

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.5  
第41卷 第5期

目次

上海大气 PM<sub>2.5</sub> 来源解析对比:基于在线数据运用3种受体模型 ..... 周敏(1997)

不同浓度臭氧对单颗粒气溶胶化学组成的影响 ..... 吴梦曦,成春雷,黄渤,李梅,陈多宏(2006)

二次有机气溶胶壳对氯化钠核吸湿性的影响:基于单颗粒微观尺度 ..... 张淑佳,徐亮,郭新梅,黄道,李卫军(2017)

城区与县区不同空气质量下碳组分污染特征对比分析 ..... 李欣悦,张凯山,邓林俐,向铤鹏,武文琪,殷子渊(2026)

临沂市 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 中元素分布特征及来源解析 ..... 陆平,赵雪艳,殷宝辉,张楠,王歆华,余浩,杨文,王晓丽(2036)

西安市秋冬季市区与山区微生物气溶胶组成特征及来源 ..... 谢雯文,路瑞,慕云飞,戚玉珍,白文艳,李彦鹏(2044)

北京市典型餐饮企业大气污染物排放特征 ..... 何万清,王天意,邵霞,聂磊,石爱军(2050)

基于随机森林模型的中国 PM<sub>2.5</sub> 浓度影响因素分析 ..... 夏晓圣,陈菁菁,王佳佳,程先富(2057)

大气污染联合治理分区视角下的中国 PM<sub>2.5</sub> 关联关系时空变异特征分析 ..... 杨文涛,黄慧坤,魏东升,赵斌,彭焕华(2066)

基于地-空观测数据的粤港澳大湾区大气污染调查及时空演变特征 ..... 王耀庭,梁加成,郑祚芳,李青春,李威,窦有俊(2075)

龙子祠泉域岩溶地下水水化学特征及成因 ..... 唐春雷,郑秀清,梁永平(2087)

三峡水库总磷时空变化特征及滞留效应分析 ..... 唐小娅,童思陈,黄国鲜,许光祥,李丹(2096)

三峡水库汛后蓄水期典型支流溶解氧与叶绿素 a 垂向分布特征 ..... 杨凡,纪道斌,王丽婧,李虹,李莹杰(2107)

汉丰湖正式运行年水体营养盐分布特征 ..... 付适,倪九派,何丙辉,李天阳,唐毅,钱田,向可翠(2116)

白洋淀水体富营养化和沉积物污染时空变化特征 ..... 刘鑫,史斌,孟晶,周云桥,可欣,王铁宇(2127)

新安江水库悬浮颗粒物时空分布、沉降通量及其营养盐效应 ..... 史鹏程,朱广伟,杨文斌,许海,朱梦圆,刘明亮,虞左明,吴志旭,郑文婷,王裕成,笄文怡,胡林娜(2137)

不同水文情景下高邮湖、南四湖和东平湖有色可溶性有机物的生物可利用性特征 ..... 张柳青,石玉,李元鹏,郭燕妮,周蕾,周永强,张运林,杨艳(2149)

水源水藻类功能群落演替特征及水质评价 ..... 李衍庆,黄廷林,张海涵,温成成,杨尚业,林子深,高欣(2158)

人工强制混合对金盆水库水体藻类群落结构时空演替的影响 ..... 王晨旭,黄廷林,李楠,齐允之,徐金兰,司凡,张晗,路林超(2166)

雄安新区-白洋淀冬季冰封期水体好氧反硝化菌群落空间分布特征及驱动因素 ..... 周石磊,孙悦,岳智丞,张航,王周强,刘世崇,彭瑞哲,苑世超,李再兴,崔建升(2177)

分层型水库水体好氧不产氧光合细菌时空演替特征 ..... 张海涵,王燕,黄廷林,王晨旭,路林超,司凡,李楠,刘凯文,闫苗苗,苗雨甜(2188)

大型通江湖泊有色可溶性有机物对不同水文情景的响应 ..... 郭燕妮,李元鹏,石玉,张柳青,周蕾,周永强,张运林,韩龙飞(2198)

秦岭北麓河流夏季有色溶解有机物分布特征及影响因素 ..... 林子深,黄廷林,杨尚业,温成成,李衍庆,周石磊,宋选社(2210)

长江下游支流水体中多环芳烃的分布及生态风险评估 ..... 贾天琪,雷荣荣,武小琳,倪涛涛,孙树睿,郭伟,刘文彬(2221)

太湖水体中 NSAIDs 的时空分布规律和生态风险评估 ..... 廉杰,李祎飞,王晓喧,叶彬,邹华,史红星(2229)

8种典型 PhACs 在水中的赋存、生态风险及其对大型溞的影响 ..... 徐鑫磊,刘建超,陆光华(2239)

我国南方桉树人工林区水库沉积物污染物的分布特征及迁移规律 ..... 朱雅,李一平,罗凡,李荣辉,黄列,程一鑫,蒋裕丰(2247)

基于连续监测的城市内河返黑返臭机制初探:以南宁市二坑溪为例 ..... 李永新,王威,何妹,申泰铭(2257)

城郊流域源汇景观格局与水体抗生性的关系 ..... 李敏,唐剑锋,陈利顶,赵方凯,冯青郁,杨磊(2264)

城市雨水径流中溶解性有机物的分子化学多样性 ..... 聂云汉,陈浩,李磊,朱奕,赵昕,贾其隆,徐慧婷,叶建锋(2272)

方解石/氯磷灰石混合物添加对水体内源磷迁移转化的调控效应和机制 ..... 柏晓云,林建伟,詹艳慧,常明玥,吴俊麟,辛慧敏,黄良君(2281)

不同环境条件下水铁矿和针铁矿纳米颗粒稳定性 ..... 王智巧,马杰,陈雅丽,翁莉萍,顾亚陶,李永涛(2292)

向日葵秸秆生物炭强化 Fe(III)/S<sub>2</sub>O<sub>8</sub><sup>2-</sup> 体系降解苯甲酸 ..... 孙鹏,张凯凯,张玉,张延荣(2301)

非活化单过硫酸盐降解柳氯磺胺吡啶:动力学及机制 ..... 丁曦,张学维,周润生,宋哲,严佳颖,周磊,修光利(2310)

贵州某规模化养猪场废水中抗生素的污染特征及去除效果 ..... 杨钊,李江,向福亮,李彦澄,马凯,谢锋(2320)

新型填料 A/O 生物滤池处理低碳氮比农村污水脱氮 ..... 赵远哲,杨永哲,王海燕,储昭升,常洋,董伟羊,闫国凯,王欢,李丛宇(2329)

贫营养好氧反硝化菌株的脱氮特性及氮/碳平衡分析 ..... 文刚,王彤,黄廷林,万琪琪,曹瑞华,寇莉青,杨尚业(2339)

连续流 SNAD 工艺处理猪场沼液启动过程中微生物种群演变及脱氮性能 ..... 秦嘉伟,信欣,鲁航,张萍萍,王露蓉,邹长武,郭俊元(2349)

不同培养条件厌氧氨氧化颗粒污泥活性及微生物群落结构差异 ..... 姜滢,郭萌蕾,谢军祥,常尧枫,谢嘉玮,陈重军,沈耀良(2358)

反硝化除磷耦合部分亚硝化-厌氧氨氧化一体式工艺的启动 ..... 陈亚,印雯,张星星,张钰,宋吟玲,吴鹏,徐乐中(2367)

土壤环境承载力评价体系构建与应用 ..... 李笑诺,丁寿康,陈卫平,王夏晖,吕斯丹,刘睿(2373)

磁性生物炭的合成及对土壤重金属污染的钝化效果 ..... 王俊楠,程珊珊,展文豪,任强,马晓宇,王洋洋(2381)

还原增溶强化 EGTA 淋洗修复重金属污染土壤 ..... 张金永,朱玉婷,王明新,韩莹,葛嘉琦(2390)

不同价态铬和土壤理化性质对大麦根系毒性阈值的影响 ..... 付平南,贡晓飞,罗丽韵,王琪,李花粉(2398)

生物炭施用对紫色土旱坡地土壤氮流失形态及通量的影响 ..... 王舒,王子芳,龙翼,严冬春,慈恩,徐国鑫,李娇,高明(2406)

长期撂荒恢复土壤团聚体组成与有机碳分布关系 ..... 王兴,钟泽坤,张欣怡,吴少君,卢绪巧,杨改河,任成杰,韩新辉(2416)

施用生物炭对壤土土壤微生物代谢养分限制和碳利用效率的影响 ..... 王强,耿增超,许晨阳,郭靖宇,李倩倩,刘莉丽,赵汉红,杜旭光(2425)

间种高粱及施用大颗粒尿素对茶园 N<sub>2</sub>O 排放的影响 ..... 张珂彬,刘新亮,康曼,王毅,沈健林,李勇(2434)

缙云山森林植被类型对土壤 N<sub>2</sub>O 相关功能微生物的影响 ..... 王盛燕,王富华,罗东海,昌盛,王子芳,高明(2445)

咸水滴灌对棉田土壤 N<sub>2</sub>O 排放和反硝化细菌群落结构的影响 ..... 郭慧楠,马丽娟,黄志杰,李美琪,侯振安,闵伟(2455)

有机质提升对酸性红壤氮循环功能基因及功能微生物的影响 ..... 储成,吴赵越,黄欠如,韩成,钟文辉(2468)

模拟酸雨对毛竹阔叶林过渡带土壤真菌结构及其多样性的影响 ..... 王楠,潘小承,王传宽,白尚斌(2476)

海洋沉积物中细菌 DNA 和 RNA 水平群落差异 ..... 李明月,杨雨虹,米铁柱,贺惠,甄毓(2485)

2003~2013年中国湿地变化的空间格局与关联性 ..... 周婷,马姣姣,徐颂军(2496)

《环境科学》征订启事(2086) 《环境科学》征稿简则(2187) 信息(2209, 2263, 2309)

# 城区与县区不同空气质量下碳组分污染特征对比分析

李欣悦, 张凯山\*, 邓林俐, 向铤鹏, 武文琪, 殷子渊

(四川大学建筑与环境学院, 成都 610065)

**摘要:** 为对比城区与相邻县区不同空气质量下的碳组分污染特征, 分别在成都市和仁寿县采集霾期及非霾期  $PM_{2.5}$  有效样品共计 88 个, 确定其相应质量和各碳组分浓度[有机碳(OC)、元素碳(EC)和二次有机碳(SOC)等], 并进行各碳组分之间的相关性分析及主成分分析. 结果表明, 不同空气质量下的城区污染物浓度均高于县区. OC 和 EC 密切相关, 非霾期的相关性系数较霾期大. 与城区相比, 霾期县区的 SOC/ $PM_{2.5}$  较大, 说明其受二次有机碳污染更为明显; 但城区非霾期二次气溶胶占比明显高于霾期, 表明霾期的一次排放是城区大气污染的主要原因. 燃煤、机动车排放和生物质燃烧均是两个区域  $PM_{2.5}$  的主要来源.

**关键词:**  $PM_{2.5}$ ; 有机碳; 元素碳; 二次有机碳; 霾

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)05-2026-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.201909079

## Comparative Analysis of Pollution Characteristics of Carbonaceous Aerosol Components in the Atmosphere Between Urban and Suburban Areas

LI Xin-yue, ZHANG Kai-shan\*, DENG Lin-li, XIANG Xin-peng, WU Wen-qi, YIN Zi-yuan

(College of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** To compare the pollution characteristics of carbonaceous aerosol components in the atmosphere between urban and suburban areas, Chengdu City and Renshou County were selected as study areas from which 88 samples of  $PM_{2.5}$  during haze and non-haze periods were collected and analyzed. Quantification of mass concentrations of  $PM_{2.5}$ , carbonaceous aerosol components [organic carbon (OC), elemental carbon (EC), and secondary organic carbon (SOC)], along with correlation analysis of OC and EC, and principal component analysis (PCA) of carbon components were carried out. The results show that pollutant concentrations during the haze period were higher than those during the non-haze period. The OC and EC for Chengdu City and Renshou County were positively correlated, with their correlation coefficients during the non-haze period higher than those during the haze period. The ratios of SOC/ $PM_{2.5}$  in Renshou County were higher than those in Chengdu City during the haze period. This indicates that secondary aerosols play a more important role in haze formation in Renshou than in Chengdu City. In contrast, the proportion of secondary aerosols during the non-haze period in Chengdu City was significantly higher, indicating that direct emissions are still the main cause of air pollution in Chengdu City. PCA results showed that  $PM_{2.5}$  formation in both Chengdu City and Renshou County was mainly due to coal burning, vehicle operation, and biomass burning.

**Key words:**  $PM_{2.5}$ ; organic carbon; elemental carbon; secondary organic carbon; haze

近年来,霾的频繁发生严重影响城市的空气质量和人体健康<sup>[1]</sup>,研究霾成因及颗粒物组分,对减少霾发生有指导意义.霾天气指的是,在某一区域及某一时段内,由非突发排放导致的各类污染物浓度急剧增加,能见度严重降低,从而导致空气质量急剧恶化的污染事件<sup>[2]</sup>,而大气颗粒物(特别是空气动力学当量直径小于  $2.5 \mu m$  的  $PM_{2.5}$ )是霾问题的主要贡献者<sup>[3]</sup>.

碳组分是大气颗粒物组分中的重要部分之一,占大气颗粒物的 20%~50%<sup>[4,5]</sup>.颗粒物碳组分主要为有机碳(organic carbon, OC)、元素碳(elemental carbon, EC)及少量的碳酸盐碳(carbonate carbon, CC),其中 CC 含量一般不超过总碳(total carbon, TC)的 5%.OC 主要包括由污染源(化石及生物质燃料)直接排放而产生的一次有机碳(primary organic carbon, POC)和前体物经过大气物理化学反应生成的二次有机碳(secondary organic carbon,

SOC).EC 来源于各种含碳物质的不完全燃烧,其表面具有吸附活性<sup>[6]</sup>,在传输过程中会吸附有机物及有毒物质.有研究表明,霾天气下,大气颗粒物及 OC、EC 大幅度增长,且 EC 作为大气化学反应的载体和催化剂,能够促进大气化学反应,从而加重霾<sup>[7,8]</sup>.除此之外, $PM_{2.5}$  中的 OC 产生光散射作用,EC 产生光吸收作用,影响大气能见度.二次有机碳(SOC)主要是气态污染物通过气相反应、颗粒物表面液相和非均相反应生成,其是二次气溶胶的重要组成部分,对霾的形成有贡献.

国内针对颗粒物碳组分展开了一系列研究,研究主要集中在经济发展较快且污染严重的区域<sup>[9,10]</sup>及城市<sup>[11~14]</sup>,例如,有研究分析了关中地区碳组分

收稿日期: 2019-09-09; 修订日期: 2019-11-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(41877395)

作者简介: 李欣悦(1995~),女,硕士研究生,主要研究方向为颗粒物采样测量及分析、环境数据统计分析, E-mail: lixinyue.lxy@foxmail.com

\* 通信作者, E-mail: zhangkaishan@scu.edu.cn

污染的空间分布及季节性差异,并解析了大气颗粒物碳组分的主要来源<sup>[15]</sup>,除此之外,亦有研究探究北京市不同粒径大气颗粒物的碳组分污染特征,特别关注 SOC 在不同粒径颗粒物中的积聚情况<sup>[16]</sup>.但近年来为减少城区污染,中心城区企业大量外迁至郊区,致中心城区内无大型工业企业,其基本集中在城郊区域.2017 年成都市城郊工业能耗为成都市主城五区工业能耗的 8.3 倍,城郊工业企业数为成都市主城五区的 5.7 倍<sup>[17]</sup>,可见,城郊工业相对集中.由此,在控制城市污染的同时,加重了郊区城区的污染,与郊区城区相邻的区县也不可避免受其影响.此类政策的影响下,仅仅关注和研究城区的污染情况是远远不够的,需对比城区和城区相邻县区的污染情况,探究其污染差异.为了解工业布局改变导致的污染成因变化,同时为城市工业发展模式提供理论支持,有效控制城市污染,从而提出了本研究.

选取成都市及仁寿县为本研究对象,成都市为市级行政区的典型代表,仁寿县为县级行政区的典型代表,且与成都市南部接壤.成都市地势平坦,而仁寿县地处丘陵,两个区域的区域面积,人口数量,经济结构和产业结构等存在明显差异<sup>[17,18]</sup>.

本研究对比城区及与城郊相邻的县区,探究两不同区域在不同空气质量下的碳组分污染特征,重点关注多种碳组分在不同空气质量下浓度变化,通过了解霾形成的影响因素,以期为区域大气污染防治提供理论支持.

## 1 材料与方 法

### 1.1 采样地点与采样设备

为了对比分析较发达中心城市和其相邻郊县在大气污染方面是否由于产业结构和区域特征的差异而存在不同,并为后续区域经济和环境的协调发展提供借鉴,本研究在大气颗粒物采样点的选择上主要考虑在研究区域内,采样点既可代表区域环境的主要特点,同时也能区分中心城区和郊区.此外,采样点应布设在相应区域内的主导风向范围内,且采样点附近均无大型工业厂区及集中餐饮区.据此,成都市的两个采样点分别设于电子科大及凤凰山.电子科大位于成都市一环,代表城市中心区域;凤凰山位于成都市三环,代表城郊区域.仁寿县的两个采样点分别设于仁寿县审计局及峰密山.其中审计局位于县区中心区域,代表县城区域,峰密山位于县郊,代表县郊区域.采样点如图 1 所示.

本研究使用中流量采样器(青岛路博 LB-120F 型)采样,采样流量为  $100 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ ,每日采集 24 h.



图 1 成都市及仁寿县  $\text{PM}_{2.5}$  采样点示意

Fig. 1  $\text{PM}_{2.5}$  sampling point locations in Chengdu City and Renshou County

选取石英滤膜( $\phi 90 \text{ mm}$ )收集  $\text{PM}_{2.5}$  样品.

### 1.2 采样时间与气象数据获取

为量化分析霾期与非霾期的污染物变化,本研究结合历年成都市与仁寿县空气质量情况,以及霾发生的典型时段,选取 2018 年 9 月~10 月(非霾期)、2018 年 12 月至 2019 年 1 月(霾期)和 2019 年 3 月~4 月(非霾期)这 3 个时段进行颗粒物采样.仁寿县采集霾期  $\text{PM}_{2.5}$  样品 12 个,非霾期  $\text{PM}_{2.5}$  样品 16 个,成都市采集霾期样品 18 个,非霾期样品 42 个.共采集有效  $\text{PM}_{2.5}$  样品 88 个.

基于文献[19,20],判断霾期及非霾期.

本研究的霾期包括:①能见度小于 3 km 且相对湿度小于 80%;②能见度小于 3 km 且相对湿度大于等于 80%, $\text{PM}_{2.5}$  浓度大于  $115 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  且小于等于  $150 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ;③能见度小于 5 km, $\text{PM}_{2.5}$  浓度大于  $150 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  且小于等于  $250 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ .其中仁寿县霾期符合①,成都市霾期符合③.

本研究获取同采样时间段内成都市及仁寿县的气象数据,包括温度、相对湿度、能见度以及风速数据.成都市气象数据来自成都市 10 个观象台的数据,即彭州站、郫县站、温江站、崇州站、双流站、新津站、大邑站、邛崃站、新都站及金堂站.仁寿县气象数据来自仁寿县观象台.

### 1.3 样品前处理及碳组分分析

本研究严格执行《环境空气颗粒物( $\text{PM}_{2.5}$ )手

工监测方法(重量法)技术规范》(HJ 656-2013)<sup>[21]</sup>中对样品前处理、运输和储存的要求。

采样前对石英滤膜进行马弗炉高温处理(600℃),从而除去滤膜中的挥发性有机碳.将滤膜放在恒温恒湿设备(上海一恒 LHS-80HC-1;温度:20℃±1℃;湿度:50%±5%)中平衡 24 h 后称量空白滤膜质量.采样结束当日将采样样品放入 4℃ 的冰箱中冷藏保存,运回实验室平衡 24 h 后称量.每张滤膜 3 次称量取平均值,保证误差小于 0.03 mg,利用重量法得所采集颗粒物质量浓度。

本研究采用热光有机碳元素分析仪(DRI-2001A 型)对石英膜样品中的碳组分进行测定.通过

测定,得到 7 个温阶下的有机碳(OC)即 OC1、OC2、OC3 和 OC4 以及元素碳(EC)即 EC1、EC2 和 EC3,其定量环境表 1 所示.在高温条件下,部分有机碳(OC)由于焦化作用成裂解碳(OP),因此有机碳(OC)、元素碳(EC)和总碳(TC)的计算公式为:

$$OC = OC1 + OC2 + OC3 + OC4 + OP \quad (1)$$

$$EC = EC1 + EC2 + EC3 - OP \quad (2)$$

$$TC = OC + EC \quad (3)$$

式中,OC1、OC2、OC3 和 OC4 指无氧加热时段与各个温度台阶相对应的碳,EC1、EC2 和 EC3 指有氧加热步骤中对应各个温度台阶的碳.OP 指从 OC 碳化过程中形成的碳化碳,即为裂解碳<sup>[22]</sup>.

表 1 多种碳组分的定量环境及源谱特征

Table 1 Quantitative environmental and source spectrum features of various carbon components

组分	定量环境		源谱特征
	气体环境	温阶/℃	
OC1	惰性环境(纯氮)	140	生物质燃烧 <sup>[23]</sup>
OC2		280	燃煤 <sup>[24]</sup>
OC3		480	道路尘 <sup>[25]</sup> 汽油车尾气 <sup>[23,26]</sup>
OC4		580	道路尘 <sup>[25]</sup> 汽油车尾气 <sup>[23,26]</sup>
EC1	有氧环境(98%氮+2%氧)	580	机动车尾气 <sup>[24]</sup> 汽油车尾气 <sup>[23,26]</sup>
EC2		740	柴油车尾气 <sup>[23]</sup>
EC3		840	柴油车尾气 <sup>[23]</sup>
OP	633 nm 的 He-Ne 激光定量		生物质燃烧 <sup>[23]</sup>

为了保证实验的准确性,以同样的测定方法对空白石英膜进行测试,共测得 5 组空白膜数据,取均值后,从样品测定结果中扣除空白膜测定结果。

颗粒物样品中 8 个碳组分的丰度可以表现源谱特征,如表 1.本研究使用 SPSS 软件对不同空气质量的 8 种碳组分的浓度进行主成分分析。

#### 1.4 碳组分分析方法

##### 1.4.1 OC 与 EC 相关性分析

OC 与 EC 的相关性可用于判断 OC 与 EC 来源是否存在一致性<sup>[27]</sup>.例如,研究表明<sup>[28]</sup>,OC 与 EC 回归方程为:

$$OC = a \times EC + b \quad (4)$$

式中, $a \times EC$  表示燃烧直接排放的 OC, $b$  表示为非燃烧源排放的 OC 背景浓度.因此,本研究根据测量结果建立 OC 与 EC 回归曲线中的系数大小研究这两者的相关性.系数  $a$  越大,则碳质气溶胶受一次排放影响更大<sup>[9]</sup>.

##### 1.4.2 二次有机碳估算

OC/EC 比值是确定污染源排放和碳质气溶胶转化特征的重要指标.研究表明<sup>[29]</sup>,OC/EC 值大于 2 时,可认为有二次有机碳(SOC)的生成.本研究采用 OC/EC 最小比值法估算 SOC 的浓度.OC/EC 的最小比值法计算公式为<sup>[30,31]</sup>:

$$POC = EC \times (OC/EC)_{\min} \quad (5)$$

$$SOC = OC - POC \quad (6)$$

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同空气质量下污染物及气象因素特征分析

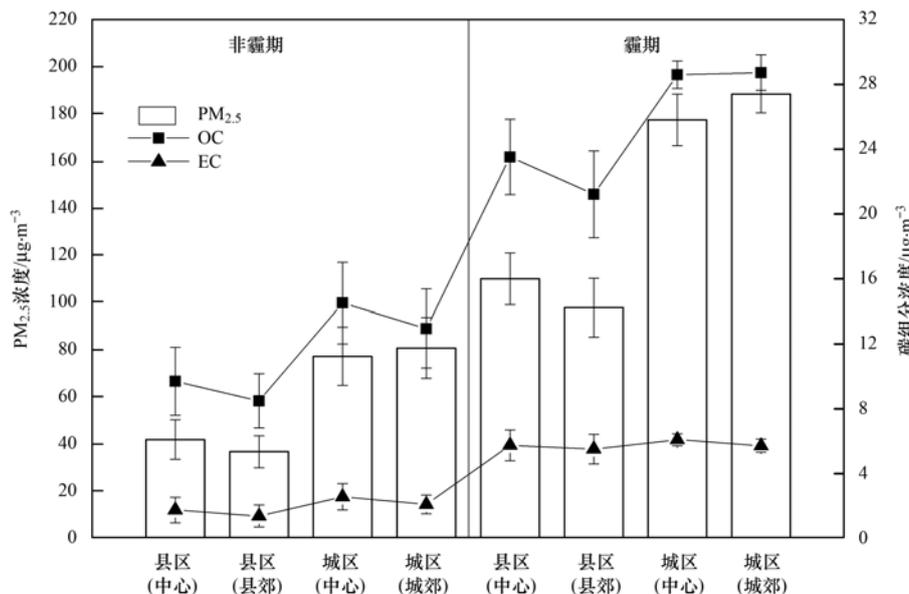
以下研究在不同空气质量下,不同区域的 PM<sub>2.5</sub> 及其碳组分的浓度变化规律,以及和气象条件之间的相关性。

#### 2.1.1 不同采样点污染物浓度差异

图 2 列出了不同污染条件下,成都市和仁寿县不同采样点的 PM<sub>2.5</sub> 及其碳组分浓度.正如预见一般,霾期的污染物浓度高于非霾期.但总体而言,同一区域内的不同采样点之间的污染物浓度相差不大.这与同一区域内两个采样点的地理位置相近,其空间差异较小有关.因此,本研究的后续分析主要关注城市区域与县区域大气污染物浓度的差别,而不考虑污染物在同一区域内不同采样点的浓度变化。

#### 2.1.2 气象条件与污染物之间的相关性分析

气象条件是影响碳组分浓度变化的重要因素<sup>[32]</sup>.表 2 列出成都市和仁寿县采样测量得到的 PM<sub>2.5</sub>、OC 和 EC 的日均值与其相应区域和采样点的气象参数之间的相关性系数.可见,能见度、风速和气温均与污染物浓度呈负相关.这是由于受气溶胶光散射吸光性消光作用的影响,污染物浓度越高,能



图中各数据的置信区间是依据 3 次平行测量,且每个样品分析 3 次的结果估算

图 2 成都市与仁寿县不同采样点  $PM_{2.5}$  浓度及碳组分浓度

Fig. 2  $PM_{2.5}$  and carbonaceous aerosol component concentrations at different sampling locations in Chengdu City and Renshou County

能见度越低;低风速不利于污染物的扩散而高温天气或有利于气团抬升和扩散.相比之下,相对湿度与污染物浓度的相关性不大显著.

表 2 大气污染物与气象因素之间的相关性系数<sup>1)</sup>

Table 2 Correlation coefficients of air pollutants versus meteorological parameters

	$PM_{2.5}$	OC	EC
能见度	-0.65**	-0.94**	-0.85**
气温	-0.62**	-0.74**	-0.80**
相对湿度	-0.10	-0.19	-0.29
风速	-0.50*	-0.48*	-0.53*

1) \*\*表示相关性在 0.01 水平上显著(双尾),\*表示相关性在 0.05 水平上显著(双尾);此相关性系数为皮尔森相关性系数

### 2.1.3 区域污染物浓度差异

采样期间的两个区域的  $PM_{2.5}$  及其碳组分浓度列于表 3. 总体而言,成都市  $PM_{2.5}$  和 OC、EC 的浓度均高于仁寿县,两者比值范围在 1.1 ~ 2.0 之间,以非霾期的比值更大.这可能是由于这两个城市发展水平差异和污染控制力度不同等原因所致<sup>[33,34]</sup>.例如,成都市生产总值明显高于仁寿县且成都市规模以上工业企业数为仁寿县的 21.5 倍,成都市工业能耗为仁寿县的 18.5 倍<sup>[17,18]</sup>,高能耗必定存在大量的一次排放,同时成都市地势不利于污染物扩散.

就 EC 在 TC 中的占比而言,两个区域的霾期均高于非霾期.这说明两区域的霾期一次排放明显.同时,这两个区域的 EC/TC 占比随着空气质量的变化而有所不同.非霾期时,成都市的 EC/TC 占比大,且霾期和非霾期之间的差异较小(<3%),相比之下,仁寿县的 EC/TC 占比霾期较非霾期大,且两者差异

较大(~5.8%).这说明仁寿县的霾发生可能跟污染物的一次排放突然增加有关.

就  $PM_{2.5}$ 、OC、EC 和 TC 在霾期与非霾期的比值而言,成都市的比值在 2.1 ~ 2.6 之间,而仁寿县的比值在 2.2 ~ 3.3 之间.两个区域比值均以 EC 比值最大,这进一步说明,一次排放的突然增加是两个区域发生霾的重要因素.

表 3 成都市与仁寿县  $PM_{2.5}$  及其碳组分浓度/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

Table 3 Concentrations of  $PM_{2.5}$  and its carbonaceous aerosol

污染物	空气质量条件	区域		区域比值 (成都市/仁寿县)
		仁寿县	成都市	
$PM_{2.5}$	霾期	103.9	182.9	1.7
	非霾期	39.3	78.5	2.0
OC	霾期	22.4	28.7	1.3
	非霾期	9.1	13.7	1.5
EC	霾期	5.3	5.9	1.1
	非霾期	1.6	2.3	1.4
TC	霾期	27.7	34.6	1.2
	非霾期	10.7	16.0	1.5

## 2.2 不同空气质量下颗粒物碳组分污染特征分析

### 2.2.1 OC 与 EC 相关性分析

仁寿县碳组分 OC 及 EC 的相关性如图 3 所示.仁寿县 OC 与 EC 呈正相关.其中霾期,OC 与 EC 的相关系数为 0.465,非霾期相关系数为 0.861.

成都市碳组分 OC 与 EC 相关性如图 4 所示.OC 与 EC 呈正相关.其中霾期,OC 与 EC 相关性系数为 0.417,非霾期相关性系数为 0.823.

成都市和仁寿县均是非霾期碳组分相关性系数

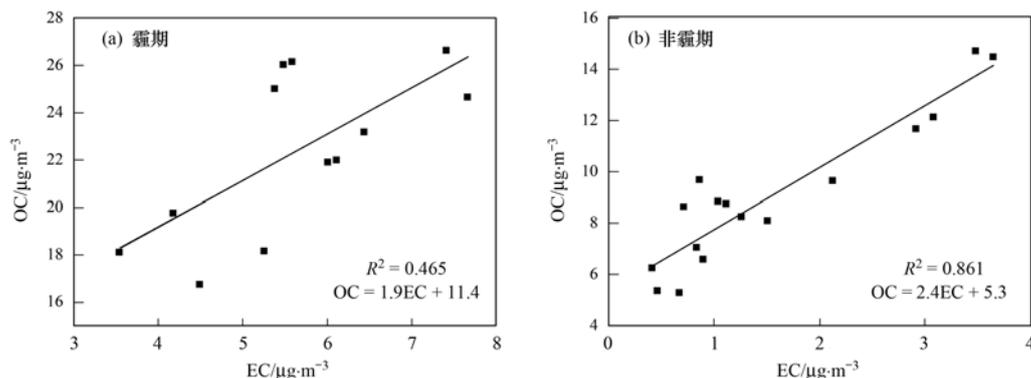


图 3 仁寿县霾期与非霾期 OCEC 相关性

Fig. 3 Comparisons of OC and EC concentrations during haze and non-haze periods in Renshou County

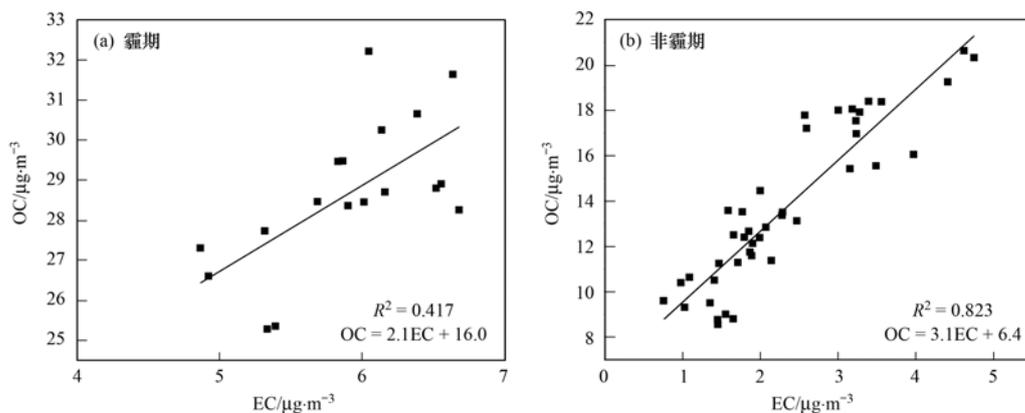


图 4 成都市霾期与非霾期 OCEC 相关性

Fig. 4 Comparisons of OC and EC concentrations during haze and non-haze periods in Chengdu City

大于霾期相关性系数,且成都市碳组分相关性相比仁寿县相差不大.霾期由于二次污染物累积,SOC生成增加,OC与一次源排放的EC相关性减弱.

比较两区域OC与EC质量浓度回归方程的斜率( $a$ 值),成都市 $a$ 值高于仁寿县,表明其碳质气溶胶来源受一次排放影响更大.比较回归方程截距( $b$

值),成都市 $b$ 值高于仁寿县,表明成都市非燃烧源排放的OC背景浓度高,且霾期更为明显,表明成都市碳组分除受燃煤等一次排放影响外,还受其他污染源的影响.

### 2.2.2 二次有机碳估算

二次有机碳(SOC)估算结果如表4所示.

表 4 成都市与仁寿县霾期与非霾期二次有机碳的估算结果

Table 4 Estimates of secondary organic carbon in Chengdu City and Renshou County during haze and non-haze periods

位置	时期	PM <sub>2.5</sub> 浓度 / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	碳组分比值 OC/EC	二次有机碳浓度及比值	
				SOC/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	SOC/PM <sub>2.5</sub> /%
仁寿县	霾	103.9 ± 9.0	4.1 ± 0.4	4.2 ± 1.6	4.0 ± 1.5
	非霾	39.3 ± 5.5	7.8 ± 1.6	1.7 ± 0.6	5.1 ± 2.0
成都市	霾	182.9 ± 7.2	5.0 ± 0.2	4.9 ± 0.8	2.6 ± 0.4
	非霾	78.5 ± 7.5	6.1 ± 0.3	3.7 ± 0.5	5.2 ± 0.7

总的来说,霾期SOC浓度高于非霾期,这与霾期二次污染物前体物累积有关,表明二次有机碳对霾天气有贡献,与霾期相关性系数低于非霾期结果所一致;由于成都市二次污染物的前体物浓度较高,其相应的SOC浓度也较高.

就不同区域空气质量而言,非霾期成都市与仁寿县二次有机碳占PM<sub>2.5</sub>的比值相差不大,表明期间污染物二次反应情况类似,但霾期成都市占比偏低,表明霾期成都市受一次排放影响较大.此外,霾期仁

寿县SOC/OC(约为18.7% ± 7.0%)高于成都市(约为17.1% ± 2.7%),由于此期间成都市与仁寿县温度、湿度相差较小,光化学反应气象条件接近,这说明仁寿县霾期受二次有机物污染较成都市明显,除一次排放增加之外,二次污染也是仁寿县霾发生的重要原因.

### 2.2.3 多种碳组分分布及来源解析

图5为仁寿县和成都市多种碳组分在总碳中的质量浓度占比.从中可知,仁寿县霾期与非霾期碳组

分质量浓度存在差异,而成都市霾期与非霾期碳组分质量浓度占比差异较小.其中非霾期碳组分质量浓度为  $EC1 > OC3 > OC4 > OC2 > OC1 > EC3 > EC2$ .霾期仁寿县碳组分质量浓度为  $EC1 > OC3 > OC2 > OC4 > OC1 > EC2 > EC3$ ,成都市碳组分质量浓度为  $EC1 > OC3 > OC4 > OC2 > OC1 > EC2 > EC3$ .非霾期与霾期的碳组分质量浓度均是  $EC1$  为最大, $OC2$ 、 $OC3$  和  $OC4$  相差较小, $EC2$  与  $EC3$  最小.仁寿县霾期  $OC1$  有大幅度增加,说明仁寿县霾期生物质燃烧大量增加.成都市霾期及非霾期  $OC3$ 、 $OC4$  相差较小,其汽油车排放相对稳定.

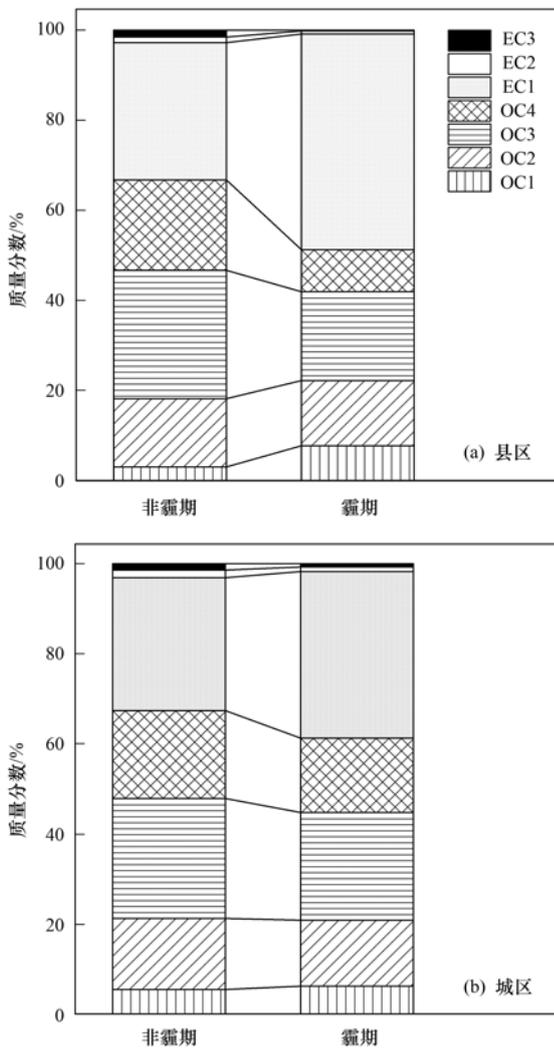


图5 多种碳组分在总碳中的质量占比

Fig. 5 Mass percentages of carbonaceous aerosol components of total carbon

本研究使用 SPSS 软件对城区县区的多种碳组分浓度进行最大方差旋转因子分析,其 KMO (Kaiser-Meyer-Olkin) 检验值均大于 0.75,因子考虑累积方差  $\geq 80\%$  且特征因子大于 1 的<sup>[35]</sup>,其结果如表 5 所示.

成都市和仁寿县的因子荷载存在一定差异.例如,仁寿县因子 1 的  $OC1$ 、 $OC2$ 、 $OC3$ 、 $EC1$ 、 $EC2$  和

$OP$  较显著,而成都市因子 1 则是  $OC1$ 、 $OC2$ 、 $OC3$ 、 $OC4$ 、 $EC1$  和  $OP$  较为显著.同时,仁寿县因子 2 的  $OC4$  显著,而成都市因子 2 则是  $EC2$  显著.

但就  $PM_{2.5}$  碳组分的主要排放源而言,如图 5 所示,两区域相差不大,均为燃煤、机动车排放和生物质燃烧.但其中机动车排放的种类有所差异.例如,如表 5 的主成分分析结果所示,成都市  $OC3$  及  $OC4$  相对显著,表明其受汽油车排放影响较大,而仁寿县  $EC2$  相对显著,表明其主要受柴油车排放影响.此外,对比同期采样样品中  $K^+$  的浓度和相应区域空气中  $SO_2$  的环境监测浓度,仁寿县和成都市的  $K^+$  霾期日均浓度分别为  $(1.0 \pm 0.1) \mu g \cdot m^{-3}$  和  $(3.3 \pm 0.4) \mu g \cdot m^{-3}$ ,而非霾期则是  $(0.2 \pm 0.1) \mu g \cdot m^{-3}$  和  $(1.0 \pm 0.1) \mu g \cdot m^{-3}$ .霾期的浓度均高于非霾期,两者的比值以仁寿县较大;而同时期的仁寿县和成都市的  $SO_2$  霾期日均浓度分别为  $(6.6 \pm 1.0) \mu g \cdot m^{-3}$  和  $(10.3 \pm 0.9) \mu g \cdot m^{-3}$ ,非霾期则为  $(5.2 \pm 1.5) \mu g \cdot m^{-3}$  和  $(7.1 \pm 0.6) \mu g \cdot m^{-3}$ ,霾期的浓度也高于非霾期,但两者的比值以成都市稍大.这同样说明一次排放的增加对两个区域的贡献不容忽视.对于仁寿县而言,生物质燃烧的贡献较成都市大,而成都市的燃煤贡献则较仁寿县大.这一发现与如表 5 所示的主成分分析结果一致.例如,因子 1 中成都市  $OC2$  和  $EC1$  相比其他组分显著,而仁寿县  $OC1$  和  $OP$  更为显著.其中, $OC1$  和  $OP$  是生物质燃烧的指示组分<sup>[23]</sup>,而  $OC2$  是燃煤燃烧的指示组分<sup>[24]</sup>.当然其他排放源的贡献也存在区域差异.例如,成都市的因子 2 以  $EC2$  最为显著,而仁寿县的因子 2 以  $OC4$  较为显著.这说明,柴油车的排放对成都市空气质量的影响

表 5 成都市与仁寿县 8 种碳组分含量主成分

因子旋转载荷矩阵<sup>1)</sup>

Table 5 Loading matrix of principal component factors with eight carbonaceous aerosol components in Chengdu City and Renshou County

项目	仁寿县		成都市	
	因子 1	因子 2	因子 1	因子 2
$OC1$	0.871	0.397	0.925	-0.041
$OC2$	0.714	0.644	0.980	0.061
$OC3$	0.730	0.592	0.908	0.089
$OC4$	0.041	0.895	0.862	0.310
$EC1$	0.842	0.514	0.986	0.069
$EC2$	0.820	-0.152	0.274	0.529
$EC3$	-0.325	-0.777	0.185	-0.879
$OP$	0.845	0.453	0.951	-0.001
特征根	5.7	1.1	5.4	1.1
解释方差/%	71.3	14.0	67.6	14.1
累积方差贡献率/%	85.3		81.7	

1)  $OC1$  和  $OP$  来源为生物质燃烧<sup>[23]</sup>, $OC2$  来源为燃煤燃烧<sup>[24]</sup>, $OC3$  和  $OC4$  来源为道路尘<sup>[25]</sup>;  $EC1$  为机动车排放的主要碳标识组分<sup>[24]</sup>,其中  $OC3$  和  $OC4$  在汽油车尾气中含量较高<sup>[23,26]</sup>, $EC2$  和  $EC3$  在柴油车尾气中含量较高<sup>[23]</sup>

响不容忽视,而道路扬尘对仁寿县的空气质量也有相当的影响。

根据表 6,成都市霾期用电量高于非霾期,其中霾期工业用电量占比明显高于非霾期,这表明霾期工业生产加强,能源的多消耗可能会与霾的发生有关.这与源解析中燃煤为  $PM_{2.5}$  碳组分主要来源结果一致.但仁寿县霾期工业用电量占比有小幅度的减少,且仁寿县内的工业生产排放霾期相对稳定,仁寿

县污染物可能受成都市南部城郊霾期工业生产一次排放的影响。

### 2.3 不同城市不同空气质量碳组分浓度对比

对比分析不同城市不同空气质量下的碳组分浓度,如表 7 所示.重点关注成都市与仁寿县与其他城市霾期与非霾期的对比情况。

霾期与非霾期污染物浓度,除苏州市外,碳组分浓度(OC、EC 和 SOC)霾期高于非霾期,苏州市霾期与非霾期污染物浓度相差较小.对比非霾期各城市污染情况,总的来说,除石家庄市碳组分浓度较高外,其他各城市及区域的碳组分污染情况存现较小差异。

城郊污染情况与城市对比,由于上海市郊区站点靠近海域,受海洋气候影响,对污染物有稀释作用,污染物浓度处于较低水平.北京市城郊碳组分浓度占比霾期与非霾期均为最高,其污染情况严重.成都市城郊碳组分浓度占比霾期为中等偏上,非霾期为中等偏下,表明成都市城郊霾期污染情况更为明显.两区域城郊 EC 浓度占比均处于较高水平,城郊大量的工业企业带来了较高的一次污染物排放。

表 6 成都市及仁寿县霾期与非霾期用电量对比<sup>1)</sup>

Table 6 Comparison of electricity consumption during haze and non-haze periods in Chengdu City and Renshou County

区域	年份	时间	全社会用电量/kW·h	工业用电量/全社会用电量/%
成都市	2017	3月	$420.2 \times 10^7$	43.9
		9月	$507.2 \times 10^7$	39.7
		12月	$511.2 \times 10^7$	51.3
仁寿县	2018	第三季度	$50.1 \times 10^7$	43.8
		第四季度	$49.0 \times 10^7$	53.5
	2019	第一季度	$50.1 \times 10^7$	44.3

1) 统计数据来源于文献[17]及仁寿县人民政府网站,其中,全社会用电量指的是各产业用电总和;与本研究成果成都市及仁寿县采样时间相对应

表 7 不同城市霾期与非霾期碳组分污染对比<sup>1)</sup>

Table 7 Comparisons of carbonaceous aerosol components during haze and non-haze periods for different cities

区域	时间(年-月)	霾期			非霾期		
		OC (OC/ $PM_{2.5}$ )	EC (EC/ $PM_{2.5}$ )	SOC	OC (OC/ $PM_{2.5}$ )	EC (EC/ $PM_{2.5}$ )	SOC
仁寿县	2018-09, 2018-12, 2019-01	22.4(22.0)	5.6(5.0)	4.2	9.1(23.0)	1.6(4.0)	1.7
成都市	2018-09, 2018-12, 2019-03	28.7(15.8)	5.9(3.2)	4.9	13.7(18.1)	2.4(3.1)	3.7
成都市西南郊区	2015-03	34.4(22.3)	9.9(6.4)	4.2	15.3(18.1)	4.1(4.9)	2.7
北京市郊区	2014-11	53.7(46.1)	21.0(18.0)	—	9.0(33.0)	8.1(29.7)	—
上海市西北郊区	2015-03 ~ 2016-02	5.1(6.3)	2.5(3.0)	2.3	3.5(6.8)	1.7(3.3)	1.7
西安市	2015-12 ~ 2016-01	21.2(12.5)	7.4(4.3)	6.2	9.5(19.6)	2.3(4.8)	1.4
济南市	2017	30.2(13.9)	2.9(1.3)	24.8	4.3(9.6)	1.7(3.8)	1.2
石家庄市	2013	99.6(28.5)	14.8(4.2)	—	29.9(30.5)	7.6(7.8)	—
唐山市	2017	31.5(20.2)	11.8(7.6)	—	8.9(30.3)	3.2(10.9)	—
天津市	2014-02 ~ 03	25.1(16.3)	6.4(4.1)	—	16.4(20.0)	2.8(3.5)	—
广州市	2010-12, 2011-01 ~ 02	24.5(25.8)	4.8(5.0)	8.7	11.0(23.2)	1.5(3.1)	4.0
上海市	2009	25.2(13.9)	6.6(3.6)	12.3	18.8(16.9)	4.3(3.8)	6.0
苏州市	2012	11.1(17.6)	2.1(3.3)	—	11.1(30.4)	2.3(6.2)	—

区域	时间(年-月)	OC/EC		OC <sub>霾</sub> /OC <sub>非霾</sub>	EC <sub>霾</sub> /EC <sub>非霾</sub>	文献
		霾期	非霾期			
仁寿县	2018-09, 2018-12, 2019-01	4.1	7.8	2.5	3.4	本研究
成都市	2018-09, 2018-12, 2019-03	5.0	6.1	2.2	2.5	本研究
成都市西南郊区	2015-03	3.5	3.7	2.2	2.4	[35]
北京市郊区	2014-11	2.6	1.1	6.0	2.6	[36]
上海市西北郊区	2015-03 ~ 2016-02	2.0	2.1	1.5	1.5	[8]
西安市	2015-12 ~ 2016-01	2.9	4.1	2.2	3.2	[37]
济南市	2017	10.4	2.5	7.0	1.7	[38]
石家庄市	2013	6.7	3.9	3.3	1.9	[39]
唐山市	2017	2.7	2.8	3.5	3.7	[40]
天津市	2014-02 ~ 03	3.9	5.9	1.5	2.3	[41]
广州市	2010-12, 2011-01 ~ 02	5.1	7.3	2.2	3.2	[42]
上海市	2009	3.8	4.4	1.3	1.5	[7]
苏州市	2012	5.3	4.8	1.0	0.9	[43]

1) 括号外数值单位为  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 括号内数值单位为%

霾期成都市与其他城市相比,碳组分污染情况低于秋冬季有大量集中供暖的北方城市石家庄和唐山,高于沿海城市广州市及污染较轻的苏州市。除此之外,其 EC 值浓度还低于西安市、天津市和上海市,表明成都市霾期的一次排放属于中等水平。其二次有机碳污染较低,低于其他城市,高于成都市郊区。

非霾期成都市碳组分污染情况与成都市西南郊区相差较小,但其污染物浓度占比低于大多数城市,特别是 EC 值占比为最低。

比较成都市  $EC_{\text{霾}}/EC_{\text{非霾}}$  及  $OC_{\text{霾}}/OC_{\text{非霾}}$  比值可知,各城市该比值差异大。成都市  $EC_{\text{霾}}/EC_{\text{非霾}} > OC_{\text{霾}}/OC_{\text{非霾}}$  且较为接近,此特征与成都市郊区、唐山市及上海市类似。

仁寿县作为一个县级区域,其霾期污染情况与市级区域相比并没有明显偏低,为城市中等偏下水平。霾期仁寿县与经济规模较大的城市相比,其碳组分浓度仅高于苏州市。与城市郊区相比,其污染物浓度低于北京市郊区及成都市郊区,高于上海市郊区,上海郊区由于气象条件,污染水平低,霾期北京市郊区污染情况处于较高水平,与霾期郊区工业生产有关。仁寿县污染物占比与成都市郊区占比类似,说明其碳组分污染情况与成都市西南郊区较为接近。这可能是由于,霾期成都市郊区一次排放增加,影响了仁寿县碳组分污染情况,两区域出现类似的污染特征。

非霾期仁寿县与其他城市相比,其污染物浓度占比与广州市类似,与城市郊区对比,其 EC 值浓度最低,较发展规模更大的城市相比非霾期一次排放量较少。同时仁寿县二次有机碳浓度仅高于济南市,低于其他城市区域,非霾期二次污染偏低。与成都市郊区对比,非霾期并无污染物占比与其类似的特征。

比较仁寿县  $EC_{\text{霾}}/EC_{\text{非霾}}$  及  $OC_{\text{霾}}/OC_{\text{非霾}}$  比值可知,  $EC_{\text{霾}}/EC_{\text{非霾}} > OC_{\text{霾}}/OC_{\text{非霾}}$ , 且不同污染情况下的 EC 值差距明显大于 OC 值差距,与西安市和广州市类似。

### 3 结论

(1) 区域的大气污染物浓度变化明显,并受区域的经济、地理位置以及气象条件的影响。总的来说,生产值和耗能较高的区域,其大气污染物浓度相对较高。但污染物浓度的变化规律随着区域产业和排放等的不同而存在一定的差异。

(2) 大气颗粒物的碳组分的变化特征存在明显的区域性,且与区域的污染排放源关系密切。例如,霾发生时,大气颗粒物中 EC 和 OC 的占比,以及

SOC 的形成等随区域的不同而存在差异。同时,相同区域的 EC 和 OC 的占比增长也有所不同。这说明一次排放和二次有机物的形成均是霾发生的重要因素且具有显著的区域性。研究 EC、OC 和 SOC 等与颗粒物的比值增长可有助于区域污染特征和成因的辨识。

(3) 分析颗粒物中碳组分的变化并结合主成分分析可以较好地了解区域大气污染的成因和特点。例如,在霾发生时,研究区域的 EC 都显著增加,但 SOC 与  $PM_{2.5}$  的比值城区确显著下降, SOC 与 OC 的比值县区显著高于城区,这表明一次排放是城区霾发生的诱因而二次有机物的形成则是造成县区霾的重要推手。而同时,主成分分析也表明,生物质燃烧和燃煤污染是霾发生时主要的排放来源。

### 参考文献:

- [1] 梁林林, 孙俊英, 张养梅, 等. 临安夏季霾和清洁天气  $PM_{2.5}$  化学组成特征比较[J]. 环境科学, 2018, **39**(7): 3042-3050.  
Liang L L, Sun J Y, Zhang Y M, et al. Comparison of chemical components characteristics of  $PM_{2.5}$  between haze and clean periods during summertime in Lin'an [J]. Environmental Science, 2018, **39**(7): 3042-3050.
- [2] 曹军骥.  $PM_{2.5}$  与环境[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [3] 李欣悦, 张凯山. 成都市气态污染物  $NO_2$ 、 $SO_2$  与大气颗粒物相关性分析[J]. 环境工程, 2019, **37**(6): 111-116.  
Li X Y, Zhang K S. Analysis on relationships of gaseous pollutants  $NO_2$  and  $SO_2$  with atmospheric particles in Chengdu [J]. Environmental Engineering, 2019, **37**(6): 111-116.
- [4] Feng Y L, Chen Y J, Guo H, et al. Characteristics of organic and elemental carbon in  $PM_{2.5}$  samples in Shanghai, China[J]. Atmospheric Research, 2009, **92**(4): 434-442.
- [5] 胡起超, 胡恭任, 于瑞莲, 等. 厦门市冬季大气  $PM_{2.5}$  中有机碳和元素碳污染特征[J]. 地球与环境, 2016, **44**(3): 336-341.  
Hu Q C, Hu G R, Yu R L, et al. Characteristics of organic carbon (OC) and elemental carbon (EC) in  $PM_{2.5}$  in winter in Xiamen city, China[J]. Earth and Environment, 2016, **44**(3): 336-341.
- [6] Han Y M, Cao J J, Chow J C, et al. Evaluation of the thermal/optical reflectance method for discrimination between char-and soot-EC[J]. Chemosphere, 2007, **69**(4): 569-574.
- [7] 朱梦雅. 基于灰霾评价的  $PM_{2.5}$  组分污染特征研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2011.
- [8] 孙运筑, 修光利, 段玉森, 等. 上海市淀山湖区域灰霾天大气颗粒物中碳组分的污染特征[J]. 华东理工大学学报(自然科学版), 2019, **45**(3): 440-448.  
Sun Y Z, Xiu G L, Duan Y S, et al. Characteristics of carbonaceous compositions in atmospheric particulate matters during haze days in Dianshan lake area, Shanghai[J]. Journal of East China University of Science and Technology, 2019, **45**(3): 440-448.
- [9] 李立伟, 肖致美, 陈魁, 等. 京津冀区域  $PM_{2.5}$  中碳组分污染特征研究[J]. 环境科学学报, 2018, **38**(4): 1306-1316.  
Li L W, Xiao Z M, Chen K, et al. Characteristics of carbonaceous species of  $PM_{2.5}$  in the region of Beijing, Tianjin and Hebei, China[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, **38**

- (4): 1306-1316.
- [10] 康晖, 朱彬, 王红磊, 等. 长三角典型站点冬季大气 PM<sub>2.5</sub> 中 OC、EC 污染特征[J]. 环境科学, 2018, **39**(3): 961-971.  
Kang H, Zhu B, Wang H L, *et al.* Characterization and variation of organic carbon (OC) and elemental carbon (EC) in PM<sub>2.5</sub> during the winter in the Yangtze river delta region, China[J]. Environmental Science, 2018, **39**(3): 961-971.
- [11] Tao J, Zhang L M, Zhang R J, *et al.* Uncertainty assessment of source attribution of PM<sub>2.5</sub> and its water-soluble organic carbon content using different biomass burning tracers in positive matrix factorization analysis—a case study in Beijing, China[J]. Science of the Total Environment, 2016, **543**: 326-335.
- [12] 吴明, 吴丹, 夏俊荣, 等. 成都冬季 PM<sub>2.5</sub> 化学组分污染特征及来源解析[J]. 环境科学, 2019, **40**(1): 76-85.  
Wu M, Wu D, Xia J R, *et al.* Analysis of pollution characteristics and sources of PM<sub>2.5</sub> chemical components in Chengdu in winter[J]. Environmental Science, 2019, **40**(1): 76-85.
- [13] 方小珍, 吴琳, 张静, 等. 不同空气质量等级下环境空气颗粒物及其碳组分变化特征[J]. 环境科学, 2017, **38**(9): 3569-3574.  
Fang X Z, Wu L, Zhang J, *et al.* Characteristics of particulate matter and carbonaceous species in ambient air at different air quality levels[J]. Environmental Science, 2017, **38**(9): 3569-3574.
- [14] 黄众思, 修光利, 朱梦雅, 等. 上海市夏冬两季 PM<sub>2.5</sub> 中碳组分污染特征及来源解析[J]. 环境科学与技术, 2014, **37**(4): 124-129.  
Huang Z S, Xiu G L, Zhu M Y, *et al.* Characteristics and sources of carbonaceous species in PM<sub>2.5</sub> in summer and winter in Shanghai[J]. Environmental Science & Technology, 2014, **37**(4): 124-129.
- [15] 康宝荣, 刘立忠, 刘焕武, 等. 关中地区细颗粒物碳组分特征及来源解析[J]. 环境科学, 2019, **40**(8): 3431-3437.  
Kang B R, Liu L Z, Liu H W, *et al.* Pollution characteristics and sources of carbonaceous components in PM<sub>2.5</sub> in the Guanzhong area[J]. Environmental Science, 2019, **40**(8): 3431-3437.
- [16] 樊啸辰, 郎建奎, 程水源, 等. 北京市大气环境 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>1</sub> 及其碳质组分季节变化特征及来源分析[J]. 环境科学, 2018, **39**(10): 4430-4438.  
Fan X C, Lang J L, Cheng S Y, *et al.* Seasonal variation and source analysis for PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>1</sub> and their carbonaceous components in Beijing[J]. Environmental Science, 2018, **39**(10): 4430-4438.
- [17] 成都市统计局. 成都统计年鉴-2018[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018.
- [18] 眉山市统计局. 2018 眉山统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018.
- [19] 中国气象局. 地面气象观测规范[M]. 北京: 气象出版社, 2005.
- [20] 中国气象局. 霾预警信号的含义和防御指南[EB/OL]. [www.cma.gov.cn](http://www.cma.gov.cn), 2014-02-24.
- [21] HJ 656-2013, 环境空气颗粒物(PM<sub>2.5</sub>)手工监测方法(重量法)技术规范[S].
- [22] 庞博, 吉东生, 刘子锐, 等. 大气细颗粒物中有机碳和元素碳监测方法对比[J]. 环境科学, 2016, **37**(4): 1230-1239.  
Pang B, Ji D S, Liu Z R, *et al.* Comparison of monitoring methods of organic carbon and element carbon in atmospheric fine particles[J]. Environmental Science, 2016, **37**(4): 1230-1239.
- [23] Cao J J, Wu F, Chow J C, *et al.* Characterization and source apportionment of atmospheric organic and elemental carbon during fall and winter of 2003 in Xi'an, China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2005, **5**(11): 3127-3137.
- [24] Xu H M, Cao J J, Chow J C, *et al.* Inter-annual variability of wintertime PM<sub>2.5</sub> chemical composition in Xi'an, China: evidences of changing source emissions[J]. Science of the Total Environment, 2016, **545-546**: 546-555.
- [25] Chow J C, Watson J G, Kuhns H, *et al.* Source profiles for industrial, mobile, and area sources in the Big Bend Regional Aerosol Visibility and Observational study [J]. Chemosphere, 2004, **54**(2): 185-208.
- [26] Kim E, Hopke P K, Edgerton E S. Improving source identification of Atlanta aerosol using temperature resolved carbon fractions in positive matrix factorization [J]. Atmospheric Environment, 2004, **38**(20): 3349-3362.
- [27] 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.
- [28] Cao J J, Lee S C, Chow J C, *et al.* Spatial and seasonal distributions of carbonaceous aerosols over China[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2007, **112** (D22): D22S11.
- [29] Chow J C, Watson J G, Lu Z Q, *et al.* Descriptive analysis of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> at regionally representative locations during SIVAQS/AUSPEX [J]. Atmospheric Environment, 1996, **30**(12): 2079-2112.
- [30] Na K, Sawant A A, Song C, *et al.* Primary and secondary carbonaceous species in the atmosphere of Western Riverside County, California [J]. Atmospheric Environment, 2004, **38**(9): 1345-1355.
- [31] 张显, 田莎莎, 刘盈盈, 等. 沈阳市采暖期与非采暖期空气 PM<sub>2.5</sub> 污染特征及来源分析[J]. 环境科学, 2019, **40**(3): 1062-1070.  
Zhang X, Tian S S, Liu Y Y, *et al.* Pollution characteristics and source apportionment of PM<sub>2.5</sub> in heating and non-heating periods in Shenyang[J]. Environmental Science, 2019, **40**(3): 1062-1070.
- [32] 刘泽珺, 吴建会, 张裕芬, 等. 菏泽市 PM<sub>2.5</sub> 碳组分季节变化特征[J]. 环境科学, 2017, **38**(12): 4943-4950.  
Liu Z J, Wu J H, Zhang Y F, *et al.* Seasonal variation of carbon fractions in PM<sub>2.5</sub> in Heze [J]. Environmental Science, 2017, **38**(12): 4943-4950.
- [33] 成都市人民政府. 成都市重污染天气应急预案[EB/OL]. <http://gk.chengdu.gov.cn/govInfoPub/detail.action?id=94247&tn=6>, 2017-11-06.
- [34] 仁寿县人民政府. 仁寿县重污染天气环境应急预案[EB/OL]. <http://www.rs.gov.cn/info/1726/30146.htm>, 2017-01-09.
- [35] 林瑜, 叶芝祥, 杨怀金, 等. 成都市西南郊区春季大气 PM<sub>2.5</sub> 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<sub>2.5</sub> in southwest suburb of Chengdu in Spring [J]. Environmental Science, 2016, **37**(5): 1629-1638.
- [36] 马乾坤, 成春雷, 李梅, 等. 北京郊区秋季灰霾天气下细颗粒物化学成分及其混合特征研究[J]. 地球化学, 2019, **48**(2): 195-203.  
Ma Q K, Cheng C L, Li M, *et al.* Chemical composition and

- mixing state of single particles during the haze period at a Beijing suburb site[J]. *Geochimica*, 2019, **48**(2): 195-203.
- [37] 王堃, 韩永明, 何世恒, 等. 西安市重污染与清洁天  $PM_{2.5}$  组分及其活性氧物质对比[J]. *环境科学*, 2017, **38**(7): 2679-2687.
- Wang K, Han Y M, He S X, *et al.* Comparison of characteristics and reactive oxidative species of  $PM_{2.5}$  in Xi'an, China during haze and clean days[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(7): 2679-2687.
- [38] 刘盈盈, 殷宝辉, 王静, 等. 济南冬季大气重污染过程颗粒物组分变化特征[J]. *环境化学*, 2018, **37**(12): 2749-2757.
- Liu Y Y, Yin B H, Wang J, *et al.* Characteristics of airborne particles compositions during winter heavy pollution days in Ji'nan [J]. *Environmental Chemistry*, 2018, **37**(12): 2749-2757.
- [39] 魏俊龙. 石家庄霾污染过程大气颗粒物化学组分分析及来源解析[D]. 北京: 北京化工大学, 2015.
- [40] 张浩杰, 高健, 孙孝敏, 等. 唐山市 2017 年采暖期不同污染等级  $PM_{2.5}$  化学组分特征对比与来源分析[J]. *环境科学研究*, 2019, **32**(5): 776-786.
- Zhang H J, Gao J, Sun X M, *et al.* Comparison and analysis of  $PM_{2.5}$  chemical composition characteristics and source of different grade pollution in Tangshan city during 2017 heating period[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, **32**(5): 776-786.
- [41] 史国良, 陈刚, 田瑛泽, 等. 天津大气  $PM_{2.5}$  中碳组分特征和来源分析[J]. *环境污染与防治*, 2016, **38**(1): 1-7.
- Shi G L, Chen G, Tian Y Z, *et al.* Characteristic and sources of carbon fractions in  $PM_{2.5}$  in Tianjin urban area [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2016, **38**(1): 1-7.
- [42] 张清艳. 广州市  $PM_{2.5}$  及其有机碳和元素碳的变化特征[D]. 咸阳: 西北农业大学, 2012.
- [43] 姚玉刚, 邹强, 陈诚, 等. 苏州市霾日细颗粒物的化学组分及来源分析[J]. *中国环境监测*, 2014, **30**(4): 62-68.
- Yao Y G, Zou Q, Chen C, *et al.* The analysis of chemical component of  $PM_{2.5}$  on haze formation in Suzhou city [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2014, **30**(4): 62-68.



## CONTENTS

Comparison of Three Receptor Models for Source Apportionment of PM <sub>2.5</sub> in Shanghai; Using Hourly Resolved PM <sub>2.5</sub> Chemical Composition Data	ZHOU Min (1997)
Impact of Differents in the Concentrations of Ozone on the Chemical Composition of Single Particles	WU Meng-xi, CHENG Chun-lei, HUANG Bo, et al. (2006)
Influence of Secondary Organic Coating on Hygroscopicity of a Sodium Chloride Core; Based on Micro-scale Single Particle Analysis	ZHANG Shu-jia, XU Liang, GUO Xin-mei, et al. (2017)
Comparative Analysis of Pollution Characteristics of Carbonaceous Aerosol Components in the Atmosphere Between Urban and Suburban Areas	LI Xin-yue, ZHANG Kai-shan, DENG Lin-li, et al. (2026)
Distribution Characteristics and Source Apportionment of Elements Bonded with PM <sub>2.5</sub> and PM <sub>10</sub> in Linyi	LU Ping, ZHAO Xue-yan, YIN Bao-hui, et al. (2036)
Characteristics and Sources of Microbial Aerosols in Urban and Mountainous Areas in Autumn and Winter in Xi'an, China	XIE Wen-wen, LU Rui, MU Fei-fei, et al. (2044)
Pollution Characteristics of Cooking Fumes, Particulates, and Non-methane Hydrocarbons in the Exhaust of Typical Beijing Restaurants	HE Wan-qing, WANG Tian-yi, SHAO Xia, et al. (2050)
PM <sub>2.5</sub> Concentration Influencing Factors in China Based on the Random Forest Model	XIA Xiao-sheng, CHEN Jing-jing, WANG Jia-jia, et al. (2057)
Spatio-temporal Variation of PM <sub>2.5</sub> Related Relationships in China from the Perspective of Air Pollution Regional Linkage Control and Prevention	YANG Wen-tao, HUANG Hui-kun, WEI Dong-sheng, et al. (2066)
Characteristics of Spatial and Temporal Evolution and Investigation of Air Pollution in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area Based on Ground-Space Observation Data	WANG Yao-ting, LIANG Jia-cheng, ZHENG Zuo-fang, et al. (2075)
Hydrochemical Characteristics and Formation Causes of Ground Karst Water Systems in the Longzici Spring Catchment	TANG Chun-lei, ZHENG Xiu-qing, LIANG Yong-ping (2087)
Tempo-spatial and Retention Analysis of Total Phosphorus in the Three Gorges Reservoir	TANG Xiao-ya, TONG Si-chen, HUANG Guo-xian, et al. (2096)
Vertical Distribution Characteristics of Dissolved Oxygen and Chlorophyll a in Typical Tributaries During the Impoundment Period of the Three Gorges Reservoir	YANG Fan, JI Dao-bin, WANG Li-jing, et al. (2107)
Spatial-temporal Distribution of Nutrients in Hanfeng Lake After Official Operation	FU Shi, NI Jiu-pai, HE Bing-hui, et al. (2116)
Spatio-temporal Variations in the Characteristics of Water Eutrophication and Sediment Pollution in Baiyangdian Lake	LIU Xin, SHI Bin, MENG Jing, et al. (2127)
Spatial-temporal Distribution of Suspended Solids and Its Sedimentation Flux and Nutrients Effects in Xin'anjiang Reservoir, China	SHI Peng-cheng, ZHU Guang-wei, YANG Wen-bin, et al. (2137)
Bioavailability Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Lake Gaoyou, Lake Nansi, and Lake Dongping Under Different Hydrological Scenarios	ZHANG Liu-qing, SHI Yu, LI Yuan-peng, et al. (2149)
Succession Characteristics of Algae Functional Groups and Water Quality Assessment in a Drinking Water Reservoir	LI Yan-qing, HUANG Ting-lin, ZHANG Hai-han, et al. (2158)
Effect of Artificial Mixing on Temporal and Spatial Succession of Algae Community Structure in Jinpen Reservoir	WANG Chen-xu, HUANG Ting-lin, LI Nan, et al. (2166)
Spatial Distribution Characteristics and Driving Factors of Aerobic Denitrification Bacterial Community Structure from Baiyangdian Lake in Xiong'an New Area During the Winter Freezing Period	ZHOU Shi-lei, SUN Yue, YUE Ge-cheng, et al. (2177)
Spatial and Temporal Succession Characteristics of Aerobic Anoxygenic Photosynthesis Bacteria in a Stratified Reservoir	ZHANG Hai-han, WANG Yan, HUANG Ting-lin, et al. (2188)
Response of Chromophoric Dissolved Organic Matter Dynamics to Different Hydrological Scenarios in the Two Largest Freshwater Lakes Connected to the Yangtze River	GUO Yan-mi, LI Yuan-peng, SHI Yu, et al. (2198)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Chromophoric Dissolved Organic Matter in a Northern-Side River of the Qinling Mountains in Summer	LIN Zi-shen, HUANG Ting-lin, YANG Shang-ye, et al. (2210)
Distribution, Sources, and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Tributary Waters of the Lower Reaches of the Yangtze River, China	JIA Tian-qi, LEI Rong-rong, WU Xiao-lin, et al. (2221)
Temporal and Spatial Occurrence of NSAIDs in Taihu Lake and Relevant Risk Assessment	LIAN Jie, LI Yi-fei, WANG Xiao-xuan, et al. (2229)
Occurrence and Ecological Risk of Eight Typical PhACs in Surface Water and Its Impact on <i>Daphnia magna</i>	XU Xin-lei, LIU Jian-chao, LU Guang-hua (2239)
Distribution Characteristics and Migration Rules of Pollutants in Sediments of Reservoirs with <i>Eucalyptus</i> Plantation, Southern China	ZHU Ya, LI Yi-ping, LUO Fan, et al. (2247)
Mechanism of Urban Black Odorous Water Based on Continuous Monitoring: A Case Study of the Erkeng Stream in Nanning	LI Yong-xin, WANG Wei, HE Mei, et al. (2257)
Relationship Between Source-Sink Landscape Pattern and Antibiotics in Surface Water in Peri-urban Watershed	LI Min, TANG Jian-feng, CHEN Li-ding, et al. (2264)
Molecular Chemo-diversity of the Dissolved Organic Matter Occurring in Urban Stormwater Runoff	NIE Yun-han, CHEN Hao, LI Lei, et al. (2272)
Regulating Effect and Mechanism of Calcite/Chlorapatite Mixture Addition on Transformation and Transport of Phosphorus in Sediments	BAI Xiao-yun, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, et al. (2281)
Stability of Ferrihydrite and Goethite Nanoparticles Under Different Environmental Conditions	WANG Zhi-qiao, MA Jie, CHEN Ya-li, et al. (2292)
Sunflower-Straw-Derived Biochar-Enhanced Fe(III)/S <sub>2</sub> O <sub>8</sub> <sup>2-</sup> System for Degradation of Benzoic Acid	SUN Peng, ZHANG Kai-kai, ZHANG Yu, et al. (2301)
Non-activated Peroxymonosulfate-Induced Degradation of Sulfasalazine; Kinetics and Mechanism Investigations	DING Xi, ZHANG Xue-wei, ZHOU Run-sheng, et al. (2310)
Pollution Characteristics and Removal Effects of Antibiotics in Wastewater from Large-Scale Pig Farms in Guizhou	YANG Zhao, LI Jiang, XIANG Fu-liang, et al. (2320)
Nitrogen Removal in Low-C/N Rural Sewage Treatment by Anoxic/Oxic Biofilter Packed with New Types of Fillers	ZHAO Yuan-zhe, YANG Yong-zhe, WANG Hai-yan, et al. (2329)
Nitrogen Removal Performance and Nitrogen/Carbon Balance of Oligotrophic Aerobic Denitrifiers	WEN Gang, WANG Tong, HUANG Ting-lin, et al. (2339)
Bacterial Community Shifts and Nitrogen Removal Characteristics for a SNAD Process Treating Anaerobic Digester Liquor of Swine Wastewater (ADLSW) in a Continuous-Flow Biofilm Reactor (CFBR)	QIN Jia-wei, XIN Xin, LU Hang, et al. (2349)
Characteristics of ANAMMOX Granular Sludge and Differences in Microbial Community Structure Under Different Culture Conditions	JIANG Ying, GUO Meng-lei, XIE Jun-xiang, et al. (2358)
Start-up of an Integrated Process of Denitrifying Phosphorus Removal Coupled with Partial Nitrification and Anaerobic Ammonium Oxidation	CHEN Ya, YIN Wen, ZHANG Xing-xing, et al. (2367)
Construction and Application of an Evaluation System for Soil Environmental Carrying Capacity	LI Xiao-nuo, DING Shou-kang, CHEN Wei-ping, et al. (2373)
Synthesis of Magnetic Biochar and Its Application in the Remediation of Heavy-Metal-Contaminated Soils	WANG Jun-nan, CHENG Shan-shan, ZHAN Wen-hao, et al. (2381)
Remediation of Heavy-Metal-Contaminated Soil by EGTA Washing Enhanced with Reduction Solubilization	ZHANG Jin-yong, ZHU Yu-ting, WANG Ming-xin, et al. (2390)
Toxicity of Chromium to Root Growth of Barley as Affected by Chromium Speciation and Soil Properties	FU Ping-nan, GONG Xiao-fei, LUO Li-yun, et al. (2398)
Effect of Fertilizer Reduction and Biochar Application on Soil Nitrogen Loss in Purple Upland	WANG Shu, WANG Zi-fang, LONG Yi, et al. (2406)
Relationship Between the Composition of Soil Aggregates and the Distribution of Organic Carbon Under Long-Term Abandoned Restoration	WANG Xing, ZHONG Ze-kun, ZHANG Xin-yi, et al. (2416)
Effects of Biochar Application on Soil Microbial Nutrient Limitations and Carbon Use Efficiency in Lou Soil	WANG Qiang, GENG Zeng-chao, XU Chen-yang, et al. (2425)
N <sub>2</sub> O Emissions from Tea Plantations with Sorghum Intercropping and Application of Big Urea Pills	ZHANG Ke-bin, LIU Xin-liang, KANG Man, et al. (2434)
Effects of Different Forest Vegetation Types on Soil Nitrogen-Related Microbial Communities and Functions in Jinyun Mountain	WANG Ying-yan, WANG Fu-hua, LUO Dong-hai, et al. (2445)
Nitrous Oxide Emission and Denitrifying Bacterial Communities as Affected by Drip Irrigation with Saline Water in Cotton Fields	GUO Hui-nan, MA Li-juan, HUANG Zhi-jie, et al. (2455)
Effect of Organic Matter Promotion on Nitrogen-Cycling Genes and Functional Microorganisms in Acidic Red Soils	CHU Cheng, WU Zhao-yue, HUANG Qian-ru, et al. (2468)
Effects of Simulated Acid Rain on Soil Fungi Diversity in the Transition Zone of Moso Bamboo and Broadleaf Forest	WANG Nan, PAN Xiao-cheng, WANG Chuan-kuan, et al. (2476)
Differences Between DNA- and RNA-Based Bacterial Communities in Marine Sediments	LI Ming-yue, YANG Yu-hong, MI Tie-zhu, et al. (2485)
Spatial Patterns and Spatial Autocorrelations of Wetland Changes in China During 2003-2013	ZHOU Ting, MA Jiao-jiao, XU Song-jun (2496)