

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



2019

Vol.40 No.1  
第40卷 第1期

目次

|                                                     |                                               |       |
|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-------|
| 2015~2016年北京市3次空气重污染红色预警PM <sub>2.5</sub> 成因分析及效果评估 | 吕喆, 魏巍, 周颖, 程水源, 王晓琦                          | (1)   |
| 长三角地区重点源减排对PM <sub>2.5</sub> 浓度的影响                  | 于燕, 王泽华, 崔雪东, 陈锋, 徐宏辉                         | (11)  |
| 上海市实施清洁空气行动计划的健康收益分析                                | 戴海夏, 安静宇, 李莉, 黄成, 严茹莎, 朱书慧, 马英歌, 宋伟民, 阚海东     | (24)  |
| 京津冀及周边地区PM <sub>2.5</sub> 时空变化特征遥感监测分析              | 陈辉, 厉青, 李莹, 张连华, 毛慧琴, 周伟, 刘伟汉                 | (33)  |
| MODIS C006气溶胶光学厚度产品在京津冀典型环境背景下的适用性                  | 王海林, 刘琼, 陈勇航, 孙冉, 李霞, 张华, 魏刚, 胡俊, 刘统强         | (44)  |
| 气象因素对香港地区臭氧污染的影响                                    | 赵伟, 高博, 刘明, 卢清, 马社霞, 孙家仁, 陈来国, 范绍佳            | (55)  |
| 天津夏季边界层低层大气中PAN和O <sub>3</sub> 的输送特征分析              | 姚青, 马志强, 林伟立, 刘敬乐, 王晓佳, 蔡子颖, 韩素芹              | (67)  |
| 成都冬季PM <sub>2.5</sub> 化学组分污染特征及来源解析                 | 吴明, 吴丹, 夏俊荣, 赵天良, 杨清健                         | (76)  |
| 郑州市冬季PM <sub>2.5</sub> 传输路径和潜在源分析                   | 段时光, 姜楠, 杨留明, 张瑞芹                             | (86)  |
| 常州春季PM <sub>2.5</sub> 中WSOC和WSN的污染特征与来源解析           | 李清, 黄雯倩, 马帅帅, 黄红缨, 叶招莲, 陈敏东                   | (94)  |
| 天津隧道机动车VOCs污染特征与排放因子                                | 孙露娜, 刘妍, 赵静波, 孙世达, 宋从波, 张静, 李悦宁, 林应超, 王婷, 毛洪钧 | (104) |
| 机动车源大气颗粒物粒径分布及碳组分特征                                 | 梅德清, 朱宗宁, 孙天硕, 王向丽, 梅丛蔚, 肖政臻                  | (114) |
| 超低排放路线下燃煤烟气可凝颗粒物在WFGD、WESP中的转化特性                    | 杨柳, 张斌, 王康慧, 麻丁仁, 盛重义                         | (121) |
| 超低排放燃煤电厂颗粒物脱除特性                                     | 阮仁晖, 谭厚章, 段钰锋, 杜勇乐, 刘鹤欣, 萧嘉繁, 杨富鑫, 张朋         | (126) |
| 北京建筑施工裸地时空变化及扬尘污染排放                                 | 张立坤, 李令军, 姜磊, 赵文慧, 鹿海峰, 王新辉, 邱昀               | (135) |
| SCR装置对焦炉煤气燃烧废气中PCDD/Fs、PCBs和PCNs的协同脱除               | 任美慧, 樊芸, 王胜, 许亮, 张宁, 张雪萍, 陈吉平, 张海军            | (143) |
| 古浪河流域大气降水稳定同位素的时空特征及其环境意义                           | 桂娟, 李宗省, 冯起, 卫伟, 李永格, 吕越敏, 袁瑞丰, 张百娟           | (149) |
| 夏季闽江CDOM的空间分布与降解特征                                  | 程琼, 庄婉娥, 王辉, 陈革, 杨丽阳                          | (157) |
| 亚热带河口陆基养虾塘水体CDOM三维荧光光谱平行因子分析                        | 朱爱菊, 孙东耀, 谭季, 黄佳芳, 罗敏                         | (164) |
| 基于UV-vis及EEMs解析周村水库夏秋季降雨不同相对分子质量DOM的光谱特征及来源         | 周石磊, 张艺冉, 黄廷林, 刘艳芳, 张磊, 李贵霞, 岳琳, 罗晓           | (172) |
| 分层型水源水库溶解性有机物性质及其膜污染特性                              | 李凯, 王晓东, 黄廷林, 李舒, 刘双                          | (185) |
| 重庆西部山区典型湖泊水-气界面CO <sub>2</sub> 交换通量及其影响因素           | 罗佳宸, 倪茂飞, 李思悦                                 | (192) |
| 基于稀疏表达的水体遥感反射率高光谱重构及其应用                             | 李渊, 李云梅, 郭宇龙, 张运林, 张毅博, 胡耀躲, 夏忠               | (200) |
| 巢湖十五里河河床地貌单元沉积物硝化速率及污染特征                            | 李如忠, 阙凤翔, 熊鸿斌, 王莉                             | (211) |
| 特大城市河流表层沉积物磷形态分布及有效性:以成都市为例                         | 丁瑶, 欧阳莉莉, 石清, 高平川, 赖承钺, 陈舒平, 贾滨洋, 姚刚          | (219) |
| 黄河中游(渭南—郑州段)全/多氟烷基化合物的分布及通量                         | 李琦路, 程相会, 赵祯, 郭萌然, 袁梦, 华夏, 方祥光, 孙红文           | (228) |
| 重工业城市岩溶地下水中多环芳烃污染特征及来源                              | 苗迎, 孔祥胜, 李成展                                  | (239) |
| 沈抚新城地下水中PAHs的污染特征及健康风险评价                            | 张士超, 姚宏, 向鑫鑫, 刘殷佐, 刘明丽, 鲁根涛, 于晓华              | (248) |
| 多环芳烃及其衍生物在北京纳污河流中的分布及健康风险                           | 付璐婧, 李一兵, 乔梦, 赵旭                              | (256) |
| 原水性质对新型含Ca <sup>2+</sup> 复合混凝剂混凝过程的影响               | 曲江东, 徐慧, 徐建坤, 段晋明, 门彬, 王东升                    | (263) |
| 水体中磺胺甲噁唑间接光降解作用                                     | 李聪鹤, 车潇炜, 白莹, 石晓勇, 苏荣国                        | (273) |
| MoS <sub>2</sub> /BiOI复合光催化剂制备及其光催化氧化还原性能           | 张亮, 赵朝成, 高先瑶, 闫青云, 王帅军, 董培, 侯亚璐               | (281) |
| 纳米零价铜活化分子氧降解水中恩诺沙星                                  | 倪永炯, 程永清, 徐梦苑, 邱春根, 马晓雁, 李军, 邓靖               | (293) |
| 不同类型LDHs负载改性麦饭石对Cr(VI)吸附性能                          | 张翔凌, 邓礼楚, 方晨佳, 雷雨, 何春艳, 高晨光, 赵双杰, 向洋          | (300) |
| 单层硅烷负载磁铁矿纳米颗粒的制备及除磷性能                               | 邢明超, 谢强, 陈守慧, 吴德意                             | (310) |
| 新生态型聚硅酸铁锰处理染料废水的优化                                  | 唐立朋, 魏群山, 吕强, 张弛, 刘亚男, 柳建设                    | (318) |
| 不同外加电压下自养型生物阴极还原硫酸盐的性能及生物膜群落响应                      | 胡佳萍, 曾翠平, 骆海萍, 刘广立, 张仁铎, 卢耀斌                  | (327) |
| 碳源对O/A-F/F模式积累内源聚合物及反硝化的影响                          | 崔有为, 金常林, 王好韩, 李晶                             | (336) |
| 进水C/P对SNEDPR系统脱氮除磷性能的影响                             | 甄建园, 于德爽, 王晓霞, 陈光辉, 都叶奇, 袁梦飞, 杜世明             | (343) |
| 不同污泥龄(SRT)对SNEDPR系统脱氮除磷影响                           | 王晓霞, 甄建园, 赵骥, 于德爽, 都叶奇, 杜世明, 袁梦飞, 张帆          | (352) |
| 后置短程反硝化AOA-SBR工艺实现低C/N城市污水的脱氮除磷                     | 巩秀珍, 于德爽, 袁梦飞, 王晓霞, 陈光辉, 王钧, 毕春雪, 都叶奇         | (360) |
| 缺氧-好氧连续流亚硝化颗粒污泥反应器的启动及稳定运行                          | 李冬, 郭跃洲, 劳会妹, 曹美忠, 张杰                         | (369) |
| 低温SNAD颗粒污泥工艺启动方式                                    | 李冬, 崔雅倩, 赵世勋, 刘志诚, 张杰                         | (376) |
| 不同取样尺度和数量下针阔混交林土壤呼吸的空间异质性                           | 严俊霞, 孙琦, 李君剑, 李洪建                             | (383) |
| 轮作方式对冬水田温室气体排放的影响                                   | 冯夕, 江长胜, 彭小乐, 李彦沛, 郝庆菊                        | (392) |
| 紫色土N <sub>2</sub> O排放及氨氧化微生物群落结构对玉米秸秆与化肥减量配施的响应     | 黄容, 高明, 王莹燕, 黎嘉成, 徐国鑫, 罗梅, 徐畅                 | (401) |
| 岩溶地区不同土地利用方式土壤固碳细菌群落结构特征                            | 张双双, 靳振江, 贾远航, 李强                             | (412) |
| 丹江口库区库滨带植被土壤细菌群落多样性及PICRUSt功能预测分析                   | 孙峰, 田伟, 张菲, 陈彦, 任学敏, 庞发虎, 李玉英, 姚伦广, 陈兆进       | (421) |
| 硫酸盐还原菌介导的吸附态砷的迁移转化                                  | 贾欠欠, 李伟, 王亚男, 段晋明, 刘玉灿                        | (430) |
| 铅锌冶炼厂周边农田土壤重金属污染空间分布特征及风险评估                         | 王洋洋, 李方方, 王笑阳, 杨志辉, 韩科, 阮心玲                   | (437) |
| 新疆干旱区某矿冶场对周围土壤重金属累积的影响                              | 杨伟光, 王美娥, 陈卫平                                 | (445) |
| 九龙江流域水稻土重金属赋存形态及污染评价                                | 林承奇, 黄华斌, 胡恭任, 于瑞莲, 郝春莉, 林颖                   | (453) |
| 草海典型高原湿地食物链中汞同位素组成特征                                | 许议元, 何天容                                      | (461) |
| Cd、Zn交互作用对三七景天根系形态和重金属吸收积累的影响                       | 郭俊梅, 杨俊兴, 杨军, 陈同斌, 李厚恩, 徐铁兵, 周小勇, 叶勇, 于豹      | (470) |
| 不同浓度镉处理对铅胁迫下玉米生长和铅吸收的影响                             | 王起凡, 郭伟, 常青, 潘亮, 周昕南, 杨亮, 李娥                  | (480) |
| 广西龙江鱼类镉含量分布特征及生物积累特性分析                              | 王俊能, 赵学敏, 胡国成, 钟松雄, 姚玲爱, 马千里, 许振成             | (488) |
| 6种消解方法对荧光测定生物体内聚苯乙烯微塑料的影响                           | 邹亚丹, 徐擎擎, 张智, 李富云, 李锋民                        | (496) |
| 一种负载功能微生物的营养缓释填料的制备及性能评价                            | 冯克, 徐丹华, 成卓韦, 於建明, 陈建孟                        | (504) |
| 《环境科学》征订启事(113)                                     |                                               |       |
| 《环境科学》征稿简则(238)                                     |                                               |       |
| 信息(93, 262, 342)                                    |                                               |       |



# 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

杨柳<sup>1</sup>, 张斌<sup>1</sup>, 王康慧<sup>1</sup>, 麻丁仁<sup>1</sup>, 盛重义<sup>1,2\*</sup>

(1. 南京师范大学环境学院, 南京 210023; 2. 浙江大学苏州工业技术研究院, 苏州 215163)

**摘要:** 固定污染源可凝结颗粒物在监测时常被忽视, 为了减少可凝结颗粒物排放, 本文研究了其在烟气净化设施中的转化规律。结果表明, 湿法脱硫装置、湿式电除尘装置对可凝结颗粒物的去除有协同作用, 烟气中可凝结颗粒物质量浓度均高于可过滤颗粒物, 但总颗粒物(可凝结颗粒物和可过滤颗粒物之和)排放量达到超低排放要求。在湿法脱硫进出口处可凝结颗粒物中有机物的质量浓度均超过了无机物的质量浓度, 但在湿式电除尘出口处趋近相等。根据可凝结颗粒物无机部分水溶性离子成分及浓度的测试结果, 推测可凝结颗粒物捕集过程中会有  $\text{PM}_{0.3}$  进入, 可凝结颗粒物形成过程中会产生酸雾, 并且在湿法脱硫、湿式电除尘作用下, 酸性加强。本研究发现  $\text{SO}_4^{2-}$  是可凝结颗粒物无机部分主要的特征水溶性离子。

**关键词:** 可凝结颗粒物(CPM); 转化; 湿法脱硫; 湿式电除尘; 酸雾

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)01-0121-05 DOI: 10.13227/j.hjxx.201805260

## Conversion Characteristics of Combustible Particles from Coal-fired Flue Gas in WFGD and WESP

YANG Liu<sup>1</sup>, ZHANG Bin<sup>1</sup>, WANG Kang-hui<sup>1</sup>, MA Ding-ren<sup>1</sup>, SHENG Zhong-yi<sup>1,2\*</sup>

(1. School of Environment Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China; 2. Suzhou Industrial Technology Research Institute of Zhejiang University, Suzhou 215163, China)

**Abstract:** Monitoring of condensable particulate matter (CPM) emitted from stationary pollution sources has often been neglected. To reduce the emission of CPM, it is necessary to study its transformation rules in flue-gas cleaning devices. The results show that the wet flue gas desulfurization (WFGD) and wet electrostatic precipitator (WESP) have a good synergistic effect on the removal of CPM. The concentration of CPM in flue gas is higher than that of filterable particulate matter, but the concentration of total particulate matter (sum of the condensable particulate matter and filterable particulate matter) reaches ultra-low emission requirements. The organic mass concentration of CPM in the WFGD inlet and outlet is larger than that of inorganic components, which is equalized during the treatment of WESP. Based on measurements of the components and concentrations of water-soluble ions in the inorganic part of the CPM,  $\text{PM}_{0.3}$  can be joined during the CPM trapping process and an acid mist is generated during the condensable particulate matter formation. The acid mist is strengthened through the treatment of WFGD and WESP. The experiment results also show that  $\text{SO}_4^{2-}$  is the main component of water-soluble ions in the inorganic part of CPM.

**Key words:** condensable particulate matter (CPM); conversion; wet flue gas desulfurization (WFGD); wet electrostatic precipitator (WESP); acid mist

从完整的固定污染源排放颗粒物谱系角度划分, 燃煤电厂排放的一次颗粒物包括可过滤颗粒物(filterable particulate matter, FPM)与可凝结颗粒物(condensable particulate matter, CPM)<sup>[1]</sup>。CPM是在固定污染源排气中在采样位置处为气态, 离开烟道后在环境状况下降温数秒内凝结为液态或固态的颗粒物<sup>[2]</sup>。我国固定污染源颗粒物测试标准采取过滤-捕集-烘干称重的方式测定固定源中的颗粒物浓度, 无法对气态 CPM 进行捕集因而逃脱了监测。

到目前为止, CPM 研究多集中于其在烟囱出口的排放特征, 主要包括排放量级与成分谱分析。Corio 等<sup>[3]</sup>归纳了 18 个燃煤电厂 CPM 排放规律, 显示 CPM 平均占总  $\text{PM}_{10}$  排放量的 76%; 其中 CPM 最大排放量占总颗粒物(total particulate matter, TPM)的 92%、CPM 最小排放量占 TPM 的 12%, CPM 平

均占 TPM 为 49%。Yang 等<sup>[4,5]</sup>研究了燃煤电厂、制砖厂、焚化炉、电弧炉和烧结炉排放 CPM 的化学组成, 其中  $\text{CPM}_{\text{无机}}$  质量浓度分别占总 CPM 的 89.0%、72.3%、89.8%、72.8% 和 95.4%。胡月琪等<sup>[6]</sup>分析了  $\text{CPM}_{\text{无机}}$  中  $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{F}^-$  等离子的排放特征, 表明  $\text{F}^-$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  是 CPM 中主要特征水溶性离子。但这些研究尚未涉及 CPM 在烟气净化装置中的转化。

湿法脱硫装置(wet flue gas desulfurization,

收稿日期: 2018-05-31; 修订日期: 2018-07-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(41771498, 51508281); 江苏省高校自然科学基金项目(16KJD610001)

作者简介: 杨柳(1969~), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为大气污染控制, E-mail: liuhuijia@263.net

\* 通信作者, E-mail: 09377@njnu.edu.cn

WFGD) 和湿式电除尘装置 (wet electrostatic precipitator, WESP) 对烟气中的气态污染物存在影响. 莫华等<sup>[7]</sup>研究了不同湿法脱硫装置对  $\text{SO}_3$  的去除效果, 发现旋汇耦合湿法脱硫装置捕集效果最好. Li 等<sup>[8]</sup>发现 WFGD 处理后多环芳烃浓度下降. 陈鹏芳等<sup>[9]</sup>在 WESP 进出口实测  $\text{SO}_3$  质量浓度, 得出 WESP 对  $\text{SO}_3$  有 55.63% ~ 76.11% 去除效果. 另外 Mizuno<sup>[10]</sup>认为 WESP 对有机物 (多环芳烃、二噁英等) 有一定的去除作用. 由于 CPM 在烟道中为气态, 可以推测 WFGD 和 WESP 装置对其迁移转化必然也会存在影响. 鉴于此, 本研究利用自主搭建的 CPM 采样装置, 结合烟气中 FPM 的排放规律, 分析了 CPM 在 WFGD 和 WESP 装置中的转化特性, 以期减少 CPM 排放提供理论依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 测试机组

本研究对象为河北省某燃煤电厂一台达到超低排放限值的煤粉炉 (300 MW 发电机组), 测试期间的发电负荷为 100%, 依次配备选择性催化还原脱硝系统 (SCR)、电除尘器 (ESP)、湿法脱硫装置 (WFGD) 和湿式电除尘器 (WESP), 其中 WFGD 采用为石灰石-石膏法, 采样点位如图 1 所示.

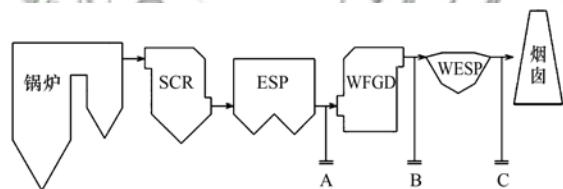


图 1 采样点选择示意

Fig. 1 Schematic diagram of the sampling points

### 1.2 采样方法

采样点设置在 WFGD 前后和 WESP 出口处. 自主搭建 FPM、CPM 同时采样装置, 采样装置如图 2 所示. 样品采集利用等速跟踪方式, 现场采样设备采用青岛崂应的 3012D 烟尘采样仪进行跟踪、抽气. 烟气首先经过设置在烟道内的 FPM 滤膜过滤, 捕集 FPM; 过滤后含有 CPM 的烟气进入循环冷凝的两级冷凝管 (温度设定为 20 ~ 30℃), 然后将冷凝生成的 CPM 随烟气冲击捕集于 2 个抽滤瓶中, 实现控温冷凝和冲击冷凝的双冷凝. 每次采样后用超纯水和正己烷分别润洗采样管、螺旋冷凝管、连接管. 每组样品采样时间约 65 ~ 85 min, 流量范围约 15 ~ 25  $\text{min} \cdot \text{L}^{-1}$ . 现场采集的每组样品包括 FPM 滤膜、冷凝液、超纯水润洗液和正己烷润洗液, 每个采样点采集 3 组样品.

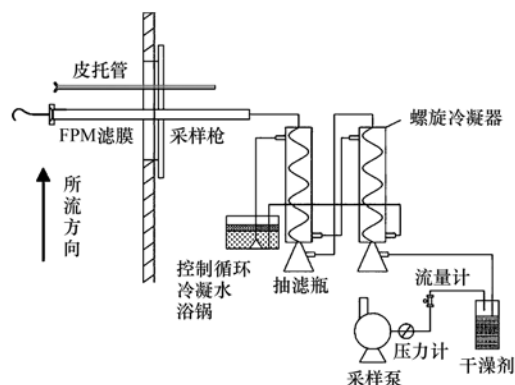


图 2 FPM、CPM 采样装置示意

Fig. 2 Distribution of the concentrations of condensable and filterable PM

### 1.3 样品的处理与分析

采样前后石英膜 (47 mm) 烘干至恒重, 通过十万分之一的感量天平 (Sartorius CPA225D, 德国) 称量, 得出 FPM 质量, 结合采样流量计算出烟气中 FPM 实测质量浓度.

将冷凝液和超纯水润洗液合并倒入分液漏斗中, 加入 30 mL 正己烷溶液萃取超声 2 min, 重复步骤 3 次. 萃取后的正己烷溶液与正己烷润洗液合并, 倒入已恒重的锡纸盘中, 在通风橱中干燥至 10 mL, 再放入恒温恒湿干燥皿中干燥至恒重, 锡纸盘增重即为 CPM 有机物质量. 萃取后的无机溶液用超纯水定容至 100 mL, 其中 50 mL 倒入已恒重的锡纸盘, 在电加热板上蒸干至剩余 10 mL, 将锡纸盘转移至恒温、恒湿干燥皿中干燥至恒重, 锡纸盘增重乘 2 即为 CPM 无机物的质量. 另结合采样流量, 计算得出烟气中  $\text{CPM}_{\text{有机}}$ 、 $\text{CPM}_{\text{无机}}$  和 CPM 实测质量浓度. 剩余 50 mL 超声 6 min 后用 0.45  $\mu\text{m}$  滤膜过滤后测定 pH 值 (Mettler-Toledo Seven Compact, 瑞士), 并进行离子成分和浓度分析.

在离子分析中,  $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  用 NexION 300X 电感耦合等离子体质谱仪 (Perkin Elmer, 美国) 分析;  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{F}^-$ 、 $\text{Cl}^-$  用 Dionex-ICS-1100 离子色谱 (Dionex, 美国) 分析;  $\text{NH}_4^+$  用水杨酸-次氯酸盐光度法分析<sup>[11]</sup>. 再结合采样流量算出各种离子浓度.

### 1.4 质量控制

为保证样品分析结果的准确可靠, 每次现场采样前分别用超纯水和正己烷对采样系统进行清洗, 并测试采样装置气密性, 每个采样点采集平行样品 3 次, 平行样之间相对偏差不大于 20%. 空白滤膜和空白超纯水均应带到采样现场, 并对空白滤膜和空白超纯水进行相同的处理过程和分析过程; 每组样品采样结束后, 将滤膜尘面对折, 置于干净的膜



盒内,并用盒盖密封和粘贴标签.装有采样膜的膜盒、冷凝液、超纯水和正己烷润洗液必须放置于低温洁净的冷藏箱中,尽快送实验室进行分析.

### 1.5 有关公式

(1) 烟气中实测总颗粒物排放质量浓度计算公式如下:

$$c' = c_{\text{FPM}} + c_{\text{CPM}}$$

式中,  $c'$  为实测总颗粒物排放质量浓度,  $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $c_{\text{FPM}}$ 、 $c_{\text{CPM}}$  分别为烟气中实测 FPM、CPM 质量浓度,  $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ .

(2) 烟气中总颗粒物基准排放质量浓度计算公式如下<sup>[12]</sup>:

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

式中,  $c$  为标准状态下总颗粒物基准排放质量浓度,  $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $\varphi'(\text{O}_2)$ 、 $\varphi(\text{O}_2)$  分别为实测含氧量、基准含氧量, %.

## 2 结果与讨论

### 2.1 CPM 在 WFGD 和 WESP 中的转化

CPM、FPM 在各采样点的质量浓度如图 3 所示,两种颗粒物质量浓度在 WFGD 和 WESP 作用下都有较大幅度的下降. CPM 在 WFGD 入口、出口及 WESP 出口质量浓度依次下降为 26.22、13.04、5.53  $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ; FPM 为 12.07、3.63、2.12  $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ . WFGD 和 WESP 对颗粒物去除的效果不同: WESP 对 CPM 去除效果比 WFGD 去除效果更好,去除率达到 57.59%; 而 WFGD 对 FPM 有着较好的去除效果,去除率为 69.92%.

CPM 在烟道中(WFGD 进口到 WESP 出口)的含量一直占据主导地位,在 WFGD 进出口、WESP 出口, CPM 质量浓度是 FPM 的 2.17、3.59、2.60 倍. 而未配备超低排放设施的燃煤电厂,排放的 CPM 与 FPM 质量浓度比约为 1:1<sup>[13]</sup>. 主要原因是烟气经高效除尘改造后, FPM 含量大幅度降低,使得 CPM 所占比例加大<sup>[14]</sup>.

另外,经过 WFGD 和 WESP 后, CPM 的去除率达到 78.90%, 使其在 WESP 出口质量浓度仅为 5.53  $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ; FPM 去除率达到 82.43%, 在 WESP 出口处质量浓度为 2.12  $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ , 其监测结果与马子轸等<sup>[15]</sup>所得结果相接近. 本研究中,总颗粒物实测质量浓度为 7.65  $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ , 其基准排放质量浓度为 7.00  $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ , 达到超低排放 10  $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$  的要求<sup>[16]</sup>.

### 2.2 CPM 化学组分在 WFGD、WESP 中转化

CPM 是由有机组分和无机组分构成的,其在烟道内的成分谱分布如图 3 所示. CPM<sub>有机</sub> 在 WFGD

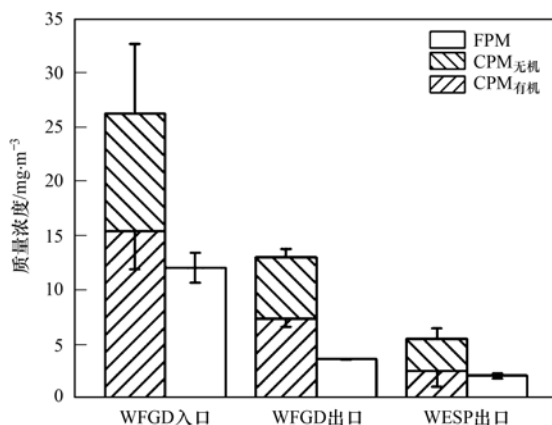


图3 CPM、FPM 质量浓度分布

Fig. 3 Distribution of the concentrations of condensable and filterable PM

入口、出口及 WESP 出口质量浓度分别为 15.43、7.40 和 2.57  $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ , CPM<sub>无机</sub> 则为 10.79、5.63 和 2.95  $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ . WFGD、WESP 对 CPM<sub>有机</sub> 和 CPM<sub>无机</sub> 都有着较好的去除效果,但对 CPM<sub>有机</sub> 的去除效果更为显著,特别是 WESP 对 CPM<sub>有机</sub> 去除率达到了 65.27%. 对于 CPM<sub>无机</sub> 而言, WFGD 和 WESP 对其去除率相近,约为 47%. 因此 CPM<sub>有机</sub> 占 CPM 的比重逐渐下降,从 WFGD 入口的 58.85% 变为 WESP 出口的 46.61%,甚至在 WESP 出口处 CPM<sub>无机</sub> 略超过 CPM<sub>有机</sub>. 另有 Yang 等<sup>[5]</sup>的研究表明,燃煤电厂 CPM 排放特征中, CPM<sub>无机</sub> 占 CPM 约 90%, 远远大于本实验结果的比例,主要原因在于他们的研究较早,烟气净化设施仅有静电除尘和脱硫装置,而现阶段采样电厂实行超低排放,烟气净化设施对烟气中  $\text{SO}_2$ 、 $\text{SO}_3$ 、 $\text{NO}_x$  等组分进行深度处理,大幅降低了烟道中凝结形成的 CPM<sub>无机</sub> 烟气组分,导致 WESP 出口 CPM<sub>无机</sub> 浓度很低.

### 2.3 CPM 无机水溶性离子在 WFGD、WESP 中转化

水溶性离子是 CPM<sub>无机</sub> 的重要组成部分,其分布情况见图 4. 经过 WFGD、WESP 处理后, CPM<sub>无机</sub> 中  $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  的离子质量浓度有较大降低. 这主要由于 4 种阳离子来源于穿透 FPM 滤膜的  $\text{PM}_{0.3}$ <sup>[17]</sup>, 而  $\text{PM}_{0.3}$  在 WFGD 系统中会被脱硫浆液喷淋洗涤而脱除一部分<sup>[18]</sup>. WESP 系统通过高压电荷放电使粉尘荷电,也能捕集一部分的  $\text{PM}_{0.3}$ <sup>[19]</sup>, 从而导致阳离子质量浓度降低.

烟气中的  $\text{NH}_3$  来源于 SCR 系统的逃逸. 在 WFGD 系统中,气态  $\text{NH}_3$  会凝结在颗粒物表面或溶解到小液滴中,使脱硫后 FPM 中  $\text{NH}_4^+$  质量浓度增加<sup>[20, 21]</sup>. 同时气态  $\text{NH}_3$  的质量浓度随之降低,导致 CPM 中  $\text{NH}_4^+$  质量浓度下降,如图 4 所示. WESP

对气态的  $\text{NH}_3$  没有去除作用, 因此 WESP 出口 CPM 中  $\text{NH}_4^+$  质量浓度与 WFGD 出口的相近。

图 4 观察到 CPM<sub>无机</sub> 阴离子的质量浓度比阳离子高出很多, 测量 WFGD 入口、出口、WESP 出口 CPM 无机溶液 pH, 分别为 4.40、3.96、3.57, 推断出 CPM 凝结过程以形成酸雾为主。

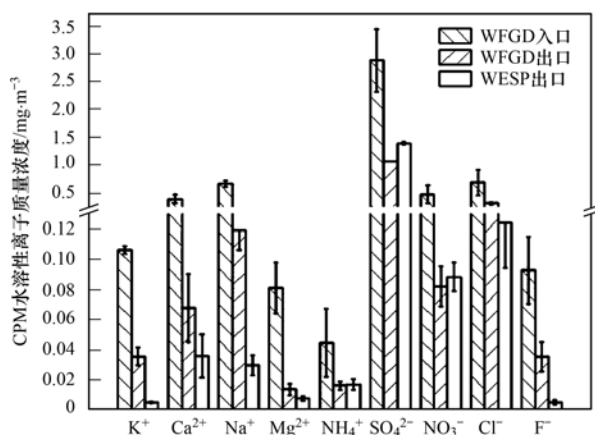
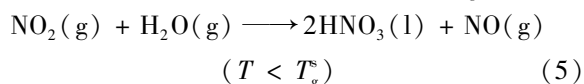
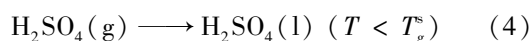
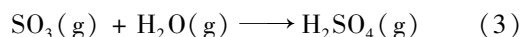
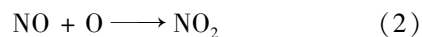
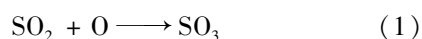


图 4 CPM 水溶性离子分布

Fig. 4 Distribution of the water-soluble ions of condensable PM

烟气经过 WESP 处理后,  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$  浓度有所增加。这一现象归因于烟气中  $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}$  被电晕放电时产生的活性物质(如  $\text{O}$ )氧化成  $\text{SO}_3$  和  $\text{NO}_2$  [22], 与前人的发现一致 [23, 24], 其反应见式(1)和(2)。  $\text{SO}_3$ 、 $\text{NO}_2$  在非凝结气体(如  $\text{N}_2$ )存在的条件下 [25], 易发生凝结形成酸雾。WESP 氧化后的  $\text{SO}_3$ 、 $\text{NO}_2$  进入采样装置中的冷凝管, 冷凝形成了  $\text{H}_2\text{SO}_4$  和  $\text{HNO}_3$ , 增加了  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$  浓度, 导致 CPM<sub>无机</sub> 的液体 pH 下降, 其反应如式(3)~(5)所示:



式中,  $T$  指气体温度,  $T_g^*$  指酸露点。

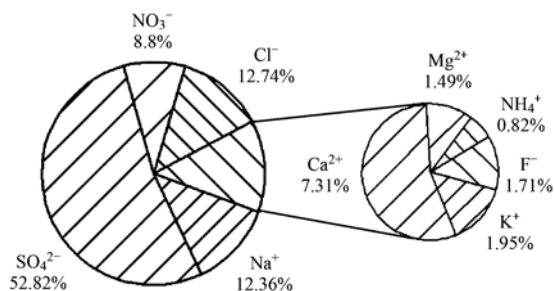


图 5 WFGD 入口 CPM 水溶性离子分布

Fig. 5 Percentage bar graph of the water-soluble ions of condensable PM in the WFGD inlet

从图 5~7 可知, CPM<sub>无机</sub> 水溶性离子中  $\text{SO}_4^{2-}$  质量浓度比重始终占据主导地位, 且其占比在 WFGD 入口、出口和 WESP 出口逐渐加大, 从 52.82% 增加到 81.67%, 可见硫氧化物对 CPM 的贡献较大。另外, CPM<sub>无机</sub> 的 pH 分布见图 8。

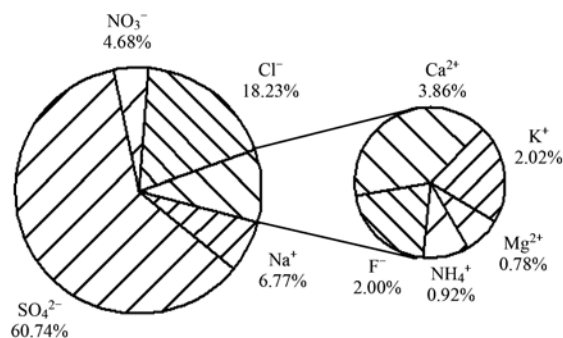


图 6 WFGD 出口 CPM 水溶性离子分布

Fig. 6 Percentage bar graph of the water-soluble ions of condensable PM in the WFGD outlet

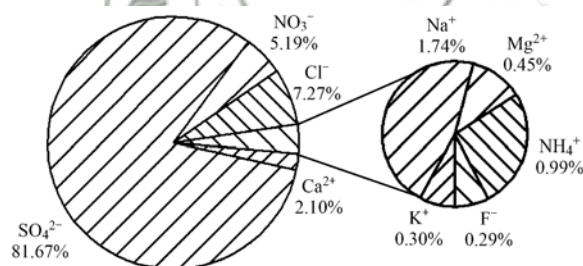


图 7 WESP 出口 CPM 水溶性离子分布

Fig. 7 Percentage bar graph of the water-soluble ions of condensable PM in the WESP outlet

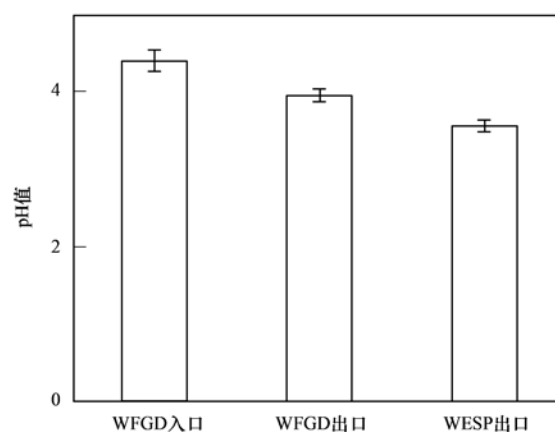


图 8 CPM<sub>无机</sub> 的 pH 分布

Fig. 8 Distribution of the pH of inorganic components of the condensable PM

### 3 结论

(1) 在装有超低排放设施的燃煤电厂, WFGD 和 WESP 装置对 CPM 有较好地去除作用, 但 CPM 依旧占据主导, 分别为 FPM 的 2.17、3.59、2.60 倍。

(2) 在 WFGD 和 WESP 装置中, CPM<sub>有机</sub> 去除率比 CPM<sub>无机</sub> 高, 使得烟气中 CPM 化学组分发生了变



化,而在 WESP 出口处  $CPM_{\text{有机}}$  在排放量上与  $CPM_{\text{无机}}$  几乎相等。

(3) CPM 中的  $K^+$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Na^+$ 、 $Mg^{2+}$  等离子能被 WFGD 和 WESP 设施很好地去;逃逸的  $NH_3$  在 WFGD 中有较好的脱除效果,导致其对 CPM 贡献较少;在 WFGD、WESP 系统中,  $SO_4^{2-}$  质量浓度比重一直占据主导作用,硫氧化物对 CPM 贡献较大。

#### 参考文献:

- [1] USEPA Method 201A, Determination of  $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$  emissions from stationary sources (constant sampling rate procedure) [S].
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Yang H H, Lee K T, Hsieh Y S, et al. Emission characteristics and chemical compositions of both filterable and condensable fine particulate from steel plants [J]. Aerosol and Air Quality Research, 2015, **15**(4): 1672-1680.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 莫华, 朱杰, 黄志杰, 等. 超低排放下不同湿法脱硫技术脱除  $SO_3$  效果测试与分析[J]. 中国电力, 2017, **50**(3): 46-50.  
Mo H, Zhu J, Huang Z J, et al. Test and study on  $SO_3$  removal performance of different wet flue gas desulfurization technologies at ultra-low pollutants emission [J]. Electric Power, 2017, **50**(3): 46-50.
- [8] 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.
- [9] 陈鹏芳, 朱庚富, 张俊翔. 基于实测的燃煤电厂烟气协同控制技术对  $SO_3$  去除效果的研究[J]. 环境污染与防治, 2017, **39**(3): 232-235.  
Chen P F, Zhu G F, Zhang J X. Research on  $SO_3$  removal efficiency by flue gas co-benefit control technique of coal-fired power plants based on field tests [J]. Environmental pollution and Control, 2017, **39**(3): 232-235.
- [10] Mizuno A. Electrostatic precipitation [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2000, **7**(5): 615-624.
- [11] 王琨, 贾琳琳, 黄丽坤, 等. 严重雾霾期大气  $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  中水溶性离子污染特征[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2014, **46**(12): 53-58.  
Wang K, Jia L L, Huang L K, et al. Pollution characteristics of water-soluble ions in  $PM_{2.5}$  and  $PM_{10}$  under severe haze days [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2014, **46**(12): 53-58.
- [12] GB 13223-2011, 火电厂大气污染物排放标准[S].  
GB 13223-2011, Emission standard of air pollutants for thermal power plants [S].
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 马子轶, 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.
- [16] 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].
- [17] 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.
- [18] 潘丹萍, 吴昊, 鲍静静, 等. 电厂湿法脱硫系统对烟气中细颗粒物及  $SO_3$  酸雾脱除作用研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, **36**(16): 4356-4362.  
Pan D P, Wu H, Bao J J, et al. Removal effect of wet flue gas desulfurization system on fine particles and  $SO_3$  acid mist from coal-fired power plants [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, **36**(16): 4356-4362.
- [19] 雒飞, 胡斌, 吴昊, 等. 湿式电除尘对  $PM_{2.5}/SO_3$  酸雾脱除特性的试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2017, **47**(1): 91-97.  
Luo F, Hu B, Wu H, et al. Experimental study on removal properties of  $PM_{2.5}$  and sulfuric acid mist by wet electrostatic precipitator [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2017, **47**(1): 91-97.
- [20] 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.
- [21] Ma Z Z, Li Z, Jiang J K, et al.  $PM_{2.5}$  emission reduction by technical improvement in a typical coal-fired power plant in China [J]. Aerosol and Air Quality Research, 2017, **17**(2): 636-643.
- [22] 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.
- [23] Huang J Y, Zhang F, Shi Y J, et al. Investigation of a pilot-scale wet electrostatic precipitator for the control of sulfuric acid mist from a simulated WFGD system [J]. Journal of Aerosol Science, 2016, **100**: 38-52.
- [24] Yang C L. Pulse-energized wet tubular electrostatic precipitator for  $NO_x$  emission control [J]. Environmental Progress & Sustainable Energy, 1999, **18**(2): 80-86.
- [25] Pla Perujo M. Condensation of water vapor and acid mixtures from exhaust gases [D]. Berlin: Technische Universität, 2005.

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| Cause and Effect Evaluation of PM <sub>2.5</sub> During Three Red Alerts in Beijing from 2015 to 2016 .....                                                                                                                              | LÜ Zhe, WEI Wei, ZHOU Ying, <i>et al.</i> ( 1 )                           |
| Effects of Emission Reductions of Key Sources on the PM <sub>2.5</sub> Concentrations in the Yangtze River Delta .....                                                                                                                   | YU Yan, WANG Ze-hua, CUI Xue-dong, <i>et al.</i> ( 11 )                   |
| Health Benefit Analyses of the Clean Air Action Plan Implementation in Shanghai .....                                                                                                                                                    | DAI Hai-xia, AN Jing-yu, LI Li, <i>et al.</i> ( 24 )                      |
| Monitoring and Analysis of the Spatio-temporal Change Characteristics of the PM <sub>2.5</sub> Concentration Over Beijing-Tianjin-Hebei and Its Surrounding Regions Based on Remote Sensing .....                                        | CHEN Hui, LI Qing, LI Ying, <i>et al.</i> ( 33 )                          |
| Applicability of MODIS C006 Aerosol Products in a Typical Environmental Area of the Beijing-Tianjin-Hebei Region .....                                                                                                                   | WANG Hai-lin, LIU Qiong, CHEN Yong-hang, <i>et al.</i> ( 44 )             |
| Impact of Meteorological Factors on the Ozone Pollution in Hong Kong .....                                                                                                                                                               | ZHAO Wei, GAO Bo, LIU Ming, <i>et al.</i> ( 55 )                          |
| Transport Characteristics of PAN and O <sub>3</sub> in the Lower Atmosphere of the Boundary Layer in Tianjin in Summer .....                                                                                                             | YAO Qing, MA Zhi-qiang, LIN Wei-li, <i>et al.</i> ( 67 )                  |
| Analysis of Pollution Characteristics and Sources of PM <sub>2.5</sub> Chemical Components in Chengdu in Winter .....                                                                                                                    | WU Ming, WU Dan, XIA Jun-rong, <i>et al.</i> ( 76 )                       |
| Transport Pathways and Potential Sources of PM <sub>2.5</sub> During the Winter in Zhengzhou .....                                                                                                                                       | DUAN Shi-guang, JIANG Nan, YANG Liu-ming, <i>et al.</i> ( 86 )            |
| Characteristics and Sources of Water-soluble Organic Carbon/Nitrogen in PM <sub>2.5</sub> During Spring in Changzhou .....                                                                                                               | LI Qing, HUANG Wen-qian, MA Shuai-shuai, <i>et al.</i> ( 94 )             |
| Pollution Characteristics and Emission Factors of VOCs from Vehicle Emissions in the Tianjin Tunnel .....                                                                                                                                | SUN Lu-na, LIU Yan, ZHAO Jing-bo, <i>et al.</i> ( 104 )                   |
| Size Distribution and Carbon Component Characteristics of Atmospheric Particulate Matter from Motor Vehicles .....                                                                                                                       | MEI De-qing, ZHU Zong-ning, SUN Tian-shuo, <i>et al.</i> ( 114 )          |
| Conversion Characteristics of Combustible Particles from Coal-fired Flue Gas in WFGD and WESP .....                                                                                                                                      | YANG Liu, ZHANG Bin, WANG Kang-hui, <i>et al.</i> ( 121 )                 |
| Particle Removal Characteristics of an Ultra-low Emission Coal-fired Power Plant .....                                                                                                                                                   | RUAN Ren-hui, TAN Hou-zhang, DUAN Yu-feng, <i>et al.</i> ( 126 )          |
| Spatial and Temporal Distribution Characteristics and Fugitive Dust Emission of Building Sites in Beijing .....                                                                                                                          | ZHANG Li-kun, LI Ling-jun, JIANG Lei, <i>et al.</i> ( 135 )               |
| Simultaneous Removal of Polychlorinated Dibenzo- <i>p</i> -dioxins/dibenzofurans, Polychlorinated Biphenyls, and Polychlorinated Naphthalenes From Flues Gases From Coke Gas Burning Using Selective Catalytic Reduction Equipment ..... | REN Mei-hui, FAN Yun, WANG Sheng, <i>et al.</i> ( 143 )                   |
| Space-Time Characteristics and Environmental Significance of the Stable Isotopes in Precipitation in the Gulang River Basin .....                                                                                                        | GUI Juan, LI Zong-xing, FENG Qi, <i>et al.</i> ( 149 )                    |
| Spatial Distribution and Degradation of CDOM in the Minjiang River in Summer .....                                                                                                                                                       | CHENG Qiong, ZHUANG Wan-e, WANG Hui, <i>et al.</i> ( 157 )                |
| Parallel Factor Analysis of Fluorescence Excitation Emission Matrix Spectroscopy of CDOM from the Mid-culture Period of Shrimp Ponds in a Subtropical Estuary .....                                                                      | ZHU Ai-ju, SUN Dong-yao, TAN Ji, <i>et al.</i> ( 164 )                    |
| Spectral Characteristics and Sources of Dissolved Organic Matter With Different Relative Molecular Weight from Rainwater From Summer and Autumn in the Zhoucun Reservoir Based on UV-Vis and EEMs .....                                  | ZHOU Shi-lei, ZHANG Yi-ran, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> ( 172 )         |
| Characteristics and Fouling Potential of Dissolved Organic Matter in a Stratified Source Water Reservoir .....                                                                                                                           | LI Kai, WANG Xiao-dong, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> ( 185 )             |
| Water-Air Interface CO <sub>2</sub> Exchange Flux of Typical Lakes in a Mountainous Area of the Western Chongqing and Their Influencing Factors .....                                                                                    | LUO Jia-chen, NI Mao-fei, LI Si-yue ( 192 )                               |
| Reconstruction of Water Hyperspectral Remote Sensing Reflectance Based on Sparse Representation and Its Application .....                                                                                                                | LI Yuan, LI Yun-mei, GUO Yu-long, <i>et al.</i> ( 200 )                   |
| Nitrification Rates and Pollution Characteristics of Sediments with Different Geomorphic Features in the Shiuli Stream, Chaohu Lake Basin .....                                                                                          | LI Ru-zhong, QUE Feng-xiang, XIONG Hong-bin, <i>et al.</i> ( 211 )        |
| Distribution and Bioavailability of Phosphorus in Surface Sediments in Megalopolis: A Case Study of Chengdu .....                                                                                                                        | DING Yao, OUYANG Li-li, SHI Qing, <i>et al.</i> ( 219 )                   |
| Distribution and Fluxes of Perfluoroalkyl and Polyfluoroalkyl Substances in the Middle Reaches of the Yellow River (Weinan-Zhengzhou Section) .....                                                                                      | LI Qi-lu, CHENG Xiang-hui, ZHAO Zhen, <i>et al.</i> ( 228 )               |
| Distribution and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Karst Groundwater System in a Strongly Industrial City .....                                                                                                           | MIAO Ying, KONG Xiang-sheng, LI Cheng-zhan ( 239 )                        |
| Pollution Characteristic and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Groundwater of Shen-Fu New City in the Hunhe River Basin .....                                                                                   | ZHANG Shi-chao, YAO Hong, XIANG Xin-xin, <i>et al.</i> ( 248 )            |
| Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Their Derivatives in Wastewater-Receiving Rivers in Beijing .....                                                                                               | FU Lu-jing, LI Yi-bing, QIAO Meng, <i>et al.</i> ( 256 )                  |
| Influence of the Coagulation Mechanism on the Coagulation Performances Using New Composite Coagulants: Role of the Raw Water Characteristics .....                                                                                       | QU Jiang-dong, XU Hui, XU Jian-kun, <i>et al.</i> ( 263 )                 |
| Indirect Photodegradation of Sulfamethoxazole in Water .....                                                                                                                                                                             | LI Cong-he, CHE Xiao-wei, BAI Ying, <i>et al.</i> ( 273 )                 |
| Fabrication of the Heterojunction Photocatalyst MoS <sub>2</sub> /BiOI and Its Investigation of Its Photocatalytic Reduction and Oxidation Activities .....                                                                              | ZHANG Liang, ZHAO Chao-cheng, GAO Xian-yao, <i>et al.</i> ( 281 )         |
| Nanoscale Zero-valent Copper-Activated Molecular Oxygen for the Degradation of Enrofloxacin in Water .....                                                                                                                               | NI Yong-jiong, CHENG Yong-qing, XU Meng-yuan, <i>et al.</i> ( 293 )       |
| Adsorption of Cr(VI) in Water by Malfanite Modified with Different LDHs Coatings .....                                                                                                                                                   | ZHANG Xiang-ling, DENG Li-chu, FANG Chen-jia, <i>et al.</i> ( 300 )       |
| Preparation of the Silane Monolayer on Magnetite Nanoparticles and Its Performance with Respect to Phosphate Removal from Water .....                                                                                                    | XING Ming-chao, XIE Qiang, CHEN Shou-hui, <i>et al.</i> ( 310 )           |
| Optimization of Dyeing Wastewater Treatment with New Eco-friendly Polysilicate Ferromanganese .....                                                                                                                                      | TANG Li-peng, WEI Qun-shan, LÜ Qiang, <i>et al.</i> ( 318 )               |
| Sulfate Reduction and Microbial Community of Autotrophic Biocathode in Response to Externally Applied Voltage .....                                                                                                                      | HU Jia-ping, ZENG Cui-ping, LUO Hai-ping, <i>et al.</i> ( 327 )           |
| Effect of Carbon Sources on the Accumulation of Endogenous Polymers and Denitrification in the O/A-F/F Mode .....                                                                                                                        | CUI You-wei, JIN Chang-lin, WANG Hao-han, <i>et al.</i> ( 336 )           |
| Effect of the Influent C/P Ratio on the Nutrient Removal Characteristics of the SNEDPR System .....                                                                                                                                      | ZHEN Jian-yuan, YU De-shuang, WANG Xiao-xia, <i>et al.</i> ( 343 )        |
| Effect of Different Sludge Retention Time (SRT) Operations on the Nutrient Removal Characteristics of a SNEDPR System .....                                                                                                              | WANG Xiao-xia, ZHEN Jian-yuan, ZHAO Ji, <i>et al.</i> ( 352 )             |
| Denitrification and Phosphorus Removal from Low C/N Urban Sewage Based on a Post-Partial Denitrification AOA-SBR Process .....                                                                                                           | GONG Xiu-zhen, YU De-shuang, YUAN Meng-fei, <i>et al.</i> ( 360 )         |
| Startup and Stabilization of Nitrosation in an Anoxic-aerobic Continuous-flow Reactor with Granules .....                                                                                                                                | LI Dong, GUO Yue-zhou, LAO Hui-mei, <i>et al.</i> ( 369 )                 |
| Startup Strategies for the SNAD Granular Sludge Process at Low Temperature .....                                                                                                                                                         | LI Dong, CUI Ya-qian, ZHAO Shi-xun, <i>et al.</i> ( 376 )                 |
| Effect of the Sampling Scale and Number on the Heterogeneity of Soil Respiration in a Mixed Broadleaf-conifer Forest .....                                                                                                               | YAN Jun-xia, SUN Qi, LI Jun-jian, <i>et al.</i> ( 383 )                   |
| Effects of the Crop Rotation on Greenhouse Gases from Flooded Paddy Fields .....                                                                                                                                                         | FENG Xi, JIANG Chang-sheng, PENG Xiao-le, <i>et al.</i> ( 392 )           |
| Response of the Soil N <sub>2</sub> O Emission and Ammonia-oxidizing Microorganism Community to the Maize Straw Return with Reducing Fertilizer in Purple Soil .....                                                                     | HUANG Rong, GAO Ming, WANG Ying-yan, <i>et al.</i> ( 401 )                |
| Community Structure of CO <sub>2</sub> -fixing Soil Bacteria from Different Land Use Types in Karst Areas .....                                                                                                                          | ZHANG Shuang-shuang, JIN Zhen-jiang, JIA Yuan-hang, <i>et al.</i> ( 412 ) |
| Composition and Predictive Functional Analysis of Rhizosphere Bacterial Communities in Riparian Buffer Strips in the Danjiangkou Reservoir, China .....                                                                                  | SUN Feng, TIAN Wei, ZHANG Fei, <i>et al.</i> ( 421 )                      |
| Migration and Transformation of Adsorbed Arsenic Mediated by Sulfate Reducing Bacteria .....                                                                                                                                             | JIA Qian-qian, LI Wei, WANG Ya-nan, <i>et al.</i> ( 430 )                 |
| Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metal Contamination in Surface Farmland Soil Around a Lead and Zinc Smelter .....                                                                                                      | WANG Yang-yang, LI Fang-fang, WANG Xiao-yang, <i>et al.</i> ( 437 )       |
| Effect of a Mining and Smelting Plant on the Accumulation of Heavy Metals in Soils in Arid Areas in Xinjiang .....                                                                                                                       | YANG Wei-guang, WANG Mei-e, CHEN Wei-ping ( 445 )                         |
| Assessment of the Speciation and Pollution of Heavy Metals in Paddy Soils from the Jiulong River Basin .....                                                                                                                             | LIN Cheng-qi, HUANG Hua-bin, HU Gong-ren, <i>et al.</i> ( 453 )           |
| Characteristics of Stable Mercury Isotopic Compositions in the Food Web of the Caohai Lake .....                                                                                                                                         | XU Yi-yuan, HE Tian-rong ( 461 )                                          |
| Interaction of Cd and Zn Affecting the Root Morphology and Accumulation of Heavy Metals in <i>Sedum aizoon</i> .....                                                                                                                     | GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, YANG Jun, <i>et al.</i> ( 470 )               |
| Effects of Different Concentrations of Lanthanum on the Growth and Uptake of Pb by Maize Grown Under Moderate Lead Stress .....                                                                                                          | WANG Qi-fan, GUO Wei, CHANG Qing, <i>et al.</i> ( 480 )                   |
| Distribution and Bioaccumulation Characteristics of Cadmium in Fish Species from the Longjiang River in the Guangxi Autonomous Region .....                                                                                              | WANG Jun-neng, ZHAO Xue-min, HU Guo-cheng, <i>et al.</i> ( 488 )          |
| Influence of Six Digestion Methods on the Determination of Polystyrene Microplastics in Organisms Using the Fluorescence Intensity .....                                                                                                 | ZOU Ya-dan, XU Qing-qing, ZHANG Ge, <i>et al.</i> ( 496 )                 |
| Preparation of a Nutritional Slow-release Packing Material with Function Microorganisms and Its Characteristics Evaluation .....                                                                                                         | FENG Ke, XU Dan-hua, CHENG Zhuo-wei, <i>et al.</i> ( 504 )                |