州市细颗粒物时空差异及管控措施影响	董喆, 袁明浩, 苏方成, 张剑飞, 孙佳葆, 张瑞芹 (2179)
2016~2019 年江西省臭氧污染特征与气象因子影响分析	钱悦, 许彬, 夏玲君, 陈燕玲, 邓力琛, 王欢, 张根 (2190)
天山北坡城市群气溶胶光学特性时空分布特征	张喆, 王建丽, 王瑾杰, 陈香月, 刘兴涛, 阿提干·吾斯曼 (2202)
基于高分影像的城市水体遥感综合分级方法	杨子谦, 刘怀庆, 吕恒, 李云梅, 朱利, 周亚明, 李玲玲, 毕顺 (2213)
太湖水体 Chl-a 预测模型 ARIMA 的构建及应用优化	李娜, 李勇, 冯家成, 单雅洁, 钱佳宁 (2223)
松花湖水水质空间差异及富营养化空间自相关分析	丁洋, 赵进勇, 张晶, 付意成, 彭文启, 陈渠昌, 李艳艳 (2232)
会仙岩溶湿地丰平枯水期地表水污染及灌溉适用性评价	朱丹尼, 邹胜章, 李军, 樊连杰, 赵一, 谢浩, 朱天龙, 潘民强, 徐利 (2240)
京杭大运河中下游段天然水化学变化特征及驱动因素	程中华, 邓义祥, 卓小可, 代丹, 于涛 (2251)
次降雨过程中不同土地利用配置对径流中氮流失的影响	罗义峰, 陈方鑫, 周豪, 龙翼, 严冬春, 谭文浩, 李丹丹, 陈晓燕 (2260)
碳氮同位素解析典型岩溶流域地下水中硝酸盐来源与归趋	任坤, 潘晓东, 梁嘉鹏, 彭聪, 曾洁 (2268)
冰封状态下里湖冰-水中浮游细菌群落结构差异	李文宝, 杨旭, 田雅楠, 杜蕾 (2276)
城市再生水河道沉积物细菌群落空间变化分析: 以京津冀北运河为例	邱莹, 靳燕, 苏振华, 邱琰茗, 赵栋梁, 郭道宇 (2287)
太湖春夏两季反硝化与厌氧氨氧化速率的空间差异及其影响因素	赵锋, 许海, 詹旭, 朱广伟, 郭宇龙, 康丽娟, 朱梦圆 (2296)
三峡库区典型支流水库浮游动植物群落结构特征及其与环境因子的关系	陈莎, 谢青, 付梅, 江韬, 王永敏, 王定勇 (2303)
铁硫改性生物炭去除水中的磷	桑倩倩, 王芳君, 赵元添, 周强, 蔡雨麒, 邓颖, 田文清, 陈永志, 马娟 (2313)
钢渣对水体中磷的去除性能及机制解析	罗晓, 张峻搏, 何磊, 杨雪晶, 吕鹏翼 (2324)
BS-18 两性修饰膨润土对四环素和诺氟沙星复合污染的吸附	王新欣, 孟昭福, 刘欣, 王腾, 胡啸龙, 孙秀贤 (2334)
Ag ₃ PO ₄ /g-C ₃ N ₄ 复合光催化剂的制备及其可见光催化性能	高闯闯, 刘海成, 孟无霜, 郝双玲, 薛婷婷, 陈国栋, Joseph Acquah (2343)
可见光驱动下罗丹明 B 自活化过硫酸盐降解双酚 A	张怡晨, 白雪, 石娟, 金鹏康 (2353)
铁钛共掺杂氧化铝诱导表面双反应中心催化臭氧氧化去除水中污染物	张帆, 宋阳, 胡春, 吕来 (2360)
硫化铁铜双金属复合材料的制备及除铬机制	屈敏, 王源, 陈辉霞, 王兴润, 徐红彬 (2370)
电催化-生物电化学耦合系统处理青霉素废水的机制	曲有鹏, 吕江维, 董跃, 冯玉杰, 张杰 (2378)
缺氧/好氧交替连续流的生活污水好氧颗粒污泥运行及污染物去除机制	李冬, 杨敬畏, 李悦, 李帅, 张诗睿, 王文强, 张杰 (2385)
反硝化除磷污泥聚集体内原位除磷活性及有机物浓度的影响	吕永涛, 姜晓童, 徒彦, 王旭东, 潘永宝, 刘爽, 崔双科, 王磊 (2396)
基于臭氧旁路处理的污泥原位减量技术工艺	薛冰, 刘宾寒, 韦婷婷, 王先恺, 陈思思, 董滨 (2402)
活性炭对城市有机固废厌氧消化过程抗生素抗性基因行为特征的影响	马佳莹, 王盼亮, 汪冰寒, 苏应龙, 谢冰 (2413)
6 种农业废弃物初期碳源及溶解性有机物释放机制	凌宇, 闫国凯, 王海燕, 董伟羊, 王欢, 常洋, 李丛宇 (2422)
中国典型农田土壤有机碳密度的空间分异及影响因素	李成, 王让会, 李兆哲, 徐扬 (2432)
不同水分条件和微生物生物量水平下水稻土有机碳矿化及其影响因子特征	刘琪, 李宇虹, 李哲, 魏晓梦, 祝贞科, 吴金水, 葛体达 (2440)
青藏高原林地土壤的氮转化特征及其影响因素分析: 以祁连山和藏东南地区为例	何芳, 张丽梅, 申聪聪, 陈金全, 刘四义 (2449)
基于物元可拓模型的兰州市主城区公园表土重金属污染评价	胡梦琨, 李春艳, 李娜娜, 吉天琪, 郑登友 (2457)
长期施用化肥和有机肥对稻田土壤重金属及其有效性的影响	夏文建, 张丽芳, 刘增兵, 张文学, 蓝贤瑾, 刘秀梅, 刘佳, 刘光荣, 李祖章, 王萍 (2469)
川南山区土壤与农作物重金属特征及成因	韩伟, 王成文, 彭敏, 王乔林, 杨帆, 徐仁廷 (2480)
宁东能源化工基地核心区表层土壤中多环芳烃的空间分布特征、源解析及风险评价	杨帆, 罗红雪, 钟艳霞, 王幼奇, 白一茹 (2490)
重金属钝化剂阻控生菜 Cd 吸收的功能稳定性和适用性	庞发虎, 吴雪姣, 孔雪菲, 曾宪, 王晓宇, 陈兆进, 姚伦广, 韩辉 (2502)
典型污染稻田水分管理对水稻镉累积的影响	张雨婷, 田应兵, 黄道友, 张泉, 许超, 朱捍华, 朱奇宏 (2512)
油茶果壳改性生物炭吸附性能及其耦合淹水对土壤 Cd 形态影响	蔡彤, 杜辉辉, 刘孝利, 铁柏清, 杨宇 (2522)
土地利用变化对松花江下游湿地土壤真菌群落结构及功能的影响	徐飞, 张拓, 怀宝东, 隋文志, 杨雪 (2531)
渔业复垦塌陷地抗生素抗性基因与微生物群落	程森, 路平, 冯启言 (2541)
3 种常用除草剂对细菌抗生素耐药性的影响	李曦, 廖汉鹏, 崔鹏, 白玉丹, 刘晨, 文畅, 周顺桂 (2550)
污水再生利用微生物控制标准及其制定方法探讨	陈卓, 崔琦, 曹可凡, 陆韻, 巫寅虎, 胡洪营 (2558)
《环境科学》征订启事 (2439) 《环境科学》征稿简则 (2479) 信息 (2152, 2231, 2286)	

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

胡月琪^{1,2}, 王铮^{1,2}, 郭建辉^{1,2}, 冯亚君^{1,2}, 丁萌萌^{1,2}, 颜旭^{1,2}

(1. 北京市生态环境监测中心, 北京 100048; 2. 大气颗粒物监测技术北京市重点实验室, 北京 100048)

摘要: 研究以自行开发建立的超低排放高湿废气中总颗粒物(total particulate matter, TPM)的直接冷凝采样系统及监测方法, 应用于3台北京市超低排放典型燃烧源烟气中颗粒物的排放监测. 分析和评估超低排放典型燃烧源排气中颗粒物及其水溶性离子的排放水平与组成特征, 探究可过滤颗粒物(filterable particulate matter, FPM)和可凝聚颗粒物(condensable particulate matter, CPM)及其水溶性离子的相互作用与影响因素. 结果表明: 北京市超低排放燃煤锅炉 FPM 基准氧含量排放浓度介于 $1.04 \sim 1.11 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 之间, TPM 基准氧含量排放浓度介于 $3.82 \sim 8.69 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 之间, 均满足国家超低排放颗粒物限值要求($10 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$), 燃煤电厂 TPM 排放浓度超过了北京市颗粒物排放标准限值要求($5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$). 燃煤供暖锅炉 CPM 及其总水溶性离子排放水平分别为 $3.05 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $1.30 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 显著低于燃煤电厂, 与燃煤电厂的负荷和烟温较高有关; 燃煤电厂锅炉 CPM 及其总水溶性离子排放浓度分别是燃煤供暖锅炉的 2.2 ~ 2.4 倍和 1.7 ~ 2.2 倍. 燃气电厂 TPM 及其总水溶性离子排放水平分别为 $1.99 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $1.44 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 均明显低于燃煤锅炉. CPM 是燃烧源排气中颗粒物的主要形式, 在超低排放锅炉烟气中 CPM 对 TPM 的质量贡献显著增加, 并随烟温的升高而增加, 燃煤锅炉为 72.6% ~ 88.1%, 燃气电厂为 93.1%, 且水溶性离子总量的 66.1% ~ 94.2% 存在于 CPM 中. 排气烟温显著影响颗粒物及其水溶性离子的赋存形态、脱除效率与排放水平. SO_4^{2-} 是燃煤锅炉颗粒物的主要特征离子, 排放浓度介于 $0.98 \sim 1.18 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 占水溶性离子排放总量的 27.7% ~ 49.6%, 来源于烟气脱硫; F^- 是燃煤电厂颗粒物中又一主要特征离子, 排放浓度介于 $1.91 \sim 2.32 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 占水溶性离子排放总量的 54.4% ~ 56.1%, 可能与燃料煤含氟量高有关; NH_4^+ 是燃气电厂颗粒物的主要特征离子, 排放浓度为 $0.92 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 占水溶性离子排放总量的 64.2%, 来源于选择性催化还原法(selective catalytic reduction, SCR)脱硝过程中的 NH_3 逃逸, 其排放浓度显著高于燃煤锅炉, 可能与燃气电厂缺少其它净化设施的协同去除效应有关.

关键词: 超低排放; 燃烧源; 可凝聚颗粒物(CPM); 水溶性离子; 排放水平与特征

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)05-2159-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202010137

Emission Concentration and Characteristics of Particulate Matter and Water-Soluble Ions in Exhaust Gas of Typical Combustion Sources with Ultra-Low Emission

HU Yue-qi^{1,2}, WANG Zheng^{1,2}, GUO Jian-hui^{1,2}, FENG Ya-jun^{1,2}, DING Meng-meng^{1,2}, YAN Xu^{1,2}

(1. Beijing Municipal Ecological and Environmental Monitoring Center, Beijing 100048, China; 2. Beijing Key Laboratory of Airborne Particulate Matter Monitoring Technology, Beijing 100048, China)

Abstract: A self-developed direct condensation sampling system and monitoring method for total particulate matter (TPM) in ultra-low-emission and high-humidity exhaust gas were applied to the emission monitoring of particulate matter in flue gas from three typical combustion sources with ultra-low emissions in Beijing. The emission levels and composition characteristics of particulate matter and water-soluble ions in the exhaust gas of typical combustion sources with ultra-low emissions were analyzed and evaluated. The interaction and influencing factors of filterable particulate matter (FPM) and condensable particulate matter (CPM) and their water-soluble ions were explored. The results showed that the emission concentration of FPM in the exhaust gas of the coal-fired boiler with ultra-low emissions was between $1.04 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ and $1.11 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ in standard smoke oxygen content, and that of TPM was between $3.82 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ and $8.69 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, which all met the national ultra-low emission limit ($10 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$). However, the TPM emission concentration of the coal-fired power plant exceeded the emission limit of Beijing ($5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$). The emission concentrations of CPM and its total water-soluble ions from the coal-fired heating boiler were $3.05 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ and $1.30 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, respectively, which were significantly lower than those of the coal-fired power plant, and were related to the higher load and flue gas temperature of the coal-fired power plant. Furthermore, the emission concentrations of CPM and its total water-soluble ions from the coal-fired power plant boiler were 2.2 to 2.4 times and 1.7 to 2.2 times greater than those of the coal-fired heating boiler, respectively. The emission concentrations of TPM and its total water-soluble ions from the gas power plant were $1.99 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ and $1.44 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, respectively, which were significantly lower than those from the coal-fired boiler. CPM was the main form of particulate matter in the exhaust gas of

收稿日期: 2020-10-21; 修订日期: 2020-10-28

基金项目: 环境保护公益性行业科研专项(20140914); 北京市地方标准制修订项目(20171035); 北京市环境保护监测中心科研项目(2013-015); 北京市科技计划项目(Z121100000312035); 北京市科技重大专项(D171100001517003)

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

the combustion source. The contribution of CPM to TPM in the ultra-low-emission boiler flue gas increased significantly, and increased with the increase in the flue gas temperature, ranging from 72.6% to 88.1% for the coal-fired boiler and 93.1% for the gas power plant. Total water-soluble ions made up 66.1% to 94.2% of the CPM. The flue gas temperature had a significant impact on the existing forms, removal efficiencies, and emission concentrations of particulate matter and water-soluble ions. SO_4^{2-} was the main characteristic water-soluble ion of particulate matter in the coal-fired boiler, and its emission concentration ranged from $0.98 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ to $1.18 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, accounting for 27.7% to 49.6% of the total water-soluble ion emissions, which originated from flue gas desulfurization. F^- was another characteristic water-soluble ion of particulate matter in the coal-fired power plant, and its emission concentration ranged from $1.91 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ to $2.32 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, accounting for 54.4% to 56.1% of the total water-soluble ion emissions, which might have been related to the high F content of fuel coal. NH_4^+ was the main characteristic water-soluble ion of particulate matter in the gas power plant, and its emission concentration was $0.92 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, accounting for 64.2% of the total water-soluble ion emissions, which originated from the escape of NH_3 in the process of selective catalytic reduction. The emission concentration of NH_4^+ was significantly higher than that of the coal-fired boiler; this might have been related to the synergistic removal effect of the gas-fired power plant, which lacked other purification facilities.

Key words: ultra-low emission; combustion source; condensable particulate matter (CPM); water-soluble ion; emission concentration and characteristics

近年来, $\text{PM}_{2.5}$ 已成为城市环境空气质量的首要污染物^[1~3], 其对人类身体健康、大气能见度和局部气候环境造成显著影响^[4~8]. 随着我国环境保护力度的不断加大, 推进了燃烧源烟气超低排放的改造. 燃煤电厂超低排放烟气治理技术普遍采用低氮燃烧 (low NO_x combustion technology, LNB) 与 SCR 脱硝、布袋除尘 (fiber filter, FF) 和静电除尘 (electrostatic precipitator, ESP)、石灰石-石膏湿法脱硫 (wet flue gas desulfurization, WFGD) 与湿式电除尘器 (wet electrostatic precipitator, WESP) 工艺^[9], 工业锅炉也有采用湿法氧化脱硝^[10], 以控制颗粒物、 SO_2 和 NO_x 的排放.

超低排放燃煤锅炉高湿废气中含有大量体积极小的气态有机或无机物质, 排出烟道后, 经过环境空气降温 and 稀释后会直接冷凝或者反应生成大量液态或固态颗粒物, 即 CPM^[11~13]. CPM 是环境空气中 $\text{PM}_{2.5}$ 和气溶胶物质的重要前体物, 也是特定气象条件下雾-霾形成和暴发的重要原因^[13,14]. 国内外学者从不同角度分析研究了燃烧源 CPM 的排放水平及其化学组成与来源^[7,11,13,15~17], 研究多集中于某一种或某一类燃烧源, 主要验证相关采样方法测定 CPM 的排放水平, 缺乏针对不同类型燃烧源 CPM 的排放水平及其化学组成较全面系统的对比分析.

本研究以自行研发建立的基于源环境的超低排

放高湿废气中 TPM 的直接冷凝采样系统及其监测方法^[18,19], 应用于北京市超低排放典型燃烧源高湿废气中 TPM 的排放监测采样. 分别采用重量法测定 FPM 和 CPM 的排放浓度, 采用离子色谱法测定颗粒物样品中的 9 种水溶性离子排放浓度. 分析和评估了超低排放典型燃烧源烟气中颗粒物及其水溶性离子的排放水平与组成特征, 探究了 FPM 和 CPM 及其水溶性离子的相互转化及影响因素. 通过全面和准确评估燃烧源颗粒物及其水溶性离子的排放水平与分布, 以期对相关环境保护管理部门大气污染防治措施效果评估与环境管理决策提供技术支撑和数

1 材料与方法

1.1 研究对象的选择

表 1 所示为本研究现场测试的典型燃烧源基本信息及其烟气组分或参数, 包括北京市 1 台燃煤电厂锅炉、1 台供暖燃煤锅炉和 1 台燃气电厂燃气轮机组, 其中燃煤电厂开展了 2 次监测. 燃煤锅炉烟气均采用了 SCR + FF + WFGD 净化工艺, 电厂燃煤锅炉还采用了 LNB + ESP 净化工艺. 燃气电厂由燃气轮机、余热锅炉、蒸汽轮机和发电机组等相关设备组成的燃气-蒸汽联合循环发电机组, 并采用 LNB + SCR 净化工艺.

表 1 测试锅炉污染防治设施及其运行参数信息¹⁾

Table 1 Information form on the operational parameters and pollution control facilities of the tested boilers¹⁾

测试对象 类型/型号	蒸发量 / $\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$	污染防治设施	负荷 /%	SO_2 / $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	NO_x / $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	O_2 /%	X_{sw} /%	烟温 / $^{\circ}\text{C}$
燃煤电厂 HG670/140-13	670	LNB + SCR + ESP + FF + WFGD	90 *	<3 *	41 *	6.8 *	8.7 ~ 10.5 *	88 *
			95 **	<3 **	59 **	6.7 **	11.2 ~ 11.4 **	89 **
供暖锅炉 QXL70-1.6/130/70-A II	100	SCR + FF + WFGD	70	<3	20	7.8	5.7 ~ 10.6	47
燃气轮机组/M701F4 + 余热 燃气电厂 锅炉 DG303.9/13.58/68.2/ 3.73/44.2/0.68-M105	418	LNB + SCR	95	<3	17	13.9	7.8 ~ 10.8	90

1) * 表示燃煤电厂第一次监测结果; ** 表示燃煤电厂第二次监测结果

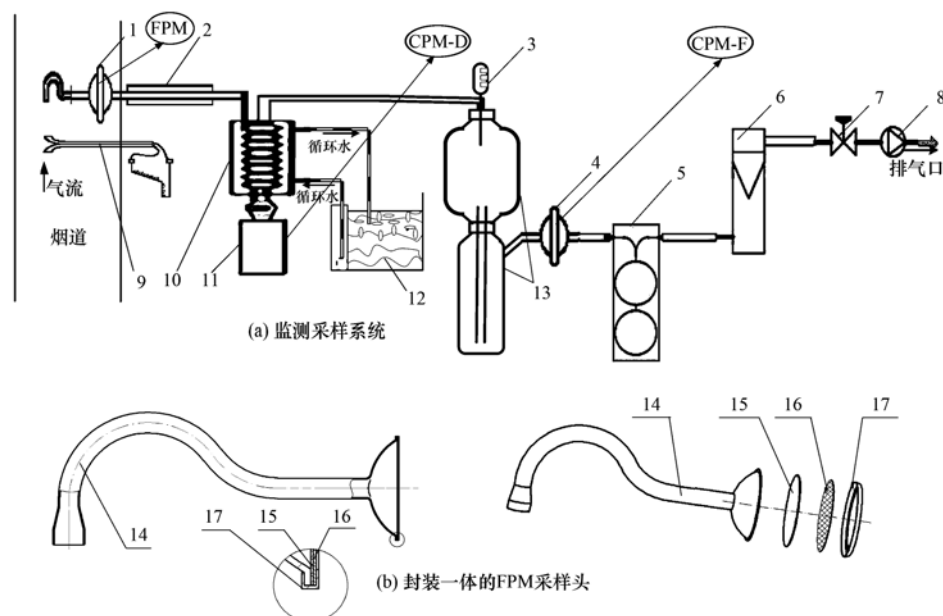
1.2 采样设备与监测方法^[18]

图1所示为固定源超低排放高湿废气中TPM的监测采样系统示意. 采样系统通过连接管线依次连接组合加热采样枪、烟气冷凝器、烟气缓冲器、CPM-F滤膜夹、烟气干燥器、流量传感器和抽气装置,并通过流量自动跟踪调节装置跟踪和调节抽气流量以实现颗粒物的等速采样.

采样系统按照颗粒物等速采样原理,将含尘烟气在抽气泵的作用下在烟道内通过FPM滤膜捕集FPM;透过FPM滤膜后的烟气经过加热至120℃的采样枪后,进入烟气冷凝器快速冷却至20~30℃,烟气中的无机或有机蒸汽通过直接冷凝或凝聚、碰并反应生成的大量微细颗粒物再被CPM-F滤膜捕集,

即可过滤的可凝聚颗粒物(filterable condensable particulate matter, CPM-F),最后烟气经干燥器后由抽气泵排出. 烟气冷凝过程中产生的冷凝水用收集瓶收集,冷凝水中的溶解性总固体即为可溶性的可凝聚颗粒物(dissolved condensable particulate matter, CPM-D).

烟气温度快速冷却至接近于环境温度(20~30℃)时,废气中CPM表现为CPM-F与CPM-D,因此,FPM和CPM-F与CPM-D构成了固定污染源废气中排放的一次颗粒物总量. 根据采集到的颗粒物或污染物的质量和所抽取的标干气体量,可计算出固定源排气中颗粒物或污染物的排放浓度.



1. FPM 滤膜夹; 2. 加热采样枪; 3. 热电偶温度计; 4. CPM-F 滤膜夹; 5. 烟气干燥器; 6. 流量传感器; 7. 流量自动跟踪调节装置; 8. 抽气装置; 9. S 型皮托管平行测速装置; 10. 烟气冷凝器; 11. 冷凝水收集瓶; 12. 循环水制冷与动力控制系统; 13. 烟气缓冲器; 14. 采样头; 15. FPM 滤膜; 16. 不锈钢托网; 17. 密封铝圈

图1 固定源超低排放高湿废气中TPM的监测采样系统示意

Fig. 1 Flow chart of the sampling system of TPM in ultra-low-emission and high-humidity fumes of a fixed burning source

本研究采用如图1(b)所示的封装一体的FPM采样头,即将采样嘴、前弯管和FPM滤膜夹上盖整体构造一体^[19,20],且其总质量不超过20 g,以克服因滤筒装卸引起的滤筒破损与碎屑损失以及避免对采样过程中沉积在采样嘴及采样头前弯管的细颗粒物回收误差等相关因素对低浓度颗粒物(FPM)监测的影响.

1.3 样品的采集与处理

以图1(a)所示的监测采样系统进行采样,各个源采样3~6组,每组样品采样时间60~90 min,采样流量控制在15~30 L·min⁻¹,使烟气通过冷凝器和缓冲器的停留时间达4~8 s,以确保CPM有足够的反应生成时间. 采样期间同时用德图公司

Testo350 烟气分析仪监测烟温、烟气含氧量及烟气中气态污染物浓度. 每次采样后用超纯水润洗烟气冷凝器管路并单独收集.

现场采集的每组样品包括封装一体FPM采样头、CPM-F滤膜、收集的冷凝水和超纯水润洗液.

采样后封装一体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,再与CPM-F滤膜样品置于干燥器中平衡24 h后称量至恒重,并根据其增重和烟气采气体积分别计算出FPM和CPM-F的排放浓度.

称重后的FPM滤膜、CPM-F滤膜分别剪碎后放入超纯水中超声提取30 min. FPM采样头内表面用超纯水荡洗后并入FPM滤膜提取液中. 经超声提取

后的水溶液分别用 0.45 μm 微孔滤膜过滤后定容至 50 mL,用于分析水溶液中的离子组分。

收集到的冷凝水称重后与超纯水润洗液合并定容至 100 mL。量取 50 mL 用于分析水溶液中的离子组分,余下的 50 mL 水溶液置于 105℃ 烘箱内蒸至近干(体积不少于 10 mL)后,置于通风橱中风干,再将残留物置于干燥器中平衡 24 h 后称量至恒重。根据冷凝水中溶解性总固体的质量和烟气采气体积计算出 CPM-D 的排放浓度。

采样使用的滤膜为直径 47 mm 的进口石英膜(Whatman:1851047);分析用的超纯水为电导率 $< 0.5 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 并经 0.45 μm 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 XP205 型十万分之一分析天平。

离子分析使用美国 Dionex 公司的 Dionex-ICS-2000 和 Dionex-ICS-3000,分别分析水溶性阳离子和水溶性阴离子,离子组分包括 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 NH_4^+ 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 NO_3^- 和 F^- 等 9 种。

1.4 质量控制

用于采样和分析的采样头、冷凝水收集瓶、烧杯、烟气冷凝器等采样前应进行清洗,风干或烘干后使用。经检查无针孔或缺陷的滤膜,使用前需置于 300℃ 马弗炉内烘烤 1 h 后备用。

采样系统经气密性检查合格后方可开始采样。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。

1.5 相关计算^[7,13,18,19]

(1) 固定源排气中颗粒物或污染物排放浓度的计算公式为:

$$\rho_i = (G'_i/V_{\text{nd}}) \times 10^6 \quad (1)$$

式中, ρ_i 为标准状态下颗粒物或污染物的实测排放浓度, $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$; 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。

(2) 固定源排气中颗粒物或污染物的基准氧含量排放浓度计算公式为:

$$\rho'_i = \rho_i \times [21 - \varphi(\text{O}_2)]/[21 - \varphi'(\text{O}_2)] \quad (2)$$

式中, ρ'_i 为标准状态下颗粒物或污染物的基准氧含量排放浓度, $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$; $\varphi'(\text{O}_2)$ 和 $\varphi(\text{O}_2)$ 分别为实测氧含量(体积分数)与基准氧含量, %。

2 结果与讨论

2.1 颗粒物排放水平

图 2 所示为超低排放典型燃烧源烟气中颗粒物的排放浓度。从中可见,燃煤电厂烟气中 TPM 两次平均实测排放浓度的结果分别为 (8.23 ± 3.36)

$\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $(7.69 \pm 1.68) \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$; 平均基准排放浓度分别为 $(8.69 \pm 3.55) \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $(8.01 \pm 1.76) \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 监测结果表明:北京市燃煤电厂烟气中 TPM 的排放满足国家超低排放标准颗粒物浓度限值 $(10 \text{mg}\cdot\text{m}^{-3})$ ^[9] 要求,但超过了北京市地方排放标准颗粒物浓度限值 $(5 \text{mg}\cdot\text{m}^{-3})$ ^[21] 要求。而 FPM 的 2 次监测平均实测排放浓度分别为 $(0.98 \pm 0.17) \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $(1.06 \pm 0.53) \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$; 平均基准排放浓度分别为 $(1.04 \pm 0.18) \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $(1.11 \pm 0.56) \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 监测结果均满足国家超低排放标准^[9] 和北京市地方排放标准^[21] 颗粒物浓度限值要求。我国现行污染物排放标准颗粒物指标专指 FPM,而忽视了粒径极小、数量极大及特定气象条件下雾、霾暴发成因的 CPM,可见超低排放燃烧源显著低估颗粒物的实际排放水平。结合表 1 发现,燃煤电厂第 2 次监测期间锅炉负荷略有增加, NO_x 的排放水平却增加了近 30%,但颗粒物排放水平基本相当。可见满足超低排放改造要求的燃煤电厂,随着锅炉负荷升高,燃烧烟气经超低排放烟气净化系统后,颗粒物的排放水平无显著变化,而 NO_x 的排放水平明显增加。

从图 2 还看出,燃煤供暖锅炉烟气中 FPM 平均实测排放浓度和平均基准排放浓度分别为 $(1.15 \pm 0.08) \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $(1.05 \pm 0.07) \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$, TPM 平均实测排放浓度和平均基准排放浓度分别为 $(4.20 \pm 1.30) \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $(3.82 \pm 1.17) \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$, FPM 和 TPM 排放浓度均满足国家超低排放标准^[9] 和北京市地方排放标准^[21] 颗粒物浓度限值要求。燃气电厂烟气中 FPM 平均实测排放浓度和平均基准排放浓度分别为 $(0.14 \pm 0.09) \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $(0.12 \pm 0.08) \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$, TPM 平均实测排放浓度和平均基准排放浓度分别为 $(1.99 \pm 0.79) \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $(1.68 \pm 0.67) \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$, FPM 和 TPM 排放浓度均显著低于国家超低排放标准^[8] 和北京市地方排放标准^[21] 颗粒物浓度限值要求。研究发现,燃煤电厂 FPM 排放水平是燃气电厂的 7.1 ~ 7.7 倍, CPM 排放水平是燃气电厂的 3.6 ~ 3.9 倍;而供暖燃煤锅炉 FPM 的排放水平是燃气电厂 FPM 排放水平的 8.4 倍; CPM 的排放水平是燃气电厂 CPM 排放水平的 1.6 倍。与燃气电厂使用清洁能源天然气密切相关。

本研究表明,超低排放锅炉烟气 TPM 排放浓度表现为:燃煤电厂 > 燃煤供暖锅炉 > 燃气电厂。超低排放燃煤电厂和燃煤供暖锅炉烟气净化工艺差别不大,其 FPM 排放浓度没有明显差异,而燃煤电厂 CPM 排放浓度是燃煤供暖锅炉 CPM 排放浓度的 2.4 倍和 2.2 倍。结合表 1 发现,燃煤供暖锅炉实际运行负荷及烟温显著低于燃煤电厂锅炉,可能由于燃煤电厂烟气

排放量及烟气流速明显高于燃煤供暖锅炉,烟气净化设施除尘及脱水效率降低,以及高烟气温度 CPM 组分更多向气态转化而不易凝聚^[7,13,15].

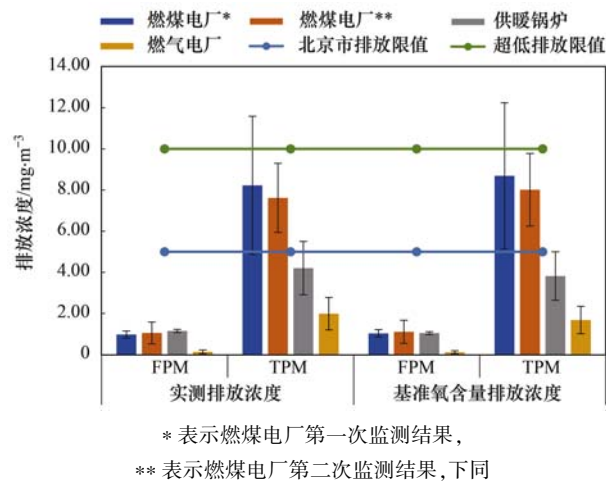


图2 超低排放锅炉排气中颗粒物排放浓度
Fig. 2 Emission concentration of particulate matter in ultra-low-emission boiler flue gas

2.2 颗粒物排放特征

图3所示为超低排放典型燃烧源烟气中颗粒物的排放浓度特征. 从中看出, 超低排放锅炉烟气 CPM-F 排放浓度均较低, 介于 $0.02 \sim 0.16 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 之间, 燃煤锅炉 CPM-F 在 TPM 中的占比为 $1.1\% \sim 3.9\%$, 燃气电厂 CPM-F 在 TPM 中的占比为 6.3% , 与文献^[13,18]的研究结论基本一致. 在超低排放锅炉烟气中 TPM 的主要存在形态为 FPM 和 CPM-D, 其中燃煤锅炉 FPM 占 TPM 的比例为 $11.9\% \sim 27.4\%$, 而燃气电厂 FPM 占 TPM 的比例较低, 为 6.9% ; CPM-D 对 TPM 的贡献较显著, 燃煤锅炉 CPM-D 对 TPM 的贡献为 $68.7\% \sim 86.9\%$, 燃气电厂 CPM-D 对 TPM 的贡献为 86.8% .

本研究表明 CPM 是超低排放锅炉烟气中颗粒物的重要组成特征, 在超低排放锅炉烟气中 CPM 对

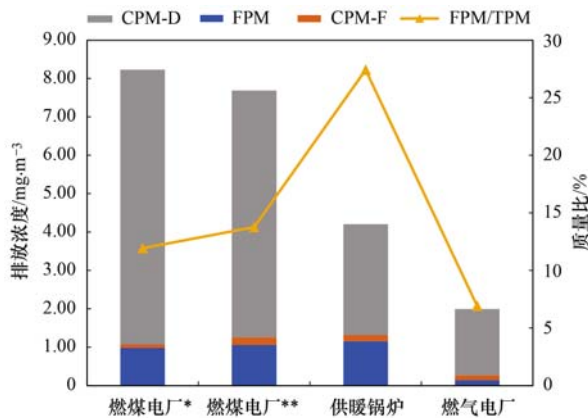


图3 超低排放锅炉排气中颗粒物组成特征
Fig. 3 Composition characteristics of particulate matter in ultra-low-emission boiler flue gas

TPM 的质量贡献明显, 燃煤锅炉为 $72.6\% \sim 88.1\%$, 燃气电厂为 93.1% , 且 CPM 在 TPM 中的质量占比表现为: 燃气电厂 > 燃煤电厂 > 燃煤供暖锅炉. 结合表1发现, 燃煤供暖锅炉烟气温度显著低于燃煤电厂和燃气电厂, 烟气排放温度对颗粒物在 FPM 与 CPM 中的分配比例有显著影响, CPM 的质量比随烟温的升高显著增加, 这与文献^[7,13,15,22]的研究结论一致.

2.3 水溶性离子排放水平

图4所示为超低排放典型燃烧源烟气颗粒物中总水溶性离子的排放浓度及分布. 从中看出, 燃煤电厂烟气 FPM 中总水溶性离子平均排放浓度2次结果分别为 $0.52 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $0.68 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, CPM 中总水溶性离子平均排放浓度分别为 $2.88 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $3.59 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 总水溶性离子在 FPM 和 CPM 中的质量分配比例分别为 $15.2:84.8$ 和 $16.0:84.0$. 燃煤供暖锅炉烟气 FPM 中总水溶性离子平均排放浓度为 $0.67 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$; CPM 中总水溶性离子平均排放浓度为 $1.30 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 总水溶性离子在 FPM 和 CPM 中的质量分配比例为 $33.9:66.1$. 而燃气电厂排气 FPM 中总水溶性离子平均排放浓度为 $0.08 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, CPM 中总水溶性离子平均排放浓度为 $1.36 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 总水溶性离子在 FPM 和 CPM 中的质量分配比例为 $5.8:94.2$.

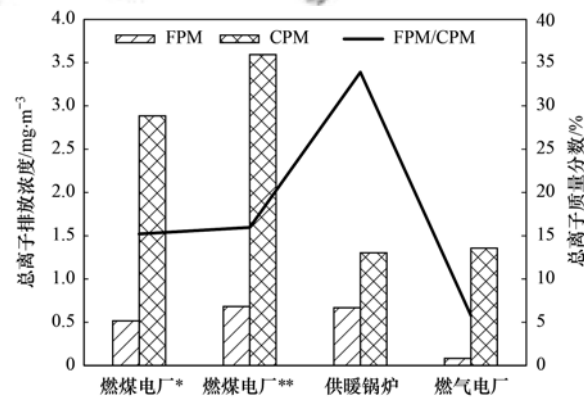


图4 超低排放锅炉烟气颗粒物中总水溶性离子排放浓度及分布
Fig. 4 Concentration and distribution of total water-soluble ions in particulate matter in the fumes of the ultra-low-emission boiler

本研究表明, 超低排放锅炉烟气 TPM 中总水溶性离子的排放水平表现为: 燃煤电厂 > 燃煤供暖锅炉 > 燃气电厂, 与 TPM 的排放水平趋势一致. 但 CPM 中总水溶性离子的排放水平表现为: 燃煤电厂 > 燃气电厂 > 燃煤供暖锅炉, 而燃煤供暖锅炉 CPM 排放水平明显高于燃气电厂.

结合表1和图4发现, 水溶性离子在 FPM 和 CPM 中的分配比例与颗粒物在 FPM 与 CPM 中的分配趋势一致. 文献^[7,13]的研究表明: 水溶性离子

随着烟气排放温度的降低由气态明显向颗粒物凝聚而被 FPM 滤膜捕集,使水溶性离子在 FPM 中的分配比例明显上升;燃煤供暖锅炉排气温度显著低于燃煤电厂和燃气电厂,从而显著降低了燃煤供暖锅炉烟气中水溶性离子在 CPM 中的质量占比,进而显著影响颗粒物在 CPM 与 FPM 中的分配.可见,排气烟温降低,有利于促进水溶性离子和 CPM 凝聚成较大粒径颗粒物,进而在一定条件下被烟气净化设施脱除,这可能是导致燃煤供暖锅炉 FPM 排放水平与燃煤电厂相当,而 CPM 及总水溶性离子的排放水平显著低于燃煤电厂的主要原因.

2.4 水溶性离子对颗粒物的质量贡献

图 5 所示为超低排放典型燃烧源烟气颗粒物中总水溶性离子的质量贡献.从中可知,燃煤电厂烟气中总水溶性离子在 FPM 中的质量占比 2 次结果分别为 52.7% 和 64.5%,在 CPM 中的质量贡献分别为 39.8% 和 54.2%,在 TPM 中的质量贡献分别为 41.3% 和 55.6%.燃煤供暖锅炉烟气中总水溶性离子在 FPM、CPM 和 TPM 中的质量贡献分别为 58.0%、42.7% 和 46.9%.而燃气电厂排气中总水溶性离子在 FPM、CPM 和 TPM 中的质量占比分别为 60.3%、73.1% 和 72.2%.

可见,超低排放燃煤锅炉烟气排放中总水溶性离子对 FPM 的质量贡献介于 52.7%~64.5% 之间,与燃气电厂排气中水溶性离子对 FPM 的质量贡献基本相当;但燃气电厂排气中水溶性离子对 CPM 和 TPM 的质量贡献比例显著高于超低排放燃煤锅炉,这与燃气电厂使用清洁燃料天然气有关,其烟气中颗粒物的成分主要为水溶性离子组分.

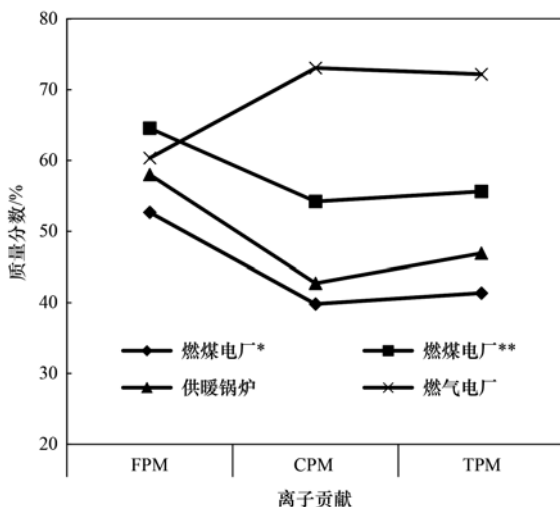


图 5 超低排放锅炉排气颗粒物中总水溶性离子贡献

Fig. 5 Contribution of total water-soluble ions to particulate matter in fumes of the ultra-low-emission boiler

2.5 水溶性离子组分的排放水平及分布

图 6 所示为超低排放典型燃烧源烟气颗粒物中

各水溶性离子组分的排放浓度及其分布.从图 6(a) 和 6(b) 看出,超低排放燃煤电厂烟气颗粒物中 F^- 和 SO_4^{2-} 是主要的水溶性离子,其排放浓度显著高于其他水溶性离子, F^- 两次平均排放质量浓度的结果分别为 $1.91 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $2.32 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,且主要分布于 CPM 中,其在 CPM 中的质量分布比例分别为 87.0% 和 99.2%; SO_4^{2-} 两次平均排放质量浓度的结果分别为 $1.10 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $1.18 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,其在 CPM 中的质量分布比例分别为 64.3% 和 87.8%.其次是 Cl^- ,其两次排放浓度的结果分别为 $0.17 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $0.27 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,在 CPM 中的质量分布比例分别为 87.0% 和 99.2%.其他水溶性离子组分排放水平均低于 $0.20 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$.

从图 6(c) 可知,燃煤供暖锅炉烟气颗粒物中 SO_4^{2-} 的排放水平显著高于其他水溶性离子,其平均排放浓度为 $0.98 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,主要分布于 CPM 中,其在 CPM 中的质量分布比例为 74.0%.其次是 NH_4^+ 、 NO_3^- 、 Na^+ 和 Cl^- ,其平均排放浓度分别为 0.27 、 0.26 、 0.21 和 $0.19 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,在 CPM 中的质量分布比例分别为 67.6%、62.0%、82.8% 和 15.5%.

从图 6(d) 可知,燃气电厂颗粒物中 NH_4^+ 和 SO_4^{2-} 是主要的水溶性离子,其平均排放浓度分别为 0.92 和 $0.41 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,这 2 种水溶性离子在 CPM 中的质量分布比例分别为 98.8% 和 91.4%.

有研究发现燃煤供暖锅炉排气颗粒物中 SO_4^{2-} 的排放水平与燃煤电厂相当,且均为颗粒物中主要水溶性离子.燃煤电厂颗粒物中 F^- 排放水平显著高于燃煤供暖锅炉,是燃煤供暖锅炉排放水平的 98~120 倍,并主要存在于 CPM 中,可能与测试的燃煤电厂所用燃料煤中氯化物的较高含量有关;但燃煤供暖锅炉排气中 F^- 排放水平与有关文献燃煤电厂 WFGD 出口相当^[17].

图 6 还看出,燃气电厂 NH_4^+ 的排放水平显著高于超低排放燃煤锅炉.锅炉烟气中 NH_3 主要来源于 SCR 系统的逃逸^[22,23],SCR 催化剂能将 SO_2 氧化为 SO_3 ^[15,24,25],从 SCR 逃逸的 SO_3 和 NH_3 在水分参与条件下会生成 $(NH_4)_2SO_4$ 和 $(NH_4)HSO_4$ ^[26],进而在颗粒物表面凝结或溶解于小液滴中,且 WFGD 对逃逸的 NH_3 有较好的脱除效果^[17,27].研究测试的燃气电厂采用 LNB + SCR 脱硝,再经余热锅炉热回收后排放,排气烟温较高,使 SCR 逃逸的 NH_3 及其与燃烧烟气中的酸性气体及水分反应生产的 NH_4^+ 不易冷凝去除,故烟气中 NH_4^+ 排放水平较高.而燃煤电厂和燃煤供暖锅炉烟气均在 SCR 脱硝后,经过 WFGD 净化工艺,可进一步降低 SCR 逃逸的 NH_3 排

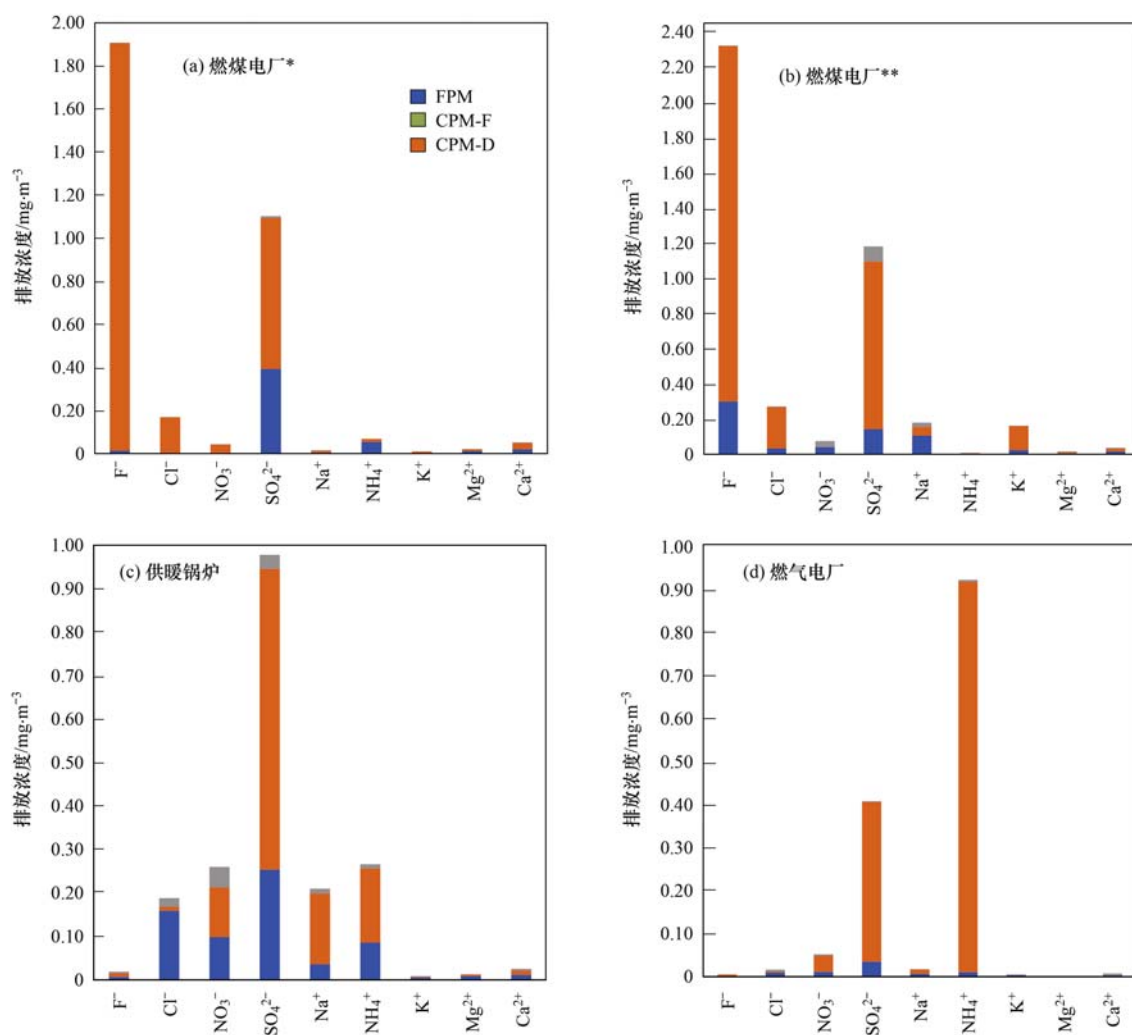


图6 超低排放锅炉排气颗粒物中水溶性离子组分排放浓度及其分布

Fig. 6 Concentration and distribution of water-soluble ions in fumes of the ultra-low-emission boilers

放. 燃煤供暖锅炉 NH_4^+ 排放水平明显高于燃煤电厂, 结合表1发现, 燃煤供暖锅炉排气烟温显著低于燃煤电厂, 可能燃煤电厂高温烟气中气态 NH_3 或 NH_4^+ 在冷凝采样过程中不易被水汽冷凝吸收.

2.6 水溶性离子组分的排放特征

图7所示为超低排放典型燃烧源烟气中水溶性离子组分的组成特征. 从图6(a)、6(b)和图7(a)、7(b)中看出, 燃煤电厂烟气中 F^- 和 SO_4^{2-} 的排放量占水溶性离子排放总量的质量分数, 2次结果分别为56.1%、32.4%和54.4%、27.7%, 且这2种水溶性离子之和占水溶性离子总量的82.0%~88.5%, 占TPM排放量的36.6%~45.6%. 可见超低排放燃煤电厂排放的水溶性离子主要特征组分为 F^- 和 SO_4^{2-} .

从图6(c)和图7(c)看出, 超低排放燃煤供暖锅炉烟气中 SO_4^{2-} 的排放水平占水溶性离子排放总量的49.6%; 其次是 NH_4^+ 和 NO_3^- , 占水溶性离子排放总量的质量分数分别为13.5%和13.2%; 另

外 Na^+ 和 Cl^- 排放量占水溶性离子总量的质量分数分别为10.7%和9.6%. 因此超低排放燃煤供暖锅炉排放的水溶性离子主要特征组分为 SO_4^{2-} .

从图6(d)和图7(d)看出, 燃气电厂排气中 NH_4^+ 和 SO_4^{2-} 的排放水平占水溶性离子排放总量的质量分数分别为64.2%和28.4%, 为水溶性离子的主要特征组分.

文献[7, 13, 15~16, 24]均指出 SO_4^{2-} 是燃煤锅炉颗粒物中尤其是CPM中主要特征水溶性离子, 这与本研究结论一致.

2.7 国内外燃烧源颗粒物排放结果比较

表2为国内外学者对典型燃烧源烟气中FPM和CPM排放水平及其特征的研究成果. 文献[13]以基于EPA Method 202^[12]原理自建采样系统, 对2台燃煤供暖锅炉和1台工业燃煤锅炉烟气颗粒物排放进行监测, FPM排放浓度分别为36.4、10.5和29.3 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$, CPM的排放浓度分别为14.7、18.7和7.5 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$, CPM占TPM的比重分别为28.8%、

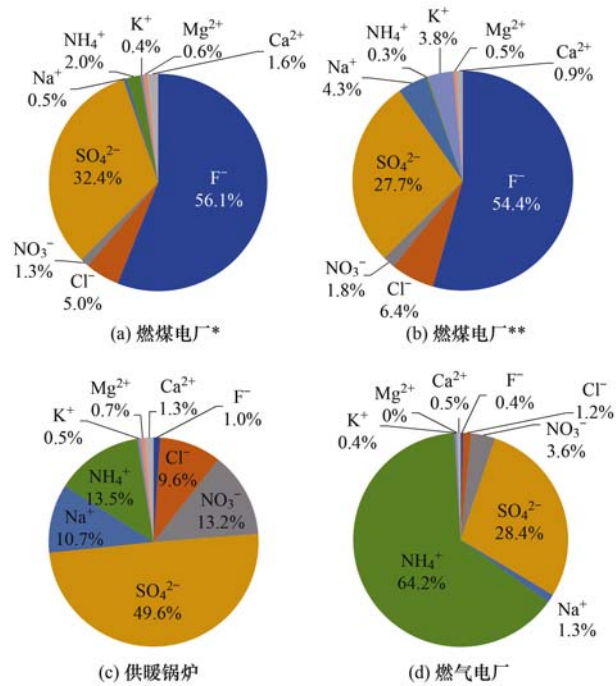


图7 超低排放锅炉烟气中水溶性离子的组成特征

Fig. 7 Mass proportions of water-soluble ions in fumes of the ultra-low-emission boilers

64.1%和20.4%。裴冰^[24]基于EPA Method 202^[12]原理自主构建的采样装置,对燃煤电厂A、B、C进行了监测,FPM 排放浓度分别为12.1、33.4和16.2 mg·m⁻³,CPM 的排放浓度分别为17.2、23.6和22.8 mg·m⁻³,CPM 占TPM 的比重分别为58.7%、41.4%和58.5%。Yang 等^[15]利用EPA Method 201/201A 与202 结合的采样方法,对某燃煤锅炉分级采样,FPM_{2.5}和CPM 的排放浓度分别为16.9 mg·m⁻³

和29.3 mg·m⁻³,CPM 占TPM_{2.5}的比重为63.35%。相关研究的燃煤锅炉烟气净化工艺均未达到国家超低排放标准颗粒物限值要求,FPM 和CPM 排放水平远高于本研究结果,但CPM 在TPM 中的比重显著低于本研究结果。

杨柳等^[17]采用基于EPA Method 202^[12]原理自主构建的采样装置,对达到超低排放的某燃煤电厂进行了监测,FPM 和CPM 排放浓度分别为2.12 mg·m⁻³和5.53 mg·m⁻³,CPM 占TPM 的比重为72.29%。该超低排放的燃煤电厂FPM 排放浓度是本研究的2 倍左右,而CPM 的排放浓度及其在TPM 中的比重略低于本研究燃煤电厂。

Li 等^[16]利用Dekati PM₁₀ 惯性撞击式分级切割采样器,结合EPA Method 202^[12]原理的采样系统,对某超低排放燃煤电厂分级采集FPM,结果表明:FPM_{2.5}、FPM 和CPM 排放浓度分别为1.1、1.6和7.9 mg·m⁻³,FPM_{2.5}对FPM 的贡献率约为70%,CPM 占TPM 的比重为83.16%。该燃煤电厂FPM 排放浓度是本研究的1.5 倍左右,而CPM 的排放浓度及其在TPM 中的贡献比例与本研究结果相当。

Yang 等^[15]利用EPA Method 201/201A 与202 结合的采样方法,对某燃煤电厂颗粒物分级采样,FPM_{2.5}和CPM 的排放浓度分别为0.75 mg·m⁻³和2.15 mg·m⁻³,CPM 占TPM_{2.5}的比重为74.13%。

本研究表明,满足超低排放要求的燃煤锅炉排气中FPM 和CPM 的排放浓度均显著降低,但CPM 对TPM 的贡献比例显著增加。

Corio 等^[28]利用EPA Method 201/201A 与202

表2 国内外燃烧源颗粒物排放特征¹⁾

Table 2 Emission characteristics of particulate matter from combustion sources at home and abroad

测试对象	机组容量 /MW	污染防治设施	负荷 /%	FPM /mg·m ⁻³	CPM /mg·m ⁻³	CPM/TPM /%	文献
燃煤供热厂1	28	湿法脱硫除尘一体净化工艺	78	36.35	14.73	28.84	[13]
燃煤供热厂2	64	EF+WFGD	85	10.48	18.74	64.13	[13]
燃煤工业锅炉	14	湿法脱硫除尘一体净化工艺	80	29.29	7.49	20.36	[13]
燃煤电厂	/	ESP+FGD	/	0.75*	2.15	74.13**	[15]
燃煤锅炉	/	旋风除尘(Cyclone)+FF	/	16.9*	29.3	63.35**	[15]
燃煤电厂	/	SCR+ESP+WFGD+WESP	/	1.6	7.9	83.16	[16]
燃煤电厂	300	SCR+ESP+WFGD+WESP	100	2.12	5.53	72.29	[17]
燃气电厂	300	LNB+SCR	85	0.10	2.71	97.0	[18]
燃煤电厂A	300	EF+WFGD	100	12.1	17.2	58.7	[24]
燃煤电厂B	325	ESP+WFGD	95.5	33.4	23.6	41.4	[24]
燃煤电厂C	100	SCR+ESP+WFGD	96.3	16.2	22.8	58.5	[24]
燃煤锅炉	/	/	/	/	/	76#	[28]
燃气轮机	/	/	/	/	/	88/90##	[28]
燃煤电厂	469	LNB+SCR+FF+ESP+WFGD	90/95##	0.98/1.06##	7.25/6.63##	88.1/86.2##	本研究
燃煤锅炉	70	SCR+FF+WFGD	78	1.15	3.05	72.6	本研究
燃气电厂	293	LNB+SCR	95	0.14	1.85	93.1	本研究

1) *表示FPM_{2.5}结果; **表示CPM/TPM_{2.5}结果; #表示18台燃煤锅炉CPM/TPM₁₀平均结果; ##表示分别为2台的CPM/TPM₁₀结果; ###表示分别为两次的结果

结合的采样方法,对 2 台带余热锅炉的燃气轮机组进行分级采样,CPM 对 TPM_{10} 的贡献比例分别为 88% 和 90%。文献[18]利用自建的固定源高湿废气中 TPM 采样系统对某燃气电厂颗粒物排放进行监测,FPM 和 CPM 平均排放浓度分别为 $0.10 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $2.71 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$,CPM 占 TPM 的平均比例为 97.0%。燃气电厂的有关研究结果与本研究结论基本一致。

3 结论

(1)燃煤电厂与燃煤供暖锅炉 FPM 排放水平相当,实测排放浓度介于 $0.98 \sim 1.15 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间;燃煤供暖锅炉 CPM 实测排放浓度为 $3.05 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$,而燃煤电厂是燃煤供暖锅炉的 2.2~2.4 倍。燃气电厂因使用清洁燃料天然气,其 FPM 和 CPM 排放水平明显低于燃煤锅炉,其实测排放浓度分别为 0.12 和 $1.85 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$,且主要为水溶性离子。

(2)燃煤电厂(两次监测)、燃煤供暖锅炉和燃气电厂烟气中总水溶性离子实测排放浓度分别为 3.40、4.27、1.97 和 $1.44 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$;烟气中总水溶性离子在 FPM 和 CPM 中的分配比例分别为:15.2:84.8、16.0:84.0、33.9:66.1 和 5.8:94.2;烟气中总水溶性离子对 TPM 的质量贡献分别为:41.3%、55.6%、46.9% 和 72.2%。

(3)在超低排放锅炉烟气中 CPM 及水溶性离子是颗粒物的重要组成部分,CPM 在 TPM 中的质量贡献显著,燃煤锅炉为 72.6%~88.1%,燃气电厂为 93.1%。排气烟温显著影响 CPM 及其水溶性离子的赋存形态、脱除效率与排放水平。

(4) SO_4^{2-} 是燃煤锅炉烟气颗粒物中主要特征水溶性离子。燃煤电厂(两次监测)与燃煤供暖锅炉 SO_4^{2-} 平均排放质量浓度分别为 1.10、1.18 和 $0.98 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$;在 CPM 中的质量分布比例分别为 64.3%、87.8% 和 74.0%; SO_4^{2-} 占全部水溶性离子的质量分数分别为 32.4%、27.7% 和 49.6%。 F^- 是燃煤电厂颗粒物中另一主要特征水溶性离子,其两次平均排放浓度的结果分别为 $1.91 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $2.32 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$;在 CPM 中所占的质量分数分别为 87.0% 和 99.2%;占全部水溶性离子的质量分数两次结果分别为 56.1% 和 54.4%。

(5)燃气电厂排气中 NH_4^+ 和 SO_4^{2-} 是主要的水溶性离子,其平均排放浓度分别为 $0.92 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $0.41 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$;在 CPM 中的质量分布比例分别为 98.8% 和 91.4%;占全部水溶性离子的质量分数分别为 64.2% 和 28.4%。

参考文献:

- [1] 胡月琪, 郭晓东, 王琛, 等. 北京市典型燃烧源颗粒物排放水平与特征测试[J]. 环境科学, 2016, 37(5): 1653-1661.
Hu Y Q, Wu X D, Wang C, et al. Testing of concentration and characteristics of particulate matters emitted from stationary combustion sources in Beijing [J]. Environmental Science, 2016, 37(5): 1653-1661.
- [2] Cao J J, Shen Z X, Chow J C, et al. Winter and summer $\text{PM}_{2.5}$ chemical compositions in fourteen Chinese cities[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2012, 62(10): 1214-1226.
- [3] 朱法华, 李小龙, 段玖祥, 等. 固定污染源排放可凝结颗粒物采样方法综述[J]. 环境监控与预警, 2019, 11(3): 1-5, 11.
Zhu F H, Li X L, Duan J X, et al. A review of sampling methods of condensable particle matter emission from stationary source[J]. Environmental Monitoring and Forewarning, 2019, 11(3): 1-5, 11.
- [4] Li M H, Fan L C, Mao B, et al. Short-term exposure to ambient fine particulate matter increases hospitalizations and mortality in COPD: a systematic review and meta-analysis[J]. Chest, 2016, 149(2): 447-458.
- [5] Shen G F, Xue M, Yuan S Y, et al. Chemical compositions and reconstructed light extinction coefficients of particulate matter in a mega-city in the western Yangtze River Delta, China [J]. Atmospheric Environment, 2014, 83: 14-20.
- [6] Kim K H, Kabir E, Kabir S. A review on the human health impact of airborne particulate matter [J]. Environment International, 2015, 74: 136-143.
- [7] 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.
- [8] Lelieveld J, Evans J S, Fnais M, et al. The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale[J]. Nature, 2015, 525(7569): 367-371.
- [9] HJ 2301-2017, 火电厂污染防治可行技术指南[S].
HJ 2301-2017, Guideline on available technologies of pollution prevention and control for thermal power plant[S].
- [10] 胡月琪, 郭建辉, 孔川, 等. NaClO_2 湿法氧化脱硝污染物排放特征与监测方法研究[J]. 生态环境学报, 2018, 27(9): 1706-1715.
Hu Y Q, Guo J H, Kong C, et al. Studies on emission characteristics and monitoring methods of pollutants in flue gas by NaClO_2 wet oxidation and denitrification [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2018, 27(9): 1706-1715.
- [11] 张斌, 杨柳, 李军状, 等. 燃煤锅炉烟气可凝结颗粒物研究进展[J]. 环境科学与技术, 2019, 42(2): 99-103.
Zhang B, Yang L, Li J Z, et al. Research progress on condensable particulate matter emitted from coal-fired boiler[J]. Environmental Science & Technology, 2019, 42(2): 99-103.
- [12] US EPA Method 202, Dry impinger method for determining condensable particulate emissions from stationary sources[S].
- [13] 胡月琪, 冯亚君, 王琛, 等. 燃煤锅炉烟气中 CPM 与水溶性离子监测方法及应用研究[J]. 环境监测管理和技术, 2016, 28(1): 41-45.
Hu Y Q, Feng Y J, Wang C, et al. Studies on monitoring method of condensable particulate and water-soluble ions in fumes from coal fired boilers[J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2016, 28(1): 41-45.

- [14] 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. 28-53.
- [15] Yang H H, Lee K T, Hsieh Y S, *et al.* Filterable and Condensable fine particulate emissions from stationary sources[J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2014, **14**(7): 2010-2016.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 胡月琪, 颜旭, 孔川, 等. 超低排放高湿废气总颗粒物监测方法及燃气电厂实际测试[J]. *环境科学*, 2020, **41**(8): 3563-3571.
Hu Y Q, Yan X, Kong C, *et al.* Monitoring method of total particulate matter in ultra-low-emission and high-humidity exhaust gas from stationary sources and an actual test in a gas power plant[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(8): 3563-3571.
- [19] 胡月琪, 王琛, 颜旭, 等. 废气中总颗粒物的采样装置和测定方法[P]. 中国专利: CN 107421787A, 2017-12-01.
- [20] ISO 12141:2002, Stationary source emissions—Determination of mass concentration of particulate matter (dust) at low concentrations—Manual gravimetric method[S].
- [21] DB 11/139-2015, 锅炉大气污染物排放标准[S].
DB 11/139-2015, Emission standard of air pollutants for boilers[S].
- [22] 张进生, 吴建会, 吕瑞鹤, 等. 典型脱硫工艺对燃煤锅炉烟气颗粒物的影响[J]. *环境科学*, 2020, **41**(10): 4455-4461.
Zhang J S, Wu J H, Lü R H, *et al.* Influence of typical desulfurization process on flue gas particulate matter of coal-fired boilers[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(10): 4455-4461.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] Li Z, Jiang J K, Ma Z Z, *et al.* Effect of selective catalytic reduction (SCR) on fine particle emission from two coal-fired power plants in China[J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **120**: 227-233.
- [27] 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.
- [28] Corio L A, Sherwell J. In-stack condensable particulate matter measurements and issues[J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2000, **50**(2): 207-218.

CONTENTS

Chemical Characteristics and Source Apportionment of Organic Aerosols in Atmospheric PM _{2.5} in Winter in Beijing	XU Nan, WANG Tian-tian, LI Xiao, <i>et al.</i> (2101)
Characteristics of Two Pollution Episodes Before and After City Heating in Beijing from February to March of 2019	YIN Xiao-mei, PU Wei-wei, WANG Ji-kang, <i>et al.</i> (2110)
Analysis of Characteristics and Causes of a Typical Haze Pollution in Beijing in the Winter of 2019	LIAN Han-yang, YANG Xin, ZHANG Pu, <i>et al.</i> (2121)
New Particle Formation Events in Summer and Winter in the Coastal Atmosphere in Qingdao, China	SUN Yue, ZHU Yu-jiao, MENG He, <i>et al.</i> (2133)
Characteristics of Heavy Metal Pollution and Ecological Risk Evaluation of Indoor Dust from Urban and Rural Areas in Taiyuan City During the Heating Season	HUANG Hao, XU Zi-qi, YAN Jun-xia, <i>et al.</i> (2143)
Concentration Analysis and Health Risk Assessment of Air Pollutants in Newly Decorated Public Places in Xi'an	FAN Jie, FAN Hao, SHEN Zhen-xing, <i>et al.</i> (2153)
Emission Concentration and Characteristics of Particulate Matter and Water-Soluble Ions in Exhaust Gas of Typical Combustion Sources with Ultra-Low Emission	HU Yue-qi, WANG Zheng, GUO Jian-hui, <i>et al.</i> (2159)
High-Throughput Sequencing Analysis of Microbial Communities in Summertime Atmospheric Particulate Matter in Hefei City	JIANG Shao-yi, SUN Bo-wen, DAI Hai-tao, <i>et al.</i> (2169)
Spatiotemporal Variations in Fine Particulate Matter and the Impact of Air Quality Control in Zhengzhou	DONG Zhe, YUAN Ming-hao, SU Fang-cheng, <i>et al.</i> (2179)
Characteristics of Ozone Pollution and Relationships with Meteorological Factors in Jiangxi Province	QIAN Yue, XU Bin, XIA Ling-jun, <i>et al.</i> (2190)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Aerosol Optical Properties in Urban Agglomerations on the North Slope of the Tianshan Mountains	ZHANG Zhe, DING Jian-li, WANG Jin-jie, <i>et al.</i> (2202)
Comprehensive Classification Method of Urban Water by Remote Sensing Based on High-Resolution Images	YANG Zi-qian, LIU Huai-qing, LÜ Heng, <i>et al.</i> (2213)
Construction and Application Optimization of the Chl-a Forecast Model ARIMA for Lake Taihu	LI Na, LI Yong, FENG Jia-cheng, <i>et al.</i> (2223)
Spatial Differences in Water Quality and Spatial Autocorrelation Analysis of Eutrophication in Songhua Lake	DING Yang, ZHAO Jin-yong, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (2232)
Pollution and Irrigation Applicability of Surface Water from Wet, Normal, and Dry Periods in the Huixian Karst Wetland, China	ZHU Dan-ni, ZOU Sheng-zhang, LI Jun, <i>et al.</i> (2240)
Changes in Water Chemistry and Driving Factors in the Middle and Lower Reaches of the Beijing-Hangzhou Grand Canal	CHENG Zhong-hua, DENG Yi-xiang, ZHUO Xiao-ke, <i>et al.</i> (2251)
Effects of Different Land Use Practices on Nitrogen Loss from Runoff During Rainfall Events	LUO Yi-feng, CHEN Fang-xin, ZHOU Hao, <i>et al.</i> (2260)
Sources and Fate of Nitrate in Groundwater in a Typical Karst Basin: Insights from Carbon, Nitrogen, and Oxygen Isotopes	REN Kun, PAN Xiao-dong, LIANG Jia-peng, <i>et al.</i> (2268)
Changes in the Bacterioplankton Community Between "Ice" and "Water" in the Frozen Dali Lake	LI Wen-bao, YANG Xu, TIAN Ya-nan, <i>et al.</i> (2276)
Analysis of the Spatial Changes in Bacterial Communities in Urban Reclaimed Water Channel Sediments; A Case Study of the North Canal River	QIU Ying, JIN Yan, SU Zhen-hua, <i>et al.</i> (2287)
Spatial Differences and Influencing Factors of Denitrification and ANAMMOX Rates in Spring and Summer in Lake Taihu	ZHAO Feng, XU Hai, ZHAN Xu, <i>et al.</i> (2296)
Structural Characteristics of Zooplankton and Phytoplankton Communities and Its Relationship with Environmental Factors in a Typical Tributary Reservoir in the Three Gorges Reservoir Region	CHEN Sha, XIE Qing, FU Mei, <i>et al.</i> (2303)
Application of Iron and Sulfate-Modified Biochar in Phosphorus Removal from Water	SANG Qian-qian, WANG Fang-jun, ZHAO Yuan-tian, <i>et al.</i> (2313)
Analysis of the Performance and Mechanism of Phosphorus Removal in Water by Steel Slag	LUO Xiao, ZHANG Jun-bo, HE Lei, <i>et al.</i> (2324)
Adsorption of BS-18 Amphoterically Modified Bentonite to Tetracycline and Norfloxacin Combined Pollutants	WANG Xin-xin, MENG Zhao-fu, LIU Xin, <i>et al.</i> (2334)
Preparation of Ag ₃ PO ₄ /g-C ₃ N ₄ Composite Photocatalysts and Their Visible Light Photocatalytic Performance	GAO Chuang-chuang, LIU Hai-cheng, MENG Wu-shuang, <i>et al.</i> (2343)
Activation of Permonosulfate by Rhodamine B for BPA Degradation Under Visible Light Irradiation	ZHANG Yi-chen, BAI Xue, SHI Juan, <i>et al.</i> (2353)
Fe-Ti Co-Doped Alumina-Induced Surface Dual Reaction Center for Catalytic Ozonation to Remove Pollutants from Water	ZHANG Fan, SONG Yang, HU Chun, <i>et al.</i> (2360)
Preparation of Sulfidated Copper-Iron Bimetallic Compositing Material and Its Mechanism for Chromium Removal	QU Min, WANG Yuan, CHEN Hui-xia, <i>et al.</i> (2370)
Mechanisms of Penicillin Wastewater Treatment by Coupled Electrocatalytic and Bioelectrochemical Systems	QU You-peng, LÜ Jiang-wei, DONG Yue, <i>et al.</i> (2378)
Aerobic Granular Sludge Operation and Nutrient Removal Mechanism from Domestic Sewage in an Anaerobic/Aerobic Alternating Continuous Flow System	LI Dong, YANG Jing-wei, LI Yue, <i>et al.</i> (2385)
In-situ Phosphorus Removal Activity and Impact of the Organic Matter Concentration on Denitrifying Phosphorus Removal in Sludge Aggregates	LÜ Yong-tao, JIANG Xiao-tong, TU Yan, <i>et al.</i> (2396)
In-situ Sludge Reduction Technology Based on Ozonation	XUE Bing, LIU Bin-han, WEI Ting-ting, <i>et al.</i> (2402)
Effects of Activated Carbon on the Fate of Antibiotic Resistance Genes During Anaerobic Digestion of the Organic Fraction of Municipal Solid Waste	MA Jia-ying, WANG Pan-liang, WANG Bing-han, <i>et al.</i> (2413)
Release Mechanisms of Carbon Source and Dissolved Organic Matter of Six Agricultural Wastes in the Initial Stage	LING Yu, YAN Guo-kai, WANG Hai-yan, <i>et al.</i> (2422)
Spatial Differentiation of Soil Organic Carbon Density and Influencing Factors in Typical Croplands of China	LI Cheng, WANG Rang-hui, LI Zhao-zhe, <i>et al.</i> (2432)
Characteristics of Paddy Soil Organic Carbon Mineralization and Influencing Factors Under Different Water Conditions and Microbial Biomass Levels	LIU Qi, LI Yu-hong, LI Zhe, <i>et al.</i> (2440)
Analysis of Nitrogen Transformation Characteristics and Influencing Factors of Forestland Soil in the Qinghai-Tibet Plateau; A Case Study of the Qilian Mountains and Southeast Tibet	HE Fang, ZHANG Li-mei, SHEN Cong-cong, <i>et al.</i> (2449)
Using the Matter-Element Extension Model to Assess Heavy Metal Pollution in Topsoil in Parks in the Main District Park of Lanzhou City	HU Meng-jun, LI Chun-yan, LI Na-na, <i>et al.</i> (2457)
Effects of Long-Term Application of Chemical Fertilizers and Organic Fertilizers on Heavy Metals and Their Availability in Reddish Paddy Soil	XIA Wen-jian, ZHANG Li-fang, LIU Zeng-bing, <i>et al.</i> (2469)
Characteristics and Origins of Heavy Metals in Soil and Crops in Mountain Area of Southern Sichuan	HAN Wei, WANG Cheng-wen, PENG Min, <i>et al.</i> (2480)
Spatial Distribution Characteristics, Source Apportionment, and Risk Assessment of Topsoil PAHs in the Core Area of the Ningdong Energy and Chemical Industry Base	YANG Fan, LUO Hong-xue, ZHONG Yan-xia, <i>et al.</i> (2490)
Functional Stability and Applicability of Heavy Metal Passivators in Reducing Cd Uptake by Lettuce	PANG Fa-hu, WU Xue-jiao, KONG Xue-fei, <i>et al.</i> (2502)
Effects of Water Management on Cadmium Accumulation by Rice (<i>Oryza sativa</i> L.) Growing in Typical Paddy Soil	ZHANG Yu-ting, TIAN Ying-bing, HUANG Dao-you, <i>et al.</i> (2512)
Adsorption Properties of Oiltea Camellia Shell-Modified Biochar and Effects of Coupled Waterlogging on Soil Cd Morphology	CAI Tong, DU Hui-hui, LIU Xiao-li, <i>et al.</i> (2522)
Effects of Land Use Changes on Soil Fungal Community Structure and Function in the Riparian Wetland Along the Downstream of the Songhua River	XU Fei, ZHANG Tuo, HUAI Bao-dong, <i>et al.</i> (2531)
Distribution of Antibiotic Resistance Genes and Microbial Communities in a Fishery Reclamation Mining Subsidence Area	CHENG Sen, LU Ping, FENG Qi-yan (2541)
Effects of Three Commonly Used Herbicides on Bacterial Antibiotic Resistance	LI Xi, LIAO Han-peng, CUI Peng, <i>et al.</i> (2550)
Discussion of Microbial Control Standards of Water Reclamation and Formulation Methods	CHEN Zhuo, CUI Qi, CAO Ke-fan, <i>et al.</i> (2558)