

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV  
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.4  
第41卷 第4期

目次

基于深度学习的华东地区 PM<sub>2.5</sub> 浓度遥感反演 ..... 刘林钰, 张永军, 李彦胜, 刘欣怡, 万一(1513)

秋冬季区域性大气污染过程对长三角北部典型城市的影响 .....  
..... 李瑞, 李清, 徐健, 李亮, 葛朝军, 黄凌, 孙登红, 刘子义, 张坤, 周国柱, 王杨君, 胡子梅, 宋燕西, 陈勇航, 李莉(1520)

基于 GAM 模型的西安市 O<sub>3</sub> 浓度影响因素解析 ..... 黄小刚, 邵天杰, 赵景波, 曹军骥, 吕晓虎(1535)

北京及周边 6 个城市大气 PM<sub>2.5</sub> 中左旋葡聚糖及其异构体的时空分布特征 ..... 朱红霞, 陶雪梅, 王超, 张霖琳, 郑晓燕(1544)

典型沿海城市采暖期细颗粒物组分特征及来源解析 ..... 李明燕, 杨文, 魏敏, 朱红晓, 刘厚凤(1550)

成都地区黑碳气溶胶变化特征及其来源解析 ..... 王璐, 袁亮, 张小玲, 贾月涛(1561)

天津夏季郊区 VOCs 对臭氧生成的影响 ..... 姚青, 韩素芹, 张裕芬, 毕晓辉, 王晓佳, 蔡子颖(1573)

涂料制造行业挥发性有机物排放成分谱及影响 ..... 吴健, 高松, 陈曦, 杨勇, 伏晴艳, 车祥, 焦正(1582)

典型超低排放燃煤电厂可凝结颗粒物特征和成因 ..... 邓建国, 王刚, 张莹, 李妍菁, 段雷, 蒋靖坤(1589)

中国地表水硝酸盐分布及其来源分析 ..... 张鑫, 张妍, 毕直磊, 山泽萱, 任丽江, 李琦(1594)

中、韩滨海城市化区域水体全氟化合物的空间特征及生态风险 ..... 杨洪法, 史斌, 周云桥, 杨璐, 孟晶, 陈礼强, 王铁宇(1607)

小清河入海口近十年水质变化及驱动因素分析 ..... 范新风, 韩美, 王磊, 李秀萍, 周璟(1619)

浙江省 H 市水处理及供水系统 4 种人工甜味剂的分布特征 ..... 马晓雁, 胡慧, 陆思嘉, 李青松, 薛乐飞, 李雪纯, 邓靖(1629)

三峡库区支流梅溪河附石藻类群落变化及其与环境因子的关系 ..... 米文梅, 施军琼, 杨燕君, 杨宋琪, 何书哈, 吴忠兴(1636)

骆马湖浮游植物演替规律及驱动因子 ..... 张庆吉, 王业宇, 王金东, 王日昕, 邓建明, 蔡永久, 彭凯, 陈业, 龚志军(1648)

拉鲁湿地水生植物群落多样性与水环境因子的关系 ..... 王佳俊, 田瀚鑫, 周磊, 徐德福, 张建伟, 彭措次仁(1657)

基于网络分析解析水源水库春季水体反硝化群落演变特征及驱动因素 .....  
..... 周石磊, 孙悦, 张艺冉, 黄廷林, 张春华, 方凯开, 曾明正, 李再兴, 崔建升(1666)

岱海水体氮、磷时空分布特征及其差异性分析 ..... 赵丽, 陈俊伊, 姜霞, 郑朔方, 王书航(1676)

巢湖滨岸水塘洼地沉积物反硝化速率及对外源碳氮的响应 ..... 李如忠, 王莉, 刘超(1684)

镁改性芦苇生物炭控磷效果及其对水体修复 ..... 丁玉琴, 李大鹏, 张帅, 陈丽媛, 徐楚天, 陈姝彤, 朱企, 黄勇(1692)

氢氧化镁对水体内源磷释放的控制作用 ..... 杨春懿, 詹艳慧, 林建伟, 邱波, 徐文隆, 俞阳, 黄良君(1700)

北京市道路雨水径流溶解性有机物化学组分特性 ..... 陈梦瑶, 杜晓丽, 于振亚, 朱英杰, 梁卉, 吴凡(1709)

新型三维多孔光热材料制备及其高盐废水处理应用 ..... 黄乐, 徐颖峰, 谢茜青, 赵娴, 冯华军(1716)

Ni 掺杂 Sb-SnO<sub>2</sub> 瓷环粒子电极电催化氧化磺胺嘧啶 ..... 石秋俊, 刘安迪, 唐柏彬, 魏世强, 张进忠(1725)

磁性 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-CuO 非均相活化过碳酸钠降解 A07 ..... 徐劫, 王琳, 陈家斌, 许芬, 王柯晴, 侯梓峰, 黄天寅(1734)

赤泥活化过一硫酸盐降解环丙沙星、性能和机制 ..... 史京转, 魏红, 周孝德, 李克斌, 史颖娟(1743)

工业废水水质对微气泡臭氧氧化深度处理影响 ..... 张静, 张守敬, 刘春, 施佳泽, 陈晓轩, 张磊, 张瑞娜(1752)

污泥水热炭对亚甲基蓝的吸附特性 ..... 陈丽媛, 李大鹏, 朱文娟, 徐楚天, 丁玉琴, 黄勇(1761)

改性西瓜皮生物炭的制备及其对 Pb(II) 的吸附特性 ..... 毕景望, 单锐, 韩静, 袁浩然, 史月月, 张兴庆(1770)

A<sup>2</sup>/O 短程硝化耦合厌氧氨氧化系统构建与脱氮特性 ..... 刘小钗, 荣懿, 汶丽杰, 李党勇, 金鹏康(1779)

基于甲烷氧化菌的城镇污水厂尾水极限脱氮系统构建及机制 ..... 杨娅男, 李彦澄, 李江, 吴攀, 杨钊, 向福亮(1787)

HRT 对 CSTR 亚硝化颗粒污泥性能影响 ..... 王建芳, 齐泽坤, 钱飞跃, 刘文如, 张俊, 王伟, 沈聪(1794)

低基质颗粒污泥反应器中亚硝化的实现过程及其污泥变化特征 ..... 朱琳, 程诚, 宋家俊, 郭凯成, 汪倩, 刘文如, 沈耀良(1801)

不同 HRT 下污水中有机物在 ABR 中的转化过程及污泥形态特征 ..... 程诚, 朱琳, 郭凯成, 汪倩, 宋家俊, 刘文如, 沈耀良(1808)

投加颗粒活性炭和二氧化锰对剩余污泥厌氧消化的影响 ..... 杨波, 贾丽娟, 徐辉, 李方, 刘艳彪(1816)

中国 193 个城市规划区土壤微量元素污染与健康风险 .....  
..... 李括, 彭敏, 杨峥, 杨柯, 刘飞, 赵传冬, 成晓梦, 马宏宏, 郭飞, 唐世琪, 刘应汉, 成杭新(1825)

基于随机森林评价的兰州市主城区校园地表灰尘重金属污染 ..... 胡梦瑶, 王佳, 张亚云, 李春艳, 李娜娜(1838)

扬州市不同功能区表层土壤中多环芳烃的含量、来源及其生态风险 ..... 姚成, 倪进治, 刘瑞, 杨柳明, 陈卫锋, 魏然(1847)

桂西南土壤镉地质异常区水稻种植安全性评估 ..... 陈同斌, 庞瑞, 王佛鹏, 周浪, 宋波(1855)

重庆市主要农耕地土壤 Cd 生物有效性及影响因素 ..... 王锐, 胡小兰, 张永文, 余飞, 朱海山, 李瑜(1864)

棉秆炭对碱性水稻土壤-水稻中镉迁移转化的阻控作用 ..... 刘师豆, 朱新萍, 韩耀光, 赵一, 金航, 贾宏涛(1871)

连续 4 a 施有机肥降低紫泥田镉活性与稻米镉含量 ..... 薛毅, 尹泽润, 盛浩, 马颖榴, 周清, 宋达清, 张杨珠(1880)

纳米氢氧化镁对不同类型土壤镉形态的影响 ..... 邓继宝, 张春来, 徐卫红(1888)

矿业废弃地复垦土壤-作物晒吸收特征及其对重金属拮抗效应 ..... 尹炳, 汪建飞, 师胜, 卜中原, 霍天满, 张世文(1904)

不同生物炭对酸性农田土壤性质和作物产量的动态影响 ..... 杨彩迪, 宗玉统, 卢升高(1914)

化肥减量有机替代对紫色土旱坡地土壤氮磷养分及作物产量的影响 ..... 朱浩宇, 高明, 龙翼, 徐国鑫, 王富华, 王子芳(1921)

紫色土旱坡地氮流失通量对减肥施肥秸秆的响应 ..... 熊子怡, 王子芳, 龙翼, 严冬春, 徐国鑫, 高明(1930)

浒苔生物炭对滨海盐碱土壤改良的效果及途径 ..... 吴丹, 孙萍, 路鹏展, 陈友媛, 郭嘉梦, 刘明, 王磊, 张彩杰(1941)

极端干旱区咸水灌溉人工防护林土壤可溶性碳的垂直分布及其影响因素 ..... 孟天歌, 吴路遥, 张少磊, 徐燕莹, 李雄, 张建国(1950)

红松人工林土壤酶活性与化学性质对氮添加的响应 ..... 吕来新, 宋蕾, 刘志理, 张金波, 金光泽(1960)

稻田土壤 N<sub>2</sub>O 消纳能力及 nosZ-I 型功能种群应答机制 ..... 郭俊丽, 田美洁, 葛体达, 魏文学, 王光军, 孙志龙, 刘毅(1968)

京津冀电子废弃物回收利用潜力预测及环境效益评估 ..... 陈盼, 施晓清(1976)

中国城市工业化发展与 PM<sub>2.5</sub> 的关系: 兼论 EKC 曲线形成的内在机制 ..... 李雅男, 丁振民, 邓元杰, 侯孟阳, 姚顺波(1987)

《环境科学》征订启事(1618)    《环境科学》征稿简则(1635)    信息(1724, 1769, 1800)

# 典型超低排放燃煤电厂可凝结颗粒物特征和成因

邓建国<sup>1</sup>, 王刚<sup>1</sup>, 张莹<sup>1</sup>, 李妍菁<sup>1</sup>, 段雷<sup>1,2</sup>, 蒋靖坤<sup>1,2\*</sup>

(1. 清华大学环境学院, 北京 100084; 2. 国家环境保护大气复合污染来源与控制重点实验室, 北京 100084)

**摘要:** 燃煤电厂排放的可凝结颗粒物 (condensable particle matter, CPM) 由于其潜在的大气环境影响引起广泛关注, 而目前对于燃煤电厂 CPM 的特征和成因尚不清楚. 本研究通过稀释间接法收集了超低排放改造后的典型燃煤电厂石灰石-石膏湿法脱硫 (wet flue gas desulfurization, WFGD) 入口/出口和湿式静电除尘 (wet electrostatic precipitator, WESP) 出口位置的 CPM, 并对其进行了重量分析和水溶性离子分析, 同时测量了可能的 CPM 气态前体物浓度. 结果表明, 烟气中 CPM 的主要气态前体物为 HCl、HNO<sub>3</sub>、SO<sub>3</sub> 和 NH<sub>3</sub> 等. 烟气温度降低后, 这些气态前体物通过冷凝或化学反应形成 CPM. 所形成 CPM 主要化学组分包括 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、Cl<sup>-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 等水溶性离子. WFGD 和 WESP 可以降低 CPM 气态前体物的浓度, 进而减少 CPM 排放, 经过 WFGD 和 WESP 后 CPM 浓度的平均下降比例分别为 27% 和 45%. 此外, 稀释降温后烟气中的 SO<sub>3</sub> 非均相冷凝在已有的颗粒物表面上, 导致颗粒物中的 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 增加, 同时 Cl<sup>-</sup> 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 减少, 致使最终排口处 CPM 的水溶性离子组分主要为 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>.

**关键词:** 燃煤电厂; 可凝结颗粒物 (CPM); 稀释间接法; 石灰石-石膏湿法脱硫 (WFGD); 湿式电除尘器 (WESP)

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)04-1589-05 DOI: 10.13227/j.hjxx.201910091

## Characteristics of Condensable Particulate Matter in Ultra-low Emission Coal-Fired Power Plants

DENG Jian-guo<sup>1</sup>, WANG Gang<sup>1</sup>, ZHANG Ying<sup>1</sup>, LI Yan-jing<sup>1</sup>, DUAN Lei<sup>1,2</sup>, JIANG Jing-kun<sup>1,2\*</sup>

(1. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. State Environmental Protection Key Laboratory of Sources and Control of Air Pollution Complex, Beijing 100084, China)

**Abstract:** The condensable particle matter (CPM) from coal-fired power plants has attracted significant attention for its potential influence on air quality. The knowledge of CPM emissions from coal-fired power plants is limited. In this study, CPM was collected at the inlet and outlet of wet flue gas desulfurization (WFGD) and the outlet of wet electrostatic precipitator (WESP) using in-direct dilution method. Both mass concentration and water-soluble ions of CPM were analyzed after sampling. The gas precursors were measured at the same time. We showed that gas precursors such as HCl, HNO<sub>3</sub>, SO<sub>3</sub>, and NH<sub>3</sub> significantly contributed to CPM from coal-fired power plants. As the temperature of flue gas decreased, these gas precursors were observed to form CPM. The major components of CPM were water-soluble ions such as SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Cl<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, and NH<sub>4</sub><sup>+</sup>. WFGD and WESP could reduce the CPM gas precursors. Therefore, CPM concentrations after WFGD and WESP of the five tested coal-fired power plants were reduced by 27% and 45%, respectively. In addition, the condensation of SO<sub>3</sub> increased SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> concentration but reduced Cl<sup>-</sup> and NO<sub>3</sub><sup>-</sup> contents. Finally, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> was found to be the major water-soluble ion of CPM.

**Key words:** coal-fired power plant; condensable particle matter (CPM); in-direct dilution; wet flue gas desulfurization (WFGD); wet electrostatic precipitator (WESP)

一直以来我国燃煤电厂颗粒物排放控制标准和政策都主要是针对可过滤颗粒物 (filterable particle matter, FPM), 即烟气温度下为固态或液态、可以被滤膜或者滤筒收集的颗粒物<sup>[1,2]</sup>. 随着超低排放改造的进行, 目前绝大部分改造后的燃煤电厂可过滤颗粒物排放浓度低于 10 mg·m<sup>-3</sup>, 重点区域的燃煤电厂可过滤颗粒物排放浓度达到燃气机组的排放水平, 低于 5 mg·m<sup>-3</sup>. 此时可凝结颗粒物 (condensable particle matter, CPM) 逐渐引起了公众的关注<sup>[3-6]</sup>. CPM 是指烟气温度下为气态的前体物, 在烟气排放进入大气环境后稀释降温后经均相和非均相成核形成的颗粒物<sup>[7-9]</sup>.

国内外学者用冷凝法研究了燃煤电厂 CPM, 结果表明 CPM 主要为无机组分<sup>[10-12]</sup>, 而 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 又是其中最

主要的无机组分<sup>[13-15]</sup>. 杨柳等<sup>[16]</sup>用冷凝法测定燃煤电厂 WFGD 和 WESP 前后 CPM 浓度及化学组成, 结果表明石灰石-石膏湿法脱硫 (wet flue gas desulfurization, WFGD) 和湿式静电除尘 (wet electrostatic precipitator, WESP) 可以降低 CPM. 蒋靖坤等<sup>[9]</sup>用冷凝法、稀释间接法<sup>[17]</sup>和稀释直接法<sup>[18]</sup>研究了我国超低排放燃煤电厂 CPM, 结果表明冷凝法由于 SO<sub>2</sub> 等气体溶于冷凝水导致以往基于冷凝法的 CPM 研究中测得的 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 偏高, 从而高估了 CPM 排放.

虽然现有的研究测量了一些燃煤电厂 WFGD

收稿日期: 2019-10-15; 修订日期: 2019-11-25

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFC0213202)

作者简介: 邓建国 (1985 ~), 男, 硕士, 主要研究方向为污染源颗粒物排放, E-mail: fengxing.luotuo@163.com

\* 通信作者, E-mail: jiangjk@tsinghua.edu.cn

和 WESP 前后 CPM 浓度及化学组成,但是对于 CPM 气态前体物在 WFGD 和 WESP 中转化规律,以及 CPM 成因尚不清楚,本研究用稀释间接法收集了 5 个典型燃煤电厂 WFGD 入口/出口和 WESP 出口位置 CPM,并对其进行重量分析和水溶性离子组分分析,同时测量了可能的 CPM 气态前体物浓度,通过揭示燃煤电厂 CPM 特征和成因,以期控制燃煤电厂 CPM 排放提供科学依据。

表 1 所测试燃煤电厂基本信息<sup>1)</sup>

Table 1 Basic information of coal-fired power plants

电厂	装机容量/MW	污控措施	入炉煤质			
			挥发分( $A_d$ )/%	灰分( $V_{daf}$ )/%	全硫( $S_{t,ad}$ )/%	全氯( $Cl_{ad}$ )/%
电厂 1	600	SCR + ESP + WFGD + WESP	28.4	18.4	1.70	0.045
电厂 2	600	SCR + ESP + WFGD + WESP	36.6	18.4	0.54	0.050
电厂 3	350	SCR + ESP + WFGD	29.7	15.1	0.45	0.054
电厂 4	600	SCR + ESP + WFGD	25.2	29.2	0.88	0.037
电厂 5	600	SCR + ESP + WFGD + WESP	13.2	37.0	1.50	0.030

1) SCR 为选择性催化还原脱硝,ESP 为传统静电除尘器,WFGD 为湿法脱硫系统,WESP 为湿式电除尘器

## 1.2 样品收集与分析

采用如图 1 所示的稀释间接法采样系统收集 CPM<sup>[9]</sup>.具体为先根据烟气中  $O_2$ 、 $CO_2$ 、 $H_2O$  含量以及温度等烟气参数计算  $PM_{2.5}$  切割头采样流量,然后用皮托管测定采样点处的烟气平均流速,最后根据采样流量以及烟气流速选取等速采样嘴进行采样。 $PM_{2.5}$  旋风切割头去除粒径大于  $2.5 \mu m$  的颗粒物,然后高温烟气分两路,一路直接用滤膜收集  $FPM_{2.5}$ ,另一路烟气与干净的稀释空气混合。稀释空气是通过空气压缩机产生,并用变色硅胶、椰壳活性炭和颗粒物高效过滤器分别去除稀释空气中的水分、挥发性

## 1 材料与方 法

### 1.1 燃煤机组

本研究选取 5 个典型燃煤电厂,这些电厂均为超低排放电厂,基本信息如表 1 所示。在电厂脱硫入口、脱硫出口和湿式电除尘出口收集 CPM 样品。在收集 CPM 样品同时测试了烟气中 CPM 气态前体物的浓度。

有机物和颗粒物。稀释气流量与烟气流量之比为 10,烟气与稀释空气在稀释腔内充分混合降温,CPM 气态前体物经均相或非均相成核形成颗粒物,达到动力学平衡后用滤膜收集总颗粒物( $TPM_{2.5}$ )。每一采样位置取 3 个平行样,每个样品采样时间为 2 h。用石英滤膜和特氟龙两种滤膜收集  $FPM_{2.5}$  和  $TPM_{2.5}$  样品,石英滤膜用于重量分析,特氟龙滤膜用于水溶性离子分析。CPM 质量浓度和水溶性离子浓度为  $TPM_{2.5}$  质量浓度和水溶性离子浓度减去  $FPM_{2.5}$  的相应值。

### 1.3 CPM 气体气态前体物测定

CPM 气态前体物  $HCl$  和  $NH_3$  等气体通过便携式傅立叶红外烟气分析仪(芬兰 Gasmet Dx4000)测定。 $SO_3$  气体通过控制冷凝法测定<sup>[19]</sup>,冷凝温度  $70^\circ C$ ,然后用离子色谱分析冷凝液中  $SO_4^{2-}$  浓度,从而确定  $SO_3$  浓度。

## 2 结果与讨论

### 2.1 可凝结颗粒物质量浓度

稀释间接法测得 5 个电厂 WFGD 入口/出口和 WESP 出口的 CPM 浓度如图 2 所示。电厂 1、电厂 2、电厂 3 和电厂 4 经过 WFGD 后 CPM 浓度都下降了,分别降低了 32%、17%、32% 和 25%,平均为 27%。电厂 1 和电厂 2 安装有 WESP,CPM 浓度进一步下降,分别降低了 60% 和 30%,平均为 45%。电厂 5 同时装有 WFGD 和 WESP,但由于 WFGD 与 WESP 之间无采样口,因此只在 WFGD 入口和 WESP 出口进行了 CPM 测试,结果显示经过 WFGD 和 WESP 后

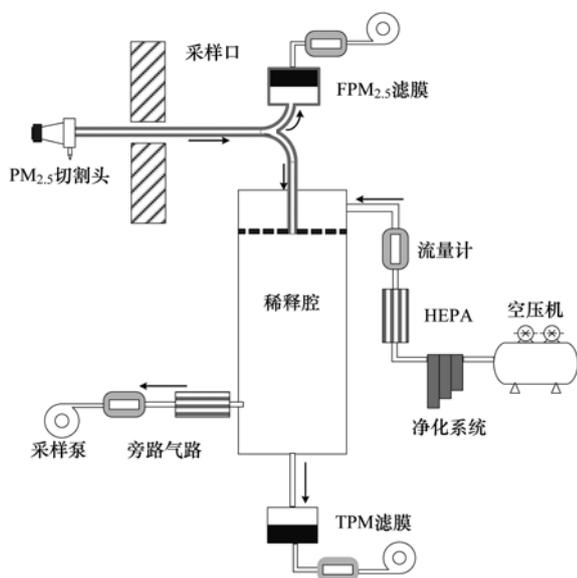
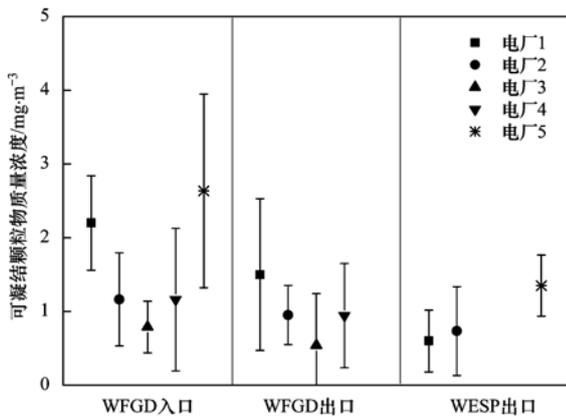


图 1 稀释间接测量可凝结颗粒物示意<sup>[9]</sup>

Fig. 1 Schematics of the indirect dilution sampling method for condensable particulate matter



电厂3和4未安装WESP,电厂5由于WFGD出口处无采样口没有进行测试

图2 WFGD入口/出口和WESP出口测得的颗粒物质量浓度

Fig. 2 Emission concentrations of particulate matter measured at the inlet and outlet of WFGD and at the WESP outlet

CPM浓度降低了46%.

经过WFGD后CPM浓度降低表明WFGD可以减少CPM的排放,表明WFGD可以去除CPM气态前体物. WFGD入口烟气温度一般在100℃以上,经过WFGD后烟气温度下降为约50℃,CPM气态前体物可能在降温过程中通过均相或者非均相冷凝成核颗粒物而被去除,也可能被脱硫浆液吸收去除.

经过WESP后CPM浓度进一步降低,同理表明WESP对CPM气态前体物有显著的去除作用. WESP前后烟气温度没有明显降低. 推测CPM气态前体物被集尘板表面水膜吸收而去除. 这是因为在WESP运行中常用水冲洗集尘板,集尘板表面一直处于湿润状态,且WESP中烟气流速较低,约为 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,烟气在WESP中停留时间较长,CPM气态前体物可能被集尘板水膜所吸收,因而导致WESP后CPM浓度降低.

## 2.2 可凝结颗粒物水溶性离子组分

用离子色谱(美国Thermo Dionex ICS1000/2000)进一步分析了 $\text{FPM}_{2.5}$ 和 $\text{TPM}_{2.5}$ 中水溶性离子,用 $\text{TPM}_{2.5}$ 中离子浓度减去 $\text{FPM}_{2.5}$ 中离子浓度得到CPM的离子浓度. 如图3所示,WFGD入口 $\text{FPM}_{2.5}$ 中水溶性离子浓度较低,主要为 $\text{SO}_4^{2-}$ ,此外电厂1和3还有 $\text{NH}_4^+$ ;WFGD入口烟气温度较高,已有研究表明 $\text{FPM}_{2.5}$ 中 $\text{SO}_4^{2-}$ 和 $\text{NH}_4^+$ 可能来自 $\text{NH}_4\text{HSO}_4$ 冷凝<sup>[20]</sup>. 经稀释降温后,WFGD入口 $\text{TPM}_{2.5}$ 中水溶性离子浓度增加了. 相比于 $\text{FPM}_{2.5}$ 中的水溶离子, $\text{TPM}_{2.5}$ 中增加最多的离子为 $\text{SO}_4^{2-}$ ,其次为 $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{NO}_3^-$ . 电厂1中这些离子增加最为显著. 显然地,这些离子组分是稀释降温过程中从烟气中冷凝或反应出来的,是CPM的主要化学组成,相减得到

的CPM水溶性离子组成主要为 $\text{SO}_4^{2-}$ ,其次为 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{NH}_4^+$ (图3).  $\text{SO}_4^{2-}$ 来自 $\text{SO}_3$ 气体,而 $\text{SO}_3$ 是通过煤燃烧或者SCR产生.  $\text{Cl}^-$ 来自煤燃烧过程中生成的HCl气体, $\text{NO}_3^-$ 来自烟气中 $\text{HNO}_3$ 或者 $\text{HNO}_2$ 气体, $\text{NH}_4^+$ 来自SCR逃逸的 $\text{NH}_3$ . 因此,这些HCl、 $\text{HNO}_3$ (或者 $\text{HNO}_2$ )、 $\text{SO}_3$ 和 $\text{NH}_3$ 是CPM的气态前体物,当烟气温度降低后,这些气态前体物通过冷凝或者酸碱反应形成CPM.

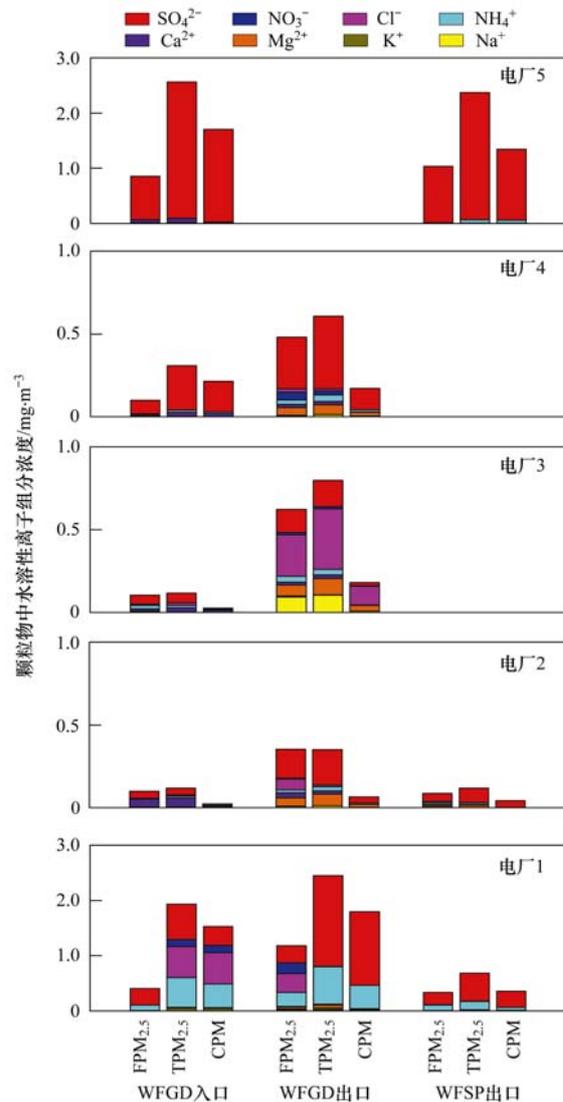


图3 颗粒物无机水溶性离子组分占比

Fig. 3 Ratio of water-soluble ions in particulate matter

WFGD出口 $\text{FPM}_{2.5}$ 中离子浓度相比于入口增加了. 阴离子和阳离子浓度均有所增加. 脱硫浆液携带是导致WFGD出口 $\text{FPM}_{2.5}$ 中水溶性离子增加一个原因,特别是导致 $\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{Mg}^{2+}$ 等阳离子增加<sup>[21]</sup>. 但经过WFGD后烟气温度下降为50℃,CPM气态前体物如HCl、 $\text{HNO}_3$ (或者 $\text{HNO}_2$ )、 $\text{SO}_3$ 和 $\text{NH}_3$ 等通过冷凝或者反应转变为颗粒物,也导致 $\text{FPM}_{2.5}$ 中 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{Cl}^-$ 和 $\text{NH}_4^+$ 增加.

稀释降温后,TPM<sub>2.5</sub>中水溶性离子浓度同样增加了.相比于WFGD出口FPM<sub>2.5</sub>中的离子,TPM<sub>2.5</sub>中SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>浓度增加了,但是Cl<sup>-</sup>和NO<sub>3</sub><sup>-</sup>浓度却减少了,电厂1和2中几乎减少为零.可能的原因为WFGD出口高湿的烟气环境更有利于SO<sub>3</sub>冷凝<sup>[19, 22, 23]</sup>,大量SO<sub>3</sub>通过非均相冷凝在FPM表面形成H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub><sup>[24]</sup>.而H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>通过强酸置换弱酸反应,与FPM中NH<sub>4</sub>Cl和NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>等发生置换反应(如: NH<sub>4</sub>Cl + H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> → NH<sub>4</sub>HSO<sub>4</sub> + HCl↑),释放HCl和HNO<sub>3</sub>,导致WFGD出口TPM<sub>2.5</sub>中Cl<sup>-</sup>和NO<sub>3</sub><sup>-</sup>浓度降低,而SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>离子增加.这意味着WFGD后烟气直接排放进入大气环境后稀释降温,如同稀释法测得的TPM<sub>2.5</sub>一样,烟气中SO<sub>3</sub>冷凝在颗粒物表面,使颗粒物中SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>增加,同时Cl<sup>-</sup>和NO<sub>3</sub><sup>-</sup>减少,最终颗粒物中含有更多SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>.相减得到的WFGD出口CPM离子组成也主要为SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>.电厂3不同于其他4个电厂,WFGD出口CPM主要为Cl<sup>-</sup>.这可能是由于电厂3入炉煤中S含量较低,仅为0.45%,WFGD出口CPM浓度也较低,而入炉煤中氯含量相对较高所致.未来需要进一步研究验证.

电厂1、电厂2和电厂5装有WESP保证超低排放.WESP去除了大量FPM<sub>2.5</sub>,出口FPM<sub>2.5</sub>水溶性离子浓度也降低了.将WESP出口烟气稀释降温,TPM<sub>2.5</sub>水溶性离子中SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>进一步增加.表明WESP出口烟气中仍含有一定量的SO<sub>3</sub>,当烟气温度降低后SO<sub>3</sub>冷凝或者反应形成CPM.相减得到的CPM水溶性离子绝大部分为SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>,因此最终排放口CPM主要为SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>.

总之,燃煤电厂排口CPM水溶性离子组成主要为SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>,SO<sub>3</sub>是燃煤电厂CPM的主要气态前体物,通过冷凝或者化学反应形成CPM.入炉煤较高的含硫量导致烟气中较高SO<sub>3</sub>含量,最终形成更多的CPM.如电厂5,最终排口90%的CPM为SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>.

### 2.3 可凝结颗粒物气态前体物质量浓度

测得了电厂1和电厂4的WFGD入口/出口和WESP出口3个位置CPM气态前体物的浓度,如图4所示HNO<sub>3</sub>气体由于没有合适的测试方法暂时没有测量.电厂1的WFGD入口CPM气态前体物SO<sub>3</sub>、HCl和NH<sub>3</sub>浓度分别为7.9、67.0和1.5 mg·m<sup>-3</sup>;WFGD出口浓度分别下降为2.6、4.2和0.7 mg·m<sup>-3</sup>.WESP出口浓度进一步下降为0.4、0.7和0.5 mg·m<sup>-3</sup>;电厂4 WFGD入口CPM气态前体物SO<sub>3</sub>、HCl和NH<sub>3</sub>浓度分别为4.3、5.5和3.5 mg·m<sup>-3</sup>;经过WFGD后分别下降为1.9、0.8和2.2 mg·m<sup>-3</sup>;表明WFGD和WESP都可以显著去除

CPM气态前体物,这也是WFGD和WESP后CPM浓度分别下降27%和45%的主要原因.较高的入炉煤硫和氯含量导致WFGD入口SO<sub>3</sub>和HCl浓度较高.SO<sub>3</sub>、HCl以及SCR后未反应的NH<sub>3</sub>经过WFGD后,一方面烟气温度降低通过冷凝或反应转变为颗粒物而被去除,上文颗粒物中相应离子组分的增加也印证了这一点.另一方面,这些气态前体物同时也可被脱硫浆液吸收去除.WESP前后烟气温度几乎没有变化,但WESP后SO<sub>3</sub>、HCl、NH<sub>3</sub>等气态前体物浓度降低,CPM浓度也随之降低,这可能是WESP的阳极集尘板水膜吸收去除烟气中SO<sub>3</sub>、HCl等CPM气态前体物.已有研究也表明WESP对SO<sub>3</sub>和HCl的去除率分别达到45%和85%<sup>[25]</sup>.而本研究中电厂1的这一去除率分别为85%和42%.因此WFGD和WESP可通过降温或溶液吸收CPM气态前体物进而减少最终排口处CPM的排放浓度.

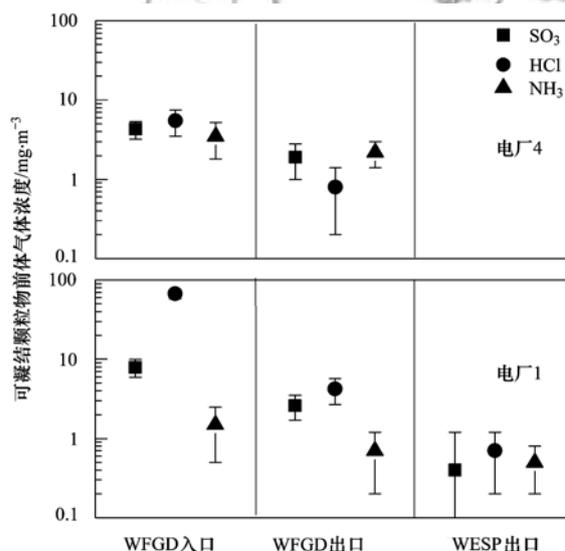


图4 WFGD入口/出口和WESP出口可凝结颗粒物气态前体物质量浓度

Fig. 4 Concentration of precursors for condensable particulate matter (CPM) at the inlet and outlet of WFGD and at the outlet of WESP

### 3 结论

(1) 实行超低排放后的典型燃煤电厂烟气中CPM主要来自于SO<sub>3</sub>、HNO<sub>3</sub>、HCl和NH<sub>3</sub>等气态前体物,温度降低后,这些气态前体物通过冷凝或者化学反应形成CPM.CPM化学组成主要为SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、其次为NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>等水溶性离子.

(2) WFGD和WESP可以去除CPM的气态前体物进而降低CPM排放,经过WFGD和WESP后CPM浓度的平均下降比例分别为27%和45%.

(3) 稀释降温后,烟气中的SO<sub>3</sub>非均相冷凝在已有的颗粒物表面上,颗粒物中的SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>增加,同时

$\text{Cl}^-$ 、 $\text{NO}_3^-$  减少, 致使最终排口处 CPM 水溶性离子主要为  $\text{SO}_4^{2-}$ 。

#### 参考文献:

- [ 1 ] 蒋靖坤, 邓建国, 李振, 等. 固定污染源排气中  $\text{PM}_{2.5}$  采样方法综述[J]. 环境科学, 2014, **35**(5): 2018-2024.  
Jiang J K, Deng J G, Li Z, *et al.* Sampling methods for  $\text{PM}_{2.5}$  from stationary sources: a review[J]. Environmental Science, 2014, **35**(5): 2018-2024.
- [ 2 ] 蒋靖坤, 邓建国, 段雷, 等. 基于虚拟撞击原理的固定源  $\text{PM}_{10}/\text{PM}_{2.5}$  采样器的研制[J]. 环境科学, 2014, **35**(10): 3639-3643.  
Jiang J K, Deng J G, Duan L, *et al.* Development of a two stage virtual impactor for stationary source  $\text{PM}_{10}$  and  $\text{PM}_{2.5}$  sampling[J]. Environmental Science, 2014, **35**(10): 3639-3643.
- [ 3 ] USEPA Method 202, Dry impinger method for determining condensable particulate emissions from stationary sources[S].
- [ 4 ] 李兴华, 曹阳, 蒋靖坤, 等. 固定源  $\text{PM}_{2.5}$  稀释采样器的研制[J]. 环境科学学报, 2015, **35**(10): 3309-3315.  
Li X H, Cao Y, Jiang J K, *et al.* Development of a dilution sampler for measuring fine particle from stationary sources[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, **35**(10): 3309-3315.
- [ 5 ] 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.
- [ 6 ] 朱法华, 李军状. 我国燃煤电厂  $\text{SO}_3$  和可凝结颗粒物控制存在问题与建议[J]. 环境影响评价, 2019, **41**(3): 1-5.  
Zhu F H, Li J Z. Questions and suggestions on the control of  $\text{SO}_3$  and condensable particulate matter from coal-fired power plants in China[J]. Environmental Impact Assessment, 2019, **41**(3): 1-5.
- [ 7 ] Morino Y, Chatani S, Tanabe K, *et al.* Contributions of condensable particulate matter to atmospheric organic aerosol over Japan[J]. Environmental Science & Technology, 2018, **52**(15): 8456-8466.
- [ 8 ] Feng Y P, Li Y Z, Cui L. Critical review of condensable particulate matter[J]. Fuel, 2018, **224**: 801-813.
- [ 9 ] 蒋靖坤, 邓建国, 王刚, 等. 固定污染源可凝结颗粒物测量方法[J]. 环境科学, 2019, **40**(12): 5234-5239.  
Jiang J K, Deng J G, Wang G, *et al.* Measuring the condensable particle matter from a stationary source [J]. Environmental Science, 2019, **40**(12): 5234-5239.
- [ 10 ] 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.
- [ 11 ] England G C, Watson J G, Chow J C, *et al.* Dilution-based emissions sampling from stationary sources: Part 1—compact sampler methodology and performance[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2007, **57**(1): 65-78.
- [ 12 ] 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.
- [ 13 ] 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.
- [ 14 ] 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.
- [ 15 ] 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.
- [ 16 ] 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.
- [ 17 ] Zheng C H, Hong Y P, Liu X J, *et al.* Removal and emission characteristics of condensable particulate matter in ultra-low emission power plant [J]. Energy & Fuels, 2018, **32**(1): 10586-10594.
- [ 18 ] 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.
- [ 19 ] USEPA Method 8A, Determination of sulfuric acid vapor or mist and sulfur dioxide emission from Kraft recovery furnaces[S].
- [ 20 ] 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.
- [ 21 ] 邓建国, 马子珍, 李振, 等. 不同湿法脱硫工艺对燃煤电厂  $\text{PM}_{2.5}$  排放的影响[J]. 环境科学, 2019, **40**(8): 3457-3462.  
Deng J D, Ma Z Z, Li Z, *et al.* Effect of a wet flue gas desulphurization system on the emission of  $\text{PM}_{2.5}$  from coal-fired power plants[J]. Environmental Science, 2019, **40**(8): 3457-3462.
- [ 22 ] Srivastava R K, Miller C A, Erickson C, *et al.* Emissions of sulfur trioxide from coal-fired power plants[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2004, **54**(6): 750-762.
- [ 23 ] Zheng C H, Wang Y F, Liu Y, *et al.* Formation, transformation, measurement, and control of  $\text{SO}_3$  in coal-fired power plants[J]. Fuel, 2019, **241**: 327-346.
- [ 24 ] 梁成思. 燃煤烟气中气溶胶颗粒形成及长大的机理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- [ 25 ] 王贵华, 朱斌帅, 张海珍, 等. 湿式电除尘器  $\text{SO}_3$ 、 $\text{HCl}$ 、 $\text{HF}$  脱除效率试验研究[J]. 中国电力, 2018, **51**(12): 170-174.  
Wang G H, Zhu B S, Zhang H Z, *et al.* Experimental study on  $\text{SO}_3$ ,  $\text{HCl}$  and  $\text{HF}$  removal efficiency of wet electrostatic precipitator[J]. Electric Power, 2018, **51**(12): 170-174.

## CONTENTS

PM <sub>2.5</sub> Inversion Using Remote Sensing Data in Eastern China Based on Deep Learning .....	LIU Lin-yu, ZHANG Yong-jun, LI Yan-sheng, <i>et al.</i> (1513)
Regional Air Pollution Process in Winter over the Yangtze River Delta and Its Influence on Typical Northern Cities .....	LI Rui, LI Qing, XU Jian, <i>et al.</i> (1520)
Influencing Factors of Ozone Concentration in Xi'an Based on Generalized Additive Models .....	HUANG Xiao-gang, SHAO Tian-jie, ZHAO Jing-bo, <i>et al.</i> (1535)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Levoglucosan and Its Isomers in PM <sub>2.5</sub> in Beijing and Six Surrounding Cities .....	ZHU Hong-xia, TAO Xue-mei, WANG Chao, <i>et al.</i> (1544)
Characteristics and Sources Apportionment of Fine Particulate Matter in a Typical Coastal City During the Heating Period .....	LI Ming-yan, YANG Wen, WEI Min, <i>et al.</i> (1550)
Characteristics and Source Apportionment of Black Carbon in Chengdu .....	WANG Lu, YUAN Liang, ZHANG Xiao-ling, <i>et al.</i> (1561)
Effects of VOCs on Ozone Formation in the Tianjin Suburbs in Summer .....	YAO Qing, HAN Su-qin, ZHANG Xiao-ling, <i>et al.</i> (1573)
Source Profiles and Impact of Volatile Organic Compounds in the Coating Manufacturing Industry .....	WU Jian, GAO Song, CHEN Xi, <i>et al.</i> (1582)
Characteristics of Condensable Particulate Matter in Ultra-low Emission Coal-Fired Power Plants .....	DENG Jian-guo, WANG Gang, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (1589)
Distribution and Source Analysis of Nitrate in Surface Waters of China .....	ZHANG Xin, ZHANG Yan, BI Zhi-lei, <i>et al.</i> (1594)
Spatial Characteristics and Ecological Risks of Perfluoroalkyl Substances in Coastal Urbanized Areas of China and South Korea .....	YANG Hong-fa, SHI Bin, ZHOU Yun-qiao, <i>et al.</i> (1607)
Analysis of Water Quality Change and Its Driving Factors of the Xiaqing River Estuary in Recent Ten Years .....	FAN Xin-feng, HAN Mei, WANG Lei, <i>et al.</i> (1619)
Distribution of Four Artificial Sweeteners in Water Treatment and Water Supply System in City H of Zhejiang Province .....	MA Xiao-yan, HU Hui, LU Si-jia, <i>et al.</i> (1629)
Changes in Epilithic Algae Community and Its Relationship with Environmental Factors in the Meixi River, a Tributary of the Three Gorges Reservoir .....	MI Wen-mei, SHI Jun-qiong, YANG Yan-jun, <i>et al.</i> (1636)
Succession Pattern of Phytoplankton and Its Drivers in Lake Luoma, Jiangsu Province .....	ZHANG Qing-ji, WANG Ye-yu, WANG Jin-dong, <i>et al.</i> (1648)
Relationship Between Diversity of Aquatic Plant Communities and Water Environmental Factors in Lhalu Wetland .....	WANG Jia-jun, TIAN Han-xin, ZHOU Lei, <i>et al.</i> (1657)
Evolution Characteristics and Driving Factors of Denitrification Community Based on Network Analysis in the Process of Spring Thermal Layer Formation in Zhoucun Reservoir .....	ZHOU Shi-lei, SUN Yue, ZHANG Yi-ran, <i>et al.</i> (1666)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Difference Analysis of Nitrogen and Phosphorus in Daihai Lake .....	ZHAO Li, CHEN Jun-yi, JIANG Xia, <i>et al.</i> (1676)
Sediment Denitrification Rate and Its Response to Exogenous Carbon and Nitrogen in the Ponds and Bottomland of the Chaohu Lakeshore Zone .....	LI Ru-zhong, WANG Li, LIU Chao (1684)
Phosphate Control Effect and Water Body Remediation of Magnesium Modified Reed Biochar .....	DING Yu-qin, LI Da-peng, ZHANG Shuai, <i>et al.</i> (1692)
Efficiency of Magnesium Hydroxide Capping and Amendment to Control Phosphorus Release from Sediments .....	YANG Chun-yi, ZHAN Yan-hui, LIN Jian-wei, <i>et al.</i> (1700)
Characteristics of Chemical Fractions of Dissolved Organic Matter in Road Runoff in Beijing .....	CHEN Meng-yao, DU Xiao-li, YU Zhen-ya, <i>et al.</i> (1709)
3D Porous Photothermal Materials for High Salt Wastewater Treatment .....	HUANG Le, XU Ying-feng, XIE Qian-qing, <i>et al.</i> (1716)
Electrocatalytic Oxidation of Sulfadiazine with Ni-Doped Sb-SnO <sub>2</sub> Ceramic Ring Particle Electrode .....	SHI Qiu-jun, LIU An-di, TANG Bo-bin, <i>et al.</i> (1725)
Degradation of AO7 with Magnetic Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> -CuO Heterogeneous Catalyzed Sodium Percarbonate System .....	XU Jie, WANG Lin, CHEN Jia-bin, <i>et al.</i> (1734)
Red Mud-activated Peroxymonosulfate for Ciprofloxacin Degradation: Efficiency and Mechanism .....	SHI Jing-zhuan, WEI Hong, ZHOU Xiao-de, <i>et al.</i> (1743)
Influence of Industrial Wastewater Quality on Advanced Treatment of Microbubble Ozonation .....	ZHANG Jing, ZHANG Shou-jing, LIU Chun, <i>et al.</i> (1752)
Adsorption Properties of Sludge-hydrochar for Methylene Blue .....	CHEN Li-yuan, LI Da-peng, ZHU Wen-juan, <i>et al.</i> (1761)
Preparation of Modified Watermelon Biochar and Its Adsorption Properties for Pb(II) .....	BI Jing-wang, SHAN Rui, HAN Jing, <i>et al.</i> (1770)
Construction and Denitrification Performance of A <sup>2</sup> /O Based on Partial Nitrification Coupled with an ANAMMOX System .....	LIU Xiao-chai, RONG Yi, WEN Li-jie, <i>et al.</i> (1779)
Construction and Mechanism of Methanotroph-based Ultimate Denitrification System for Tailwater of Urban Sewage Plants .....	YANG Ya-nan, LI Yan-cheng, LI Jiang, <i>et al.</i> (1787)
Impact of Hydraulic Retention Time on Performance of Partial Nitrification Granular Sludge in Continuous Stirred-Tank Reactor .....	WANG Jian-fang, QI Ze-kun, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (1794)
Realization Process of Nitrification and Changes in Sludge Characteristics in Granular Sludge Reactor for Low Strength Sewage Treatment .....	ZHU Lin, CHENG Cheng, SONG Jia-jun, <i>et al.</i> (1801)
Characteristics of Organics Transformation and Sludge Morphology in an ABR for Sewage Treatment with Different HRTs .....	CHENG Cheng, ZHU Lin, GUO Kai-cheng, <i>et al.</i> (1808)
Effect of Adding Granular Activated Carbon (GAC)/Manganese Dioxide (MnO <sub>2</sub> ) for the Anaerobic Digestion of Waste Activated Sludge .....	YANG Bo, JIA Li-juan, XU Hui, <i>et al.</i> (1816)
Trace Metals Pollution and Health Risks for Planning Area Soils of 193 Chinese Cities .....	LI Kuo, PENG Min, YANG Zheng, <i>et al.</i> (1825)
Assessment of Heavy Metal Pollution in Surface Dust of Lanzhou Schools Based on Random Forests .....	HU Meng-jun, WANG Jia, ZHANG Ya-yun, <i>et al.</i> (1838)
Contents, Sources, and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Soils of Various Functional Zones in Yangzhou City, China .....	YAO Cheng, NI Jin-zhi, LIU Rui, <i>et al.</i> (1847)
Safety Assessment of Rice Planting in Soil Cadmium Geological Anomaly Areas in Southwest Guangxi .....	CHEN Tong-bin, PANG Rui, WANG Fo-peng, <i>et al.</i> (1855)
Bioavailability and Influencing Factors of Soil Cd in the Major Farming Areas of Chongqing .....	WANG Rui, HU Xiao-lan, ZHANG Yong-wen, <i>et al.</i> (1864)
Control of Cadmium Migration and Transformation in Alkaline Paddy Soil-Rice Using Cotton Stalk Biochar .....	LIU Shi-dou, ZHU Xin-ping, HAN Yao-guang, <i>et al.</i> (1871)
Reduction of Soil Cadmium Activity and Rice Cadmium Content by 4-year-consecutive Application of Organic Fertilizer .....	XUE Yi, YIN Ze-run, SHENG Hao, <i>et al.</i> (1880)
Effects of Nano-magnesium Hydroxide on the Forms of Cadmium in Different Types of Soil .....	DENG Ji-bao, ZHANG Chun-lai, XU Wei-hong (1888)
Selenium Uptake Characteristics of Reclaimed Soil-Crop from Mining Wasteland and Its Antagonistic Effects on Heavy Metals .....	YIN Bing, WANG Jian-fei, SHI Sheng, <i>et al.</i> (1904)
Dynamic Effects of Different Biochars on Soil Properties and Crop Yield of Acid Farmland .....	YANG Cai-di, ZONG Yu-tong, LU Sheng-gao (1914)
Effects of Fertilizer Reduction and Application of Organic Fertilizer on Soil Nitrogen and Phosphorus Nutrients and Crop Yield in a Purple Soil Sloping Field .....	ZHU Hao-yu, GAO Ming, LONG Yi, <i>et al.</i> (1921)
Response of Nitrogen Loss Flux in Purple Soil Sloping Field to Reduced Fertilizer and Combining Straw .....	XIONG Zi-yi, WANG Zi-fang, LONG Yi, <i>et al.</i> (1930)
Effect and Approach of <i>Enteromorpha prolifera</i> Biochar to Improve Coastal Saline Soil .....	WU Dan, SUN Ping, LU Peng-zhan, <i>et al.</i> (1941)
Vertical Distribution of Soil Dissolved Carbon and Its Influencing Factors in the Artificial Shelterbelt Irrigated with Saline Water in an Extreme Drought Desert .....	MENG Tian-ge, WU Lu-yao, ZHANG Shao-lei, <i>et al.</i> (1950)
Response of Soil Enzyme Activity and Chemical Properties to Nitrogen Addition in a Korean Pine Plantation .....	LÜ Lai-xin, SONG Lei, LIU Zhi-li, <i>et al.</i> (1960)
Consumption Capacity of N <sub>2</sub> O in Paddy Soil and the Response Mechanism of <i>nosZ-I</i> -containing Communities .....	GUO Jun-li, TIAN Mei-jie, GE Ti-da, <i>et al.</i> (1968)
Predicting the Recycling Potential and Evaluating the Environmental Benefits of Waste Electrical and Electronic Equipment in Beijing-Tianjin-Hebei .....	CHEN Pan, SHI Xiao-qing (1976)
Relationship Between Urban Industrialization and PM <sub>2.5</sub> Concentration in China and the Internal Mechanism of EKC .....	LI Ya-nan, DING Zhen-min, DENG Yuan-jie, <i>et al.</i> (1987)