

百方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.1

第40卷 第1期

目次

2015~2016年北京市3次空气重污染红色预警PM_{2.5}成因分析及效果评估..... 吕喆,魏巍,周颖,程水源,王晓琦(1)

长三角地区重点源减排对PM_{2.5}浓度的影响..... 于燕,王泽华,崔雪东,陈锋,徐宏辉(11)

上海市实施清洁空气行动计划的健康收益分析..... 戴海夏,安静宇,李莉,黄成,严茹莎,朱书慧,马英歌,宋伟民,阚海东(24)

京津冀及周边地区PM_{2.5}时空变化特征遥感监测分析..... 陈辉,厉青,李莹,张连华,毛慧琴,周伟,刘伟汉(33)

MODIS C006气溶胶光学厚度产品在京津冀典型环境背景下的适用性..... 王海林,刘琼,陈勇航,孙冉,李霞,张华,魏刚,胡俊,刘统强(44)

气象因素对香港地区臭氧污染的影响..... 赵伟,高博,刘明,卢清,马社霞,孙家仁,陈米国,范绍佳(55)

天津夏季边界层低层大气中PAN和O₃的输送特征分析..... 姚青,马志强,林伟立,刘敬乐,王晓佳,蔡子颖,韩素芹(67)

成都冬季PM_{2.5}化学组分污染特征及来源解析..... 吴明,吴丹,夏俊荣,赵天良,杨清健(76)

郑州市冬季天气PM_{2.5}传输路径和潜在源分析..... 段时光,姜楠,杨留明,张瑞芹(86)

常州春季PM_{2.5}中WSOC和WSON的污染特征与来源解析..... 李清,黄雯倩,马帅帅,黄红缨,叶招莲,陈敏东(94)

天津隧道机动车VOCs污染特征与排放因子..... 孙露娜,刘妍,赵静波,孙世达,宋从波,张静,李悦宁,林应超,王婷,毛洪钧(104)

机动车源大气颗粒物粒径分布及碳组分特征..... 梅德清,朱宗宁,孙天硕,王向丽,梅丛蔚,肖政臻(114)

超低排放路线下燃煤烟气可凝结颗粒物在WFGD、WESP中的转化特性..... 杨柳,张斌,王康慧,麻丁仁,盛文(121)

超低排放燃煤电厂颗粒物脱除特性..... 阮仁晖,谭厚章,段钰锋,杜勇乐,刘鹤欣,萧嘉繁,杨富鑫,张朋(126)

北京建筑施工裸地时空变化及扬尘污染排放..... 张立坤,李令军,姜磊,赵文慧,鹿海峰,王新辉,邱昀(135)

SCR装置对焦炉煤气燃烧废气中PCDD/Fs、PCBs和PCNs的协同脱除..... 任美慧,樊芸,王胜,许亮,张宁,张雪萍,陈吉平,张海军(143)

古浪河流域大气降水稳定同位素的时空特征及其环境意义..... 桂娟,李宗省,冯起,卫伟,李永格,吕越敏,袁瑞丰,张百娟(149)

夏季闽江CDOM的空间分布与降解特征..... 程琼,庄婉娥,王辉,陈菁,杨丽阳(157)

亚热带河口陆基养虾塘水体CDOM三维荧光光谱平行因子分析..... 朱爱菊,孙东耀,谭季,黄佳芳,罗敏(164)

基于UV-vis及EEMs解析周村水库夏秋季降雨不同相对分子质量DOM的光谱特征及来源..... 周石磊,张艺冉,黄廷林,刘艳芳,张磊,李贵霞,岳琳,罗晓(172)

分层型水源水库溶解性有机物质及其膜污染特性..... 李凯,王晓东,黄廷林,李舒,刘双(185)

重庆西部山区典型湖泊水-气界面CO₂交换通量及其影响因素..... 罗佳宸,倪茂飞,李思悦(192)

基于稀疏表达的水体遥感反射率高光谱重构及其应用..... 李渊,李云梅,郭宇龙,张运林,张毅博,胡耀霖,夏忠(200)

巢湖十五里河河床地貌单元沉积物硝化速率及污染特征..... 李如忠,阙凤翔,熊鸿斌,王莉(211)

特大城市河流表层沉积物磷形态分布及有效性:以成都市为例..... 丁瑶,欧阳莉莉,石清,高平川,赖承钺,陈舒平,贾滨洋,姚刚(219)

黄河中游(渭南—郑州段)全/多氟烷基化合物的分布及通量..... 李琦路,程相会,赵祯,郭萌然,袁梦,华夏,方祥光,孙红文(228)

重工业城市岩溶地下水中多环芳烃污染特征及来源..... 苗迎,孔祥胜,李成展(239)

沈抚新城地下水中PAHs的污染特征及健康风险评价..... 张士超,姚宏,向鑫鑫,刘殷佐,刘明利,鲁根涛,于晓华(248)

多环芳烃及其衍生物在北京纳污河流中的分布及健康风险..... 付璐婧,李一兵,乔梦,赵旭(256)

原水性质对新型含Ca²⁺复合混凝剂混凝过程的影响..... 曲江东,徐慧,徐建坤,段晋明,门彬,王东升(263)

水体中磺胺甲噁唑间接光降解作用..... 李聪鹤,车潇炜,白莹,石晓勇,苏荣国(273)

MoS₂/BiOI复合光催化剂制备及其光催化氧化还原性能..... 张亮,赵朝成,高先瑶,闫青云,王帅军,董培,侯亚璐(281)

纳米零价铜活化分子氧降解水中恩诺沙星..... 倪永炯,程永清,徐梦苑,邱春根,马晓雁,李军,邓靖(293)

不同类型LDHs负载改性麦饭石对Cr(VI)吸附性能..... 张翔凌,邓礼楚,方晨佳,雷雨,何春艳,高晨光,赵双杰,向洋(300)

单层硅烷负载磁铁矿纳米颗粒的制备及除磷性能..... 邢明超,谢强,陈守慧,吴德意(310)

新生态型聚硅酸铁锰处理染料废水的优化..... 唐立朋,魏群山,吕强,张弛,刘亚男,柳建设(318)

不同外加电压下自养型生物阴极还原硫酸盐的性能及生物膜群落响应..... 胡佳萍,曾翠平,骆海萍,刘广立,张仁铎,卢耀斌(327)

碳源对O/A-F/F模式积累内源聚合物及反硝化的影响..... 崔有为,金常林,王好韩,李晶(336)

进水C/P对SNEDPR系统脱氮除磷性能的影响..... 甄建园,于德爽,王晓霞,陈光辉,都叶奇,袁梦飞,杜世明(343)

不同污泥龄(SRT)对SNEDPR系统脱氮除磷影响..... 王晓霞,甄建园,赵骥,于德爽,都叶奇,杜世明,袁梦飞,张帆(352)

后置短程反硝化AOA-SBR工艺实现低C/N城市污水的脱氮除磷..... 巩秀珍,于德爽,袁梦飞,王晓霞,陈光辉,王钧,毕春雪,都叶奇(360)

缺氧-好氧连续流亚硝化颗粒污泥反应器的启动及稳定运行..... 李冬,郭跃洲,劳会妹,曹美忠,张杰(369)

低温SNAD颗粒污泥工艺启动方式..... 李冬,崔雅倩,赵世勋,刘志诚,张杰(376)

不同取样尺度和数量下针阔混交林土壤呼吸的空间异质性..... 严俊霞,孙琦,李君剑,李洪建(383)

轮作方式对冬水田温室气体排放的影响..... 冯夕,江长胜,彭小乐,李彦沛,郝庆菊(392)

紫色土N₂O排放及氨氧化微生物群落结构对玉米秸秆与化肥减量配施的响应..... 黄容,高明,王莹燕,黎嘉成,徐国鑫,罗梅,徐畅(401)

岩溶地区不同土地利用方式土壤固碳细菌群落结构特征..... 张双双,靳振江,贾远航,李强(412)

丹江口库区库滨带植被土壤细菌群落多样性及PICRUSt功能预测分析..... 孙峰,田伟,张菲,陈彦,任学敏,庞发虎,李玉英,姚伦广,陈兆进(421)

硫酸盐还原菌介导的吸附态砷的迁移转化..... 贾欠欠,李伟,王亚男,段晋明,刘玉灿(430)

铅锌冶炼厂周边农田土壤重金属污染空间分布特征及风险评估..... 王洋洋,李方方,王笑阳,杨志辉,韩科,阮心玲(437)

新疆干旱区某矿冶场对周围土壤重金属累积的影响..... 杨伟光,王美娥,陈卫平(445)

九龙江流域水稻土重金属赋存形态及污染评价..... 林承奇,黄华斌,胡恭任,于瑞莲,郝春莉,林颖(453)

草海典型高原湿地食物链中汞同位素组成特征..... 许议元,何天容(461)

Cd、Zn交互作用对三七景天根系形态和重金属吸收积累的影响..... 郭俊梅,杨俊兴,杨军,陈同斌,李厚恩,徐铁兵,周小勇,叶勇,于豹(470)

不同浓度镉处理对铅胁迫下玉米生长和铅吸收的影响..... 王起凡,郭伟,常青,潘亮,周昕南,杨亮,李娥(480)

广西龙江鱼类镉含量分布特征及生物积累特性分析..... 王俊能,赵学敏,胡国成,钟松雄,姚玲爱,马千里,许振成(488)

6种消解方法对荧光测定生物体内聚苯乙烯微塑料的影响..... 邹亚丹,徐擎擎,张智,李富云,李锋民(496)

一种负载功能型微生物的营养缓释填料的制备及性能评价..... 冯克,徐丹华,成卓韦,於建明,陈建孟(504)

《环境科学》征订启事(113) 《环境科学》征稿简则(238) 信息(93, 262, 342)

成都冬季 PM_{2.5} 化学组分污染特征及来源解析

吴明¹, 吴丹², 夏俊荣¹, 赵天良^{1*}, 杨清健¹

(1. 南京信息工程大学大气物理学院, 气象灾害教育部重点实验室, 气候与环境变化国际合作联合实验室, 气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室, 南京 210044; 2. 南京信息工程大学环境科学与工程学院, 江苏省大气环境与装备技术协同创新中心, 江苏省大气环境监测与污染控制高技术重点实验室, 南京 210044)

摘要: 2017年1月1~20日在成都地区分昼夜对PM_{2.5}进行连续膜样品采集,并在实验室测定了其主要的化学组分(水溶性离子和碳质组分)的质量浓度.观测期间,PM_{2.5}的平均质量浓度为(127.1±59.9) μg·m⁻³;总水溶性离子的质量浓度为(56.5±25.7) μg·m⁻³,其中SO₄²⁻、NO₃⁻和NH₄⁺是最主要的离子,质量浓度分别为(13.6±5.5)、(21.4±12.0)和(13.3±5.7) μg·m⁻³,一共占到了水溶性离子的85.6%;有机碳(OC)和元素碳(EC)的平均质量浓度分别为34.0 μg·m⁻³和6.1 μg·m⁻³,分别占PM_{2.5}质量浓度的26.8%和4.8%.昼夜污染对比显示,PM_{2.5}白天和夜晚质量浓度分别为(120.4±56.4) μg·m⁻³和(133.8±64.0) μg·m⁻³,夜间污染更为严重.SO₄²⁻、NO₃⁻和NH₄⁺白天浓度高于夜间,这与白天光照促进了二次离子的形成有关;而Cl⁻、K⁺、OC和EC浓度夜间明显升高,可能是受夜间煤和生物质燃烧排放增加的影响.通过对近年来成都冬季PM_{2.5}化学组分的研究进行文献总结和比较后发现,SO₄²⁻浓度显著降低,从2010年的50.6 μg·m⁻³降低到2017年的13.6 μg·m⁻³;而NO₃⁻浓度变化不大,维持在20 μg·m⁻³左右.PM_{2.5}中离子酸碱平衡分析表明,成都冬季PM_{2.5}由于NH₄⁺的相对过剩而呈现出碱性,与以往呈偏酸性结果存在差异.对成都冬季NO₃⁻/SO₄²⁻的比值进行计算,NO₃⁻/SO₄²⁻平均值为1.57,表明移动源对PM_{2.5}污染影响更大.OC与EC的相关性表明,白天和夜间OC与EC的相关系数分别为0.82和0.90(P<0.01),OC与EC来源具有一致性.SOC估算结果显示,白天和夜间SOC浓度分别为8.5 μg·m⁻³和11.9 μg·m⁻³,占到OC的28.1%和31.8%.K⁺/EC平均值为0.31,并且K⁺与OC之间相关系数为0.87(P<0.01),说明生物质燃烧对成都冬季碳质气溶胶有一定影响.主成分分析表明,成都冬季PM_{2.5}主要来源于燃烧源(燃煤、生物质燃烧等)、二次无机污染源以及土壤和扬尘源,其贡献率分别为32.8%、34.5%和21.5%.

关键词: 成都; 细颗粒物; 水溶性离子; OC/EC; 昼夜差异; 源解析

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)01-0076-10 DOI: 10.13227/j.hjkk.201805035

Analysis of Pollution Characteristics and Sources of PM_{2.5} Chemical Components in Chengdu in Winter

WU Ming¹, WU Dan², XIA Jun-rong¹, ZHAO Tian-liang^{1*}, YANG Qing-jian¹

(1. Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education, Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change, Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Jiangsu Collaborative Innovation Center for Atmospheric Environment and Equipment Technology, Jiangsu Provincial Key Laboratory of High-tech Research on Atmospheric Environmental Monitoring and Pollution Control, School of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: Day-night PM_{2.5} samples were continuously collected in Chengdu from January 1 to 20, 2017, and the concentrations of major chemical components (water-soluble ions and carbonaceous components) were measured in the laboratory. During the observation period, the average mass concentration of PM_{2.5} was (127.1 ± 59.9) μg·m⁻³. The mass concentration of water-soluble ions was (56.5 ± 25.7) μg·m⁻³ and SO₄²⁻, NO₃⁻, and NH₄⁺ were the most dominant ions with a concentration of (13.6 ± 5.5), (21.4 ± 12.0), and (13.3 ± 5.7) μg·m⁻³, respectively, accounting for 85.6% of the water-soluble ions. The average mass concentrations of organic carbon (OC) and elemental carbon (EC) were 34.0 and 6.1 μg·m⁻³, respectively, accounting for 26.8% and 4.8% of the PM_{2.5} mass concentration, respectively. The comparison of the average day-night concentration shows that the daytime and nighttime mass concentrations of PM_{2.5} are (120.4 ± 56.4) and (133.8 ± 64.0) μg·m⁻³, respectively, and that the nighttime pollution is more serious. The SO₄²⁻, NO₃⁻, and NH₄⁺ concentrations are higher during the day than at night, which is related to daytime light, which promotes the formation of secondary ions. The Cl⁻, K⁺, OC, and EC concentrations increase significantly, which may be affected by increased emissions from coal and material combustion. Based on the literature review and comparison of the

收稿日期: 2018-05-07; 修订日期: 2018-07-12

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0203304); 国家自然科学基金项目(91544109)

作者简介: 吴明(1992~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为大气环境与气候变化, E-mail: 279462024@qq.com

* 通信作者, E-mail: tlzhao@nuist.edu.cn

winter chemical composition of PM_{2.5} in Chengdu in recent years, the SO₄²⁻ concentration significantly decreases from 50.6 μg·m⁻³ in 2010 to 13.6 μg·m⁻³ in 2017. The NO₃⁻ concentration changes little; it is maintained at ~20 μg·m⁻³. The analysis of the acid-alkali ion balance shows that PM_{2.5} in Chengdu is alkaline due to the relative overgrowth of NH₄⁺, which is different from previous partially acidic results. The average value of NO₃⁻/SO₄²⁻ is 1.57. Mobile sources have a greater impact on the PM_{2.5} pollution in Chengdu in winter. The correlation coefficients of OC and EC between daytime and nighttime are 0.82 and 0.90, respectively ($P < 0.01$), which indicates that the OC and EC sources are consistent. The SOC estimation shows that the SOC concentrations during the day and night are 8.5 μg·m⁻³ and 11.9 μg·m⁻³, respectively, accounting for 28.1% and 30.8% of the OC, respectively. The K⁺/EC average value is 0.31 and the correlation coefficient between K⁺ and OC is 0.87 ($P < 0.01$), indicating that biomass combustion has a certain influence on the carbonaceous aerosol in Chengdu in winter. The principal component analysis shows that the winter PM_{2.5} in Chengdu mainly originates from combustion sources (coal burning, biomass burning, etc.), secondary inorganic sources, and soil and dust sources. The contribution rates are 32.8%, 34.5%, and 21.5%, respectively.

Key words: Chengdu; PM_{2.5}; water-soluble ion; OC/EC; day-night difference; source apportionment

大气颗粒物的化学组成是了解其来源、形成机制和环境健康效应的基础,水溶性离子和碳质气溶胶(包括有机物和元素碳)作为气溶胶的主要化学组分,在 PM_{2.5} 中分别占到 20% ~ 50% 和 18% ~ 51%^[1,2],其中二次组分,包括 SO₄²⁻、NO₃⁻、NH₄⁺ 以及二次有机气溶胶的贡献十分突出,特别是在霾污染过程中,二次化学组分可以占到 PM_{2.5} 的 30% ~ 77%^[3]. 大气颗粒物及其化学组分的污染特征受到多种因素影响,一般而言,受到供暖时期污染物排放增加、不利的大气扩散条件等的影响,PM_{2.5} 污染易在冬季频发;同时,大气颗粒物还存在明显的昼夜差异, Yang 等^[4] 对北京 PM_{2.5} 化学组分的分析表明,二次离子 SO₄²⁻、NO₃⁻ 和 NH₄⁺ 质量浓度均呈现白天高于夜间,而 Cl⁻ 和 K⁺ 表现为夜间高于白天. 利用 SO₄²⁻/NO₃⁻ 比值,可以定性判断移动源与固定源对大气污染的相对贡献, Lang 等^[5] 对北京 PM_{2.5} 化学组分的长时间采样研究发现,从 2013 ~ 2015 年 SO₄²⁻ 浓度显著降低, NO₃⁻ 和 NH₄⁺ 浓度呈现增加趋势, NO₃⁻/SO₄²⁻ 比值不断增加,表明移动源对北京大气污染贡献增加. OC 和 EC 的相关性及 OC/EC 的比值可以用来初步判断碳质气溶胶的来源, Zhao 等^[6] 对上海碳质气溶胶研究, OC 与 EC 间有较高的相关性, OC/EC 在 4.31 ~ 6.35 之间,高于 2,表明 SOC 对 PM_{2.5} 有重要影响;杜博涵等^[7] 根据经验公式对北京夏、秋季 SOC 的估算表明, SOC 是 OC 的重要组成部分,占到了 OC 的 42% 和 28%. 除了根据气溶胶化学组分之间的关系对污染源进行定性判断以外,利用一些受体模型,如 PMF、CMB 和 PCA 等^[8-10],可以进一步对大气颗粒物来源进行解析,分析不同污染源的贡献率. 王苏蓉等^[11] 利用 PMF 受体模型对南京 PM_{2.5} 进行源解析,结果表明燃煤是南京市 PM_{2.5} 最主要来源;张懿华等^[12] 对上海城区 OC 和 EC 进行了观测,并使用 PMF 分析了碳质气溶胶的来源及贡献. 总体而言,燃煤和生物质燃烧以及二次源是 PM_{2.5} 的主要污染源.

从地理分布上看,我国重霾污染区域主要集中在华北平原(主要为北京-天津-河北地区)、长三角地区、珠三角地区和四川盆地^[13-15]. 许多研究人员已经对京津冀、长三角、珠三角地区^[16-19] 气溶胶污染进行了大量的研究,相比而言,四川盆地气溶胶污染的研究仍较为缺乏. Tao 等^[20] 分析了成都春季生物质燃烧对 PM_{2.5} 影响; Li 等^[21] 则对 2016 年成都冬季的两次霾污染过程中气溶胶化学成分的变化、二次转化生成和吸湿增长进行了研究; Tao 等^[22] 利用 PMF 方法对成都 2011 年 PM_{2.5} 污染来源进行了解析. 在典型的盆地地形下,四川盆地上空形成强的下沉气流,冬季尤为明显,使盆地内部常年湿度高、风速小、逆温频繁^[23,24],成都市位于四川盆地西部,是西南地区重要城市,城市人为污染物排放和特殊的盆地地形导致成都地区大气污染频发^[25]. 本研究选取污染严重的冬季,对成都地区 PM_{2.5} 的污染特征和来源进行了研究,其中根据已有的不多的成都地区 PM_{2.5} 的研究文献,对 PM_{2.5} 中化学组分的长时间变化规律进行了梳理分析,并对化学组分的昼夜差异进行了对比研究,这是目前成都地区气溶胶研究还较为缺乏的.

本研究于 2017 年 1 月对成都冬季 PM_{2.5} 进行了连续昼夜采集,分析测定了其中水溶性离子和碳质气溶胶的浓度,对 PM_{2.5} 及其主要化学组分的污染水平和昼夜变化进行了分析,并与近些年成都地区冬季的气溶胶研究结果进行了对比. 通过离子的酸碱平衡、NO₃⁻/SO₄²⁻ 比值和 OC 与 EC 相关性的分析,揭示了 PM_{2.5} 污染特征的变化,并使用主成分分析法(PCA)对 PM_{2.5} 来源进行了解析. 本研究结果能促进对成都冬季 PM_{2.5} 及其化学组分浓度水平、污染特征及污染来源的理解,以为成都地区的污染控制和环境改善提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 样品采集

采样点设置在成都市温江气象局(30.75°N,

103.86°E), 海拔高度约 539 m. 该站点东面、南面以及北面为城市建筑群, 西面为农田, 站点周围无高大建筑物的遮挡, 视野开阔, 无明显大气污染排放源, 监测数据能较好地反映成都市区大气环境状况. 采样使用中流量采样器(青岛崂山, KC-120H), 采样流量为 100 L·min⁻¹. 样品采集时间从 2017 年 1 月 1~21 日, 每日采样两次, 采样时段分别为 08:00~19:40 与 20:00~次日 07:40. 使用石英滤膜(Pall, 美国)收集 PM_{2.5}, 采样前将石英滤膜放置在马弗炉中, 在 800℃ 下灼烧 5 h, 去除有机杂质. 采样前后, 石英滤膜均在恒温恒湿($t=25^{\circ}\text{C}$, $U=50\%$)条件下平衡 48 h, 然后使用精度为 10 μg 的十万分之一天平(瑞士, Mettler Toledo MX5 型)进行称重, 称重时连续称量 3 次, 3 次称量之间质量差在 20 μg 以内. 根据采样前后石英膜的质量差以及采样体积, 计算得到 PM_{2.5} 质量浓度. 采样后样品放置在冰柜(-18℃)中保存至分析. 同时, 在采样器不开机的情况下, 使用相同的采样流程获得 5 次空白样品.

1.2 样品分析

取 1/8 滤膜放入一次性聚氯乙烯瓶中, 加入 25 mL 去离子水, 超声萃取 30 min 后静置 12 h, 然后使用 0.22 μm 水系滤头(Member, 德国)过滤样品, 最后使用离子色谱仪对样品中 Na⁺、NH₄⁺、K⁺、Mg²⁺、Ca²⁺、F⁻、Cl⁻、NO₃⁻、SO₄²⁻ 等 9 种离子进行测定. 水溶性无机阴离子采用 Dionex 公司生产的 ICS-2000 离子色谱仪进行分析, 分离柱和保护柱分别为 Ion Pac(4×250 mm) 和 Ion Pac AG11-HC(4×50 mm), 淋洗液为 10 mmol·L⁻¹ KOH 溶液; 水溶性阳离子使用 Dionex 公司生产的 ICS-3000 离子色谱仪进行测定, 分离柱和保护柱使用的是 Ion PacCS16(5×250 mm) 和 Ion Pac CG16(5×50 mm), 淋洗液为 33 mmol·L⁻¹ 的甲烷磺酸. 分析时离子色谱仪流速均为 1 mL·min⁻¹, 各离子检测线为 0.01 μg·m⁻³, 所有离子浓度均减去相应空白值.

采用美国沙漠所热光碳分析仪(DRI 2001A)对样品中有机碳(OC)和无机碳(EC)进行测定. 仪器分析方法为 IMPROVE 热光反射法. 热光碳分析仪分析测量原理为, 首先在无氧的纯氮环境下加热样品, 使样品中 OC 在 140℃(OC1)、280℃(OC2)、480℃(OC3)和 580℃(OC4)温度下气化析出, 气化的 OC 经氧化炉氧化为 CO₂; 然后在氮-氧混合气体(98% 氮气 + 2% 氧气)环境下, 将样品中 EC 在 580℃(EC1)、740℃(EC2)和 840℃(EC3)下燃烧形成 CO₂, 上述各温度梯度下产生的 CO₂ 在还原炉中经催化还原为 CH₄, 再使用火焰离子化检测器

(FID)测定 CH₄ 浓度, 从而获得 OC 和 EC 的各组分浓度. 由于样品在加热过程中, 部分 OC 会碳化为 EC, 这一部分碳称为裂解碳(OPC), 为准确区分 OC 和 EC, 在测量过程中, 采用 633 nm 的氦-氖激光测定反射光强度, 来确定元素碳氧化的起始点.

1.3 PCA 方法

主成分分析法(principal component analysis, PCA)是一种广泛应用于气溶胶来源定量解析的统计方法^[26, 27]. 该方法通过对数据变量进行降维来获得主要影响因子, 其原理是假定物种的测量浓度是不同因子(源)的线性组合, 其数学表达式如下:

$$x_{ij} = \sum_{k=1}^p g_{ik} f_{kj} + e_{ij}$$

式中, x_{ij} 表示 j 物种在第 i 个样品中的浓度, g_{ik} 表示因子 k 对样品 i 的贡献, f_{kj} 表示 j 物种在因子 k 中的浓度, e_{ij} 表示误差. 理想情况下 e_{ij} 仅仅表示实验误差, 但在实际中, 它还包括一些未知或无法解释的成分.

本研究使用 SPSS 软件中 PCA 分析模块, 对成都 PM_{2.5} 各化学组分质量浓度进行主成分分析, 根据计算得到的成分因子和各因子中载荷值来确定 PM_{2.5} 来源以及来源的贡献.

2 结果与讨论

2.1 PM_{2.5} 及其化学组分的浓度变化

2.1.1 PM_{2.5} 及其化学组分质量浓度水平

观测期间成都市 PM_{2.5} 及其化学组分的平均质量浓度统计结果见表 1, 其浓度时间变化如图 1 所示. PM_{2.5} 的日均值(白天和夜间)为 (127.1 ± 59.9) μg·m⁻³, 远高于我国空气质量标准中 PM_{2.5} 的二级浓度限值 75 μg·m⁻³ (GB 3095-2012), 观测时段内成都市大气污染较严重. 与国内其他城市冬季 PM_{2.5} 的质量浓度相比, 成都 PM_{2.5} 浓度低于兰州^[28] (141.1 μg·m⁻³, 2012)、上海^[29] (138.0 μg·m⁻³, 2013~2014 年), 高于北京^[30] (113.4 μg·m⁻³, 2014 年)、广州^[31] (63.0 μg·m⁻³, 2014 年).

根据化学组分的实验室分析结果, PM_{2.5} 中总水溶性离子的平均质量浓度为 (56.5 ± 25.7) μg·m⁻³, 占 PM_{2.5} 质量浓度的 44.4% (表 1). 各离子对 PM_{2.5} 质量浓度的贡献大小依次为 NO₃⁻ > SO₄²⁻ > NH₄⁺ > Cl⁻ > K⁺ > Ca²⁺ > Na⁺ > F⁻ > Mg²⁺, 其中二次离子 SNA(SO₄²⁻、NO₃⁻、NH₄⁺) 是最主要的离子成分, 平均浓度分别为 (13.6 ± 5.5)、(21.4 ± 12.0) 和 (13.3 ± 5.7) μg·m⁻³, 三者共占到水溶性离子质量浓度的 85.6%, 其中 NO₃⁻ 浓度明显高于

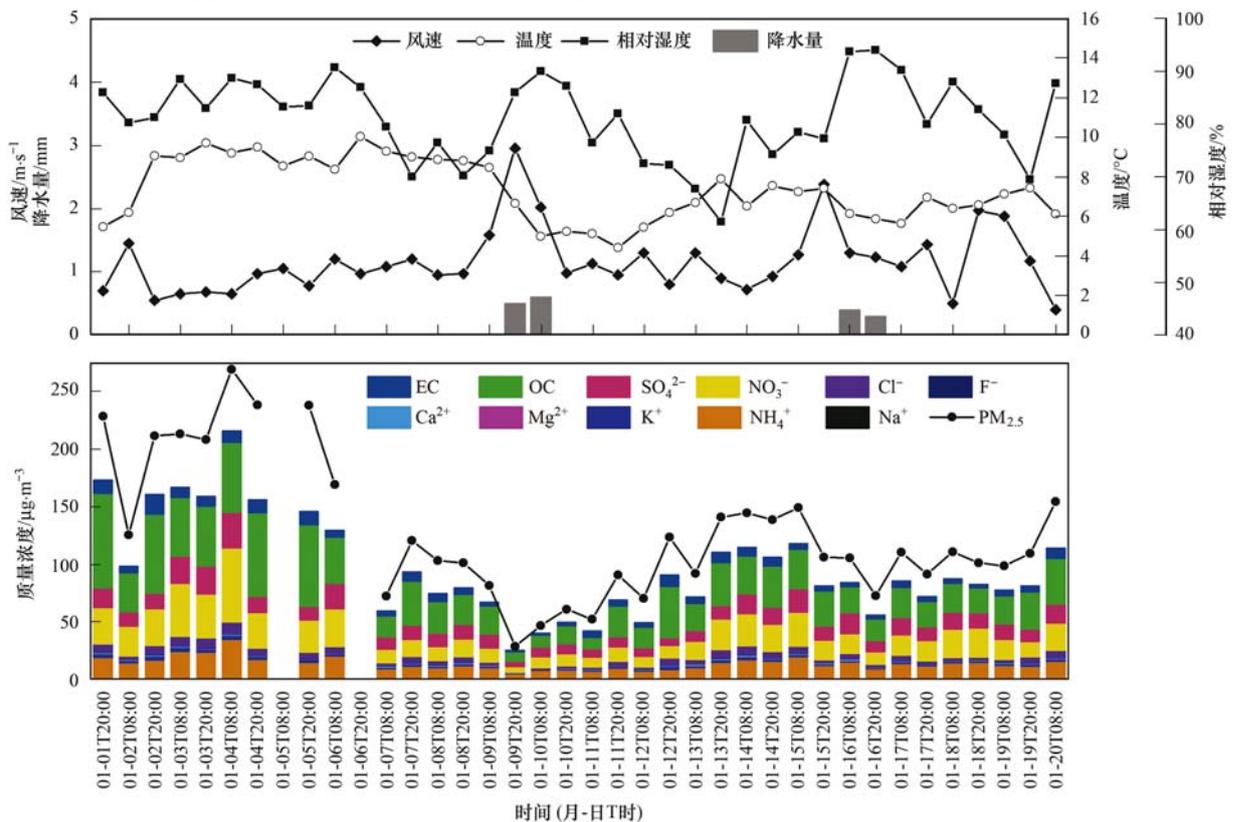
SO₄²⁻ 和 NH₄⁺. 除 SNA 外, Cl⁻ 和 K⁺ 也占有一定比例, 其平均浓度分别为(4.6 ± 2.4) μg·m⁻³ 和(1.9 ± 0.9) μg·m⁻³, 而 Ca²⁺、Na⁺、F⁻、Mg²⁺ 含量相对较低, 其所占比例不到 1.0%. 碳质气溶胶的分析结果表明, 成都冬季有机碳(OC)和元素碳(EC)平均质量浓度分别为(34.0 ± 18.4) μg·m⁻³ 和(6.1 ± 3.3) μg·m⁻³, 分别占 PM_{2.5} 的 26.8% 和 4.8%.

相较于其他城市, OC 浓度高于上海冬季^[30] (17.2 μg·m⁻³, 2013 ~ 2014 年)、重庆冬季^[32] (24.2 μg·m⁻³, 2015 年), 而 EC 浓度高于上海冬季^[29] (2.9 μg·m⁻³, 2013 ~ 2014 年) 低于重庆冬季^[33] (5.9 μg·m⁻³, 2015 年). 以上质量浓度分析表明, SNA 和 OC 是成都冬季 PM_{2.5} 的最主要成分, 对它们的控制是减少气溶胶污染的关键.

表 1 PM_{2.5} 及其化学组分浓度水平¹⁾Table 1 Concentration levels of PM_{2.5} and chemical components

项目	白天		夜间		日均值	
	浓度/μg·m ⁻³	占比/%	浓度/μg·m ⁻³	占比/%	浓度/μg·m ⁻³	占比/%
PM _{2.5}	120.4 ± 56.4		133.8 ± 64.0		127.1 ± 59.9	
SO ₄ ²⁻	15.1 ± 6.3	12.5	12.2 ± 4.2	9.1	13.6 ± 5.5	10.7
NO ₃ ⁻	22.6 ± 14.3	18.8	20.2 ± 9.5	15.1	21.4 ± 12.0	16.8
NH ₄ ⁺	14.0 ± 6.7	11.7	12.6 ± 4.4	9.4	13.3 ± 5.7	10.5
Cl ⁻	4.4 ± 2.5	3.6	4.8 ± 2.3	3.6	4.6 ± 2.4	3.6
K ⁺	1.8 ± 0.9	1.5	2.0 ± 0.9	1.5	1.9 ± 0.9	1.5
Na ⁺	0.7 ± 0.3	0.6	0.6 ± 0.2	0.5	0.7 ± 0.23	0.5
Ca ²⁺	0.8 ± 0.3	0.7	0.7 ± 0.0	0.5	0.8 ± 0.3	0.6
Mg ²⁺	0.1 ± 0.1	0.1	0.1 ± 0.0	0.0	0.1 ± 0.0	0.0
F ⁻	0.2 ± 0.1	0.2	0.2 ± 0.1	0.2	0.2 ± 0.1	0.2
OC	28.9 ± 13.0	24.0	39.1 ± 21.8	29.3	34.0 ± 18.4	26.8
EC	5.3 ± 2.9	4.4	6.8 ± 4.0	5.1	6.1 ± 3.3	4.8
IC	59.7 ± 30.3	49.7	53.3 ± 20.3	39.9	56.5 ± 25.7	44.4
TC	34.2 ± 14.9	28.4	46.0 ± 20.4	34.4	40.1 ± 21.2	31.6

1) IC: 水溶性离子总浓度, TC: OC 和 EC 浓度之和.

图 1 PM_{2.5} 及其主要化学组分质量浓度的时间变化Fig. 1 Time change of the mass concentration of PM_{2.5} and main chemical components

观测时期 $PM_{2.5}$ 及其化学组分的浓度在不同采样日差异较大, 图 1 给出了它们随时间的变化情况, 同时给出了主要气象要素: 温度、湿度、风速和相对湿度等的变化(数据来源于气象数据共享网(<http://data.cma.cn/>)). 从图中可以看到, 化学组分的浓度变化与 $PM_{2.5}$ 的质量浓度变化基本一致, 呈现出相同的变化特征. 观测初期(1月1日夜间~1月6日白天)污染最为严重, $PM_{2.5}$ 平均浓度达到了 $211.1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 其中1月4日白天达到最高, 为 $269.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 该时段对应着高温高湿的天气条件, 有利于二次污染物的形成, 而较低的风速为污染物的积累提供了有利条件; 从1月7日白天~1月9日白天, $PM_{2.5}$ 浓度水平整体降低, 该时间段对应的相对湿度也有明显降低, 对二次污染物的转化生成可能会有一定的抑制作用. $PM_{2.5}$ 浓度最低的时段为1月9日夜间~1月11日白天, 该时段内 $PM_{2.5}$ 浓度均小于 $75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 空气质量较好, 在这一时段, 有降水发生, 且风速显著增加, 使得污染物得到了清除和扩散, 有效降低了大气气溶胶的污染; 从1月11日夜间起, $PM_{2.5}$ 呈现增长趋势, 直到1月15日夜间达到第二个污染高峰, 随后 $PM_{2.5}$ 浓度快速降低, 并在1月16日夜间形成低值; 之后又有所回升, 但维持在较低水平.

2.1.2 昼夜差异

本研究对 $PM_{2.5}$ 进行昼夜分开采集, 因此可以对 $PM_{2.5}$ 及其化学组分的昼夜差异进行深入研究, 其白天和夜间平均质量浓度的统计结果见表 1, 图 2 则给出了 $PM_{2.5}$ 及主要组分质量浓度的昼夜对比. 白天和夜间 $PM_{2.5}$ 平均浓度分别为 $(120.4 \pm 56.4) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $(133.8 \pm 64.0) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 夜间 $PM_{2.5}$ 的污染更严重. 总水溶性离子平均浓度在白天和夜间分别为 $(59.7 \pm 30.3) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 (53.3 ± 20.3)

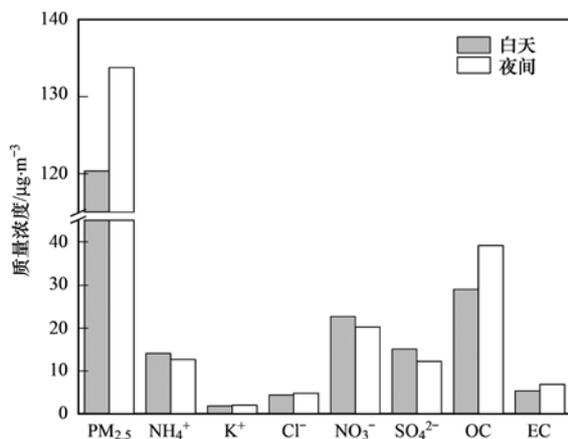


图 2 $PM_{2.5}$ 及主要化学组分质量浓度的昼夜对比

Fig. 2 Day-night comparison of the mass concentration of $PM_{2.5}$ and major chemical components

$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 与 $PM_{2.5}$ 质量浓度相反, 白天污染更为严重. 对比各离子昼夜浓度可以发现, 水溶性离子中 SNA 的浓度均白天高于夜间, 这与白天光照所导致的光化学反应促进了二次离子 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 NH_4^+ 的生成有关; 而 Cl^- 和 K^+ 相反, 夜间高于白天, 同时 OC 和 EC 也都表现出夜间高于白天的特征. 污染物夜间浓度的升高一方面与昼夜气象条件的变化有关, 夜晚边界层高度会显著降低, 风速也会减小, 限制了污染物的扩散和传输^[34]; 另一方面, 污染源的排放也可能是重要原因, Cl^- 在远离海洋的地区, 主要来源于煤的燃烧, 而 K^+ 则是生物质燃烧的示踪物^[33], OC 和 EC 也主要来源于化石燃料和生物质的燃烧排放, 冬季夜间气温较低, 而成都没有集中供暖, 居民自发使用煤炭和生物质燃烧取暖增加了这些污染物的排放, Hu ^[35] 等使用 $HR-ToF-AMS$ 对四川资阳的研究也表明来源于生物质燃烧的有机物在清晨和夜间有更高的浓度.

2.1.3 与以往观测结果对比

虽然四川盆地气溶胶的研究相对较少, 但近些年一些学者在成都地区也进行了 $PM_{2.5}$ 的采样和分析工作, 表 2 对成都冬季 $PM_{2.5}$ 的采样和分析结果进行了总结. 虽然不同研究的采样仪器、采样频率和分析仪器以及分析方法之间可能存在一定差异, 但对比结果仍能在一定程度上反映区域气溶胶污染的变化. 从表 2 中可以看到, 近些年来成都冬季 $PM_{2.5}$ 中 SO_4^{2-} 呈现显著降低的趋势, 2017 年冬季 SO_4^{2-} 相比于 2010 和 2011 年降低了 73.1% 和 52.2%, 而相对于 2012~2015 年降低约 30%. 这得益于四川省以及成都市一些污染防治的政策法规实施, 例如 2009 年《成都市大气污染防治管理规定》实施, 对机动车尾气污染和燃煤污染提出了防治意见; 2011 年四川省出台了《四川省“十二五”节能减排综合性工作方案》, 加强了氮氧化物和二氧化硫排放的控制. 成都地区对于气态前体物 SO_2 的有效控制(如燃煤电厂脱硫脱硝技术的提升), 减少了 SO_4^{2-} 的形成, 降低了 SO_4^{2-} 对大气污染的贡献. NO_3^- 的浓度变化幅度低于 SO_4^{2-} , 从 2010 年到 2011 年, NO_3^- 浓度与 SO_4^{2-} 一样大幅降低, 但 2011 年后, NO_3^- 浓度与 SO_4^{2-} 浓度变化产生明显差异, 其浓度呈现出增加趋势. 虽然成都减少了来自固定源的 NO_x 排放(脱销技术的改进和提升等), 但随着成都汽车保有量的显著增加(从 2010 年的 260 万辆增加到 2016 年的 467 万辆, <http://www.chengduyearbook.com/index.aspx>), 来自移动源排放的 NO_x 压力明显增加, 这使得 NO_3^- 浓度呈现升高趋势. NH_4^+ 浓度受

到 NO₃⁻ 和 SO₄²⁻ 变化的共同影响, 在 2012 年之前小幅度降低, 2013 年之后略为增加, 浓度变化幅度很小. 碳质气溶胶由于受不同分析方法对 OC 和 EC 分割点处理差异的影响, 浓度对比的不确定性相比水溶性离子更高. 本研究中冬季 OC 质量浓度相比

以往年份最高, 与 2010 年的浓度结果较为接近, 而 EC 处于中间水平, 但 OC/EC 的比值较高, 达到了 5.6, 说明 2017 年成都冬季可能存在明显的生物质燃烧或二次有机碳的生成, 具体情况在 2.2.3 节进行了进一步探讨.

表 2 成都地区冬季 PM_{2.5} 及其主要组分质量浓度变化/μg·m⁻³

Table 2 Changes of PM_{2.5} and main components in winter in Chengdu/μg·m⁻³

采样时间(年-月-日)	PM _{2.5}	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	NH ₄ ⁺	OC	EC	p ³⁾	NO ₃ ⁻ /SO ₄ ²⁻	OC/EC	文献
2010-01-01 ~ 2010-01-31	225.5	31.2	50.6	18.2	31.5	11.6	0.65	0.62	2.7	[36]
2011-01-06 ~ 2011-01-30	158	15.5	31.8	15.3	22	8	0.93	0.49	2.8	[22]
2012-12 ~ 2013-02 ¹⁾	108.1	~18.4	~20.5	~11.4	23.9	5.4	~0.87	~0.90	4.4	[37]
2013-12 ~ 2014-02 ¹⁾	122.61	19.62	19.25	~12.26	—	—	~0.95	1.02	—	[38]
2015-01-06 ~ 2015-01-16 ²⁾	149.6	19.3	22.6	13.5	22.8	5.1	0.96	0.85	4.5	[21]
2017-01-01 ~ 2017-01-20	127.1	21.4	13.6	13.3	34.0	6.1	1.18	1.57	5.6	本研究

1) 每 6 d 采样一次, 采样时间为 24 h; 2) 高频采样; 3) $p = c(\text{NH}_4^+) / [2c(\text{SO}_4^{2-}) + c(\text{NO}_3^-)]$

2.2 PM_{2.5} 化学组分污染特征分析

2.2.1 水溶性离子的酸碱平衡

水溶性离子中酸碱离子的组成比例直接影响着大气颗粒物的 pH 值, 而 pH 值对颗粒物表面非均相反应的途径和速率有着直接影响^[39]. 一般使用离子的当量浓度来对大气颗粒物的酸碱性进行分析, 阳离子当量浓度(CE)和阴离子当量浓度(AE)的计算公式分别如下:

$$\text{CE} = \frac{\text{Na}^+}{2.3} + \frac{\text{NH}_4^+}{18} + \frac{\text{K}^+}{39} + \frac{\text{Mg}^{2+}}{12} + \frac{\text{Ca}^{2+}}{20}$$

$$\text{AE} = \frac{\text{F}^-}{19} + \frac{\text{Cl}^-}{35.5} + \frac{\text{NO}_3^-}{62} + \frac{\text{SO}_4^{2-}}{48}$$

对观测期间 PM_{2.5} 中阴阳离子浓度的相关关系分昼夜分别进行分析, 结果如图 3 所示. 从中可以看出, 白天和夜间阳离子与阴离子浓度的线性关系都非常好, 拟合曲线斜率都十分接近于 1, 相关系数也都非常高, 说明成都冬季 PM_{2.5} 中阴阳离子平衡较好, 也说明本研究实验结果是准确合理的. 白天和夜间 AE/CE 平均值均为 0.87, 阴离子被阳离子完全中和, 阳离子相对富余, PM_{2.5} 呈现碱性, 这主要是由 NH₄⁺ 的相对过剩造成的. NH₄⁺ 作为 PM_{2.5} 中的主要碱性离子, 主要通过和 SO₄²⁻ 和 NO₃⁻ 结合形成 (NH₄)₂SO₄、NH₄HSO₄ 和 NH₄NO₃ 存在. 白天和夜间 $c(\text{NH}_4^+) / [2c(\text{SO}_4^{2-}) + c(\text{NO}_3^-)]$ 均大于 1 (c 表示量浓度), 说明主要的酸性离子 SO₄²⁻ 和 NO₃⁻ 被碱性离子 NH₄⁺ 完全中和, 过量的 NH₄⁺ 使 PM_{2.5} 呈现碱性. 从表 2 中近些年成都冬季 $c(\text{NH}_4^+) / [2c(\text{SO}_4^{2-}) + c(\text{NO}_3^-)]$ 的比值变化可以看出, $c(\text{NH}_4^+) / [2c(\text{SO}_4^{2-}) + c(\text{NO}_3^-)]$ 其数值呈现出增加趋势, 在 2015 年前小于 1, 到 2017 年增加到 1.18, 这主要与 SO₄²⁻ 浓度的大幅度降低有关,

说明通过严格的 SO₂ 排放控制, 成都地区 PM_{2.5} 的 pH 值发生了转折性变化, NH₄⁺ 从不足转为相对富余, 其对 PM_{2.5} 的贡献比例也在增加, 因此加强对 NH₃ 排放的控制, 对进一步减轻成都地区的气溶胶污染可能非常关键.

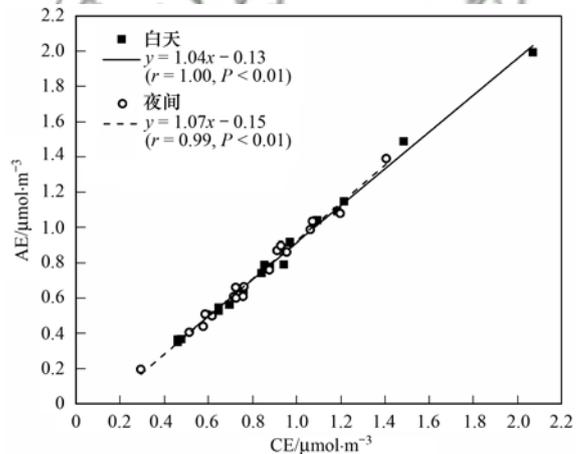


图 3 阴离子和阳离子当量浓度的相关性分析

Fig. 3 Correlation analysis of anion and cation equivalent concentrations

2.2.2 NO₃⁻/SO₄²⁻ 的比值变化

SO₄²⁻ 和 NO₃⁻ 主要由大气中气态前体物 SO₂ 和 NO_x 在大气氧化剂作用下二次转化生成. 有研究表明, 汽油和柴油燃烧排放的 NO_x 和 SO_x 比例为 13:1 和 8:1, 而煤炭燃烧排放的 NO_x 和 SO_x 为 1:2^[40, 41], 因此 NO₃⁻/SO₄²⁻ 的比值可以用来表征移动源(主要为汽车尾气)和固定源(主要为燃煤)对大气污染的相对贡献^[42]. 通常以 1 为界限, 如果 NO₃⁻/SO₄²⁻ 大于 1, 代表移动源贡献大于固定源; 相反, 则说明固定源贡献更大. 在本研究观测时段内, NO₃⁻/SO₄²⁻ 平均值为 1.57, 比北京^[30] (1.22, 2014 年)、上海^[29] (1.49, 2013 ~ 2014 年) 和苏州^[43] (1.53,

2015 年)都要高,说明在成都冬季,移动源对大气污染的贡献十分突出.与往年结果对比(表 2),成都地区 $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ 的比值呈现出升高趋势,这是由 SO_4^{2-} 浓度的显著降低和 NO_3^- 浓度的小幅度上升所造成的.近些年 $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ 比值的变化说明成都地区移动源对大气污染的贡献在不断增加,这与北京^[7]的变化趋势相同,改善空气质量需要加强对机动车尾气排放的控制.

2.2.3 OC 与 EC 的相关性分析

EC 来源于燃料高温燃烧产生的单质碳或难溶性高分子碳聚物,在大气环境中相对稳定^[44];而 OC 来源复杂,可分为由燃烧或生物源等直接排放的一次有机碳(POC)和由人为或天然源排放的挥发性有机物在大气中被氧化而生成的二次有机碳(SOC)^[45],对 OC 和 EC 的相关关系进行分析可以初步推断两者来源的一致性.本研究观测期间,白天和夜间 OC 与 EC 质量浓度的相关关系如图 4 所示.白天和夜间 OC 与 EC 的相关系数分别为 0.82 和 0.90 ($P < 0.01$),相关性都非常高,表明 OC 和 EC 来源较为一致,受燃烧源的影响较大^[46].

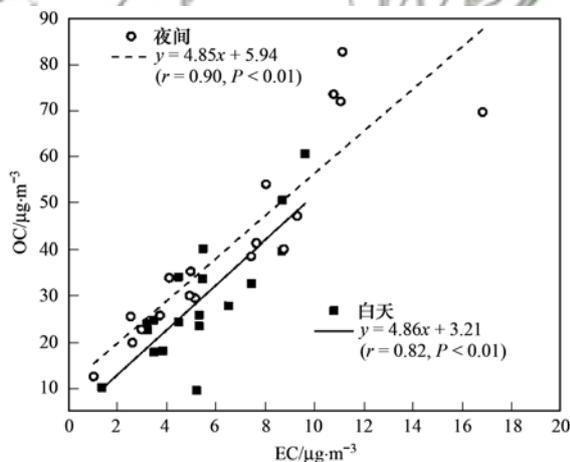


图 4 OC 与 EC 的相关性

Fig. 4 Correlation between OC and EC

观测期间白天和夜间 OC/EC 的平均值分别为 5.7 和 6.0,一般认为,OC/EC 大于 2 的时候,存在明显 SOC 的污染.使用 Turpin 等^[47]提出的经验公式来估算 SOC 大小,其公式如下:

$$\text{SOC} = \text{OC} - \text{EC} \times (\text{OC}/\text{EC})_{\text{pri}}$$

$$\text{POC} = \text{OC} - \text{SOC}$$

式中, $(\text{OC}/\text{EC})_{\text{pri}}$ 为采样期间 OC/EC 比值的最小值为 4.08,计算得到 SOC 在白天和夜间分别为 $8.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $11.9 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,分别占到 OC 的 28.1% 和 31.8%,表明 SOC 对成都冬季碳质气溶胶污染有重要影响.

由于生物质燃烧排放的碳质气溶胶 OC/EC 的

比值较高^[20],使用 Turpin 经验公式计算得到的 SOC 也可能包含有生物质燃烧的影响,但难以对其贡献进行定量计算. K^+ 作为生物燃烧的标志物,很多研究用来对生物质燃烧的贡献进行定性分析.以往研究显示 K^+/EC 比值在生物质和化石燃料中分别为 0.2 ~ 0.5 和 0.03 ~ 0.09^[48, 49],本研究中 K^+/EC 平均值为 0.31,表明生物质燃烧对成都冬季碳质气溶胶有一定影响.同时 K^+ 与 OC 之间较高的相关性 ($r = 0.87$, $P < 0.01$) 进一步说明了以上结论.

2.3 来源解析

根据水溶性离子和碳质气溶胶的质量浓度,使用 PCA 方法对成都冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 化学组分进行来源解析,分析结果见表 3.表中各化学组分载荷值表示不同因子与相应化学组分的相关性,载荷值越大,相关性越大,一般认为载荷值大于 0.5 的化学组分为因子(源类型)的指示物^[50].为得到更加清晰的指示物,使得各因子(源类型)中指示物的载荷值更加接近 1,而非指示物的载荷接近 0,在主成分分析时进行了最大方差旋转.在主成分分析提取因子时,保留了特征值大于 1.0 的因子.

表 3 $\text{PM}_{2.5}$ 化学组分主成分分析¹⁾

Table 3 Principal component analysis of the

$\text{PM}_{2.5}$ chemical composition

化学组分	因子 1	因子 2	因子 3
Na^+	0.545	0.142	0.605
NH_4^+	0.900	0.393	0.083
K^+	0.479	0.822	0.217
Mg^{2+}	0.082	0.085	0.903
Ca^{2+}	0.049	0.130	0.920
F^-	0.455	0.644	0.376
Cl^-	0.576	0.710	0.312
NO_3^-	0.859	0.457	0.041
SO_4^{2-}	0.930	0.220	0.170
OC	0.321	0.904	-0.031
EC	0.134	0.961	0.111
方差贡献/%	32.8	34.5	21.5
来源	二次无机污染	燃烧	土壤和扬尘

1) 黑字体表示在某一因子中具有更高载荷值的元素

从表 3 可以看出, $\text{PM}_{2.5}$ 中各化学组分经主成分分析后可提取出 3 个因子,这 3 个因子共解析了化学组分来源(方差贡献)的 88.8%. 因子 1,其载荷较大的组分为 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NH_4^+ ,这 3 个化学组分在因子 1 中的载荷值分别为 0.930、0.859 和 0.900. SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NH_4^+ 主要来源为二次转化过程,因此因子 1 可以代表二次无机源. 因子 2 中影响较大的组分为 EC、OC、 K^+ 和 Cl^- ,化石燃料和生物质的燃烧是 OC 和 EC 的重要来源,而 K^+ 则能够指示生物质的燃烧,同时在远离海洋的地区,

Cl⁻ 主要来源于煤的燃烧, 所以因子 2 表示燃烧源(燃煤、生物质燃烧等)。在因子 3 中, Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 载荷因子最大, Mg²⁺ 和 Ca²⁺ 是地壳元素的代表, 因此因子 3 主要为土壤和扬尘源。从 3 个因子方差贡献看, 二次无机源、燃烧源(燃煤、生物质燃烧等)以及土壤和扬尘源对 PM_{2.5} 的贡献分别为 32.8%、34.5% 和 21.5%, 燃烧源的贡献最大, 其次为二次无机离子, 土壤和扬尘源贡献相对较小。

3 结论

(1) 观测期间, 成都冬季 PM_{2.5} 污染严重, SNA 和 OC 是 PM_{2.5} 中的最主要成分; PM_{2.5} 及其化学组分的浓度水平变化基本一致, 在不同采样日之间差异很大; 昼夜污染对比表明, PM_{2.5} 夜间污染更重, 但 SNA 的浓度均白天高于夜间, 这与白天光照所导致的光化学反应二次生成有关; Cl⁻ 和 K⁺, 还有 OC 和 EC 夜间浓度更高, 这可能与冬季气温较低, 居民自发使用煤炭和生物质燃烧取暖有关。

(2) 与近些年成都冬季 PM_{2.5} 的采样和分析结果对比, SO₄²⁻ 呈现显著降低的趋势, 得益于成都地区对于气态前体物 SO₂ 的有效控制; NO₃⁻ 浓度呈现出增加趋势, 与汽车保有量的增加导致的汽车尾气排放有关; NH₄⁺ 浓度变化幅度很小。冬季 OC 质量浓度相比以往年份最高, EC 处于中间水平, 但 OC/EC 的比值较高。

(3) 成都地区 PM_{2.5} 的酸碱性发生了转折性变化, 由于 SO₄²⁻ 浓度的大幅度降低, NH₄⁺ 从过去的不足转为现在的相对富余, 对 PM_{2.5} 污染的贡献增加。近些年 NO₃⁻/SO₄²⁻ 的比值不断增加, 移动源对大气污染的贡献十分突出。白天和夜间 OC 与 EC 都有较高的相关性, OC 和 EC 来源较为一致。SOC 的形成和生物质燃烧对冬季碳质气溶胶的污染有重要影响。

(4) PCA 分析结果表明, 观测期间成都 PM_{2.5} 主要来源于燃烧源(燃煤、生物质燃烧等)、二次无机源以及土壤和扬尘源, 其相对贡献分别为 32.8%、34.5% 和 21.5%。

参考文献:

[1] Cheng Z, Luo L N, Wang S X, *et al.* Status and characteristics of ambient PM_{2.5} pollution in global megacities[J]. *Environment International*, 2016, **89-90**: 212-221.

[2] Wang J D, Zhao B, Wang S X, *et al.* Particulate matter pollution over China and the effects of control policies[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **584-585**: 426-447.

[3] Huang R J, Zhang Y L, Bozzetti C, *et al.* High secondary aerosol contribution to particulate pollution during haze events in China[J]. *Nature*, 2014, **514**(7521): 218-222.

[4] Yang H N, Chen J, Wen J J, *et al.* Composition and sources of

PM_{2.5} around the heating periods of 2013 and 2014 in Beijing: Implications for efficient mitigation measures[J]. *Atmospheric Environment*, 2016, **124**: 378-386.

[5] Lang J L, Zhang Y Y, Zhou Y, *et al.* Trends of PM_{2.5} and chemical composition in Beijing, 2000-2015[J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2017, **17**(2): 412-425.

[6] Zhao M F, Huang Z S, Qiao T, *et al.* Chemical characterization, the transport pathways and potential sources of PM_{2.5} in Shanghai: Seasonal variations[J]. *Atmospheric Research*, 2015, **158-159**: 66-78.

[7] 杜博涵, 黄晓锋, 何凌燕, 等. 宁波市 PM_{2.5} 中碳组分的时空分布特征和二次有机碳估算[J]. *环境科学*, 2015, **36**(9): 3128-3134.

Du B H, Huang X F, He L Y, *et al.* Seasonal and spatial variations of carbon fractions in PM_{2.5} in Ningbo and the estimation of secondary organic carbon[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(9): 3128-3134.

[8] 郑张, 张延君, 闫才青, 等. 上海 PM_{2.5} 工业源谱的建立[J]. *中国环境科学*, 2013, **33**(8): 1354-1359.

Zhen M, Zhang Y J, Yan C Q, *et al.* Establishing PM_{2.5} industrial source profiles in Shanghai[J]. *China Environmental Science*, 2013, **33**(8): 1354-1359.

[9] Zhang W, Guo J H, Sun Y L, *et al.* Source apportionment for urban PM₁₀ and PM_{2.5} in the Beijing area[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, **52**(5): 608-615.

[10] Gao J, Peng X, Chen G, *et al.* Insights into the chemical characterization and sources of PM_{2.5} in Beijing at a 1-h time resolution[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **542**: 162-171.

[11] 王苏蓉, 喻义勇, 王勤耕, 等. 基于 PMF 模式的南京市大气细颗粒物源解析[J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(12): 3535-3542.

Wang S R, Yu Y Y, Wang Q G, *et al.* Source apportionment of PM_{2.5} in Nanjing by PMF[J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(12): 3535-3542.

[12] 张懿华, 王东方, 赵倩彪, 等. 上海城区 PM_{2.5} 中有机碳和元素碳变化特征及来源分析[J]. *环境科学*, 2014, **35**(9): 3263-3270.

Zhang YH, Wang D F, Zhao Q B, *et al.* Characteristics and sources of organic carbon and elemental carbon in PM_{2.5} in Shanghai urban area[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(9): 3263-3270.

[13] 张小曳, 孙俊英, 王亚强, 等. 我国雾-霾成因及其治理的思考[J]. *科学通报*, 2013, **58**(13): 1178-1187.

Zhang X Y, Sun J Y, Wang Y Q, *et al.* Factors contributing to haze and fog in China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, **58**(13): 1178-1187.

[14] Chan C K, Yao X H. Air pollution in mega cities in China[J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(1): 1-42.

[15] Xu X, Zhao T, Liu F, *et al.* Climate modulation of the Tibetan Plateau on haze in China[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, **16**(3): 1365-1375.

[16] Wang J, Zhou M, Liu B S, *et al.* Characterization and source apportionment of size-segregated atmospheric particulate matter collected at ground level and from the urban canopy in Tianjin[J]. *Environmental Pollution*, 2016, **219**: 982-992.

[17] Xiang P, Zhou X M, Duan J C, *et al.* Chemical characteristics of water-soluble organic compounds (WSOC) in PM_{2.5} in Beijing, China; 2011-2012[J]. *Atmospheric Research*, 2016, **183**: 104-112.

[18] Chen W H, Wang X M, Zhou S Z, *et al.* Chemical composition

- of PM_{2.5} and its impact on visibility in Guangzhou, southern China[J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2016, **16**(10): 2349-2361.
- [19] Yang H, Yu J Z, Ho S S H, *et al.* The chemical composition of inorganic and carbonaceous materials in PM_{2.5} in Nanjing, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(20): 3735-3749.
- [20] Tao J, Zhang L M, Engling G, *et al.* Chemical composition of PM_{2.5} in an urban environment in Chengdu, China: Importance of springtime dust storms and biomass burning[J]. *Atmospheric Research*, 2013, **122**: 270-283.
- [21] Li L L, Tan Q W, Zhang Y H, *et al.* Characteristics and source apportionment of PM_{2.5} during persistent extreme haze events in Chengdu, southwest China[J]. *Environmental Pollution*, 2017, **230**: 718-729.
- [22] 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.
- [23] 郭晓梅. 四川盆地空气质量气候特征及其大地形影响效应的观测模拟研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2016.
- Guo X M. Observed and simulated research on climate characteristic of air quality and the topographic induced effects in Sichuan Basin[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2016.
- [24] Yu S H, Gao W L, Xiao D X, *et al.* Observational facts regarding the joint activities of the southwest vortex and plateau vortex after its departure from the Tibetan Plateau[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2016, **33**(1): 34-46.
- [25] Liao T T, Wang S, Ai J, *et al.* Heavy pollution episodes, transport pathways and potential sources of PM_{2.5} during the winter of 2013 in Chengdu (China) [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **584-585**: 1056-1065.
- [26] Zhou J B, Xing Z Y, Deng J J, *et al.* Characterizing and sourcing ambient PM_{2.5} over key emission regions in China I: water-soluble ions and carbonaceous fractions [J]. *Atmospheric Environment*, 2016, **135**: 20-30.
- [27] 林瑜, 叶芝祥, 杨怀金, 等. 成都市西南郊区春季大气 PM_{2.5} 的污染水平及来源解析[J]. *环境科学*, 2016, **37**(5): 1629-1638.
- Lin Y, Ye Z X, Yang H J, *et al.* Pollution level and source apportionment of atmospheric particles PM_{2.5} in southwest suburb of Chengdu in spring [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(5): 1629-1638.
- [28] Wang Y N, Jia C H, Tao J, *et al.* Chemical characterization and source apportionment of PM_{2.5} in a semi-arid and petrochemical-industrialized city, Northwest China [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **573**: 1031-1040.
- [29] Ming L, Jin L, Li J, *et al.* PM_{2.5} in the Yangtze River Delta, China: chemical compositions, seasonal variations, and regional pollution events[J]. *Environmental Pollution*, 2017, **223**: 200-212.
- [30] 丛晓光, 程玲珑, 王莉莉, 等. 北京城区灰霾期间大气 PM_{2.5} 中水溶性离子污染特征及来源研究[J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 2017, **38**(1): 49-57.
- Cong X G, Cheng L L, Wang L L, *et al.* The mass concentration levels, diurnal variation and source apportionment of water-soluble inorganic ions in PM_{2.5} during haze days in Beijing urban area [J]. *Journal of Capital Normal University (Natural Sciences Edition)*, 2017, **38**(1): 49-57.
- [31] Tao J, Zhang L M, Cao J J, *et al.* Source apportionment of PM_{2.5} at urban and suburban areas of the Pearl River Delta region, south China-with emphasis on ship emissions [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **574**: 1559-1570.
- [32] 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.
- [33] 郑玫, 张延君, 闫才青, 等. 中国 PM_{2.5} 来源解析方法综述 [J]. 北京大学学报(自然科学版), 2014, **50**(6): 1141-1154.
- Zheng M, Zhang Y J, Yan C Q, *et al.* Review of PM_{2.5} source apportionment methods in China [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2014, **50**(6): 1141-1154.
- [34] 吴丹, 曹双, 汤莉莉, 等. 南京北郊大气颗粒物的粒径分布及其影响因素分析 [J]. *环境科学*, 2016, **37**(9): 3268-3279.
- Wu D, Cao S, Tang L L, *et al.* Variation of size distribution and the influencing factors of aerosol in northern suburbs of Nanjing [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(9): 3268-3279.
- [35] Hu W, Hu M, Hu W W, *et al.* Characterization of submicron aerosols influenced by biomass burning at a site in the Sichuan Basin, southwestern China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, **16**(20): 13213-13230.
- [36] 张智胜, 陶俊, 谢绍东, 等. 成都城区 PM_{2.5} 季节污染特征及来源解析[J]. *环境科学学报*, 2013, **33**(11): 2947-2952.
- Zhang Z S, Tao J, Xie S D, *et al.* Seasonal variations and source apportionment of PM_{2.5} at urban area of Chengdu [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, **33**(11): 2947-2952.
- [37] 陈源, 谢绍东, 罗彬. 成都市大气细颗粒物组成和污染特征分析(2012-2013年) [J]. *环境科学学报*, 2016, **36**(3): 1021-1031.
- Chen Y, Xie S D, Luo B. Composition and pollution characteristics of fine particles in Chengdu from 2012 to 2013 [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(3): 1021-1031.
- [38] 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.
- [39] Jang M, Czoschke N M, Lee S, *et al.* Heterogeneous atmospheric aerosol production by acid-catalyzed particle-phase reactions [J]. *Science*, 2002, **298**(5594): 814-817.
- [40] Wang Y, Zhuang G S, Zhang X Y, *et al.* The ion chemistry, seasonal cycle, and sources of PM_{2.5} and TSP aerosol in Shanghai [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(16): 2935-2952.
- [41] Yao X H, Chan C K, Fang M, *et al.* The water-soluble ionic composition of PM_{2.5} in Shanghai and Beijing, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2002, **36**(26): 4223-4234.
- [42] Arimoto R, Duce R A, Savoie D L, *et al.* Relationships among aerosol constituents from Asia and the North Pacific during PEM-West A [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1996, **101**(D1): 2011-2023.
- [43] 王念飞, 陈阳, 郝庆菊, 等. 苏州市 PM_{2.5} 中水溶性离子的季节变化及来源分析 [J]. *环境科学*, 2016, **37**(12): 4482-4489.
- Wang N F, Chen Y, Hao Q J, *et al.* Seasonal variation and source analysis of the water-soluble inorganic ions in fine particulate matter in Suzhou [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(12): 4482-4489.
- [44] Turpin B J, Huntzicker J J. Identification of secondary organic

- aerosol episodes and quantitation of primary and secondary organic aerosol concentrations during SCAQS [J]. *Atmospheric Environment*, 1995, **29**(23): 3527-3544.
- [45] Pandis S N, Harley R A, Cass G R, *et al.* Secondary organic aerosol formation and transport [J]. *Atmospheric Environment. Part A. General Topics*, 1992, **26**(13): 2269-2282.
- [46] Yang L X, Zhou X H, Wang Z, *et al.* Airborne fine particulate pollution in Jinan, China: concentrations, chemical compositions and influence on visibility impairment [J]. *Atmospheric Environment*, 2012, **55**: 506-514.
- [47] Turpin B J, Lim H J. Species contributions to PM_{2.5} mass concentrations: revisiting common assumptions for estimating organic mass [J]. *Aerosol Science and Technology*, 2001, **35**(1): 602-610.
- [48] Andreae M O. Soot carbon and excess fine potassium: long-range transport of combustion-derived aerosols [J]. *Science*, 1983, **220**(4602): 1148-1151.
- [49] Vicente A, Alves C, Calvo A I, *et al.* Emission factors and detailed chemical composition of smoke particles from the 2010 wildfire season [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **71**: 295-303.
- [50] Callén M S, de la Cruz M T, López J M, *et al.* Comparison of receptor models for source apportionment of the PM₁₀ in Zaragoza (Spain) [J]. *Chemosphere*, 2009, **76**(8): 1120-1129.



CONTENTS

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