

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

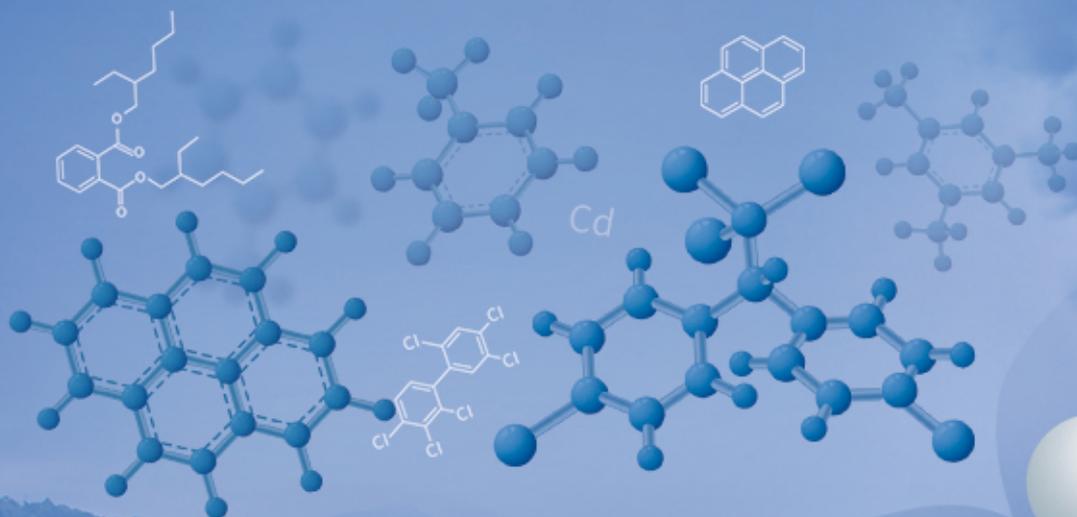
ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

升金湖水体优先污染物筛选与风险评价

龚雄虎, 丁琪琪, 金苗, 薛滨, 张路, 姚书春, 王兆德, 卢少勇, 赵中华



PAHs

VOCs

HMs

PCBs

OCPs

PAEs

ANTs

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年10月

第42卷 第10期

Vol.42 No.10

目次

PM_{2.5} 化学组分连续观测在污染事件源解析中的应用 蔡凡涛, 尚玥, 戴维, 谢鸣捷 (4575)

汾渭平原 PM_{2.5} 空间分布的地形效应 黄小刚, 赵景波, 孙从建, 汤慧玲, 梁旭琦 (4582)

华中地区冬季灰霾天气下 PM_{2.5} 中重金属污染特征及健康风险评价: 以湖北黄冈为例
..... 李星谕, 毛瑶, 陈展乐, 刘威杰, 程铖, 石明明, 许安, 苏业旺, 胡天鹏, 祁士华, 邢新丽 (4593)

华北区域大气中羰基化合物体积分数水平及化学反应活性 黄禹, 陈曦, 王迎红, 刘子锐, 唐贵谦, 李杏茹 (4602)

成都市春季 O₃ 污染特征及关键前体物识别 韩丽, 陈军辉, 姜涛, 徐晨曦, 李英杰, 王成辉, 王波, 钱骏, 刘政 (4611)

基于边界观测的长三角某工业区 O₃ 来源特征 黄晴, 黄银芝, 张珊, 金丹, 高松, 修光利 (4621)

廊坊开发区 8~9 月 O₃ 污染过程 VOCs 污染特征及来源分析 张敬巧, 王宏亮, 方小云, 刘锐泽, 丁文文, 凌德印, 王淑兰 (4632)

广东省家具行业基于涂料类型的 VOCs 排放特征及其环境影响
..... 曾春玲, 邵霞, 刘锐源, 姚懿娟, 李银松, 侯墨, 刘洋, 范丽雅, 叶代启 (4641)

厦门湾空气质量对新冠疫情管控的响应 徐超, 吴水平, 刘怡靖, 钟雪芬 (4650)

北京平原和延庆地区山谷风异同及对污染的影响 吴进, 李琛, 马志强, 孙兆彬, 韩婷婷, 邱雨露, 马小会, 李颖芳, 朱晓婉 (4660)

两湖盆地冬季区域大气颗粒物污染特征及独特的风场和下垫面影响
..... 朱燕, 赵天良, 白永清, 徐家平, 孙晓芸, 胡未央, 常嘉成, 杨婕, 朱从祯 (4669)

燃煤电厂颗粒物中硫酸根与硝酸根离子的转化规律 杨柳, 何晴, 盛重义 (4678)

长江流域主要干/支流化学特征及外源酸的影响 王琪, 于爽, 蒋萍萍, 孙平安 (4687)

土地利用对太湖入流河道营养盐的影响 连心桥, 朱广伟, 杨文斌, 康丽娟, 朱梦圆, 许海 (4698)

基于 eDNA 技术的渭河浮游动物多样性及关键种生态位特征
..... 梁东, 夏军, 宋进喜, 常剑波, 吴琼, 程丹东, 张怡暄, 孔飞鹤, 任源鑫 (4708)

三亚市水体中 PPCPs 的污染水平、分布特征及生态风险评价 任丙南, 耿静 (4717)

升金湖水体优先污染物筛选与风险评价 龚雄虎, 丁琪琪, 金苗, 薛滨, 张路, 姚书春, 王兆德, 卢少勇, 赵中华 (4727)

天目湖沙河水库水生态安全状况长期变化及影响因素 杨文斌, 段文秀, 崔扬, 朱广伟, 吴天浩, 许海, 朱梦圆 (4739)

华中地区供水水库抗生素抗性基因的季节变化及影响因素 张凯, 辛蕊, 李观家, 王倩, 王亚南, 许智恒, 崔向超, 魏巍 (4753)

快速城镇化进程中珠江三角洲硝酸型地下水赋存特征及驱动因素 吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 朱亮, 张玉玺 (4761)

盐城地区地表水化学空间特征及控制因素分析 王建, 张华兵, 许君利, 彭俊 (4772)

基于沉积物中总氮和总磷垂向分布与吸附解吸特征的白洋淀清淤深度
..... 周亚婷, 陈兴宏, 李立青, 张伟军, 张美一, 王东升, 王洪杰 (4781)

硼酸和磷酸对 PMS/Co²⁺ 均相催化氧化有机物的影响因素与机制 万琪琪, 陈铸昊, 曹瑞华, 王静怡, 李刚 (4789)

磁性生物炭负载 α-MnO₂ 活化过一硫酸盐降解 2,2',4,4'-四溴联苯醚 李鑫, 尹华, 罗昊昱, 欧阳晓芳, 刘航, 祝铭韩 (4798)

紫外活化过硫酸钠灭活水中噬菌体 MS2 的特性及机制 张崇森, 杨昊明, 王真 (4807)

铈改性水葫芦生物炭对磷酸盐的吸附特性 王光泽, 曾薇, 李帅帅 (4815)

低温地下水净化工艺中氨氮去除性能及机制 李冬, 刘孟浩, 张瑞苗, 曾辉平, 张杰 (4826)

我国城市污泥中重金属的赋存形态与生态风险评价 耿源濛, 张传兵, 张勇, 黄豆豆, 闫姝骁, 孙腾飞, 程柳, 王静, 毛宇翔 (4834)

不同气候类型下污水厂活性污泥中微生物群落比较 杨思航, 秦泽生, 梁漫春 (4844)

部分亚硝化-厌氧氨氧化协同反硝化处理生活污水脱氮除碳 秦彦荣, 袁忠玲, 张明, 张民安, 刘安迪, 付雪, 马娟, 陈永志 (4853)

同步短程硝化-厌氧氨氧化-短程反硝化颗粒污泥培育过程及其性能 周峰, 刘勇弟, 厉巍 (4864)

多种微塑料提取方法在中国典型土壤中的应用 赵小丽, 刘子涵, 从辰宇, 韩剑桥 (4872)

柴达木盆地土壤重金属污染与来源分析 陈亮, 张西营, 唐启亮, 耿盛, 王二龙, 李姜瑶 (4880)

快速城市化区域不同用地类型土壤重金属含量分布特征及生态风险 李梦婷, 沈城, 吴健, 黄沈发, 李大雁, 王敏 (4889)

广西都安县典型水田晒地球化学特征及影响因素 刘飞, 杨柯, 徐仁廷, 唐世琪 (4897)

炭化苹果枝通过减少土壤 DTPA-Cd 降低苹果砷木镉积累和镉伤害 邓波, 荀咪, 张玮玮, 杨洪强 (4908)

海南省集约化种植园中谷物、蔬菜和水果中重金属累积程度及健康风险
..... 杨剑洲, 王振亮, 高健翁, 严慧, 胡树起, 唐世新, 龚晶晶 (4916)

环境中抗生素抗性基因丰度与抗生素和重金属含量的相关性分析: 基于 Web of Science 数据库检索 苗荪, 陈磊, 左剑恶 (4925)

银川市农田土壤中四环素类抗生素的污染特征及生态风险评估 张小红, 陶红, 王亚娟, 马志义, 周泽英 (4933)

施用不同来源粪肥对土壤中抗生素淋溶的影响 李斌绪, 朱昌雄, 宋婷婷, 马金莲, 张治国, 李红娜 (4942)

我国典型森林土壤微生物驱动的氮代谢途径特征解析 吕雪丽, 赵永鹏, 林清火, 彭显龙, 尹云锋, 蒋先军 (4951)

青藏高原高寒湿地春夏两季根际与非根际土壤反硝化速率及 nirS 型反硝化细菌群落特征分析
..... 李玉倩, 马俊伟, 高超, 霍守亮, 夏星辉 (4959)

松嫩平原芦苇湿地退化与修复过程中土壤细菌和甲烷代谢微生物的群落结构
..... 王秋颖, 王娜, 刘颖, 陈功, 何辉, 高婕, 庄绪亮, 庄国强 (4968)

不同轮作休耕下潮土细菌群落结构特征 南镇武, 刘柱, 代红翠, 张磊, 王娜, 徐杰, 刘开昌, 孟维伟, 王旭清 (4977)

稻田土壤光合细菌群落对镉污染的响应 罗路云, 金德才, 王殿东, 陈昂, 张德咏, 曾军, 匡炜, 张卓, 刘勇 (4988)

铁尾矿芦苇根际微生物和根内生菌群落分布及其限制性因子解析 曹曼曼, 王飞, 周北海, 陈辉伦, 袁蓉芳 (4998)

有机无机氮配施对不同程度盐渍土硝化和反硝化作用的影响 周慧, 史海滨, 张文聪, 王维刚, 苏永德, 闫妍 (5010)

水稻产量、稻田 CH₄ 和 N₂O 排放对长期大气 CO₂ 浓度升高的响应 于海洋, 宋开付, 黄琼, 王天宇, 张广斌, 马静, 朱春梧, 徐华 (5021)

原料和热解温度对生物炭中可溶性有机质的影响 闫代红, 马亚培, 宋凯悦, 马红亮, 高人, 尹云锋 (5030)

中国 84 个主要城市大气热岛效应的时空变化特征及影响因子 李宇, 周德成, 闫章美 (5037)

室内建筑装饰装修材料气味物质及其释放研究进展 张万众, 张彭义 (5046)

《环境科学》征订启事 (4814) 《环境科学》征稿简则 (4871) 信息 (4907, 5009, 5029)

燃煤电厂颗粒物中硫酸根与硝酸根离子的转化规律

杨柳¹, 何晴¹, 盛重义^{1,2*}

(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: 燃煤电厂排放的颗粒物可以分为可凝结颗粒物 (condensable particle matter, CPM) 和可过滤颗粒物 (filterable particle matter, FPM). 通过分析 7 个超低排放燃煤电厂的湿法脱硫 (wet flue gas desulfurization, WFGD) 进出口和湿电除尘 (wet electrostatic precipitator, WESP) 出口烟气中 CPM 和 FPM 的 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 浓度, 揭示了这 2 种典型水溶性离子在烟道内的变化规律与转化特征. 结果表明在 WFGD 前后, CPM 中的 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 浓度呈降低趋势, 其降低率范围分别为 43.12%~86.84% 和 17.99%~91.58%, 而 FPM 中 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 浓度呈增大趋势. 在 WESP 前后, CPM 中 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 浓度呈增大趋势, 增长率范围分别为 21.05%~424.65% 和 13.51%~298.37%, 而 FPM 中 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 浓度呈减小趋势. 在 WFGD 中, 随着烟气温度降低和湿度增加, 部分 CPM 会通过冷凝和团聚作用进一步转化为 FPM; 在 WESP 中, 由于烟气一直处于低温、高湿的条件, 烟气中存在的 SO_2 与 NO_2 会结合水蒸气发生氧化还原反应, 进而经过协同作用促进 CPM 中 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 的生成.

关键词: 可凝结颗粒物 (CPM); 湿法脱硫系统 (WFGD); 湿电除尘系统 (WESP); SO_4^{2-} ; NO_3^- ; 转化规律

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)10-4678-09 DOI: 10.13227/j.hjcx.202101097

Conversion Characterizations of Sulfate Ion and Nitrate Ion in Particulate Matter from Coal-fired Power Plants

YANG Liu¹, HE Qing¹, SHENG Zhong-yi^{1,2*}

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

Abstract: The particulate matter emitted from coal-fired power plants includes condensable particulate matter (CPM) and filterable particulate matter (FPM). By analyzing the concentration of SO_4^{2-} and NO_3^- components of CPM and FPM in the inlet/outlet of wet flue gas desulfurization (WFGD) and the outlet of wet electrostatic precipitator (WESP) from 7 ultra-low emission coal-fired power plants, the variation laws and transformation characteristics were investigated. The results showed that the concentration of SO_4^{2-} and NO_3^- of CPM decreased after WFGD, with reduction rates of 43.12%-86.84% and 17.99%-91.58%, respectively, which were different from the conversion trend of FPM. The concentrations of SO_4^{2-} and NO_3^- of CPM increased after WESP, with reduction rates of 21.05%-424.65% and 13.51%-298.37%, respectively, which were also different from that of FPM. In the WFGD system, CPM could be transformed into FPM due via condensation and aggregation under the decreasing temperature and increasing of humidity of the flue gas. In the WESP system, SO_2 and NO_2 in the flue gas combine with water vapor in a redox reaction, which promotes the generation of SO_4^{2-} and NO_3^- in CPM through synergistic action.

Key words: condensable particle matter (CPM); wet flue gas desulfurization (WFGD); wet electrostatic precipitator (WESP); SO_4^{2-} ; NO_3^- ; conversion characterizations

近年来, 中国经常发生细颗粒物 (fine particulate matter, $\text{PM}_{2.5}$) 引起的大面积雾-霾事件, 对环境造成严重影响^[1], 故采取更为严格的措施进一步降低燃煤电厂为代表的重点大气污染源排放已成必然趋势^[2,3]. 从完整的固定污染源排放颗粒物谱系角度划分, 燃煤电厂排放的颗粒物实质上包括可过滤颗粒物 (filterable particulate matter, FPM) 和可凝结颗粒物 (condensable particulate matter, CPM)^[4].

水溶性离子是 $\text{PM}_{2.5}$ 的重要组成部分^[5,6]. 尤其是 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 等水溶性离子是造成 $\text{PM}_{2.5}$ 散射可见光的主要原因之一^[7,8]. 有研究表明, 在雾-霾易发气象条件下, 电厂排放的 SO_2 和 FPM 等常规污染物在烟羽范围内能够大比例转化为水溶性离子^[9,10]; 在雾-霾不易发的气象条件下, 冷凝液滴中的水溶性离子也易形成干态水溶性离子颗粒物, 在大气中持

续积聚^[11]. 可见燃煤电厂排放烟气中的水溶性离子对 $\text{PM}_{2.5}$ 的贡献作用不容忽视.

目前, 针对燃煤烟气水溶性离子的排放特征研究较多, 对象主要围绕 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NH_4^+ 、 Cl^- 、 F^- 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Na^+ 这 9 种水溶性离子. 胡月琪等^[12] 研究了北京市 4 家单位燃煤锅炉的排放情况, 发现 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 为颗粒物中主要的水溶性离子, 分别占总颗粒物 (total particulate matter, TPM) 水溶性离子的 0.7%~8.7% 和 63.8%~81.0%, 其中 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 质量浓度最高分别可达 2.062 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 27.287 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$. 马子轸等^[13] 的研究发现煤粉炉电厂排放的水溶性离子占 $\text{PM}_{2.5}$ 的 26.2%, 阴

收稿日期: 2021-01-12; 修订日期: 2021-03-14

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41877469, 41771498)

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理论与技术, E-mail: liuhuijia@263.net

* 通信作者, E-mail: 09377@njnu.edu.cn

阳离子分别以 SO_4^{2-} 和 NH_4^+ 为主,这 2 种离子占有离子的当量百分比分别为 32.9% 和 47.1%,而 NO_3^- 只占据了其中很小的比例. Yang 等^[14,15] 的研究显示,燃煤锅炉烟气排放的 $\text{PM}_{2.5}$ 中含量较高的水溶性离子依次是 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NH_4^+ 和 Cl^- ,FPM 和 CPM 中 SO_4^{2-} 占比都是最高的. 通过以上研究可以发现 SO_4^{2-} 在水溶性离子中占据绝对优势,但是 NO_3^- 的占比在不同的电厂差异较大.

此外,有学者探讨了湿法脱硫(wet flue gas desulfurization, WFGD)和湿电除尘(wet electrostatic precipitator, WESP)对颗粒物中水溶性离子的影响. Wang 等^[16] 的研究指出 WESP 对 FPM 中水溶性离子的脱除效果良好,在所探究的电厂中,对 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 的去除效率最高分别可达到 73.06% 和 68.54%. Liang 等^[17] 的研究通过对 FPM_{2.5} 的化学分析表明,脱硫过程中引入的 SO_4^{2-} 和 Ca^{2+} 会被 WESP 有效去除. 段雷等^[18] 的研究指出极细颗粒物中 SO_4^{2-} 不仅和硫分紧密相关,也和 WFGD 有很大关

系,结果表明经过 WFGD 后,部分电厂中 PM_1 中的 SO_4^{2-} 含量有增长趋势.

综上所述,目前大多研究集中于分析颗粒物中水溶性离子在烟气排放口的排放特征与影响因素等^[19,20],而对 CPM 与 FPM 中典型水溶性离子间内在关系的关注较少. 基于此,本研究对比分析了 7 个超低排燃煤电厂中 WFGD 和 WESP 前后的典型水溶性离子浓度,揭示了 CPM 和 FPM 中 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 在 WFGD 与 WESP 前后的变化规律和内在转化的联系.

1 材料与方法

1.1 燃煤机组与采样点位情况

本研究选取 7 个典型燃煤电厂,基本信息如表 1 所示. 这些电厂均为超低排放电厂,依次配备选择性催化还原脱硝(selective catalytic reduction, SCR)、电除尘(electrostatic precipitator, ESP)、WFGD 和 WESP 等烟气净化设施. 其中 WFGD 和 WESP 的具体工况如表 2 所示.

表 1 所测试电厂的基本信息

Table 1 Basic information of the power plants

电厂	装机容量 /MW	污染物浓度/ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$		硫分	煤质/%		煤种
		锅炉出口 NO_x	脱硫入口 SO_2		灰分	含水率	
电厂 A	330	800	5 000	1.9	31	10	掺烧
电厂 B	210	550	4 700	2.3	35.5	8.80	混煤
电厂 C	220	/	4 000	1.6	35	/	掺烧
电厂 D	330	1 200	4 586	2.0	27.6	9.01	烟煤
电厂 E	630	800	3 800	1.5	37.6	10.49	掺烧
电厂 F	/	/	3 900	1.55	30	11	掺烧
电厂 G	330	250	2 619	1.2	20.0	28.00	烟煤

表 2 所测试 WFGD 与 WESP 的基本信息

Table 2 Basic information of the WFGD and WESP

项目	电厂						
	A	B	C	D	E	F	G
WFGD	双塔 双循环	单塔 双循环	双塔 双循环	/	单塔 单循环	/	单塔 单循环
WESP	导电 玻璃钢	卧式湿式静电除尘	导电 玻璃钢	/	导电 玻璃钢	/	导电 玻璃钢

采样点位的设定主要依据文献^[21],同时与燃煤电厂的实际情况相结合. 为了探究 WFGD 和 WESP 前后 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 的转化规律,采样点位分别设置于电厂的脱硫入口、脱硫出口(即湿除入口)和湿除出口,采样点分布如图 1 所示.

1.2 样品采集与分析

1.2.1 样品采集方法

本研究依据 EPA Method 201A^[22] 和 Method 202^[23] 自主搭建了采样装置,装置如图 2 所示.

采样时,恒温采样枪等速地从烟道中抽取烟气. 烟气通过 FPM 滤膜后,其中的 TFPM 被捕集下来.

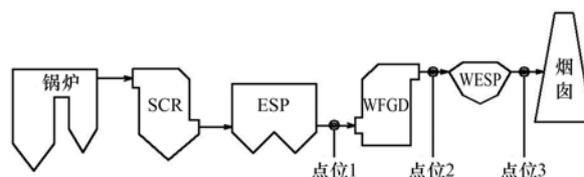
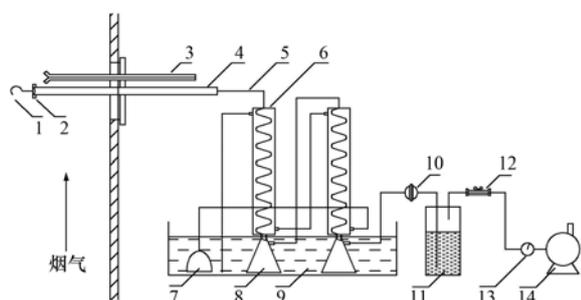


图 1 燃煤电厂主要烟气处理设施与采样点设置示意

Fig. 1 Schematic showing the control devices and sampling sites

紧接着,烟气进入循环冷凝的 2 级冷凝管. 大部分 CPM 被捕集到 2 个干式冲击瓶中,其中冲击瓶的水浴温度设定在 20 ~ 30℃,还有少部分未被捕集的 CPM 通过设置在冷凝装置后的 CPM 滤膜捕集. 其



1. 等速采样喷嘴; 2. FPM 滤膜; 3. 皮托管; 4. 采样枪; 5. 硅胶连接管; 6. 螺旋冷凝管; 7. 循环潜水泵; 8. 干式冲击瓶; 9. 恒温水浴槽; 10. CPM 滤膜; 11. 硅胶干燥剂; 12. 气体流量计; 13. 压力表; 14. 采样动力泵(烟气测试仪)

图 2 采样装置示意

Fig. 2 Schematic diagram of the sampling system

中, FPM 滤膜为 47 mm 石英滤膜, CPM 滤膜为 47 mm 玻璃纤维滤膜。

每次采样前后, 依次使用超纯水和正己烷润洗螺旋冷凝管、冲击瓶和连接管。此外, 每次采样后都要使用氮气对螺旋冷凝管、冲击瓶、连接管和 CPM 滤膜夹进行吹扫, 以降低可溶性气体(如 SO_2) 可能对测定结果造成的正向偏差。现场采集的每组颗粒物样品包括 FPM 滤膜, CPM 滤膜、超纯水冲洗液和正己烷冲洗液。每个采样点采集至少 2 组样品, 测试结果取平均值。

1.2.2 样品分析方法

现场采集的样品均先需要将有机组分和无机组分进行分离, 然后再对无机组分中的离子浓度进行测定。

分离滤膜样品的有机组分和无机组分时, 将滤膜剪碎后放入离心管中, 加入 10 mL 超纯水, 并将离心管置于超声波水浴中超声提取 3 次, 每次超声时间为 2 min。然后将提取液换成正己烷, 重复上述步骤, 得到超纯水滤膜提取液和正己烷滤膜提取液。接着向超纯水滤膜提取液中加入 10 mL 正己烷进行萃取, 重复 3 次, 最终得到超纯水滤膜萃取液和正己烷滤膜萃取液。此外, CPM 超纯水冲洗液也需要用 30 mL 正己烷作萃取处理, 重复 3 次, 得到 CPM 超纯水冲洗萃取液和 CPM 正己烷冲洗萃取液。

本研究只对所测得的样品进行无机组分的离子分析。其中 FPM 无机组分为超纯水滤膜萃取液, CPM 无机组分为超纯水滤膜萃取液和超纯水冲洗萃取液的总和。FPM 的有机组分为正己烷滤膜提取液和正己烷滤膜萃取液的总和, CPM 有机组分为正己烷冲洗液和正己烷冲洗萃取液的总和, 有机部分在本研究中不做分析。

SO_4^{2-} 和 NO_3^- 用离子色谱法进行分析, 样品测定前需过 1°C 柱, 再用 0.22 μm 滤膜过滤干净。离子

色谱由美国 Dionex 公司生产, 其型号为 ICS-1100, 具体工作条件为: 采用 AS11-HC/AG11-HC(2 mm) 阴离子色谱柱/保护柱和 30 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ KOH 阴离子淋洗液, 其中阴离子淋洗液由 RFC-30 + EGC KOH 自动发生。

此外, 本研究也同步检测了烟道中锅炉出口处的 NO_x 浓度以及脱硫入口处的 SO_2 浓度, 检测方法参见文献[24, 25]。

1.3 质量控制

为了保证实验结果的准确性, 用于现场采样装置所用的螺旋冷凝管、干式冲击瓶和连接管道的硅胶管等需要进行充分清洗, 烘干后使用。滤膜采样前、采样后, 均采用恒温恒湿箱保存, 保证采样前后环境温度和湿度条件一致, 且避免静电和污染等人为原因对滤膜测试造成的影响。

此外, 采样时严格按照采样方法进行。采样过程中, 采集全程序空白。即: 采样嘴应背对废气气流方向, 采样管在烟道中放置时间和移动方式与实际采样相同。全程序空白应在每次测量系列过程中进行 1 次, 并保证至少 1 天 1 次。为防止在采集全程序空白过程中空气或废气进入采样系统, 必须断开采样管与采样器主机的连接, 密封采样管末端接口。任何低于全程序空白增重的样品均无效, 并且全程序空白增重除以对应测量系列的平均体积不应超过排放限值的 10%。

1.4 有关计算

固定源排放颗粒物的基准氧浓度计算公式为^[19]:

$$c = c' \times [21 - \varphi(\text{O}_2)] / [21 - \varphi'(\text{O}_2)] \quad (1)$$

式中, c' 为标准状态下颗粒物的基准氧浓度, $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$; $\varphi(\text{O}_2)$ 和 $\varphi'(\text{O}_2)$ 分别为实测氧含量和基准氧含量, %。

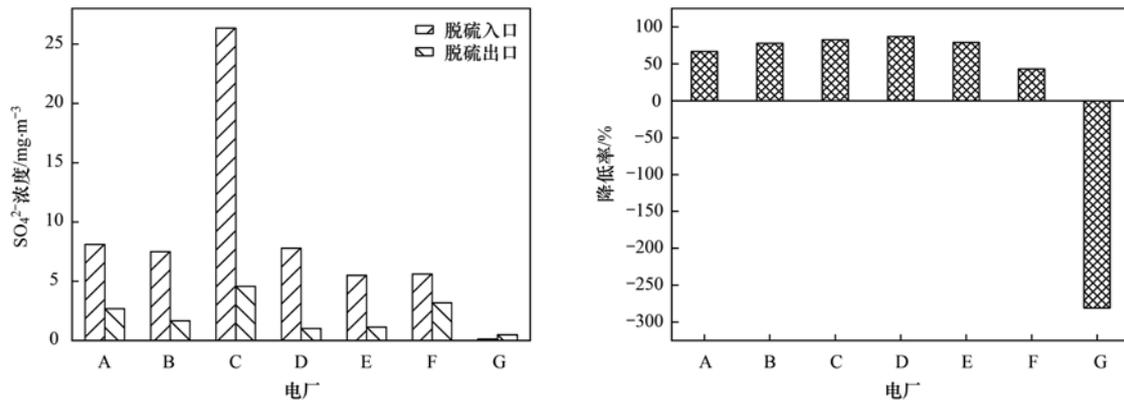
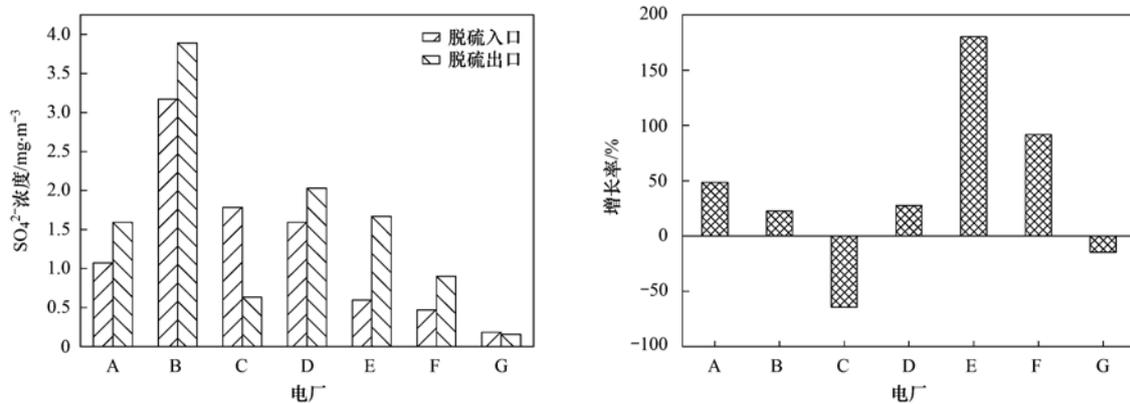
2 结果与讨论

2.1 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 在 WFGD 前后的转化规律

2.1.1 SO_4^{2-} 的转化规律

本研究分析了 WFGD 前、后 2 个采样点位处 CPM 和 FPM 中的 SO_4^{2-} 浓度, 图 3 和图 4 展示了 2 种颗粒物中 SO_4^{2-} 浓度的变化情况。在 G 电厂中, 无论是 CPM 还是 FPM, 其 SO_4^{2-} 浓度水平都很低, 这是因为 G 电厂所用煤的硫分较低, 燃烧后烟气中生成的 SO_2 和 SO_3 较少。

此外从图 3 可以看出, 脱硫前后 CPM 中 SO_4^{2-} 浓度范围(G 电厂除外) 分别为 5.493 ~ 26.354 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 1.023 ~ 4.569 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。从整体上来说,

图3 CPM中SO₄²⁻在WFGD前后的转化规律Fig. 3 Conversion characterization of the SO₄²⁻ in CPM before and after WFGD图4 FPM中SO₄²⁻在WFGD前后的转化规律Fig. 4 Conversion characterization of the SO₄²⁻ in FPM before and after WFGD

SO₄²⁻ 浓度呈降低趋势,其降低率为 43.12% ~ 86.84%,这与 Wang 等^[16]的研究结果一致。

CPM 中 SO₄²⁻ 浓度整体呈下降趋势主要是因为 SO₃ 状态的改变,其中 SO₃ 是 CPM 中 SO₄²⁻ 的主要来源^[26]。一般认为在烟气温度低于 200℃ 时,几乎所有 SO₃ 会全部转化成 H₂SO₄ 气溶胶^[27]。故在 WFGD 入口处,烟气中存在的是 H₂SO₄ 气溶胶。经过 WFGD 后,烟气温度明显降低、湿度明显增大,可以认为烟气温度从 100℃ 以上降低到约 50℃^[28]。H₂SO₄ 气溶胶在高湿度条件下经历快速冷凝的过程中,容易被飞灰或细小液滴吸附,粒径增大进一步转化为 FPM^[28],从而导致了脱硫后烟气 CPM 中的 SO₄²⁻ 浓度大幅下降。从微观层面而言,在 WFGD 中烟气湿度很大,水蒸气在喷水水表面上冷凝,容易产生向内的 Stefan 电流和扩散电泳。这种扩散电泳作用力会使细颗粒接近水滴,导致这些细小液滴进一步增大形成 FPM 而被捕集^[29]。

从图 4 可以看出,脱硫前后 FPM 中的 SO₄²⁻ 浓度范围(C 和 G 电厂除外)分别为 0.470 ~ 3.170 mg·m⁻³和 0.901 ~ 3.890 mg·m⁻³,整体浓度呈增大

趋势。此外,综合分析图 3 和图 4 发现,从脱硫入口到出口,CPM 中 SO₄²⁻ 浓度降低率范围为 43.12% ~ 86.84%;而在 FPM 中 SO₄²⁻ 浓度增长率最低仅有 22.71%,最高可达 180.34%。这说明经过 WFGD 后,FPM 中 SO₄²⁻ 增长率范围相对于 CPM 的降低率更大。那么导致 FPM 中 SO₄²⁻ 浓度增大的原因除了是 H₂SO₄ 气溶胶因冷凝、团聚作用转化成了 FPM 外,也可能是脱硫浆液的夹带作用^[30,31]。

在 WFGD 中,脱硫浆液的液滴夹带引入了部分主要含 Ca²⁺ 和 SO₄²⁻ 等水溶性离子的小液滴。这些小液滴穿透除雾器干化后参与了新的细颗粒物的生成,最终表现为 FPM 中 SO₄²⁻ 浓度升高。为此,本研究通过对比 WFGD 前后 Ca²⁺ 浓度变化发现,其在脱硫前后增加的趋势并不明显,具体如表 3 所示。

可以看出,从脱硫入口到脱硫出口,FPM 中 Ca²⁺ 质量浓度的增长率大部分不超过 40%,这与 SO₄²⁻ 浓度较高的增长率情况并不一致。此外,在 A、B 和 D 电厂中,脱硫浆液实际上所夹带的 SO₄²⁻ 比理论值低,说明在这 3 个电厂中,夹带作用小于 CPM 向 FPM 的转化作用;而在 E 和 F 电厂中,实际

表 3 部分电厂 FPM 中 Ca^{2+} 与 SO_4^{2-} 在 WFGD 前后的转化规律Table 3 Conversion characterizations of the Ca^{2+} and SO_4^{2-} in the FPM before and after WFGD in some power plants

项目	电厂 A		电厂 B		电厂 D		电厂 E		电厂 F	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Ca^{2+} 浓度/ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$	0.75	0.93	0.17	0.23	0.41	0.53	0.16	0.26	0.22	0.28
Ca^{2+} 增长率/%	24.00		35.29		27.67		58.02		27.98	
SO_4^{2-} 理论增长率/%	57.60		84.70		66.41		139.25		67.15	
SO_4^{2-} 实际增长率/%	48.60		22.71		27.67		180.34		91.70	

1)1、2 表示采样点位

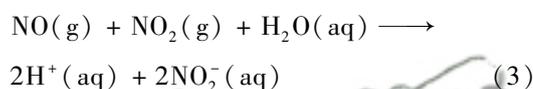
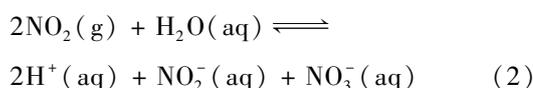
值比理论值更高,说明这 2 个电厂中脱硫浆液的夹带作用占据主导地位。

值得注意的是, G 电厂中 CPM 的 SO_4^{2-} 浓度在脱硫前后呈上升趋势,这可能是脱硫浆液携带了粒径极小的液滴直接形成了 CPM 导致的。而 C 和 G 电厂中 FPM 的 SO_4^{2-} 浓度在脱硫前后呈降低趋势,这可能是因为 WFGD 的喷淋洗涤作用较好,使得 FPM 被大量去除,故 SO_4^{2-} 浓度降低。而在另外几个电厂中, CPM 向 FPM 转化率比 WFGD 对 FPM 的去除率更高,故其他几个电厂 FPM 中的 SO_4^{2-} 浓度呈现上升趋势。

2.1.2 NO_3^- 的转化规律

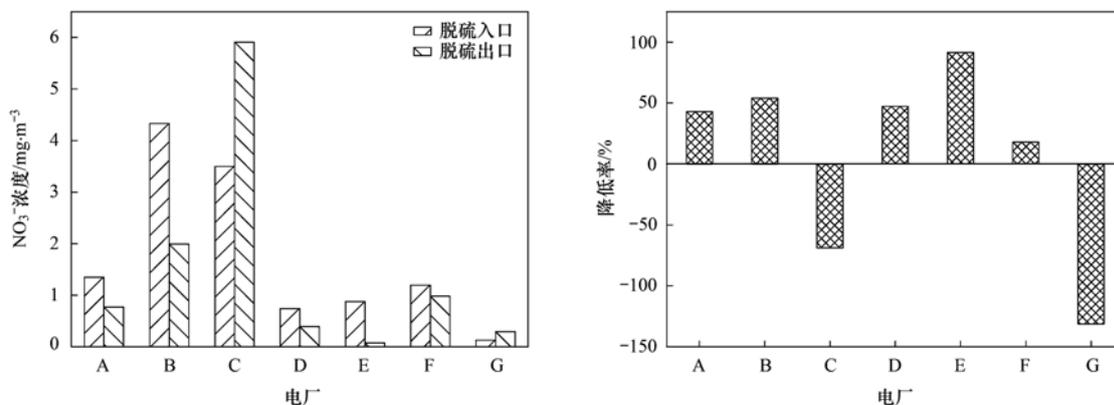
本研究将 WFGD 前、后 2 个采样点处 CPM 与 FPM 中的 NO_3^- 浓度进行对比分析,发现 NO_3^- 与 SO_4^{2-} 浓度的变化规律基本相同。经过 WFGD 后, CPM 中 NO_3^- 浓度呈下降趋势,浓度范围从 0.741 ~ 4.330 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 降低为 0.074 ~ 1.990 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ (C 和 G 电厂除外); FPM 中 NO_3^- 浓度变化规律与之相反,浓度范围从 0.025 ~ 2.769 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 增加为 0.078 ~ 4.050 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ (B 和 G 电厂除外),这与前人的研究结果一致^[16,19]。

燃煤产生的 NO_x 是颗粒物中 NO_3^- 的主要来源,其转化生成 NO_3^- 的方程式如下所示^[32]:



经过 WFGD 后,烟气中 NO_x 会因高湿度条件下的快速冷凝过程进一步团聚、增长而转化为 FPM^[28],这与 SO_4^{2-} 变化规律相似。该过程最终导致 CPM 中 NO_3^- 浓度下降,而 FPM 中 NO_3^- 浓度上升。

综合分析图 5 和图 6 发现,在 CPM 中 NO_3^- 浓度的降低率均不超过 100%,而在 FPM 中 NO_3^- 增长了 44.78% ~ 212.00%。尤其在 E 电厂中, FPM 中 NO_3^- 浓度在脱硫出口处呈 3 倍增长,并且此时 SO_4^{2-} 浓度增长率也达 180.34%,这些离子浓度出现较高水平的增长现象可归因于在 E 电厂中, WFGD 出口的温度可能比一般情况下的 50℃ 更低,才会导致 CPM 向 FPM 的更高比例转化。

图 5 CPM 中 NO_3^- 在 WFGD 前后的转化规律Fig. 5 Conversion characterization of the NO_3^- in the CPM before and after WFGD

综上所述, FPM 中 NO_3^- 浓度的增长率整体上大于 CPM 中的 NO_3^- 浓度的降低率,这说明了在实际烟道环境中存在 CPM 向 FPM 转化的可能性。

2.2 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 在 WESP 前后的转化规律

2.2.1 SO_4^{2-} 的转化规律

本研究测定分析了 WESP 前后采样点位处

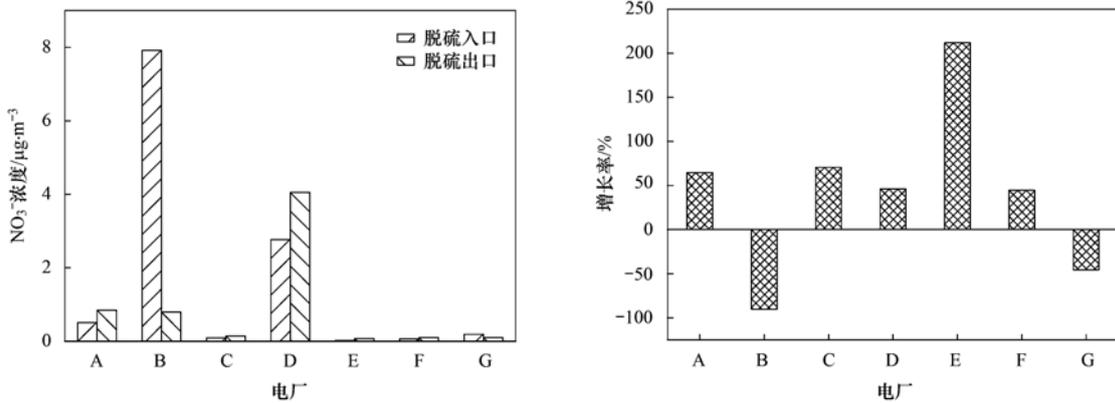


图6 FPM 中 NO₃⁻ 在 WFGD 前后的转化规律

Fig. 6 Conversion characterization of the NO₃⁻ in the FPM before and after WFGD

CPM 和 FPM 中的 SO₄²⁻ 浓度,图 7 和图 8 展示了 2 种颗粒物中的 SO₄²⁻ 浓度变化情况.从图 7 可以看出,在湿除入口和出口处,CPM 中 SO₄²⁻ 浓度范围分别为 0.499 ~ 3.187 mg·m⁻³ 和 2.618 ~

5.666 mg·m⁻³ (A 和 C 电厂除外).容易得出 CPM 中 SO₄²⁻ 浓度呈增大趋势,增长率范围为 21.05% ~ 424.65%,这与邓建国等^[28]的研究结果一致.

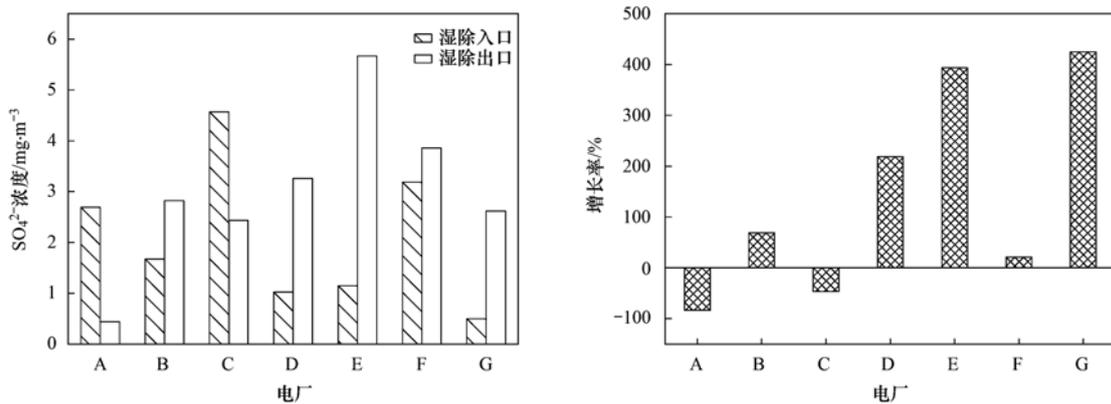


图7 CPM 中 SO₄²⁻ 在 WESP 前后的转化规律

Fig. 7 Conversion characterization of the SO₄²⁻ in the CPM before and after WESP

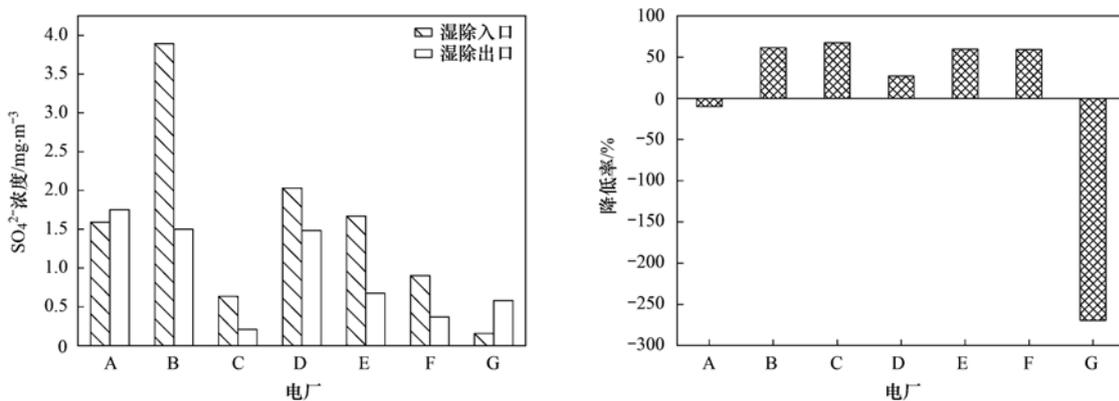


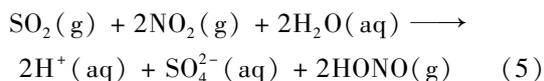
图8 FPM 中 SO₄²⁻ 在 WESP 前后转化规律

Fig. 8 Conversion characterization of the SO₄²⁻ in the FPM before and after WESP

导致 CPM 中的 SO₄²⁻ 浓度出现上述规律有 2 方面的原因.首先,WESP 在电晕放电时产生的活性物质会将 SO₂ 氧化成 SO₃^[19,33],进一步变成了 H₂SO₄ 气溶胶,最终导致 CPM 中的 SO₄²⁻ 浓度升高.

其次,WESP 前后采样点位处的温湿度情况并无较大的差异^[28].换言之,在 WESP 中烟气一直处于较低温度、较高湿度的条件,在这种条件下烟气中存在的 SO₂ 与 NO₂ 会结合水蒸气发生以下氧化

还原反应^[34]:



因此,烟气中存在的 NO_2 会通过该反应促进 CPM 中 SO_4^{2-} 的生成,导致 CPM 中 SO_4^{2-} 浓度增大.此外,结合图 7 可以得出 E 和 G 电厂在 WESP 前后 SO_4^{2-} 浓度增长率达到了 400% 及以上水平,这说明在这 2 个电厂中,以上 2 种促进作用都是不容忽视的.

从图 8 中可以看出,在湿除入口和湿除出口处, FPM 中 SO_4^{2-} 浓度范围分别为 $0.635 \sim 3.890 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $0.207 \sim 1.500 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ (A 和 G 电厂除外),容易得出 FPM 中 SO_4^{2-} 浓度降低率范围为 27.00%~67.40%,这与前人的研究结果一致^[28].

FPM 中 SO_4^{2-} 浓度呈上述降低趋势是因为在 WESP 中, FPM 因粉尘荷电的物理作用而被捕集到集尘板上,进而得以去除^[35,36],因此 FPM 中离子浓度降低.

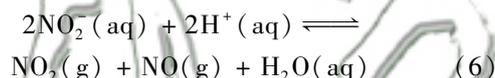
另外, A 电厂中 CPM 与 FPM 的 SO_4^{2-} 浓度变化趋势与其他电厂相反.这可能是因为,在湿除入口与出口处,烟气的温度有一定幅度的降低,在这过程

中, CPM 会因凝结、团聚作用转化为 FPM,故最终 CPM 中的 SO_4^{2-} 浓度减小而 FPM 中的 SO_4^{2-} 浓度增大.

2.2.2 NO_3^- 的转化规律

本研究将 WESP 前后 2 个采样点处 CPM 与 FPM 中的 NO_3^- 浓度进行对比分析,容易得出经过 WESP 后,大部分电厂 CPM 中 NO_3^- 浓度呈增大趋势,增长率为 298.37%,最低为 13.51%;而 FPM 中 NO_3^- 浓度则呈降低趋势,降低率范围为 15.46%~94.30%,这与前人的研究结果一致^[12].

通过分析图 9 和图 10 可以发现, WESP 前后 NO_3^- 与 SO_4^{2-} 浓度的变化规律基本相同.在 WESP 中,低温、高湿的烟气条件有利于 SO_2 与 NO_2 发生氧化还原反应^[34],因协同作用生成更多的 NO_3^- .此外,由于较强的酸性条件会促进 NO_2^- 转化为 NO_3^- ^[32]:



此时, SO_2 在此过程中参与反应并提供的 H^+ 会有效促进式(2)的正向进行,所以最终 WESP 出口

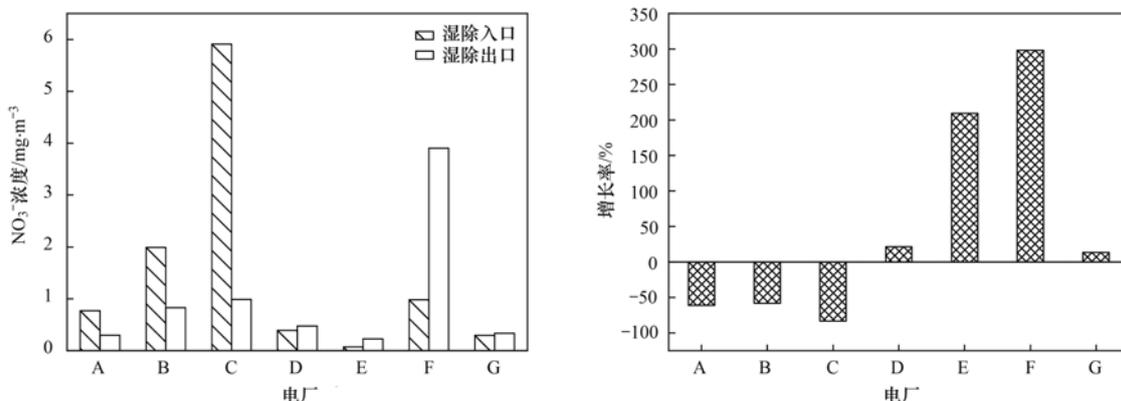


图 9 CPM 中 NO_3^- 在 WESP 前后的转化规律

Fig. 9 Conversion characterization of the NO_3^- in the CPM before and after WESP

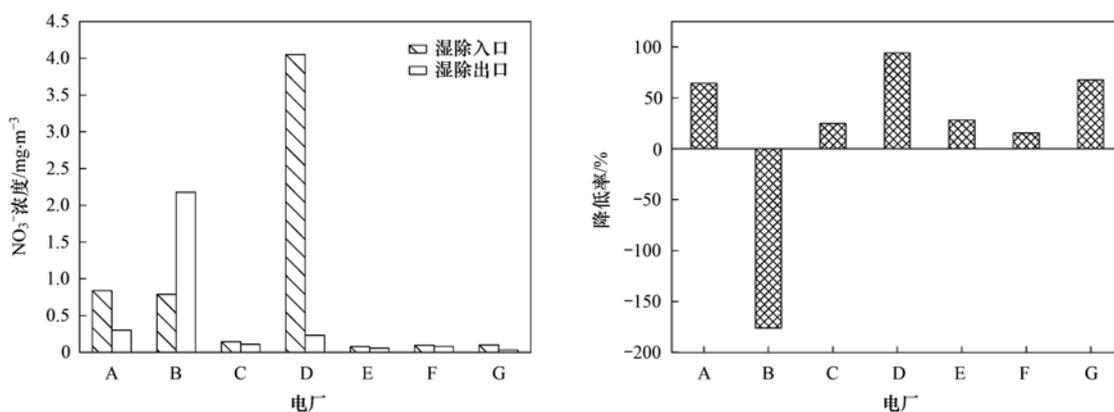


图 10 FPM 中 NO_3^- 在 WESP 前后的转化规律

Fig. 10 Conversion characterization of the NO_3^- in the FPM before and after WESP

处 CPM 中的 NO_3^- 浓度有所升高, 而 FPM 中的 NO_3^- 则被有效去除^[35,36].

3 结论

(1) 在 WFGD 前后, CPM 中的 SO_4^{2-} 与 NO_3^- 浓度呈降低趋势, 并且其降低率范围分别为 43.12% ~ 86.84% 和 17.99% ~ 91.58%; 而 FPM 中 SO_4^{2-} 与 NO_3^- 浓度呈增大趋势, 增长率范围分别为 22.71% ~ 180.34% 和 44.78% ~ 212.00%.

(2) 在 WESP 前后, CPM 中 SO_4^{2-} 与 NO_3^- 浓度呈增大趋势, 增长率范围分别为 21.05% ~ 424.65% 和 13.51% ~ 298.37%; 而 FPM 中的 SO_4^{2-} 与 NO_3^- 浓度呈降低趋势, 并且其降低率范围分别为 27.00% ~ 67.40% 和 15.46% ~ 94.30%.

(3) 在 WFGD 中, 随着烟气温度降低、湿度增加, 部分 CPM 会通过冷凝和团聚作用进一步转化为 FPM; 在 WESP 中, 由于烟气一直处于低温、高湿的条件, 烟气中存在的 SO_2 与 NO_2 会结合水蒸气发生氧化还原反应, 进而经过协同作用促进 CPM 中 SO_4^{2-} 与 NO_3^- 的生成.

参考文献:

- [1] Tie X X, Huang R J, Cao J J, *et al.* Severe pollution in China amplified by atmospheric moisture[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1), doi: 10.1038/s41598-017-15909-1.
- [2] Cano M, Vega F, Navarrete B, *et al.* Characterization of emissions of condensable particulate matter in clinker kilns using a dilution sampling system[J]. *Energy & Fuels*, 2017, 31(8): 7831-7838.
- [3] Guo S, Hu M, Zamora M L, *et al.* Elucidating severe urban haze formation in China[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, 111(49): 17373-17378.
- [4] 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.
- [5] Chen X, Yang T, Wang Z F, *et al.* Investigating the impacts of coal-fired power plants on ambient $\text{PM}_{2.5}$ by a combination of a chemical transport model and receptor model[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 727, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138407.
- [6] 陈锦超. 北京市霾与非霾期间 $\text{PM}_{2.5}$ 中无机组分特征及源解析的研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018. 2-3.
Chen J C. Study on the characteristics of inorganic compositions in $\text{PM}_{2.5}$ and source apportionment during haze and non-haze days in Beijing[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2018. 2-3.
- [7] Sisler J F, Malm W C. The relative importance of soluble aerosols to spatial and seasonal trends of impaired visibility in the United States[J]. *Atmospheric Environment*, 1994, 28(5): 851-862.
- [8] Yang L X, Wang D C, Cheng S H, *et al.* Influence of meteorological conditions and particulate matter on visual range impairment in Jinan, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2007, 383(1-3): 164-173.
- [9] 江得厚, 苏跃进. 治霾当务之急是控制可凝结颗粒物的排放浓度[J]. *电力科技与环保*, 2018, 34(4): 1-6.
Jiang D H, Su Y J. The haze pollution controlling requires emission concentration reducing of condensable particulates first [J]. *Electric Power Environmental Protection*, 2018, 34(4): 1-6.
- [10] 曹顺安, 苏跃进. 燃煤电厂湿烟筒条件下 SO_x 排放致霾机理分析及治理措施[J]. *华北电力技术*, 2017, (8): 54-60.
Cao S A, Su Y J. Mechanism analysis of haze and fog caused by SO_x discharged from wet chimney of coal-fired power plant and the measures to govern [J]. *North China Electric Power*, 2017, (8): 54-60.
- [11] 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. 101-105.
- [12] 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.
- [13] 马子轸, 李振, 蒋靖坤, 等. 燃煤电厂产生和排放的 $\text{PM}_{2.5}$ 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 $\text{PM}_{2.5}$ emitted from coal-fired power plants [J]. *Environmental Science*, 2015, 36(7): 2361-2366.
- [14] Yang H H, Arafath S M, Lee K T, *et al.* Chemical characteristics of filterable and condensable $\text{PM}_{2.5}$ emissions from industrial boilers with five different fuels [J]. *Fuel*, 2018, 232: 415-422.
- [15] Yang H H, Arafath S M, Wang Y F, *et al.* Comparison of coal- and oil-fired boilers through the investigation of filterable and condensable $\text{PM}_{2.5}$ sample analysis [J]. *Energy & Fuels*, 2018, 32(3): 2993-3002.
- [16] 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.
- [17] Liang Y G, Li Q, Ding X, *et al.* Forward ultra-low emission for power plants via wet electrostatic precipitators and newly developed demisters: filterable and condensable particulate matters [J]. *Atmospheric Environment*, 2020, 225, doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.117372.
- [18] 段雷, 马子轸, 李振, 等. 燃煤电厂排放细颗粒物的水溶性无机离子特征综述 [J]. *环境科学*, 2015, 36(3): 1117-1122.
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.
- [19] 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.
- [20] 王润芳, 马大卫, 姜少毅, 等. 超低排放改造后燃煤电厂细颗粒物排放特征 [J]. *环境科学*, 2020, 41(1): 98-105.
Wang R F, Ma D W, Jiang S Y, *et al.* Fine particulate emission characteristics of an ultra-low emission coal-fired power plant [J]. *Environmental Science*, 2020, 41(1): 98-105.
- [21] GB/T 16157-1996, 固定污染源排气中颗粒物测定与气态污

- 染物采样方法[S].
- [22] USEPA Method 201A, Determination of PM_{10} and $PM_{2.5}$ emissions from stationary sources[S].
- [23] USEPA Method 202, Dry impinger method for determining condensable particulate emissions from stationary sources[S].
- [24] HJ/T 43-1999, 固定污染源排气中氮氧化物的测定 盐酸萘乙二胺分光光度法[S].
- [25] HJ/T 56-2000, 固定污染源排气中二氧化硫的测定 碘量法[S].
- [26] Feng Y P, Li Y Z, Cui L. Critical review of condensable particulate matter[J]. *Fuel*, 2018, **224**: 801-813.
- [27] Zheng C H, Wang Y F, Liu Y, *et al.* Formation, transformation, measurement, and control of SO_3 in coal-fired power plants[J]. *Fuel*, 2019, **241**: 327-346.
- [28] 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.
- [29] Feng Y P, Li Y Z, Cui L, *et al.* Cold condensing scrubbing method for fine particle reduction from saturated flue gas[J]. *Energy*, 2019, **171**: 1193-1205.
- [30] Pan D P, Wu H, Yang L J. Fine particle transformation during the limestone gypsum desulfurization process [J]. *Energy & Fuels*, 2016, **30**(11): 9737-9744.
- [31] Pan D P, Yang L J, Wu H, *et al.* Formation and removal characteristics of sulfuric acid mist in a wet flue gas desulfurization system[J]. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 2017, **92**(3): 598-604.
- [32] 大连理工大学无机化学教研室. 无机化学[M]. (第五版). 北京: 高等教育出版社, 2006. 462.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] Jeong S H, Shim S H, Song D K, *et al.* Performance of a pilot-scale wet electrostatic precipitator for the control of sulfuric acid mist and fine particulates [J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2013, **22**(2): 409-415.
- [36] Chang J C, Dong Y, Wang Z Q, *et al.* Removal of sulfuric acid aerosol in a wet electrostatic precipitator with single terylene or polypropylene collection electrodes [J]. *Journal of Aerosol Science*, 2011, **42**(8): 544-554.



CONTENTS

Continuous PM _{2.5} Composition Measurements for Source Apportionment During Air Pollution Events	CAI Fan-tao, SHANG Yue, DAI Wei, <i>et al.</i> (4575)
Orographic Influences on the Spatial Distribution of PM _{2.5} on the Fen-Wei Plain	HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, SUN Cong-jian, <i>et al.</i> (4582)
Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} Under Winter Haze Conditions in Central China: A Case Study of Huanggang, Hubei Province	LI Xing-yu, MAO Yao, CHEN Zhan-le, <i>et al.</i> (4593)
Concentration and Reactivity of Carbonyl Compounds in the Atmosphere of North China	HUANG Yu, CHEN Xi, WANG Ying-hong, <i>et al.</i> (4602)
Characteristics of O ₃ Pollution and Key Precursors in Chengdu During Spring	HAN Li, CHEN Jun-hui, JIANG Tao, <i>et al.</i> (4611)
O ₃ Source Characteristics of an Industrial Area in the Yangtze River Delta Based on Boundary Observations	HUANG Qing, HUANG Yin-zhi, ZHANG Shan, <i>et al.</i> (4621)
Characteristics and Source of VOCs During O ₃ Pollution Between August to September, Langfang Development Zones	ZHANG Jing-qiao, WANG Hong-liang, FANG Xiao-yun, <i>et al.</i> (4632)
Coating-derived VOCs Emission Characteristics and Environmental Impacts from the Furniture Industry in Guangdong Province	ZENG Chun-ling, SHAO Xia, LIU Rui-yuan, <i>et al.</i> (4641)
Response of Air Quality to COVID-19 Lockdown in Xiamen Bay	XU Chao, WU Shui-ping, LIU Yi-jing, <i>et al.</i> (4650)
Similarities and Differences of Valley Winds in the Beijing Plain and Yanqing Areas and Its Impact on Pollution	WU Jin, LI Chen, MA Zhi-qiang, <i>et al.</i> (4660)
Characteristics of Atmospheric Particulate Matter Pollution and the Unique Wind and Underlying Surface Impact in the Twain-Hu Basin in Winter	ZHU Yan, ZHAO Tian-liang, BAI Yong-qing, <i>et al.</i> (4669)
Conversion Characterizations of Sulfate Ion and Nitrate Ion in Particulate Matter from Coal-fired Power Plants	YANG Liu, HE Qing, SHENG Zhong-yi (4678)
Water Chemical Characteristics and Influence of Exogenous Acids in the Yangtze River Basin	WANG Qi, YU Shi, JIANG Ping-ping, <i>et al.</i> (4687)
Effects of Land Use on Nutrient Concentrations in the Inflow River of Lake Taihu, China	LIAN Xin-qiao, ZHU Guang-wei, YANG Wen-bin, <i>et al.</i> (4698)
Diversity of Zooplankton and Niche Characteristics of Keystone Species in the Weihe River Based on eDNA	LIANG Dong, XIA Jun, SONG Jin-xi, <i>et al.</i> (4708)
Occurrence, Distribution, and Ecological Risk Assessment of Pharmaceutical and Personal Care Products in the Aquatic Environment of Sanya City, China	REN Bing-nan, GENG Jing (4717)
Screening of Priority Pollutants and Risk Assessment for Surface Water from Shengjin Lake	GONG Xiong-hu, DING Qi-qi, JIN Miao, <i>et al.</i> (4727)
Long-term Changes and Drivers of Ecological Security in Shahe Reservoir, China	YANG Wen-bin, DUAN Wen-xiu, CUI Yang, <i>et al.</i> (4739)
Seasonal Variation and Influencing Factor Analysis of Antibiotic Resistance Genes in Water Supply Reservoirs of Central China	ZHANG Kai, XIN Rui, LI Kuang-jia, <i>et al.</i> (4753)
Geochemical Characteristics and Driving Factors of NO ₃ -Type Groundwater in the Rapidly Urbanizing Pearl River Delta	LÜ Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i> (4761)
Spatial Hydrochemical Characteristics and Controlling Factors of Surface Water in the Yancheng Area	WANG Jian, ZHANG Hua-bing, XU Jun-li, <i>et al.</i> (4772)
Identification of Dredging Depths Based on Sediment Vertical Distribution Profiles of Total Nitrogen and Total Phosphorus and Their Adsorption-desorption Equilibria	ZHOU Ya-ting, CHEN Xing-hong, LI Li-qing, <i>et al.</i> (4781)
Role of Borate and Phosphate Buffers in the Degradation of Organic Compounds in a PMS/Co ²⁺ System; Influencing Factors and Mechanisms	WAN Qi-qi, CHEN Zhu-hao, CAO Rui-hua, <i>et al.</i> (4789)
Degradation 2,2',4,4'-Tetrabromodiphenyl Ether by Activated Peroxymonosulfate Using Magnetic Biochar Supported α -MnO ₂	LI Xin, YIN Hua, LUO Hao-yu, <i>et al.</i> (4798)
Characteristics and Mechanisms of Bacteriophage MS2 Inactivation in Water by UV Activated Sodium Persulfate	ZHANG Chong-miao, YANG Hao-ming, WANG Zhen (4807)
Adsorption Characteristics of Phosphate on Cerium Modified Water Hyacinth Biochar	WANG Guang-ze, ZENG Wei, LI Shuai-shuai (4815)
Removal Efficiency and Mechanism of Ammonia Nitrogen in a Low Temperature Groundwater Purification Process	LI Dong, LIU Meng-hao, ZHANG Rui-miao, <i>et al.</i> (4826)
Speciation and Ecological Risk Assessment of Heavy Metal(loid)s in the Municipal Sewage Sludge of China	GENG Yuan-meng, ZHANG Chuan-bing, ZHANG Yong, <i>et al.</i> (4834)
Meta-analysis of Microbial Communities in the Activated Sludge of Wastewater Treatment Plants Under Different Climate Types	YANG Si-hang, QIN Ze-sheng, LIANG Man-chun (4844)
Partial Nitrification and Anaerobic Ammonia Oxidation Synergistic Denitrification to Remove Nitrogen and Carbon from Domestic Sewage	QIN Yan-rong, YUAN Zhong-ling, ZHANG Ming, <i>et al.</i> (4853)
Cultivation and Performance Analysis of Simultaneous Partial Nitrification, ANAMMOX, and Denitrification Granular Sludge	ZHOU Feng, LIU Yong-di, LI Wei (4864)
Application of Various Methods to Extract Microplastic from Typical Soils in China	ZHAO Xiao-li, LIU Zi-han, CONG Chen-yu, <i>et al.</i> (4872)
Evaluation and Sources of Heavy Metal Pollution in the Surface Soil of the Qaidam Basin	CHEN Liang, ZHANG Xi-ying, TANG Qi-liang, <i>et al.</i> (4880)
Content and Ecological Risks of Heavy Metals in Soil with Different Land Uses in a Rapidly Urbanizing Area	LI Meng-ting, SHEN Cheng, WU Jian, <i>et al.</i> (4889)
Selenium Geochemical Characteristics and Influencing Factors of Paddy Fields in Du'an County, Guangxi	LIU Fei, YANG Ke, XU Ren-ting, <i>et al.</i> (4897)
Carbonized Apple Branches Decrease the Accumulation and Damage of Cadmium on Apple Rootstock by Reducing DTPA-Cd in Soil	DENG Bo, XUN Mi, ZHANG Wei-wei, <i>et al.</i> (4908)
Accumulation and Health Risk of Heavy Metals in Cereals, Vegetables, and Fruits of Intensive Plantations in Hainan Province	YANG Jian-zhou, WANG Zhen-liang, GAO Jian-weng, <i>et al.</i> (4916)
Correlation Analysis among Environmental Antibiotic Resistance Genes Abundance, Antibiotics Concentrations, and Heavy Metals Concentrations Based on Web of Science Searches	MIAO Sun, CHEN Lei, ZUO Jian-e (4925)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Tetracycline Antibiotics in Farmland Soil in Yinchuan	ZHANG Xiao-hong, TAO Hong, WANG Ya-juan, <i>et al.</i> (4933)
Effect of Manure from Different Sources on the Leaching of Antibiotics in Soil	LI Bin-xu, ZHU Chang-xiong, SONG Ting-ting, <i>et al.</i> (4942)
Analysis of the Traits of Nitrogen Metabolism Pathways for Several Forest Soils in Eastern China	LÜ Xue-li, ZHAO Yong-peng, LIN Qing-huo, <i>et al.</i> (4951)
Denitrification Rates and <i>nirS</i> -type Denitrifying Bacteria Community Structure Characteristics of Bulk and Rhizosphere Soil in Spring and Summer in the Alpine Wetlands of the Qinghai-Tibet Plateau	LI Yu-qian, MA Jun-wei, GAO Chao, <i>et al.</i> (4959)
Microbial Community Structure of Soil Methanogens and Methanotrophs During Degradation and Restoration of Reed Wetlands in the Songnen Plain	WANG Qiu-ying, WANG Na, LIU Ying, <i>et al.</i> (4968)
Characteristics of Bacterial Community Structure in Fluvo-aquic Soil Under Different Rotation Fallow	NAN Zhen-wu, LIU Zhu, DAI Hong-cui, <i>et al.</i> (4977)
Response of Photosynthetic Bacterial Community to Cadmium Contamination in Paddy Soil	LUO Lu-yun, JIN De-cai, WANG Dian-dong, <i>et al.</i> (4988)
Community Distribution of the Rhizospheric and Endophytic Bacteria of <i>Phragmites australis</i> and Their Limiting Factors in Iron Tailings	CAO Man-man, WANG Fei, ZHOU Bei-hai, <i>et al.</i> (4998)
Effects of Combination of Organic and Inorganic Nitrogen on Nitrification and Denitrification in Two Salinized Soils	ZHOU Hui, SHI Hai-bin, ZHANG Wen-cong, <i>et al.</i> (5010)
Response of Yield, CH ₄ , and N ₂ O Emissions from Paddy Fields to Long-term Elevated CO ₂ Concentrations	YU Hai-yang, SONG Kai-fu, HUANG Qiong, <i>et al.</i> (5021)
Effects of Feedstock Material and Pyrolysis Temperature on Dissolved Organic Matter in Biochars	YAN Dai-hong, MA Ya-pei, SONG Kai-yue, <i>et al.</i> (5030)
Spatiotemporal Variations in Atmospheric Urban Heat Island Effects and Their Driving Factors in 84 Major Chinese Cities	LI Yu, ZHOU De-cheng, YAN Zhang-mei (5037)
Research Progress in the Odorants and Their Emissions from Indoor Building Decoration Materials	ZHANG Wan-zhong, ZHANG Peng-yi (5046)