

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

基于碳减排目标与排放标准约束情景的火电大气污染物减排潜力

李辉, 孙雪丽, 庞博, 朱法华, 王圣, 晏培



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年12月

第42卷 第12期
Vol.42 No.12

目次(卷终)

基于碳减排目标与排放标准约束情景的火电大气污染物减排潜力	李辉, 孙雪丽, 庞博, 朱法华, 王圣, 晏培 (5563)
汽修行业挥发性有机物排放与控制现状及对策	王海林, 杨涛, 聂磊, 方莉, 张中申, 郝郑平 (5574)
西宁市生物质燃烧源大气污染物排放清单	高玉宗, 姬亚芹, 林孜, 林宇, 杨益 (5585)
新冠疫情期间四川盆地空气质量及影响因素分析	陈军辉, 冯小琼, 李媛, 王书肖 (5594)
基于 iLME + Geoi-RF 模型的四川省 PM _{2.5} 浓度估算	吴宇宏, 杜宁, 王莉, 蔡宏, 周彬, 吴磊, 敖迪 (5602)
《大气污染防治行动计划》后期成都大气 PM _{2.5} 中水溶性无机离子特征	李佳琪, 张军科, 董贵明, 邓嘉琳, 刘子锐, 王跃思 (5616)
洛阳市大气细颗粒物化学组分特征及溯源分析	孙佳侯, 董喆, 李利萍, 刘洋, 陈红阳, 张瑞芹 (5624)
北京市黑碳气溶胶浓度特征及其主要影响因素	曹阳, 安欣欣, 刘保献, 景宽, 王琴, 罗霄旭 (5633)
天津市郊夏季 VOCs 化学特征及其时间精细化的来源解析	王艺璇, 刘保双, 吴建会, 张裕芬, 冯银厂 (5644)
沈阳市挥发性有机物污染特征及反应活性	杜寒冰, 王男, 任万辉, 苏枞枞, 胡建林, 于兴娜 (5656)
典型化工集中区环境空气 SVOCs 污染特征及来源解析	葛祥, 吴健, 高松, 冯加良, 陈俊伟, 张舒惟, 焦正 (5663)
南京毒性挥发性有机化合物夏冬季源解析及健康风险评估	张子金, 林煜棋, 张煜烟, 曹梦瑶, 章炎麟 (5673)
基于排放清单和实地测试的工业 VOCs 排放特征: 以郑州市高新区为例	任何, 卢轩, 刘洋, 尹沙沙, 胡鹤霄 (5687)
我国水性建筑涂料 VOCs 排放特征及其环境影响	高美平, 王海林, 刘文文, 聂磊, 李国昊, 安小栓 (5698)
VOCs 源强不确定性对臭氧生成及污染防治影响的模拟分析	王峰, 汪健伟, 杨宁, 翟菁, 侯灿 (5713)
山东省 O ₃ 时空分布及影响因素分析	张森, 丁椿, 李彦, 王桂霞, 林晶晶, 孟赫, 许杨 (5723)
2020 年成都市典型臭氧污染过程特征及敏感性	钱骏, 徐晨曦, 陈军辉, 姜涛, 韩丽, 王成辉, 李英杰, 王波, 刘政 (5736)
基于高分辨率在线测量的轻型汽油车含氧挥发性有机物排放模型构建	郝钰琦, 袁自冰, 王梦雷, 沙青娥, 杜新悦, 刘元向, 刘学辉, 段乐君, 袁斌, 郑君瑜, 邵敏, 闫宇 (5747)
三重属性的承载力约束下中国水资源利用效率动态演进特征分析	张凯, 吴凤平, 成长春 (5757)
长江流域总氮排放量预测	丁肇慰, 郑华 (5768)
1980~2015 年长江流域净人为氮输入与河流氮输出动态特征	姚梦雅, 胡敏鹏, 陈丁江 (5777)
黄河水环境特征与氮磷负荷时空分布	韩谔, 潘保柱, 陈越, 刘亚平, 侯易明 (5786)
基于氮氧同位素解析不同降雨条件下硝酸盐污染源	邢子康, 余钟波, 衣鹏, 钱睿智, 王嘉毅 (5796)
水源水库真核微生物种群结构季相演替特征	张海涵, 黄鑫, 黄廷林, 刘凯文, 马曼丽, 刘祥, 苗雨甜, 宗容容 (5804)
达里湖表层水体浮游细菌群落结构的夏-冬季节差异	李文宝, 郭鑫, 张博尧, 杜蕾, 田雅楠 (5814)
尾水排放对受纳水体底栖生物膜细菌群落和水溶性有机质的影响机制	王钰涛, 范晨阳, 朱金鑫, 李轶, 王龙飞 (5826)
武汉典型饮用水水源中典型 POPs 污染特征与健康风险评估	张坤峰, 付青, 涂响, 昌盛, 樊月婷, 孙兴滨, 王山军 (5836)
上海沙田湖养殖区及周边水体中氟喹诺酮类抗性基因的分布特征及其与环境因子关系	徐慕, 李世豪, 马巾, 王丽卿, 张玮 (5848)
曝气人工湿地脱除低污染水中氮的影响因素	李琳琳, 李荣涛, 孔维静, 杨苹果, 杜志超, 毕斌, 卢少勇 (5857)
水平潜流人工湿地对畜禽养殖废水中特征污染物的去除	赵伟, 范增增, 杨新萍 (5865)
木屑生物炭对填料土的氮磷吸附及雨水滞留改良影响	孟依柯, 王媛, 汪传跃, 王报 (5876)
黑臭河道中聚乙烯醇/海藻酸钠固定微米沸石粉去除氨氮	魏超, 陈涛, 江桥, 王姝, 邱伟建, 成小英 (5884)
玉米秸秆生物炭对灰钙土吸附金霉素的影响	南志江, 蒋煜峰, 毛欢欢, 梁新茹, 邓雪儒 (5896)
饮用水砂滤池中微生物对微量污染物的降解潜力与途径	周洁, 王东麟, 林慧, 柏耀辉 (5905)
污水分析方法监测城市毒品滥用长期趋势	曹禹, 董小棠, 邵雪婷, 刘琳, 王德高 (5912)
阿奇霉素和铜对活性污泥古菌群落和 ARGs 的胁迫影响及后效应	高玉玺, 李星, 赵君如, 张忠兴, 樊晓燕 (5921)
典型冶炼行业场地土壤重金属空间分布特征及来源解析	李强, 曹莹, 何连生, 王耀峰, 龚成, 何书涵 (5930)
我国焦化场地多环芳烃和重金属分布情况及生态风险评价	王耀峰, 何连生, 姜登岭, 曹莹, 李强, 官健 (5938)
浙江省香榧主产区土壤重金属空间异质性及其生态风险	王敏, 董佳琦, 白龙龙, 张勇, 蒋仲龙, 姜雯雯, 吴家森, 张璐瑶, 方嘉, 傅伟军 (5949)
北方农田镉污染土壤玉米生产阈值及产区划分初探	管伟豆, 郭堤, 王萍, 张增强, 李荣华 (5958)
典型铅锌矿区耕地土壤团聚体重金属含量与农作物含量相关性及其风险评价	强瑞, 李英菊, 罗谦, 陈美凤, 李海燕, 黄先飞, 秦樊鑫 (5967)
雄安新区企业周边农田土壤-作物系统重金属污染风险及累积效应	周亚龙, 王乔林, 王成文, 刘飞, 宋云涛, 郭志娟, 杨志斌 (5977)
铜仁土壤-水稻重金属累积效应与安全种植区划	朱亮亮, 吴勇, 周浪, 唐乐斌, 宋波 (5988)
干湿交替对铈锰改性生物炭固定红壤 As 的影响	黄晓雅, 李莲芳, 朱昌雄, 黄金丽, 吴翠霞, 叶婧 (5997)
铵态氮肥和腐殖酸协同促进孔雀草对土壤中 Cd 的去除	王冰清, 阳琴, 李虹颖, 熊启中, 徐刚, 孙瑞波, 田达, 李军利, 郇建建, 叶新新 (6006)
稻田灌溉河流 CH ₄ 和 N ₂ O 排放特征及影响因素	吴双, 杨蔚桐, 盛扬悦, 方贤滔, 张天睿, 胡靖, 刘树伟, 邹建文 (6014)
节水灌溉和控释肥施用耦合措施对单季稻田 CH ₄ 和 N ₂ O 排放的影响	王永明, 徐永记, 纪洋, 冯彦房 (6025)
有机无机配施下西北旱区麦田土壤 N ₂ O 的排放特征及微生物特性	王楷, 史雷, 马龙, 王书婷, 张然, 郑伟, 李紫燕, 翟丙年 (6038)
不同秸秆还田方式对旱地红壤细菌群落、有机碳矿化及玉米产量的影响	孔培君, 郑洁, 栾璐, 陈紫云, 薛敬荣, 孙波, 蒋瑞霖 (6047)
氮磷添加对盐渍化草地土壤微生物特征的影响	杨建强, 刁华杰, 胡姝姝, 陈晓鹏, 王常慧 (6058)
化肥和有机肥配施生物炭对紫色土壤养分及磷赋存形态的影响	向书江, 余砾, 熊子怡, 罗东海, 王莹燕, 邓正昕, 王子芳, 高明 (6067)
浒苔生物炭与木醋液复配改良碱化土壤效果及提高油菜产量	王正, 孙兆军, Sameh El-Sawy, 王珍, 何俊, 韩磊, 邹本涛 (6078)
《环境科学》第42卷(2021年)总目录	(6091)
《环境科学》征订启事(5593) 《环境科学》征稿简则(5623) 信息(5643, 5835, 5883)	

《大气污染防治行动计划》后期成都大气 PM_{2.5} 中水溶性无机离子特征

李佳琪¹, 张军科^{1*}, 董贵明¹, 邓嘉琳¹, 刘子锐², 王跃思²

(1. 西南交通大学地球科学与环境工程学院, 成都 611756; 2. 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理与大气化学国家重点实验室, 北京 100029)

摘要: 为探究《大气污染防治行动计划》实施后期成都大气 PM_{2.5} 中水溶性无机离子 (WSIIs) 季节变化及来源等特征, 本研究于 2016~2017 年在成都城区进行了分季节 PM_{2.5} 样品的连续采集, 对其中 WSIIs 进行了全面分析. 结果表明, 成都市年均 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 和 $\rho(\text{WSIIs})$ 分别为 $(114.0 \pm 76.4) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $(41.2 \pm 31.3) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, $\rho(\text{WSIIs})$ 可占 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 的 36.1%, 其季节贡献特征为: 秋季 (39.5%) > 冬季 (38.2%) > 春季 (32.5%) > 夏季 (28.9%). 全年及各季节 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 和 $\rho(\text{WSIIs})$ 均值均表现为夜间高于白天, 且昼夜差异幅度呈现出了明显的季节变化特征. SNA (SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 NH_4^+) 是 WSIIs 的重要组成, 在春、夏、秋和冬这 4 季中可占到整体 $\rho(\text{WSIIs})$ 的 84.2%、86.6%、86.3% 和 87.0%. 秋和冬的 $\rho(\text{NO}_3^-)/\rho(\text{SO}_4^{2-})$ 比值分别为 1.1 和 1.6, 高于春和夏的 0.96 和 0.57, 移动源和固定源相对贡献随季节变化特征明显. 观测期间 WSIIs 主要来源包括二次生成、扬尘源和燃烧源. 后向轨迹分析表明, 来自成都东部地区的近地气团对应的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 低于源自西部的高空气团, 就 WSIIs 构成而言, 东部气团对应的 $\rho(\text{SO}_4^{2-})$ 占比高于西部气团, 而西部气团对应的 $\rho(\text{NO}_3^-)$ 占比则高于前者.

关键词: PM_{2.5}; 水溶性无机离子; 季节变化; 源解析; 成都

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)12-5616-08 DOI: 10.13227/j.hj.kx.202104281

Characterization of Water-soluble Inorganic Ions in Atmospheric PM_{2.5} in Chengdu During the Later Stage of the Air Pollution Prevention and Control Action Plan

LI Jia-qi¹, ZHANG Jun-ke^{1*}, DONG Gui-ming¹, DENG Jia-lin¹, LIU Zi-rui², WANG Yue-si²

(1. Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China; 2. State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: The purpose of this study was to investigate the seasonal variation and sources of water-soluble inorganic ions (WSIIs) in PM_{2.5} during the later stage of the Air Pollution Prevention and Control Action Plan in Chengdu. PM_{2.5} samples in different seasons were collected from 2016 to 2017 in the urban area of Chengdu, and the WSIIs in PM_{2.5} were analyzed. The results show that the annual average $\rho(\text{PM}_{2.5})$ and $\rho(\text{WSIIs})$ in Chengdu were $(114.0 \pm 76.4) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ and $(41.2 \pm 31.3) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, respectively. $\rho(\text{WSIIs})$ accounted for 36.1% of $\rho(\text{PM}_{2.5})$. The seasonal contributions of $\rho(\text{WSIIs})$ to $\rho(\text{PM}_{2.5})$ were: autumn (39.5%) > winter (38.2%) > spring (32.5%) > summer (28.9%). The average $\rho(\text{PM}_{2.5})$ and $\rho(\text{WSIIs})$ at night throughout the year and during each season were higher than those during the day, and the diurnal difference showed obvious seasonal variation. SNA (SO_4^{2-} , NO_3^- , and NH_4^+) were important components of WSIIs and accounted for 84.2%, 86.6%, 86.3%, and 87.0% of the total $\rho(\text{WSIIs})$ in spring, summer, autumn, and winter, respectively. The $\rho(\text{NO}_3^-)/\rho(\text{SO}_4^{2-})$ ratios in autumn and winter were 1.1 and 1.6, respectively, which were higher than the 0.96 and 0.57 ratios in spring and summer, respectively. This means that the contributions of mobile and stationary sources varied significantly with the seasons. The main sources of WSIIs during the observation period included secondary formation, dust, and combustion sources. The backward trajectory analysis shows that $\rho(\text{PM}_{2.5})$ of the near-surface air mass from the eastern areas of Chengdu were lower than that of the upper air mass from the western areas. In terms of WSII composition, the contribution of $\rho(\text{SO}_4^{2-})$ from the eastern air masses was higher than that from the western air masses, whereas the contribution of $\rho(\text{NO}_3^-)$ from the western air masses was higher than the former.

Key words: PM_{2.5}; water-soluble inorganic ions; seasonal variation; source apportionment; Chengdu

随着工业化和城市化快速发展, 大气污染成为我国亟须解决的环境问题之一. PM_{2.5} 不仅是引发大气污染的重要元凶, 还可对气候环境和人体健康产生诸多不利影响^[1]. 以往研究指出, 成都是我国重点污染城市之一, 其所处的盆地地形通常使得污染物难以快速稀释和扩散, 导致污染物大量积累, 同时受盆地高温高湿的气候影响, 该区域大气污染形成机制及来源也明显不同于我国华北及东部地区^[2-4]. 为实现我国空气质量的整体改善, 在 2013

年, 国务院颁布了《大气污染防治行动计划》(“大气十条”), 其对我国不同地区提出了针对性的污染减排措施和目标要求, 对近年来我国空气质量的持续改善起到了至关重要的作用.

收稿日期: 2021-04-26; 修订日期: 2021-05-31

基金项目: 四川省科技计划项目(2019YFS0476); 国家自然科学基金项目(41805095); 国家重点研发计划项目(2017YFC0210000)

作者简介: 李佳琪(1997~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大气细颗粒物理化特征, E-mail: jiaqi97315@163.com

* 通信作者, E-mail: zhangjunke@home.swjtu.edu.cn

水溶性无机离子(WSIIs)由阴(NO_3^- 、 SO_4^{2-} 和 Cl^- 等)、阳(NH_4^+ 、 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 等)离子构成,不仅是 PM_{2.5} 的重要组成,更是引发灰霾污染的关键组分. 黄含等^[5]对西安的研究发现,年均 $\rho(\text{WSIIs})$ 为 $25.4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 可占 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 的 40.3%; 李欢等^[6]对 2017~2018 年北京大气 PM_{2.5} 研究发现,其中年均 $\rho(\text{WSIIs})$ 为 $31.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 可占 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 的 41.1%,而在“重度污染”天,该占比可升至 47.3%; 王少博等^[7]对邢台市秋季 WSIIs 的研究发现,当空气质量从“优”到“严重污染”时,其在 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 中的占比大幅升高,从 45.6% 升高至 63.6%; 而在成都, Wu 等^[8]的研究发现,秋季 $\rho(\text{WSIIs})$ 为 $36.9 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 可占到 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 的 62.8%,该占比要明显高于以上对于我国西北及华北地区的研究结果. 可见,对 WSIIs 的减排是我国(尤其是成都)PM_{2.5} 减排和空气质量改善的关键. 2016~2017 年是“大气十条”目标达成及实施效果评估的关键阶段,为探究该时期成都大气 PM_{2.5} 中 WSIIs 污染特征,本文在成都城区进行了 PM_{2.5} 分季节连续观测研究,并对其中主要 WSIIs 的浓度水平、季节变化和来源等特征进行了全面分析,以上结果对于“大气十条”实施效果评估和下一阶段污染减排措施的制定具有重要指导意义.

1 材料与方法

1.1 采样时间及地点

于 2016~2017 年,在四川省区域环境空气质量综合监测重点实验室(104.06°E, 30.70°N)对成都城区大气 PM_{2.5} 进行了分季节样品采集. PM_{2.5} 样品采集使用 TH-150C(武汉天虹,中国),采样流量 $100 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$,采样膜为石英滤膜(Pall: $d=90 \text{ mm}$),各季节采样时段分别为 2016 年 10 月(秋季)、2017 年 1 月(冬季)、2017 年 4 月(春季)和 2017 年 7 月(夏季). 每天采集 2 个样品,采样时间分别为每天 08:30~20:00 和 20:30~次日 08:00,每个样品累计时长为 11.5 h. 在每季节采样开始及采样结束后均进行空白样品采集,其测定结果用于最终实验数据的空白扣除. 此外,收集该站点同步采集的气态前体物(CO 、 SO_2 、 NO_x 和 O_3)及气象要素(风速、风向、温度、湿度和能见度等)结果,详细信息见文献[9].

1.2 称重及样品分析

滤膜前处理:为去除杂质的影响,石英滤膜在采样前置于铝箔纸中于 500℃ 的马弗炉中预先灼烧 4 h,随后在恒温[(20±1)℃]、恒湿[(45±5)%]箱内平衡 48 h,待称量.

称重:使用精度为 0.1 mg 的天平(TB-215D,美国丹佛仪器公司)对滤膜进行称重. 采样完成后在同样恒温、恒湿环境中平衡后进行称重. 大气 PM_{2.5} 的质量浓度由采样膜采样前后质量差与采样体积之比(标况体积)计算得出.

WSIIs 测定:利用离子色谱(Dionex ICS-90 USA)对膜样品中典型阳离子(NH_4^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+})和阴离子(SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 Cl^-)的浓度进行测定,具体方法参见文献[6]. 其中,阳离子检测采用 Ion Pac CS12A 4×250 mm 分离柱, CSRS 300-4mm 抑制器,淋洗液为 $22 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的甲烷磺酸(MSA); 阴离子检测用 Ion Pac AS14A 4×250 mm 分离柱, ASRS300-4mm 抑制器,淋洗液为 $3.5 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 Na_2CO_3 和 $1.0 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 NaHCO_3 混合溶液. 本研究所有实验数据均扣除空白.

2 结果与讨论

2.1 PM_{2.5} 及整体 WSIIs 季节变化特征

在观测期间,成都市年均 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 为 $(114.0 \pm 76.4) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 该浓度水平明显高于同处于成渝城市群的重庆市的 $75.4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (2012~2013 年)^[10], 更高于京津冀的北京市(2017~2018 年, $64.8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)^[11] 和珠三角的广州市(2012~2013 年, $61.3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)^[12] 的观测结果,进一步凸显了成都市严重的 PM_{2.5} 污染特征. 就季节差异而言,从春季至冬季污染呈加重趋势(图 1),春、夏、秋和冬这 4 季平均 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 分别为 (73.8 ± 32.3) 、 (82.7 ± 26.3) 、 (104.6 ± 51.4) 和 $(193.3 \pm 98.5) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

年均 $\rho(\text{WSIIs})$ 为 $(41.2 \pm 31.3) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 该值明显高于我国西北地区的银川($23.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)^[13] 和同处西南地区的贵阳($18.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)^[14], 然而 $\rho(\text{WSIIs})$ 在 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 中的占比(36.1%)则介于 2 个城市之间(银川 24.1%, 贵阳 56.0%), 这一方面反映了成都大气中 $\rho(\text{WSIIs})$ 较高, 另一方面也体现了不同地区 PM_{2.5} 化学组成的差异性. 就 WSIIs 而言,各离子的相对年均占比依次为: NO_3^- (34.9%) > SO_4^{2-} (29.2%) > NH_4^+ (22.2%) > Cl^- (6.5%) > K^+ (3.6%) > Ca^{2+} (3.3%) > Mg^{2+} (0.3%). $\rho(\text{WSIIs})$ 季节特征与 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 季节变化特征接近, 最高值出现在冬季,达到 $(73.9 \pm 13.0) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 秋季次之,为 $(41.3 \pm 7.2) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 春季和夏季较为接近,分别为 $(24.0 \pm 4.1) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $(23.9 \pm 4.4) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (图 1), 分别占 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 的 38.2%、39.5%、32.5% 和 28.9%.

整个观测时段,平均 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 和 $\rho(\text{WSIIs})$ 均表

现为夜间 $[(121.1 \pm 81.2) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$ 和 $(43.3 \pm 31.9) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$ 高于白天 $[(107.0 \pm 70.8) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$ 和 $(39.2 \pm 30.5) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$. 同时,它们的昼夜差异也呈现出了明显的季节特征, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 的最大昼夜差

异出现在冬季,达到 $24.9 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,最小差异出现在秋季,仅为 $5.7 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$; $\rho(\text{WSIIs})$ 的最大昼夜差异出现在夏季,差值为 $6.6 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,而在秋季,昼夜浓度水平几乎一致,差值仅为 $0.1 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ (图1).

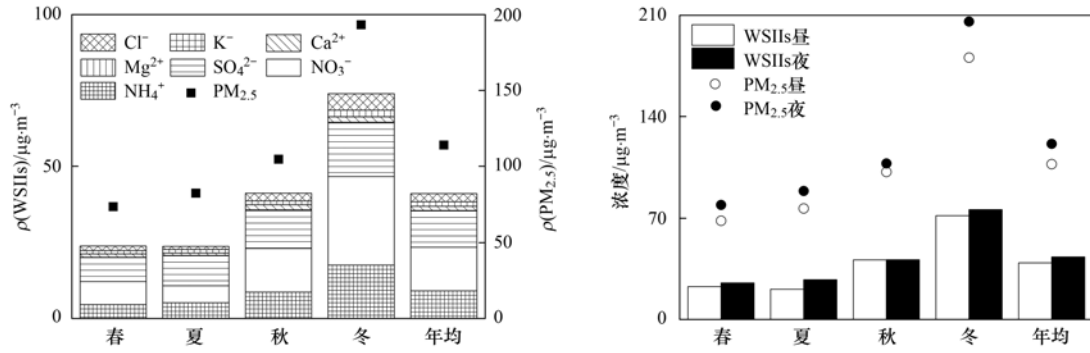


图1 成都市各季节及全年 $\rho(\text{WSIIs})$ 和 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 均值及昼夜差异

Fig. 1 Average concentrations and diurnal difference of $\rho(\text{PM}_{2.5})$ and $\rho(\text{WSIIs})$ in different seasons and throughout the year in Chengdu

2.2 各 WSIIs 季节变化特征

SNA(SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 NH_4^+) 是 WSIIs 的重要组成部分,年均浓度为 $(35.6 \pm 28.4) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,占整体 $\rho(\text{WSIIs})$ 的86.4%,该比值与我国华北地区观测结果接近,如天津(85.3%)和廊坊(86.0%)^[15]. 4个季节的 $\rho(\text{SNA})$ 在 $\rho(\text{WSIIs})$ 的占比均在80%以上,分别为84.2%(春)、86.6%(夏)、86.3%(秋)和87.0%(冬). 与4季接近的占比不同,各季节 $\rho(\text{SNA})$ 差异明显,浓度最高的冬季 $[(64.3 \pm 34.8) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$ 可达浓度较低的春季 $[(20.2 \pm 11.4) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$ 和夏季 $[(20.7 \pm 11.1) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$ 的3倍以上.

NO_3^- 主要通过 NO_2 与 $\cdot\text{OH}$ 的均相气相氧化反应(白天)以及 N_2O_5 在潮湿表面的非均相水解反应(夜间)生成^[1]. $\text{PM}_{2.5}$ 中的 NO_3^- 主要以 NH_4NO_3 形式存在,其稳定性较弱,在高温环境中会发生逆向反应分解为气态 HNO_3 及 NH_3 . 因此,受冬季较低温度的影响, $\rho(\text{NO}_3^-)$ 在该季节达到最高,为 $(29.0 \pm 17.0) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,分别占 $\rho(\text{SNA})$ 和 $\rho(\text{WSIIs})$ 的45.1%和39.2%,是该季节贡献最高的离子组分;而夏季的高温使得 $\rho(\text{NO}_3^-)$ 降至最低,仅为 $(5.6 \pm 4.5) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,分别占 $\rho(\text{SNA})$ 和 $\rho(\text{WSIIs})$ 的27.0%和23.4%.

SO_4^{2-} 主要形成机制包括:①光化学过程,即大气中 SO_2 与 $\cdot\text{OH}$ 反应随后生成硫酸,最后进一步形成硫酸盐;②液相过程,在云雾、水雾和气溶胶的水相中, SO_2 通过非均相反应被氧化成硫酸盐^[1]. $\rho(\text{SO}_4^{2-})$ 从春季至冬季整体呈升高趋势,冬季 $[(17.7 \pm 7.7) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$ 约为春季 $[(7.9 \pm 3.7) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$ 的2.3倍. 与浓度季节变化不同, $\rho(\text{SO}_4^{2-})$

在 $\rho(\text{WSIIs})$ 中占比的最高值出现在夏季,最低值出现在冬季,变化趋势为:夏季(41.4%)>春季(32.9%)>秋季(30.2%)>冬季(24.0%),这主要是因为夏季高温高湿有利于 SO_4^{2-} 通过以上2种途径的大量生成.

$\rho(\text{NO}_3^-)/\rho(\text{SO}_4^{2-})$ 常被用作判断移动源和固定源对大气污染的相对贡献强度,当比值大于1时,表明移动源贡献大于固定源;反之,当比值小于1时,表明固定源贡献强于移动源^[16]. 本研究中, $\rho(\text{NO}_3^-)/\rho(\text{SO}_4^{2-})$ 的年均比值为1.2,该值高于我国部分城市的观测结果,如太原(1.06)^[17]和沈阳(0.52)^[18],凸显了移动源对成都市空气质量的重要影响. 同时,该比值高于早期对成都市的研究结果,如蒋燕^[19]对成都2013~2014年的研究发现, $\rho(\text{NO}_3^-)/\rho(\text{SO}_4^{2-})$ 的年均比值0.74,这进一步凸显了移动源在成都大气污染中愈加重要的作用. 据统计,至2019年底,成都市机动车保有量达到519.5万辆,仅次于北京市,位居全国第二(<http://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/ydyhjl>). 这意味着未来对移动源的管控是该地区大气污染控制的重要方向之一. 就季节变化而言,春季和夏季的 $\rho(\text{NO}_3^-)/\rho(\text{SO}_4^{2-})$ 比值低于1,分别为0.96和0.57,而在秋季和冬季的比值则高于1,分别为1.1和1.6,该比值的季节变化体现了移动源和固定源在不同季节污染中所扮演的作用差异.

NH_4^+ 作为 $\text{PM}_{2.5}$ 中含量最高的阳离子其浓度最高值出现在冬季,达到 $(17.6 \pm 10.3) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,最低值出现在春季,仅为 $(4.6 \pm 3.2) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$. 由于 NH_4^+ 通常是与各类阴离子结合共存,因此,其季节变化特征也是各类阴离子共同影响的结果. 在观测期无沙

尘天气出现,因此,2 种土壤尘离子 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 可能主要来源自成都当地的道路扬尘及施工活动^[20],这些源排放强度通常不存在明显的季节变化,其浓度水平可能主要受清除过程所决定,相应地,其浓度在降水强度和频率最高的夏季降至最低 [Mg^{2+} : $(0.06 \pm 0.03) \mu g \cdot m^{-3}$, Ca^{2+} : $(0.83 \pm 0.29) \mu g \cdot m^{-3}$]. Cl^{-} 和 K^{+} 通常被分别作为燃煤和生物质燃烧的重要示踪物^[21],在本研究中,2 种离子的最高值均出现在冬季,分别为 $(2.2 \pm 1.2) \mu g \cdot m^{-3}$ 和 $(5.4 \pm 3.1) \mu g \cdot m^{-3}$,达到各自浓度最低水平的 5.2 倍和 2.0 倍,这主要与冬季不利于污染扩散的气象条件及加强的燃烧过程有关.值得注意的是,本研究燃烧源离子,尤其是源自燃煤的 Cl^{-} ,在冬季的升高幅度和浓度水平均远低于北方城市,如杨留明等^[22]的研究发现郑州冬季 $\rho(Cl^{-})$ 是夏季的 17.3 倍,这与北方城市冬季的燃煤供暖贡献直接相关.

2.3 离子平衡、相关性及 SNA 存在形式

通过阴阳离子平衡分析一方面可以验证实验数据的可靠性,另一方面可对大气颗粒物的酸碱度进行评估.参考以往研究^[23],本研究采用阴、阳离子电荷当量,即 AE (anion equivalent) 和 CE (cation equivalent) 的比值对 PM_{2.5} 的酸碱性进行计算,其中 AE 和 CE 的计算公式分别为:

$$AE = [NO_3^-]/62 + [SO_4^{2-}]/48 + [Cl^-]/35.5$$

$$CE = [Mg^{2+}]/12 + [Ca^{2+}]/20 + [NH_4^+]/18 + [K^+]/39$$

通过计算得知,整个观测期间 AE/CE 值为 0.89 ($R^2 = 0.99$),春、夏、秋和冬这 4 季 AE/CE 的值分别为 0.96 ($R^2 = 0.96$)、0.88 ($R^2 = 0.99$)、0.91 ($R^2 = 0.98$) 和 0.87 ($R^2 = 0.99$).可见,在本研究期间,成都市 PM_{2.5} 中阴离子被阳离子完全中和,阳离子略有剩余,大气颗粒物表现为碱性.这与我国其他城市,如银川市^[13] (AE/CE = 0.71) 和珠海市^[24] (AE/CE = 0.82) 的报道结果类似,又不同于盘锦市^[25] (AE/CE = 1.26) 的研究结果,体现了不同城市不同时期大气颗粒物酸碱性的动态变化特征.

各离子之间的相关性不仅反映了它们的结合方式,还对其来源的相似性具有一定的指示作用.本研究各离子之间的相关分析结果如表 1 所示.可以看出, NH_4^+ 、 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 三者之间均存在较强的相关性,这 3 种离子可能主要以 $(NH_4)_2SO_4$ 、 NH_4HSO_4 和 NH_4NO_3 等形式存在,属于典型的二次反应产物.2 种燃烧源典型示踪物 K^{+} 和 Cl^{-} 也呈现出了较强相关性 ($r = 0.846$),体现出二者相似的来源. Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 是典型的扬尘源示踪离子,两者同样呈现出非常强的相关性,相关系数 r 达到 0.803.

表 1 PM_{2.5} 中各 WSIs 的相关系数矩阵¹⁾

Table 1 Correlation coefficient matrix of WSIs in PM_{2.5}

	NH_4^+	NO_3^-	SO_4^{2-}	Mg^{2+}	Ca^{2+}	K^{+}	Cl^{-}
NH_4^+	1						
NO_3^-	0.967 **	1					
SO_4^{2-}	0.939 **	0.847 **	1				
Mg^{2+}	0.211 *	0.267 **	0.207 *	1			
Ca^{2+}	0.058	0.148	0.062	0.803 **	1		
K^{+}	0.676 **	0.627 **	0.665 **	0.243 **	0.095	1	
Cl^{-}	0.814 **	0.781 **	0.735 **	0.320 **	0.173	0.846 **	1

1) * 表示相关性在 0.05 水平显著 (双侧), ** 表示相关性在 0.01 水平显著 (双侧)

如前所述, SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 NH_4^+ 是 WSIs 的主要成分,可占整体 ρ (WSIs) 的 80% 以上.这 3 种离子是由气态前体物,如 SO_2 、 NO_x 和 NH_3 在大气中经过均相或非均相反应形成的二次污染物^[26].以往研究指出,硫氧化率 [$SOR = [SO_4^{2-}]/([SO_4^{2-}] + [SO_2])$] 和氮氧化率 [$NOR = [NO_3^-]/([NO_3^-] + [NO_2])$] 可分别表示 SO_2 和 NO_2 向二次离子 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 的转化程度, SOR 和 NOR 的数值越大,表明二次转化程度越高^[27]. Ohta 等^[28] 的研究发现,当 SOR 大于 0.25 以及 NOR 大于 0.10 时,大气中存在较高的 SO_2 和 NO_2 的二次转化.本研究中, SOR 和 NOR 的年均值分别为 0.43 和 0.25.从季节差异来

看, SOR 在秋 (0.54)、冬 (0.50) 季高于春 (0.32)、夏 (0.26) 季,说明秋冬季 SO_2 向 SO_4^{2-} 的转化程度高于其他 2 个季节;而 NOR 在秋季 (0.41) 最高,春 (0.21)、冬 (0.22) 季接近,夏季最低 (0.15).

在 PM_{2.5} 中, NH_4^+ 是最为重要的碱性离子,也是与各类酸性离子结合的最主要物种.在这种结合过程中, NH_4^+ 首先与 SO_4^{2-} 结合生成 $(NH_4)_2SO_4$ 或 NH_4HSO_4 , 然后剩余 NH_4^+ 将依次结合 NO_3^- 及 Cl^{-} , 形成 NH_4NO_3 或 NH_4Cl .研究证实,当 NH_4^+ 和 SO_4^{2-} 物质的量浓度比值大于 2 时, SO_4^{2-} 与 NH_4^+ 全部转化为 $(NH_4)_2SO_4$, 而非 NH_4HSO_4 .在本研究中, 4 个季节的 NH_4^+ 和 SO_4^{2-} 量浓度比值均大于 2, 分别为

3.1(春季)、2.8(夏季)、3.7(秋季)和5.3(冬季),说明在各季节大气中的 SO_4^{2-} 均全部与 NH_4^+ 结合生成了 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$,且 NH_4^+ 还有剩余.为了进一步探究SNA的存在形式,绘制了 $[\text{NH}_4^+]$ 与 $2[\text{SO}_4^{2-}] + [\text{NO}_3^-]$ 以及 $[\text{NH}_4^+]$ 与 $2[\text{SO}_4^{2-}] + [\text{NO}_3^-] + [\text{Cl}^-]$ 的量浓度散点图(图2),可以看出,4个季节 $[\text{NH}_4^+]$ 与 $2[\text{SO}_4^{2-}] + [\text{NO}_3^-]$ 存在很强的相关性

(R^2 均大于0.96),且斜率大于1,说明 NH_4^+ 与 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 结合之后依然有剩余.通过 $[\text{NH}_4^+]$ 与 $2[\text{SO}_4^{2-}] + [\text{NO}_3^-] + [\text{Cl}^-]$ 的量浓度散点图的分析,进一步发现,春夏季斜率接近1,而秋冬季部分点依然落在1:1线以上,所以4季中 NH_4^+ 主要以 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 、 NH_4NO_3 和 NH_4Cl 的形式存在,而在秋冬季可能还会与其他阴离子结合存在.

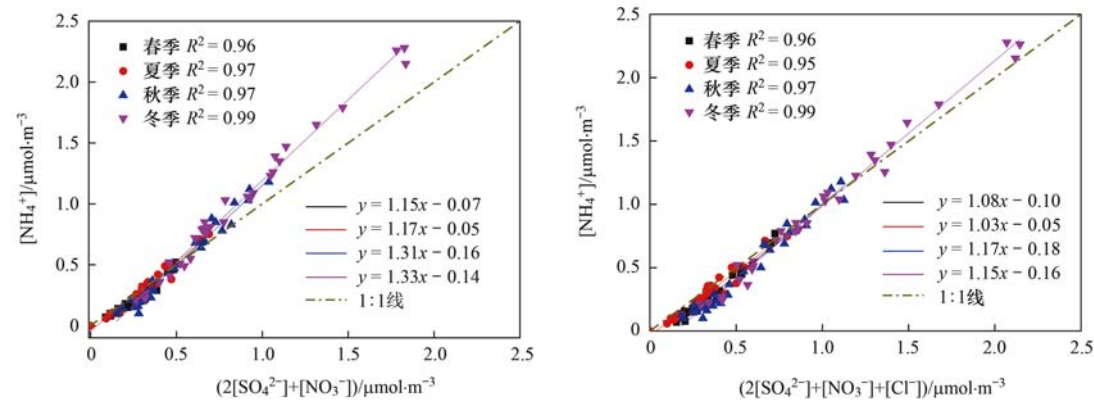


图2 成都市不同季节 $[\text{NH}_4^+]$ 与 $(2[\text{SO}_4^{2-}] + [\text{NO}_3^-])$ 和 $(2[\text{SO}_4^{2-}] + [\text{NO}_3^-] + [\text{Cl}^-])$ 的散点图

Fig. 2 Scatter plots of $[\text{NH}_4^+]$ vs. $(2[\text{SO}_4^{2-}] + [\text{NO}_3^-])$ and $[\text{NH}_4^+]$ vs. $(2[\text{SO}_4^{2-}] + [\text{NO}_3^-] + [\text{Cl}^-])$ in different seasons in Chengdu

2.4 来源分析

2.4.1 主成分分析

对2016~2017年成都市WSIIs进行主成分分析,结果如表2所示.前3个因子累计解释方差93.3%.因子1中荷载较大的是 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 NH_4^+ ,方差解释比例为61.5%,这3种离子组分主要是其气态前体物(SO_2 、 NO_x 和 NH_3)经过均相或非均相反应二次生成,因此因子1可以认为是二次生成.因子2中荷载较大的是 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} ,方差解释比例为24.2%,这2种离子通常来源于道路扬尘和土壤尘,因此该因子代表的是扬尘源.因子3的方差解释比例是三因子中最小的,为7.6%,荷载较大的是 K^+ 和 Cl^- ,它们的主要来源是生物质和燃煤燃烧,因此代表燃烧源.首先, SO_2 、 NO_x 和 NH_3 是二次生成因子的重要前体物,当前,成都市 SO_2 减排效果明显,其浓度水平已经远低于国家标准^[29],而 NO_x 和 NH_3 则处于较高水平,已有研究指出,机动车是城市大气中 NO_x 的最主要来源^[30],对 NH_3 也有一定的贡献^[31];其次,城市中机动车的高强度活动是引起道路扬尘的重要原因,也是城市扬尘的重要贡献者,同时,市区内的施工活动(如地铁施工)是城市扬尘的另一贡献者;再次,成都市燃烧源主要源自周边农村地区的生物质燃烧活动以及各类工业的燃煤.可见,要实现WSIIs的整体减排,不仅需要兼顾成都市区的机动车和各类施工排放,还要对周边农村地区和工业区域的燃烧源排放加强管理.

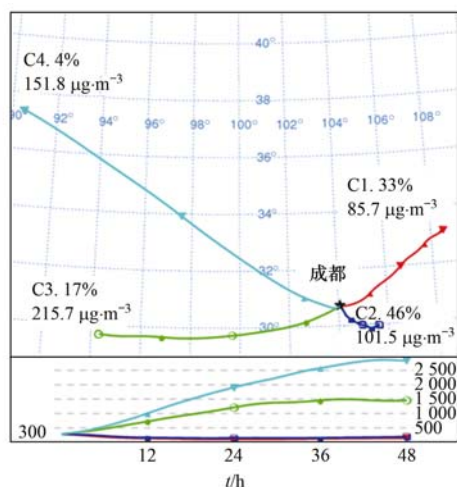
表2 成都市全年WSIIs主成分分析

Table 2 Principal component analysis of WSIIs in Chengdu throughout the year

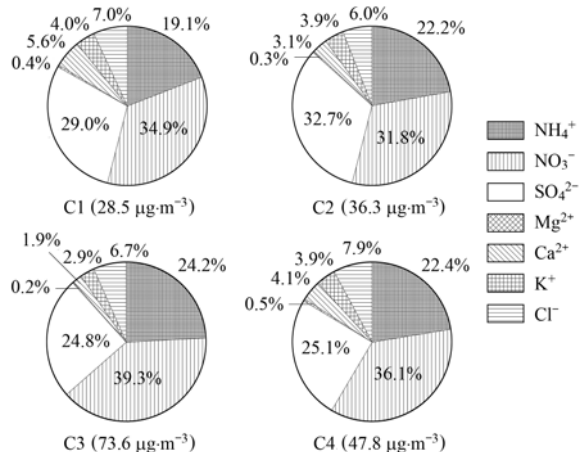
离子组分	因子1	因子2	因子3
NH_4^+	0.937	0.044	0.341
NO_3^-	0.917	0.130	0.287
SO_4^{2-}	0.893	0.042	0.323
Mg^{2+}	0.130	0.932	0.139
Ca^{2+}	0.015	0.955	0.013
K^+	0.394	0.07	0.895
Cl^-	0.591	0.162	0.736
总计	4.307	1.692	0.535
解释方差/%	61.521	24.178	7.639
累计方差/%	61.521	85.699	93.338
来源	二次生成	扬尘源	燃烧源

2.4.2 远距离传输

利用HYSPLIT模型对研究时段到达观测站点的气团后向轨迹进行聚类分析,结果如图3所示.可以看出,所有气团可聚为4类,即C1、C2、C3和C4.其中,C1和C2来源于成都的东北和东南方向,两者所对应的气团占比之和达到79%,而对应的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 却明显低于其他2个聚类,分别为 $85.7\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $101.5\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.同时,C1和C2传输高度较低,属于典型的近地面传输气团.C3和C4分别来自成都市西北和西南方向区域,其中C3气团占比为17%,对应的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 为4个聚类中最高,达到 $215.7\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,而C4占比虽然仅为4%,但对应的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 依然高达 $151.8\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

图3 后向轨迹聚类结果及对应的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ Fig. 3 Backward trajectory clustering results and the corresponding $\rho(\text{PM}_{2.5})$

除了 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 存在差异,各聚类对应的 $\rho(\text{WSIIs})$ 及构成也存在明显不同.首先, $\rho(\text{WSIIs})$ 顺序为:C1($28.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)<C2($36.3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)<C4($47.8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)<C3($73.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$),可见,2个西部气团聚类对应的 $\rho(\text{WSIIs})$ 高于2个东部气团聚类.其次,就WSIIs构成而言,2个东部聚类中, $\rho(\text{SO}_4^{2-})$ 在 $\rho(\text{WSIIs})$ 中的占比略高于西部聚类,分别为29.0%~32.7%和24.8%~25.1%,而2个西部聚类中 $\rho(\text{NO}_3^-)$ 在 $\rho(\text{WSIIs})$ 中的占比则高于东部聚类,分别为36.1%~39.3%和31.8%~34.9%(图4).通过计算 $\rho(\text{NO}_3^-)/\rho(\text{SO}_4^{2-})$ 可知,2个西部聚类对应的比值(C3:1.6, C4:1.4)高于东部聚类(C1:1.2, C2:0.9),这可能是因为,西部气团在到达成都的12~48 h期间属于典型高空传输(高度为500~1000 m),在此过程中携带的污染物非常有限,而在到达成都前的0~12 h内,气团高度快速降低,由图3可以看出,在此过程中,气团已经到达成

图4 各聚类 $\rho(\text{WSIIs})$ 及其构成Fig. 4 The $\rho(\text{WSIIs})$ and its composition per cluster

都周边及市区,因此,其携带的污染物主要为成都本地排放,故受当地移动源贡献显著.另一方面,2个东部聚类气团为典型的低空传输,传输高度始终低于300 m,因此,其包含的气团会携带成都附近及周边区域各类固定源(如周边工业)排放的污染物,最终导致整体 $\rho(\text{NO}_3^-)/\rho(\text{SO}_4^{2-})$ 较低.

3 结论

(1) 2016~2017成都市大气PM_{2.5}中平均 $\rho(\text{WSIIs})$ 为 $(41.2 \pm 31.3) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,可占整体 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 的36.1%,其贡献季节变化表现为:秋季(39.5%)>冬季(38.2%)>春季(32.5%)>夏季(28.9%).全年及各季节 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 和 $\rho(\text{WSIIs})$ 均值均表现为夜间高于白天,且该昼夜差异幅度随季节各异.

(2) SNA是WSIIs的主导成分,可占 $\rho(\text{WSIIs})$ 的86.4%,4季贡献变化范围为:84.0%~87.0%;受排放源和气象条件的影响,各离子组分季节特征明显,其中 $\rho(\text{NO}_3^-)$ 和 $\rho(\text{SO}_4^{2-})$ 的最高值均出现在冬季,而最低值却分别出现在夏季和春季.

(3) 各季节阴阳离子显著相关($R^2 > 0.96$),PM_{2.5}整体呈碱性;各类具有相似形成机制或来源的离子均呈现出较强的相关性,其中 NH_4^+ 的存在形式包括 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 、 NH_4NO_3 及 NH_4Cl 等.

(4) 成都大气PM_{2.5}中WSIIs的主要来源包括二次生成、扬尘源及燃烧源,对WSIIs的减排需要兼顾市区的机动车和施工及周边区域的燃烧源排放.来自成都东部地区近地气团对应的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 低于来自成都西部地区的高空气团,在WSIIs中,东部气团对应的 $\rho(\text{SO}_4^{2-})$ 占比高于西部气团,而西部气团对应的 $\rho(\text{NO}_3^-)$ 占比则更高.

参考文献:

- [1] Zhang R Y, Wang G H, Guo S, *et al.* Formation of urban fine particulate matter [J]. Chemical Reviews, 2015, **115** (10): 3803-3855.
- [2] Tao J, Gao J, Zhang L, *et al.* PM_{2.5} pollution in a megacity of southwest China: source apportionment and implication [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2014, **14** (16): 8679-8699.
- [3] Wang H B, Tian M, Chen Y, *et al.* Seasonal characteristics, formation mechanisms and source origins of PM_{2.5} in two megacities in Sichuan Basin, China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2018, **18** (2): 865-881.
- [4] Liu Y S, Tang G Q, Huang X J, *et al.* Unexpected deep mixing layer in the Sichuan Basin, China [J]. Atmospheric Research, 2021, **249**, doi: 10.1016/j.atmosres.2020.105300.
- [5] 黄含含, 王羽琴, 李升革, 等. 西安市PM_{2.5}中水溶性离子的季节变化特征[J]. 环境科学, 2020, **41** (6): 2528-2535.

Huang H H, Wang Y Q, Li S P, *et al.* Seasonal variation of water-soluble ions in PM_{2.5} in Xi'an [J]. Environmental Science,

- 2020, **41**(6): 2528-2535.
- [6] 李欢, 唐贵谦, 张军科, 等. 2017~2018年北京大气PM_{2.5}中水溶性无机离子特征[J]. 环境科学, 2020, **41**(10): 4364-4373.
- Li H, Tang G Q, Zhang J K, *et al.* Characteristics of water-soluble inorganic ions in PM_{2.5} in Beijing during 2017-2018[J]. Environmental Science, 2020, **41**(10): 4364-4373.
- [7] 王少博, 王涵, 张敬巧, 等. 邢台市秋季PM_{2.5}及水溶性离子污染特征[J]. 中国环境科学, 2020, **40**(5): 1877-1884.
- Wang S B, Wang H, Zhang J Q, *et al.* Characterization analysis of PM_{2.5} and water-soluble ions during autumn in Xingtai city[J]. China Environmental Science, 2020, **40**(5): 1877-1884.
- [8] Wu P, Huang X J, Zhang J K, *et al.* Characteristics and formation mechanisms of autumn haze pollution in Chengdu based on high time-resolved water-soluble ion analysis[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, **26**(3): 2649-2661.
- [9] 冯炎鹏, 张军科, 黄小娟, 等. 成都夏冬季PM_{2.5}中水溶性无机离子污染特征[J]. 环境科学, 2020, **41**(7): 3012-3020.
- Feng Y P, Zhang J K, Huang X J, *et al.* Pollution characteristics of water-soluble inorganic ions in Chengdu in summer and winter[J]. Environmental Science, 2020, **41**(7): 3012-3020.
- [10] Chen Y, Xie S D, Luo B, *et al.* Particulate pollution in urban Chongqing of southwest China: Historical trends of variation, chemical characteristics and source apportionment[J]. Science of the Total Environment, 2017, **584-585**: 523-534.
- [11] Huang X J, Tang G Q, Zhang J K, *et al.* Characteristics of PM_{2.5} pollution in Beijing after the improvement of air quality[J]. Journal of Environmental Sciences, 2021, **100**: 1-10.
- [12] 刘叶新, 陈伟华, 王雪梅, 等. 广州PM_{2.5}化学组分特征及其与气象因子的关系[J]. 环境科学学报, 2019, **39**(1): 53-63.
- Liu Y X, Chen W H, Wang X M, *et al.* Chemical composition of PM_{2.5} and its relations with meteorological factors in Guangzhou[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, **39**(1): 53-63.
- [13] 李慧, 王淑兰, 张敬巧, 等. 银川市PM_{2.5}中水溶性离子污染特征与来源分析[J]. 环境工程技术学报, 2021, **11**(4): 624-630.
- Li H, Wang S L, Zhang J Q, *et al.* Characterization and source analysis of water-soluble ions in PM_{2.5} of Yinchuan City[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2021, **11**(4): 624-630.
- [14] Tian J, Guan H, Zhou Y H, *et al.* Isotopic source analysis of nitrogen-containing aerosol: a study of PM_{2.5} in Guiyang (SW, China)[J]. Science of the Total Environment, 2021, **760**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.143935.
- [15] 赵普生, 张小玲, 孟伟, 等. 京津冀区域气溶胶中无机水溶性离子污染特征分析[J]. 环境科学, 2011, **32**(6): 1546-1549.
- Zhao P S, Zhang X L, Meng W, *et al.* Characteristics of inorganic water-soluble ions from aerosols in Beijing-Tianjin-Hebei area[J]. Environmental Science, 2011, **32**(6): 1546-1549.
- [16] Lai S C, Zou S C, Cao J J, *et al.* Characterizing ionic species in PM_{2.5} and PM₁₀ in four Pearl River Delta cities, South China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2007, **19**(8): 939-947.
- [17] 任娇, 尹诗杰, 郭淑芬. 太原市大气PM_{2.5}中水溶性离子的季节污染特征及来源分析[J]. 环境科学学报, 2020, **40**(9): 3120-3130.
- Ren J, Yin S J, Guo S F. Seasonal variation and source analysis of water-soluble ions in PM_{2.5} in Taiyuan[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, **40**(9): 3120-3130.
- [18] 田莎莎, 张显, 卞思思, 等. 沈阳市PM_{2.5}污染组分特征及其来源解析[J]. 中国环境科学, 2019, **39**(2): 487-496.
- Tian S S, Zhang X, Bian S S, *et al.* Characteristics of PM_{2.5} pollution components and their sources in Shenyang[J]. China Environmental Science, 2019, **39**(2): 487-496.
- [19] 蒋燕, 贺光艳, 罗彬, 等. 成都平原大气颗粒物中无机水溶性离子污染特征[J]. 环境科学, 2016, **37**(8): 2863-2870.
- Jiang Y, He G Y, Luo B, *et al.* Pollution characteristics of inorganic water-soluble ions in atmospheric particulate matter in Chengdu plain[J]. Environmental Science, 2016, **37**(8): 2863-2870.
- [20] 程渊, 刘保双, 吴建会, 等. 菏泽市夏季PM₁₀和PM_{2.5}中水溶性离子组分污染特征[J]. 环境化学, 2019, **38**(4): 729-737.
- Cheng Y, Liu B S, Wu J H, *et al.* Pollution characteristics of water-soluble ions in ambient PM₁₀ and PM_{2.5} during summer of 2015 in Heze City[J]. Environmental Chemistry, 2019, **38**(4): 729-737.
- [21] Zhang J K, Cheng M T, Ji D S, *et al.* Characterization of submicron particles during biomass burning and coal combustion periods in Beijing, China[J]. Science of the Total Environment, 2016, **562**: 812-821.
- [22] 杨留明, 王申博, 郝祺, 等. 郑州市PM_{2.5}中水溶性离子特征及来源分析[J]. 环境科学, 2019, **40**(7): 2977-2984.
- Yang L M, Wang S B, Hao Q, *et al.* Characteristics and source analysis of water-soluble ions in PM_{2.5} in Zhengzhou[J]. Environmental Science, 2019, **40**(7): 2977-2984.
- [23] Xu L L, Chen X Q, Chen J S, *et al.* Seasonal variations and chemical compositions of PM_{2.5} aerosol in the urban area of Fuzhou, China[J]. Atmospheric Research, 2012, **104-105**: 264-272.
- [24] 俞娟, 李明, 康辉, 等. 沿海城市珠海PM_{2.5}中水溶性离子特征及来源分析[J]. 地球环境学报, 2020, **11**(2): 151-160.
- Yu J, Li M, Kang H, *et al.* Characteristics and sources of water-soluble ions in PM_{2.5} in the coastal city of Zhuhai, China[J]. Journal of Earth Environment, 2020, **11**(2): 151-160.
- [25] 马妍, 姬亚芹, 国纪良, 等. 盘锦市秋季PM_{2.5}水溶性离子特征及来源分析[J]. 环境科学学报, 2020, **40**(2): 401-407.
- Ma Y, Ji Y Q, Guo J L, *et al.* Characteristics and source analysis of water-soluble ions in PM_{2.5} during autumn in Panjin[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, **40**(2): 401-407.
- [26] 杨懂艳, 刘保献, 张大伟, 等. 2012~2013年间北京市PM_{2.5}中水溶性离子时空分布规律及相关性分析[J]. 环境科学, 2015, **36**(3): 768-773.
- Yang D Y, Liu B X, Zhang D W, *et al.* Correlation, seasonal and temporal variation of water-soluble ions of PM_{2.5} in Beijing during 2012-2013[J]. Environmental Science, 2015, **36**(3): 768-773.
- [27] Huang X J, Liu Z R, Zhang J K, *et al.* Seasonal variation and secondary formation of size-segregated aerosol water-soluble inorganic ions during pollution episodes in Beijing[J]. Atmospheric Research, 2016, **168**: 70-79.
- [28] Ohta S, Okita T. A chemical characterization of atmospheric aerosol in Sapporo[J]. Atmospheric Environment. Part A. General Topics, 1990, **24**(4): 815-822.
- [29] 刘琴, 张军科, 黄小娟, 等. 成都春季气溶胶理化性质及不同时段污染特征[J]. 中国环境科学, 2019, **39**(12): 5009-5017.

- Liu Q, Zhang J K, Huang X J, *et al.* The physicochemical properties of aerosol and its pollution characteristics in different periods in spring in Chengdu[J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(12): 5009-5017.
- [30] 张娟, 王伟, 赵颖. 北京市延庆区 PM_{2.5} 中主要水溶性无机离子特征及来源解析[J]. *环境工程技术学报*, 2020, **10**(2): 173-182.
- Zhang J, Wang W, Zhao Y. Characteristics and source analysis of water-soluble inorganic ions in PM_{2.5} in Yanqing District, Beijing[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2020, **10**(2): 173-182.
- [31] 郑婷婷, 王国栋, 顾绍晶, 等. 汽车尾气净化三效催化剂中 N₂O 和 NH₃ 的生成及控制研究进展[J]. *化工进展*, 2020, **39**(6): 2399-2410.
- Zheng T T, Wang G D, Gu S J, *et al.* Research progress on the formation and control of N₂O and NH₃ in automotive three-way catalyst[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2020, **39**(6): 2399-2410.

《环境科学》征稿简则

1. 来稿报道成果要有创新性,论点明确,文字精炼,数据可靠.全文不超过8 000字(含图、表、中英文摘要及参考文献).国家自然科学基金项目、国家科技攻关项目、国际合作项目或其它项目请在来稿中注明(在首页以脚注表示).作者投稿时请先登陆我刊网站(www.hjkx.ac.cn)进行注册,注册完毕后以作者身份登录,按照页面给出的提示信息投稿即可.

2. 稿件请按 GB 7713-87《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》中学术论文的规范撰写.论文各部分的排列顺序为:题目;作者姓名;作者工作单位、地址、邮政编码;中文摘要;关键词;中图分类号;英文题目;作者姓名及单位的英译名;英文摘要;关键词;正文;致谢;参考文献.

3. 论文题目应简练并准确反映论文内容,一般不超过 20 字,少用副标题.

4. 中文摘要不少于 300 字,以第三人称写.摘要内容包括研究工作的目的、方法、结果(包括主要数据)和结论.重点是结果和结论.英文摘要与中文对应,注意人称、时态和语言习惯,以便准确表达内容.

5. 前言包括国内外前人相关工作(引文即可)和本工作的目的、特点和意义等.科普知识不必赘述.

6. 文中图表应力求精简,同一内容不得用图表重复表达,要有中英文对照题目.图应大小一致,曲线粗于图框,图中所有字母、文字字号大小要统一.表用三线表.图表中术语、符号、单位等应与正文一致.

7. 计量单位使用《中华人民共和国法定计量单位》(SI).论文中物理计量单位用字母符号表示,如 mg(毫克),m(米),h(小时)等.科技名词术语用国内通用写法,作者译的新名词术语,文中第一次出现时需注明原文.

8. 文中各级标题采用 1, 1.1, 1.1.1 的形式,左起顶格书写,3 级以下标题可用(1), (2)……表示,后缩 2 格书写.

9. 文中外文字母、符号应标明其大小写,正斜体.生物的拉丁学名为斜体.缩略语首次出现时应给出中文全称,括号内给出英文全称和缩略语.

10. 未公开发表资料不列入参考文献,可在出现页以脚注表示.文献按文中出现的先后次序编排.常见文献书写格式为:

期刊:作者(外文也要姓列名前).论文名[J].期刊名,年,卷(期):起页-止页.

图书:作者.书名[M].出版地:出版社,年.起页-止页.

会议文集:作者.论文名[A].见(In):编者.文集名[C].出版地:出版社(单位),年.起页-止页.

学位论文:作者.论文名[D].保存地:保存单位,年份.

报告:作者.论文名[R].出版地:出版单位,出版年.

专利:专利所有者.专利题名[P].专利国别:专利号,出版日期.

11. 来稿文责自负,切勿一稿多投.编辑对来稿可作文字上和编辑技术上的修改和删节.在 3 个月内未收到本刊选用通知,可来电询问.

12. 投稿请附作者单位详细地址,邮编,电话号码,电子邮箱等.编辑部邮政地址:北京市 2871 信箱;邮编:100085;电话:010-62941102, 010-62849343;传真:010-62849343;E-mail:hjkx@rcees.ac.cn;网址:www.hjkx.ac.cn

CONTENTS

Emission Reduction Potential of Air Pollutants of Thermal Power Industry Based on Carbon Emission Reduction Target and Emission Standard Constraint Scenarios	LI Hui, SUN Xue-li, PANG Bo, <i>et al.</i> (5563)
Volatile Organic Compounds in the Vehicle Repairing Industry of China: Emission, Management, Purification, and Policy	WANG Hai-lin, YANG Tao, NIE Lei, <i>et al.</i> (5574)
Pollutant Emission Inventory of Biomass Combustion Sources in Xining City	GAO Yu-zong, JI Ya-qin, LIN Zi, <i>et al.</i> (5585)
Analysis of Air Quality and Influencing Factors in Sichuan Basin During the COVID-19 Outbreak	CHEN Jun-hui, FENG Xiao-qiong, LI Yuan, <i>et al.</i> (5594)
Estimation of PM _{2.5} Concentration in Sichuan Province Based on Improved Linear Mixed Effect Model and Geo-intelligent Random Forest	WU Yu-hong, DU Ning, WANG Li, <i>et al.</i> (5602)
Characterization of Water-soluble Inorganic Ions in Atmospheric PM _{2.5} in Chengdu During the Later Stage of the Air Pollution Prevention and Control Action Plan	LI Jia-qi, ZHANG Jun-ke, DONG Gui-ming, <i>et al.</i> (5616)
Characteristics of Chemical Composition and Source Apportionment of Atmospheric Fine Particulate Matter in Luoyang	SUN Jia-bin, DONG Zhe, LI Li-ping, <i>et al.</i> (5624)
Characteristics and Main Influencing Factors of Black Carbon Aerosol in Beijing	CAO Yang, AN Xin-xin, LIU Bao-xian, <i>et al.</i> (5633)
Chemical Characteristics and Source Apportionment with Temporal Refinement for VOCs in Tianjin Suburb in Summer	WANG Yi-xuan, LIU Bao-shuang, WU Jian-hui, <i>et al.</i> (5644)
Pollution Characteristics and Reactivity of Volatile Organic Compounds in Shenyang	DU Han-bing, WANG Nan, REN Wan-hui, <i>et al.</i> (5656)
Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric SVOCs Around Typical Chemical Industry Zones	GE Xiang, WU Jian, GAO Song, <i>et al.</i> (5663)
Source Analysis and Health Risk Assessment of Toxic Volatile Organic Compounds in Nanjing in Summer and Winter	ZHANG Zi-jin, LIN Yu-chi, ZHANG Yu-xian, <i>et al.</i> (5673)
Emission Characteristics of Industrial VOCs Based on Emission Inventory and Field Test: A Case Zhengzhou High-tech Zone	REN He, LU Xuan, LIU Yang, <i>et al.</i> (5687)
VOCs Emission Characteristics of Water-based Architectural Coatings and the Influence on the Atmospheric Environment in China	GAO Mei-ping, WANG Hai-lin, LIU Wen-wen, <i>et al.</i> (5698)
WRF-Chem Simulations of the Impacts of Uncertainty in VOCs Emissions on Ozone Formation and Control Strategies	WANG Feng, WANG Jian-wei, YANG Ning, <i>et al.</i> (5713)
Spatial and Temporal Distribution of Ozone and Influencing Factors in Shandong Province	ZHANG Miao, DING Chun, LI Yan, <i>et al.</i> (5723)
Chemical Characteristics and Contaminant Sensitivity During the Typical Ozone Pollution Processes of Chengdu in 2020	QIAN Jun, XU Chen-xi, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i> (5736)
Development of an Emission Model for Oxygenated Volatile Organic Compounds from Gasoline Vehicles Based on the Online Measurement	HAO Yu-qi, YUAN Zi-bing, WANG Meng-lei, <i>et al.</i> (5747)
Dynamic Evolution Characteristics of Water Resources Utilization Efficiency in China Under the Constraint of Triple Attribute Carrying Capacity	ZHANG Kai, WU Feng-ping, CHENG Chang-chun (5757)
Prediction of Total Nitrogen Load in Yangtze River Basin	DING Zhao-wei, ZHENG Hua (5768)
Dynamic of Net Anthropogenic Nitrogen Inputs and Riverine Nitrogen Export in the Yangtze River Basin in 1980-2015	YAO Meng-ya, HU Min-peng, CHEN Ding-jiang (5777)
Characteristics of Water Environment and Spatial-temporal Distribution of Nitrogen and Phosphorus Load in the Yellow River	HAN Xu, PAN Bao-zhu, CHEN Yue, <i>et al.</i> (5786)
Analysis of Nitrate Pollution Sources Under Different Rainfall Conditions Based on $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{18}\text{O}$ Values	XING Zi-kang, YU Zhong-bo, YI Peng, <i>et al.</i> (5796)
Seasonal Variation Characteristics of Eukaryotic Microbial Community Composition in the Source Water Reservoir	ZHANG Hai-han, HUANG Xin, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (5804)
Characteristics of Planktonic Bacteria Community Between Summer and Winter Surface Water in Dali Lake	LI Wen-bao, GUO Xin, ZHANG Bo-yao, <i>et al.</i> (5814)
Impacts of Wastewater Effluent Discharge on Bacteria Community and Water-soluble Organic Matter in Benthic Biofilm in Receiving River	WANG Yu-tao, FAN Chen-yang, ZHU Jin-xin, <i>et al.</i> (5826)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Typical POPs in Typical Drinking Water Sources in Wuhan	ZHANG Kun-feng, FU Qing, TU Xiang, <i>et al.</i> (5836)
Investigation on Fluoroquinolone Resistance Genes in the Intensive Aquaculture Area of Shatianhu Intensive Aquaculture Farm and Surrounding Waterbodies in Shanghai, China	XU Mu, LI Shi-hao, MA Jin, <i>et al.</i> (5848)
Influencing Factors of Nitrogen Removal from Low-Pollution Water by Aerated Constructed Wetland	LI Lin-lin, LI Rong-tao, KONG Wei-jing, <i>et al.</i> (5857)
Removal of Characteristic Pollutants in Livestock Wastewater by Horizontal Subsurface Flow Constructed Wetlands	ZHAO Wei, FAN Zeng-zeng, YANG Xin-ping (5865)
Improvement of Nitrogen and Phosphorus Adsorption and Stormwater Retention Capacity by Hardwood Biochar as an Additive Material in Filler Soil	MENG Yi-ke, WANG Yuan, WANG Chuan-yue, <i>et al.</i> (5876)
Removal of Ammonia Nitrogen from Polyvinyl Alcohol/Sodium Alginate Fixed Micron Zeolite Powder in Black and Smelly Rivers	WEI Chao, CHEN Tao, JIANG Qiao, <i>et al.</i> (5884)
Effect of Corn Stalk Biochar on the Adsorption of Aureomycin from Sierozem	NAN Zhi-jiang, JIANG Yu-feng, MAO Huan-huan, <i>et al.</i> (5896)
Microbial Degradation Potential and Transformation Pathway of Micropollutants in Sand Filters of Drinking Water Treatment Plants	ZHOU Jie, WANG Dong-lin, LIN Hui, <i>et al.</i> (5905)
Long-term Trends in Illicit Drugs Abuse in the City Assessed by Wastewater Analysis	CAO Yu, DONG Xiao-tang, SHAO Xue-ting, <i>et al.</i> (5912)
Stress and Post Effects of Azithromycin and Copper on Archaeal Community and ARGs in Activated Sludge	GAO Yu-xi, LI Xing, ZHAO Jun-ru, <i>et al.</i> (5921)
Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Soil Heavy Metals at Typical Smelting Industry Sites	LI Qiang, CAO Ying, HE Lian-sheng, <i>et al.</i> (5930)
Distribution and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Heavy Metals in Coking Sites in China	WANG Yao-feng, HE Lian-sheng, JIANG Deng-ling, <i>et al.</i> (5938)
Spatial Variation and Risk Assessment of Heavy Metals in Soils of Main <i>Torreya grandis</i> Plantation Region in Zhejiang Province	WANG Min, DONG Jia-qi, BAI Long-long, <i>et al.</i> (5949)
Investigations on the Derivation of Safe Maize-Producing Threshold of Soil Cd Content and on Classification of Cd Contaminated Maize-Producing Areas in Northern China	GUAN Wei-dou, GUO Di, WANG Ping, <i>et al.</i> (5958)
Relationship Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metal Contents in Soil Aggregates and in Crops Around a Typical Pb-Zn Mining Area	QIANG Yu, LI Ying-ju, LUO Qian, <i>et al.</i> (5967)
Heavy Metal Pollution and Cumulative Effect of Soil-crop Systems Around Typical Enterprises in Xiong'an New District	ZHOU Ya-long, WANG Qiao-lin, WANG Cheng-wen, <i>et al.</i> (5977)
Heavy Metal Accumulation Effect and Safe Planting Zoning of Soil and Rice in Tongren	ZHU Liang-liang, WU Yong, ZHOU Lang, <i>et al.</i> (5988)
Effect of Dry-Wet Alternation on the Immobilization of Arsenic in Red Soil by Cerium Manganese Modified Biochar	HUANG Xiao-ya, LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, <i>et al.</i> (5997)
Ammonium Nitrogen Fertilizer and Humic Acid Synergically Promote the Removal of Cd from Soil by <i>Tagetes patula</i> L.	WANG Bing-qing, YANG Qin, LI Hong-ying, <i>et al.</i> (6006)
Characteristics and Influencing Factors of the Dissolved Methane and Nitrous Oxide Concentrations and Emissions from a Rice Paddy Drainage River in China	WU Shuang, YANG Wei-tong, SHENG Yang-yue, <i>et al.</i> (6014)
Coupling Effects of Water-saving Irrigation and Controlled-release Fertilizer (CRF) Application on CH ₄ and N ₂ O Emission in Single Cropping Paddy Field	WANG Yong-ming, XU Yong-ji, JI Yang, <i>et al.</i> (6025)
Effects of Manure Combined Chemical Fertilizers on Soil N ₂ O Emission and Microbial Characteristics of Wheat Crop System in Northwest Arid	WANG Kai, SHI Lei, MA Long, <i>et al.</i> (6038)
Effects of Different Types of Straw Returning on the Bacterial Community, Organic Carbon Mineralization and Maize Yield in Upland Red Soil	KONG Pei-jun, ZHENG Jie, LUAN Lu, <i>et al.</i> (6047)
Effects of Nitrogen and Phosphorus Additions on Soil Microorganisms in Saline-alkaline Grassland	YANG Jian-qiang, DIAO Hua-jie, HU Shu-ya, <i>et al.</i> (6058)
Effects of Combined Application of Biochar with Chemical Fertilizers and Organic Fertilizers on Nutrients and Phosphorus Forms in Purple Soils	XIANG Shu-jiang, YU Luo, XIONG Zi-yi, <i>et al.</i> (6067)
Effects of <i>Enteromorpha prolifera</i> Biochar and Wood Vinegar Co-application on Takyric Solonetz Improvement and Yield of Oil Sunflower	WANG Zheng, SUN Zhao-jun, Sameh El-Sawy, <i>et al.</i> (6078)