

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第7期

Vol.39 No.7

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

近20年来中国典型区域 PM _{2.5} 时空演变过程	罗毅,邓琼飞,杨昆,杨扬,商春雪,喻臻钰 (3003)
西安市 PM _{2.5} 健康损害价值评估	魏国茹,史兴民 (3014)
河北香河亚微米气溶胶组分特性、来源及其演变规律分析	江琪,王飞,孙业乐 (3022)
南京北郊秋季 PM _{2.5} 碳质组分污染特征及来源分析	徐足飞,曹芳,高嵩,鲍孟盈,石一凡,章炎麟,刘晓妍,范美益,张雯淇,卞航,刘寿东 (3033)
临安夏季霾和清洁天气 PM _{2.5} 化学组成特征比较	梁林林,孙俊英,张养梅,刘畅,徐婉筠,张根,刘旭艳,马千里 (3042)
盘锦市秋冬季节 PM _{2.5} 中碳组分特征及来源解析	张蕾,姬亚芹,张军,王士宝,李越洋,赵静琦,张伟 (3051)
南京冬季气溶胶光学特性及黑碳光吸收增强效应	黄聪聪,马嫣,郑军 (3057)
夏季青岛大气粗细粒子中微量元素的浓度、溶解度及干沉降通量	李鹏志,李茜,石金辉,高会旺,姚小红 (3067)
太原市夏季降水溶解态重金属特征及来源	叶艾玲,程明超,张璐,何秋生,郭利利,王新明 (3075)
杭州地区大气 CO ₂ 体积分数变化特征及影响因素	浦静姣,徐宏辉,姜瑜君,杜荣光,齐冰 (3082)
典型工业源 VOCs 治理现状及排放组成特征	景盛翱,王红丽,朱海林,杨强,卢滨,夏阳,余传冠,陶士康,李莉,楼晟荣,黄成,唐伟,井宝莉 (3090)
地级市域工业 VOCs 排放源产排特性及其控制技术应用现状:以秦皇岛市为例	胡旭睿,虎啸宇,王灿 (3096)
青霉素发酵尾气 VOCs 污染特征及健康风险评价	郭斌,么瑞静,张硕,马磊,康江,王姗姗 (3102)
轻型汽油车尾气 OC 和 EC 排放因子实测研究	黄成,胡馨遥,鲁君 (3110)
南京市大气降尘重金属污染水平及风险评价	田春晖,杨若杼,古丽扎尔·依力哈木,钱新,王金花,李慧明 (3118)
西安城区路面细颗粒灰尘重金属污染水平及来源分析	石栋奇,卢新卫 (3126)
三峡库区主要河流秋季 pCO ₂ 及其影响因素	罗佳宸,毛蓉,李思悦 (3134)
泾河支流地表水地下水的水化学特征及其控制因素	寇永朝,华琨,李洲,李志 (3142)
生物滞留对城市地表径流磷的去除途径	李立青,刘雨倩,杨佳敏,王娟 (3150)
淀山湖浮游植物功能群演替特征及其与环境因子的关系	杨丽,张玮,尚光霞,张军毅,王丽卿,魏华 (3158)
抚仙湖硅藻群落的时空变化特征及其与水环境的关系	李蕊,陈光杰,康文刚,陈丽,王教元,陈小林,刘园园,冯钟,张涛 (3168)
蓝藻水华及其降解对沉积物-水微界面的影响	王永平,谢瑞,晁建颖,姬昌辉,于剑 (3179)
生物炭对人工湿地植物根系形态特征及净化能力的影响	徐德福,潘潜澄,李映雪,陈晓艺,王佳俊,周磊 (3187)
Mn-Co/蜂窝陶瓷催化剂制备及催化臭氧化对苯二酚效能	张兰河,高伟国,陈子成,张海丰,王旭明 (3194)
Fe/Cu 双金属活化过一硫酸盐降解四环素的机制	李晶,鲍建国,杜江坤,冷一非,孔淑琼 (3203)
铈酸盐改性钛酸纳米片对水中 Cd(II) 的吸附行为及机制	康丽,刘文,刘晓娜,刘宏芳,李一菲 (3212)
铁锰原位氧化产物吸附微量磷的实验	蔡言安,毕学军,张嘉凝,董杨,刘文哲 (3222)
制备方法对铁钛复合氧化物磷吸附性能的影响:共沉淀法与机械物理混合法	仲艳,王建燕,陈静,张高生 (3230)
电导率对厌氧产酸、正渗透与微生物燃料电池耦合工艺运行性能的影响	陆宇琴,刘金梦,王新华,李秀芬,李晔 (3240)
不同磷浓度下生物除磷颗粒系统的 COD 需求	李冬,曹美忠,郭跃洲,梅宁,李帅,张杰 (3247)
基质浓度对 ABR 反应器 SAD 协同脱氮除碳效能影响	张敏,姜滢,汪瑶琪,韦佳敏,陈重军,沈耀良 (3254)
采用含硫铁化学污泥作为反硝化电子供体进行焦化废水中总氮深度去除	付炳炳,潘建新,马景德,王丰,吴海珍,韦朝海 (3262)
间歇曝气下短程硝化耦合污泥微膨胀稳定性	高春娣,孙大阳,安冉,赵楠,焦二龙,祝海兵 (3271)
基于高通量测序的 SBR 反应器丝状膨胀污泥菌群分析	洪颖,姚俊芹,马斌,徐双,张彦江 (3279)
纳米零价铁(NZVI)对厌氧产甲烷活性、污泥特性和微生物群落结构的影响	苏润华,丁丽雨,任洪强 (3286)
气水比对后置固相反硝化滤池工艺脱氮及微生物群落影响	张千,吉芳英,付旭芳,陈晴空 (3297)
活性污泥胞外多聚物提取方法的比较	孙秀玥,唐珠,杨新萍 (3306)
耐冷嗜碱蒙氏假单胞菌 H97 的鉴定及其好氧反硝化特性	蔡茜,何腾霞,冶青,李振轮 (3314)
PFOS 前体物质(PreFOSs)降解菌的分离鉴定及其降解特性	赵淑艳,周涛,王博慧,梁田坤,柳丽芬 (3321)
采油井场土壤微生物群落结构分布	蔡萍萍,宁卓,何泽,张敏,石建省 (3329)
铜尾矿坝不同恢复年限土壤理化性质和酶活性的特征	王瑞宏,贾彤,曹苗文,柴宝峰 (3339)
广西某赤泥堆场周边土壤重金属污染风险	郭颖,李玉冰,薛生国,廖嘉欣,王琼丽,吴川 (3349)
邻苯二甲酸酯在重庆市城市土壤中的污染分布特征及来源分析	杨志豪,何明靖,杨婷,卢俊峰,魏世强 (3358)
成都平原区水稻土有机碳剖面分布特征及影响因素	李珊,李启权,王昌全,张浩,肖怡,唐嘉玲,代天飞,李一丁 (3365)
塔里木盆地北缘绿洲不同连作年限棉田土壤有机碳、无机碳含量与环境因子的相关性	赵晶晶,贡璐,安申群,李杨梅,陈新 (3373)
塔里木盆地北缘绿洲4种土地利用方式土壤有机碳组分分布特征及其与土壤环境因子的关系	安申群,贡璐,李杨梅,陈新,孙力 (3382)
高原喀斯特土壤有机碳短期稳定的温度作用机制	唐国勇,张春华,刘方炎,马艳 (3391)
施硼对水稻幼苗吸收和分泌砷的影响	朱毅,孙国新,陈正,胡莹,郑瑞伦 (3400)
不同改良剂对铅镉污染农田水稻重金属积累和产量影响的比较分析	胡雪芳,田志清,梁亮,陈俊德,张志民,朱祥民,王士奎 (3409)
南京大气臭氧浓度的季节变化及其对主要作物影响的评估	赵辉,郑有飞,魏莉,关清 (3418)
三峡库区涪陵和忠县两地居民发汞含量水平及影响因素分析	程楠,谢青,樊宇飞,王永敏,张成,王定勇 (3426)
人粪便好氧堆肥过程中典型抗生素的消减特性	时红蕾,王文昌,李倩 (3434)
COD/SO ₄ ²⁻ 对青霉素菌渣厌氧消化影响	强虹,李玉友,裴梦富 (3443)
果蔬类垃圾主发酵堆肥产物储放和利用的恶臭释放特征	何品晶,蒋宁玲,徐贤,韦顺艳,邵立明,吕凡 (3452)
曾用抗生素磺胺二甲嘧啶对稻田 NH ₃ 挥发的影响	庞炳坤,张敬沙,吴杰,李志琳,蒋静艳 (3460)
《环境科学》征订启事(3141) 《环境科学》征稿简则(3202) 信息(3229, 3433, 3451)	

南京北郊秋季 $\text{PM}_{2.5}$ 碳质组分污染特征及来源分析

徐足飞¹, 曹芳^{1*}, 高嵩², 鲍孟盈¹, 石一凡³, 章炎麟¹, 刘晓妍¹, 范美益¹, 张雯淇¹, 卞航¹, 刘寿东¹

(1. 南京信息工程大学大气环境中心, 南京 210044; 2. 江苏省电力公司电力科学研究院, 南京 210000; 3. 南京信息工程大学, 气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 江苏省农业气象重点实验室, 南京 210044)

摘要: 本研究于 2015 年 10 ~ 11 月在南京北郊分昼夜采集 $\text{PM}_{2.5}$ 样品, 采用热光透射法 (TOT) 和离子色谱法对样品中的有机碳 (OC)/元素碳 (EC) 和左旋葡聚糖 (levoglucosan) 的质量浓度特征进行分析. 观测期间 OC 和 EC 的平均浓度分别为 $(11.3 \pm 4.9) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $(1.1 \pm 0.9) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 总碳 TC 占 $\text{PM}_{2.5}$ 的质量分数为 22.9%, OC/EC 的平均值为 7.4, SOC 占 OC 的质量分数为 51.9%. $\text{PM}_{2.5}$ 、OC、EC 和 SOC 质量浓度都体现出夜晚 > 白天的特征, 白天 OC 和 EC 的相关性好于夜晚 (相关性系数分别为 0.86 和 0.7). 通过分析 $\text{PM}_{2.5}$ 、左旋葡聚糖和 SOC 质量浓度以及后向轨迹和火点数据可知南京北郊在 13 ~ 16 号受到来自河北等地生物质燃烧远距离输送的影响. 采样期间 K^+ 和左旋葡聚糖与 OC、EC 和 SOC 的相关性显著 (相关性系数分别为 0.78、0.79 和 0.65), 经受体示踪物方法估算采样期间生物质燃烧对 OC 的贡献为 21.9%.

关键词: $\text{PM}_{2.5}$; 有机碳 (OC); 元素碳 (EC); 生物质燃烧; 左旋葡聚糖

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)07-3033-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201711243

Characteristics and Source Analysis of Carbonaceous Components of $\text{PM}_{2.5}$ During Autumn in the Northern Suburb of Nanjing

XU Zu-fei¹, CAO Fang^{1*}, GAO Song², BAO Meng-ying¹, SHI Yi-fan³, ZHANG Yan-lin¹, LIU Xiao-yan¹, FAN Mei-yi¹, ZHANG Wen-qi¹, BIAN Hang¹, LIU Shou-dong¹

(1. Yale-NUIST Center on Atmospheric Environment, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Jiangsu Electric Power Company Research Institute, Nanjing 210000, China; 3. Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Jiangsu Key Laboratory of Agricultural Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: In this study, $\text{PM}_{2.5}$ samples were collected from October to November of 2015 in the northern suburb of Nanjing. The mass concentrations of organic carbon (OC), elemental carbon (EC), and levoglucosan in the samples were analyzed by thermal optical transmittance (TOT) and ion chromatography. The average concentrations of OC and EC were respectively $(11.3 \pm 4.9) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ and $(1.1 \pm 0.9) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$. The average total carbon (TC) was 22.9%, and the OC/EC was 7.4. The quality concentrations of $\text{PM}_{2.5}$, OC, EC, and SOC all reflected daytime features, and the correlation between OC and EC was better during the day than at night (correlation coefficients of 0.86 for day and 0.7 for night). By analyzing the mass concentrations of $\text{PM}_{2.5}$, levoglucosan, and SOC, as well as the data of backward trajectories and fire point data, it was determined that the northern suburb of Nanjing is affected by the long-distance transportation of biomass from Hebei and other places from October 13-16. The correlations between levoglucosan and OC, EC, or SOC were significant (correlation coefficients of 0.78, 0.79, and 0.65, respectively), and the contribution of biomass combustion during sampling to OC was 21.9%.

Key words: $\text{PM}_{2.5}$; organic carbon (OC); elemental carbon (EC); biomass burning; levoglucosan

大气细颗粒物 ($\text{PM}_{2.5}$) 对全球气候变化和人体健康等具有重要的影响, 它能散射和吸收太阳光使全球辐射平衡受到破坏^[1], 可诱发呼吸系统、心血管疾病和机体突变等, 对人体健康造成伤害^[2]. 碳质气溶胶主要包括有机碳 (OC) 和元素碳 (EC). OC 和 EC 在 $\text{PM}_{2.5}$ 中所占比例极高, 约占 $\text{PM}_{2.5}$ 的 10% ~ 50%^[3], 而且对环境和人体健康有很大影响^[4~7]. EC 大多来源于一次排放的气溶胶中或者由化石燃料、生物质不完全燃烧产生^[8]; OC 的来

源相对复杂, 可以存在于一次排放的污染物中, 也可以由一次排放的有机碳 (POC) 通过光化学反应形成, 产物为二次有机碳 (SOC). 近年来我国对

收稿日期: 2017-11-27; 修订日期: 2018-01-04

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFC0212700); 国家自然科学基金青年科学基金项目 (41603104); 国家自然科学基金重大研究计划培育项目 (91644103); 江苏省自然科学基金青年基金项目 (BK20150895)

作者简介: 徐足飞 (1993 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为大气环境, E-mail: 20151212192@nuist.edu.cn

* 通信作者, E-mail: caofang@163.com

PM_{2.5}中含碳组分的时空分布、污染特征和来源等方面开展了大量的研究. 刘浩等^[9]对黄石市夏季PM_{2.5}中有机碳、元素碳浓度进行测定,发现黄石市大气颗粒物中OC易形成二次污染,而EC排放以烟炱为主;樊晓燕等^[10]测定了北京有机碳和元素碳的质量浓度,发现冬季OC和EC的主要来源为燃煤排放;张桂香等^[11]测定了太原市冬春两季以及昼夜的PM_{2.5}中OC和EC的浓度,发现OC和EC的浓度水平体现出冬季大于春季,夜晚大于白天这一特征.

近年来秋季大面积的秸秆燃烧事件报道持续增多,相关研究表明生物质燃烧对PM_{2.5}的形成有很大影响^[12]. 已有研究发现,城郊地区除工厂以及机动车尾气等的排放影响外,外源输送的生物质燃烧对PM_{2.5}的影响不可忽视^[13, 14],而大气颗粒物中的左旋葡聚糖目前被认为是生物质燃烧最有代表性的示踪物质^[15, 16],本研究采集了2015年10~11月(秋季)的南京北郊PM_{2.5}颗粒物样品,分析了OC和EC的污染特征,并且首次采用离子色谱法测定南京北郊PM_{2.5}中的左旋葡聚糖浓度,对南京北郊秋季受生物质燃烧的影响进行分析,结合气象数据、后向轨迹分析等手段分析PM_{2.5}颗粒物的来源,并且计算出生物质燃烧对OC的贡献率,以期对南京北郊颗粒物的污染治理提供重要的科学依据.

1 材料与方法

1.1 样品采集

采样地点位于南京信息工程大学距地约30 m的文德楼顶(E118°72', N32°21'),距江北快速路约200 m,附近有南钢集团、中石化集团、扬子石化、南化集团等化工企业,受到交通和工业污染的影响^[17~22]. 大气颗粒物PM_{2.5}样品采用国产中流量采样器(KC-1000, 青岛崂山)采集,流量为100 L·min⁻¹. 样品采集时间为2015年10月6日至11月5日,连续12 h采集到石英膜(PALL)上,白天采集时间为08:00~20:00,夜晚采集时间为20:00~08:00. 采样之前将滤膜用锡纸包好放入马弗炉中450℃高温灼烧6 h,待冷却后在干燥皿中平衡48 h,在恒定的温度(20~23℃)和相对湿度(40%~60%)下用电子天平(万级,BS124S, SARTURIUS)进行称重,称重后放入冰箱-24℃保存.

1.2 样品分析

1.2.1 OC和EC的测定及SOC的估算

采用美国Sunset Lab公司Model-4型全自动半

连续式分析仪对样品中的有机碳(OC)和元素碳(EC)进行测定. 该仪器测量原理为热光透射法(thermal-optical transmittance method, TOT),热光法的基本原理是在分析过程中引入一束激光用来监测滤膜对激光的响应信号,确定OC与EC的分割点,以校正碳化所引起的误差. 升温程序选用稍作改动后的NIOSH5040方法^[23],具体步骤为:①从样品中截取面积为2.27 cm²的石英滤膜,放入石英炉内. ②样品在氦气的非氧化环境中逐级升温至870℃,致使OC被加热挥发(该过程中也有部分OC被碳化;即pyrolyzed carbon, PC),在此炉温下保持一段时间后,冷却至550℃. ③此后样品又在氦气/氧气混合气(He/O₂)环境中逐级升温至870℃,该过程中EC被氧化分解为气态氧化物. 这两个步骤中所产生的分解产物都随氦气(He)进入二氧化锰(MnO₂)氧化炉被转化为CO₂后由非红外色散法(NDIR)定量检验. 整个过程中都有一束激光照在石英膜上,波长为658 nm,这样在OC炭化时激光的透射光的强度会逐渐减弱,而在He切换成He/O₂同时加温时、随着PC和EC的氧化分解激光之透射光会逐渐增强. 当透射光的强度恢复到起始强度时,这一时刻就定义为OC/EC分割点、亦即该时刻之前检测到的碳量就定义为样品的OC,而其后检测到的碳量则对应于样品中EC.

每次样品分析结束后,仪器都会通入定量的氦气/甲烷(He/CH₄)标气,用CH₄标准峰来定量样品分析结果和校正NDIR. 在每次样品分析过程中可能发生的漂移. 测样开始前和结束后用标准蔗糖溶液进行外标校正,采用内外标联合校正确保仪器具有较高的精准度,其检出限为0.5 μg·m⁻³. 分析样品过程进行空白校正.

本文使用Turpin等^[24]提出的经验公式对SOC进行定量的描述:

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

式中,(OC/EC)_{min}为本次观测的OC/EC的最小值,昼夜的SOC分别选用了昼夜的(OC/EC)_{min}进行计算,昼夜的(OC/EC)_{min}分别为3.9和2.7.

1.2.2 左旋葡聚糖的测定

截取面积为3.14 cm²的滤膜样品放入30 mL塑料瓶中,加入3 mL超纯水后超声振荡30 min(放置冰袋避免水温升高). 萃取液经过针式滤器(0.22 μm, 上海ANPEL)过滤到进样管中,用离子色谱(ICS-5000⁺, Thermo)进行分析测试. 分离系统采用的是Dionex CarboPacTM MA1分析柱(4×250

mm) 和 Dionex CarboPacTM MA1 保护柱 (4×50 mm), 进样体积为 $200 \mu\text{L}$; 以 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaOH 和水为淋洗液进行二元梯度淋洗, 流速 $0.4 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$, 总运行时间为 60 min, 包括: 15 min 的平衡期; 15 ~ 34 min 的淋洗浓度为 $300 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaOH; 34 ~ 45 min 的淋洗浓度为 $480 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaOH; 45 ~ 60 min 为 $480 \sim 650 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaOH 的线性梯度淋洗期. 样品浓度采用标准曲线进行定量, 选取了 1、2、5、10、20、50、100、200、500、1 000 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 这 9 个标准浓度, 相关系数为 99.98. 空白样品中左旋葡聚糖的测定结果低于检出限 $0.8 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$.

1.3 数据来源和分析方法

使用 NOAA 数据资料建立了 HYSPLIT 后向轨迹模型对流向南京北郊的气流轨迹进行模拟, 时间后推 72 h, 高度使用 (m-AGL) 100、500、1 000 m 高度. 气象数据取自南京信息工程大学气象观测场小气候气象观测仪, 包括气温 (T)、相对湿度 (RH)、风速 (WS)、风向 (WD) 等, 时间间隔为 1 h. 卫星火点数据下载自美国国家航空航天局 (NASA) 官网 (<https://earthdata.nasa.gov/firms>).

2 结果与讨论

2.1 碳质组分特征分析

2.1.1 $PM_{2.5}$ 及其 OC、EC 浓度变化特征

采样期间, 南京北郊 $PM_{2.5}$ 平均浓度为 $(54.1 \pm 28.9) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 低于我国环境空气质量 (GB 3095-2012) 日平均二级标准浓度限值 $75 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$. 与沈铁迪等^[25] 2011 年 11 月在鼓楼区的研究相比, $PM_{2.5}$ 浓度基本持平. 从图 1 可以看出, 采样期间有两次污染过程, 第一个污染过程发生在 13 ~ 16 号, $PM_{2.5}$ 平均浓度为 $83.3 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$; 第二个污染过程出现在 22 ~ 24 号, $PM_{2.5}$ 平均浓度为 $84.4 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$. $PM_{2.5}$ 浓度于 22 号夜晚达到峰值 ($132.1 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$), 为本次采样期间的最高浓度.

采样期间南京北郊 OC 和 EC 的变化趋势与 $PM_{2.5}$ 浓度变化趋势相似, 说明采样点附近的排放源在采样期间比较稳定. OC 和 EC 的平均浓度分别为 $(11.3 \pm 4.9) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $(1.1 \pm 0.9) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 总碳 TC 占 $PM_{2.5}$ 的质量分数为 22.9%,

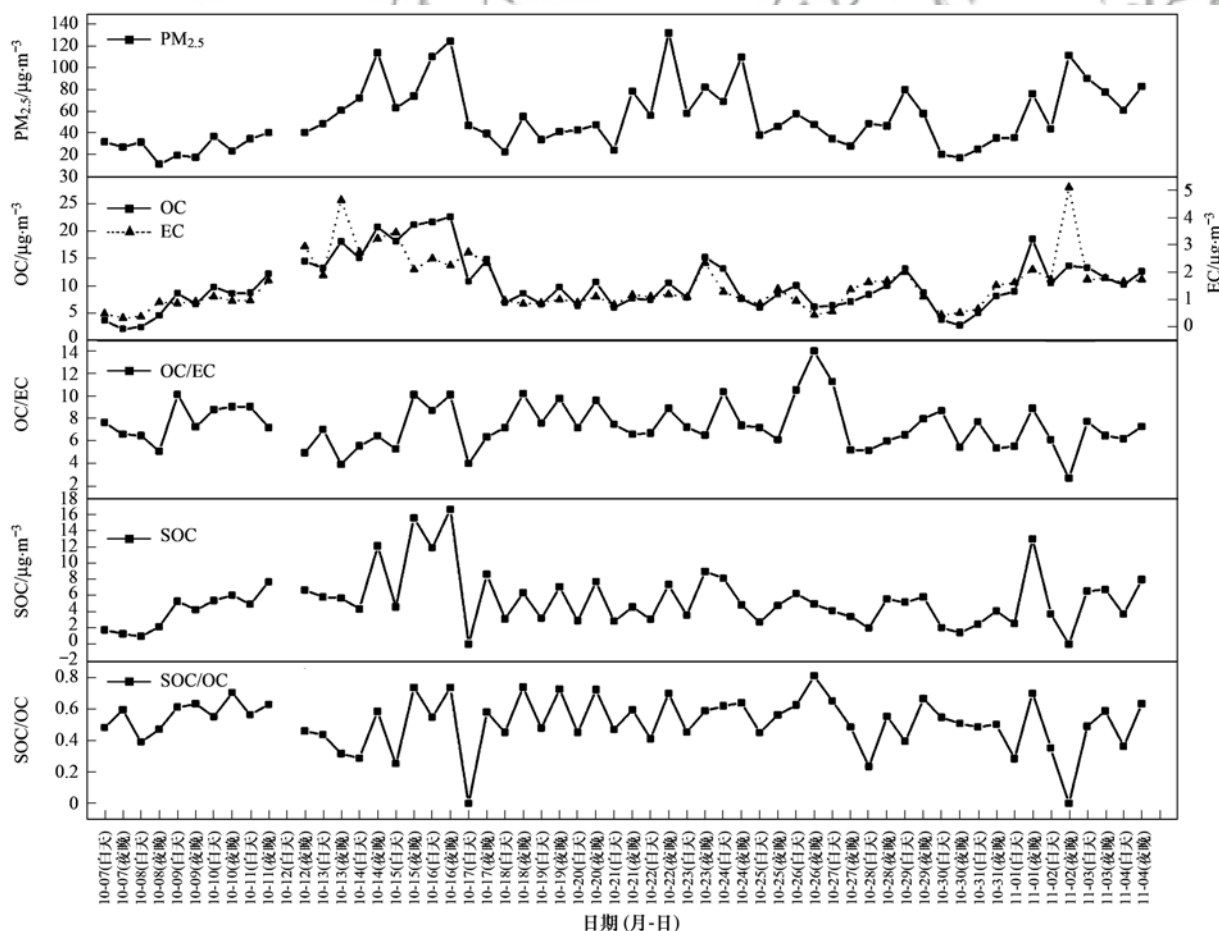


图 1 $PM_{2.5}$ 及 OC、EC 浓度变化特征

Fig. 1 Daily variation of $PM_{2.5}$, OC and EC mass concentrations

与吴梦龙等^[22]在2011年秋季的研究相比(15.25%), TC占比较大,但小于重工业城市西安^[26](30.05%)。本研究测得的碳质组分浓度与其他城市研究结果对比如表1所示,采样期间南

京北郊地区的OC、EC质量浓度低于2011年秋季的武汉^[27]和2013年秋季的贵阳^[28],并且低于受生物质燃烧影响严重的万州^[29]和成都^[30],与同为长三角城市的上海^[31]相当。

表1 国内城市大气细粒子中碳质组分浓度特征

Table 1 Concentration characteristics of carbonaceous components in fine particles in China

采样地点	时间	OC/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	EC/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	OC/EC	SOC/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	SOC/OC/%	TC/PM _{2.5} /%	方法	文献
本研究	2015年秋季	11.3	1.1	7.4	5.3	51.9	22.9	TOT	本研究
南京南化	2011年秋季	13.24	2.69	5.09	5.73	43.27	15.25	TOR	[22]
西安	2013年秋季	29.77	8.4	3.54	—	—	30.05	TOT	[26]
武汉	2011年秋季	22.60	3.10	7.29	—	—	19.32	TOT	[27]
贵阳	2013年秋季	14.90	2.31	6.45	6.89	46.40	20.76	TOR	[28]
万州	2013年冬季	16.82	6.87	—	—	—	—	TOR	[29]
成都	2012年秋季	14.40	6.00	2.50	—	—	—	TOR	[30]
上海	2010年秋季	8.60	2.20	3.91	4.9	47.9	22.10	TOR	[31]

2.1.2 OC和EC比值分析及SOC的估值

OC和EC的比值可以用于分析碳质气溶胶的来源^[32]: OC和EC的比值为1.0~4.2表明有柴油和汽油车的尾气排放^[33],比值为3.8~13.2表明存在生物质燃烧排放^[34],2.5~10.5表明燃煤排放^[35],本研究中OC和EC的比值大多在5~12之间(图1),平均比值为7.4,表明本研究区域主要可能受到燃煤排放、生物质燃烧排放的影响。

OC和EC的比值还可用于评价和估算碳质气溶胶的二次来源贡献^[36]。使用Turpin等^[24]提出的经验公式计算出采样期间SOC的平均浓度为 $(5.3 \pm 3.4) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,SOC对OC的平均贡献为 $(51.9 \pm 0.2)\%$,高于上海^[28]、贵阳^[29]以及西安^[37],说明SOC是南京北郊大气PM_{2.5}中OC的重要组成部分,与郭安可等^[38]的研究结果一致。与吴梦龙等^[22]在南化的研究相比(表1),SOC浓度变化不大,但

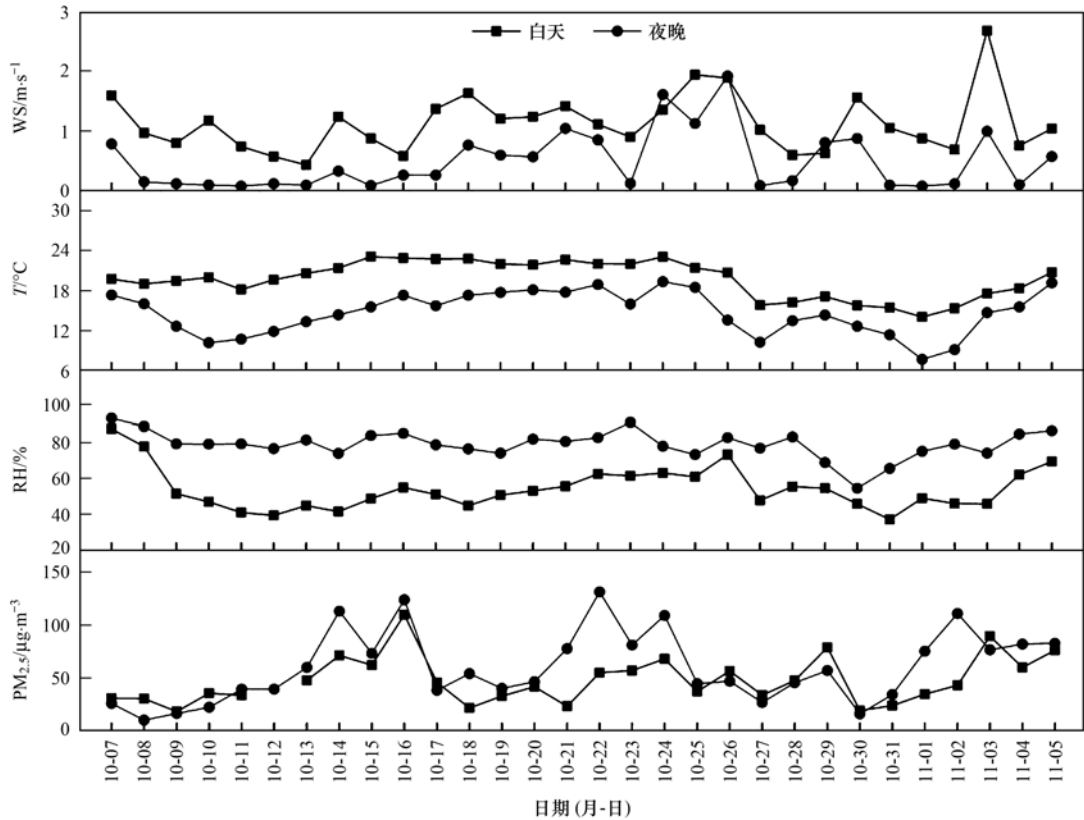


图2 PM_{2.5}浓度及各气象要素昼夜时间变化曲线

Fig. 2 Diurnal variation of PM_{2.5} concentration and meteorological elements

SOC 对 OC 的平均贡献略有提高,表明南京北郊的二次污染程度依然严重.

2.2 昼夜特征分析

采样期间白天和夜间 PM_{2.5} 浓度存在显著差异,夜间平均浓度为 (59.4 ± 33.8) μg·m⁻³,高于白天平均浓度 (48.5 ± 22.1) μg·m⁻³,与方小珍等^[39]在廊坊市秋季的研究结果一致. 图 2 展示了白天和夜间 PM_{2.5} 浓度及各气象要素变化曲线. 从中可以看出,采样期间各气象要素的特征主要体现在夜间的温度低于白天、夜间的相对湿度高于白天,低温高湿的环境更利于二次有机气溶胶的生成,夜间相对较低的风速使得空气中的污染物不易被扩散,且夜间边界层高度较低,这样的气象条件可能是造成夜

间 PM_{2.5} 浓度值普遍高于白天的主要原因^[40].

通过研究 OC 和 EC 的相关关系可以较好地地区分碳质气溶胶的来源^[41],如果 OC 和 EC 的相关性好,说明它们有很大一部分相同或者近似的污染源. 本文分别对南京北郊白天和夜晚的 OC 和 EC 的相关关系进行了分析(图 3),白天 OC 和 EC 的相关性系数为 0.86,表明白天 OC 与 EC 有相同的来源以及扩散过程. 而夜晚的 OC 和 EC 的相关性系数为 0.7,比白天略差,这与张桂香等^[11]对于太原市冬季的研究是一致的,这表明夜晚 OC 和 EC 的来源相较于白天更加复杂,这个现象可能是夜晚高湿的环境有利于生成更多的二次颗粒物造成的.

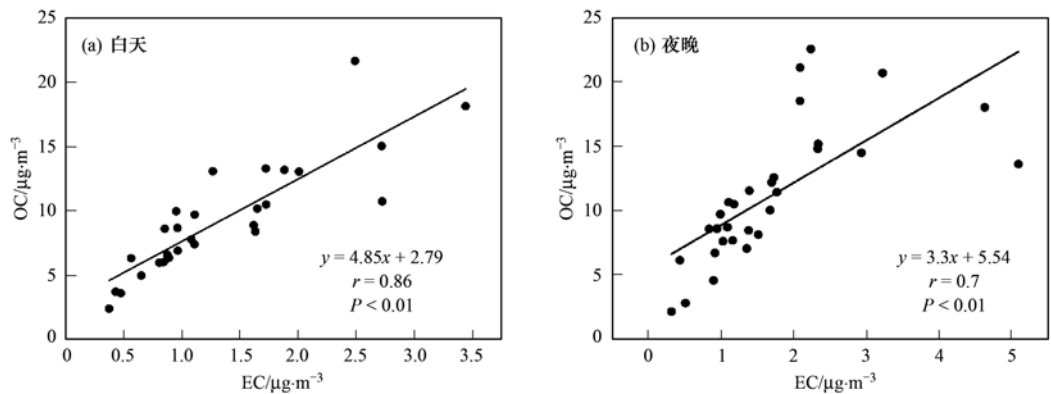


图3 OC 和 EC 在白天和夜晚的相关关系
Fig. 3 Correlation between OC and EC during the day and night

分别计算了采样期间白天和夜间各要素的平均浓度,如表 2 所示. 夜间 OC、EC 和 SOC 的平均浓度为 (11.2 ± 5.2)、(1.7 ± 1.1) 和 (6.6 ± 3.9) μg·m⁻³,均高于白天的平均浓度,与 PM_{2.5} 浓度昼夜变化差异一致. 夜间 SOC/OC 平均值为 (59.4 ± 15.4)%,显著高于白天的 (43.9 ± 14.1)%,并且 16 号夜晚 SOC 浓度到达最高值 16.6 μg·m⁻³,SOC 对 OC 的贡献率也达到峰值 (73.5%),这验证了之前的推测:采样期间南京北郊夜晚空气的相对湿度较高(平均相对湿度为 78.9%),使得大气中的细粒子更容易通过水汽作为载体在空气中发生反应形成更多的二次颗粒物.

此外,南京秋冬季夜晚边界层高度低,再加上表 2 中夜晚的平均风速只有白天的一半,这阻碍了空气的垂直对流运动,妨碍了附近工厂排放的污染物、汽车尾气、水汽凝结物的扩散,较高的相对湿度使得边界层中的细粒子不断发生凝结,不断生成二次颗粒物,这是夜晚各污染物浓度普遍比白天要高的主要原因,可见南京北郊秋季夜晚对 OC 和 EC 污染

表 2 PM_{2.5}、OC、EC 以及气象要素昼夜对比
Table 2 Comparison of PM_{2.5}, OC, EC, and meteorological elements between day and night

项目	白天	夜晚
PM _{2.5} /μg·m ⁻³	48.5 ± 22.1	59.4 ± 33.8
OC/μg·m ⁻³	9.3 ± 4.4	11.2 ± 5.2
EC/μg·m ⁻³	1.4 ± 0.8	1.7 ± 1.1
SOC/μg·m ⁻³	4.1 ± 2.4	6.6 ± 3.9
SOC/OC/%	43.9 ± 14.1	59.4 ± 15.4
风速/m·s ⁻¹	1.1 ± 0.5	0.5 ± 0.5
气温/℃	19.8 ± 2.7	14.8 ± 3.2
相对湿度/%	54.4 ± 11.6	78.9 ± 7.5

的影响较大.

2.3 生物质燃烧污染特性分析

2.3.1 污染时段分析

左旋葡聚糖 (levoglucosan) 目前被认为是生物质燃烧最有代表性的示踪物质,本文分析了左旋葡聚糖浓度时间变化,如图 4 所示. 在采样期间南京北郊左旋葡聚糖平均浓度为 (179.6 ± 119.3) ng·m⁻³,远高于香港^[42] (30.0 ± 22.2) ng·m⁻³ 和浙江临安^[42] (51.1 ± 30.1) ng·m⁻³,约为 Fu^[12] 等在华

北地区生物质燃烧期间观测结果的一半 ($403 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$). 13~16号是本次观测期间污染严重的时段,与 $\text{PM}_{2.5}$ 、OC、EC 以及 SOC 浓度相同,左旋葡聚糖浓度也在此期间达到峰值 ($487.1 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$),远高于本次采样的平均浓度,表明生物质燃烧可能对本次污染有较大的贡献。

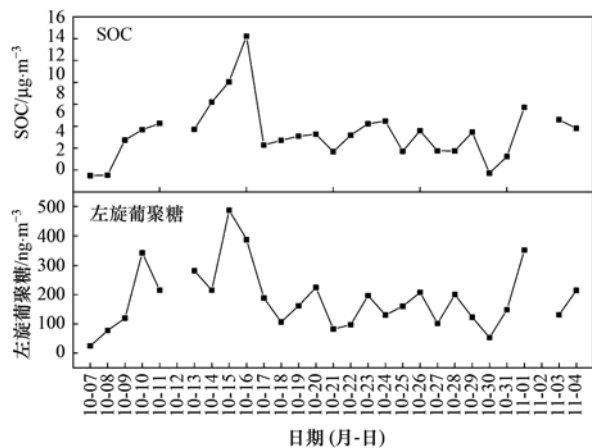


图4 左旋葡聚糖和 SOC 浓度时间变化曲线

Fig. 4 Daily variation of levoglucosan and SOC mass concentrations

为了探究本次污染的来源,本研究利用 NOAA 数据资料建立 HYSPLIT 后向轨迹模型对 13~16 号之间污染时期进行模拟(图 5),从图 5 中可知,13 号到达南京北郊的气团主要来源于南京的东北部地区,途经河北、山东等地最后到达南京北郊. 根据 NASA 官网 10 月 8~10 日的火点数据可以看出 10 月 8~10 日这两天河北和山东等地有较为密集的大范围火点,72 h 后南京北郊 $\text{PM}_{2.5}$ 中左旋葡聚糖和 SOC 浓度达到高峰,所以推测来自河北和山东等地生物质燃烧的远距离传输以及由其排放的颗粒物老

化产生的 SOC 是造成南京北郊 13~16 号之间污染的重要原因之一. 而在 22~24 号这一污染期间,左旋葡聚糖和 SOC 浓度变化相对平稳, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的高值主要出现在夜晚(图 2),所以夜间来自附近工厂过度的一次排放可能是造成这一时段污染的主要原因,而夜间不利的气象条件更使得本次污染加剧。

2.3.2 K^+ 和左旋葡聚糖与 SOC、OC、EC 的相关关系分析

K^+ 也是生物质燃烧重要的代表物质,采样期间 K^+ 与左旋葡聚糖的相关性显著(相关性系数为 0.77). 图 6 为 K^+ 和左旋葡聚糖与 SOC、OC、EC 的相关关系,从中可以发现 K^+ 和左旋葡聚糖与 SOC 之间的相关性较好(相关性系数分别为 0.74 和 0.78),并且整个采样期间左旋葡聚糖与 SOC 变化趋势极其相似(图 4),这可能是生物质燃烧(如秸秆)排放了较多的碳氢化合物以及 VOCs,最终转化生成 SOC 造成的^[39]. K^+ 和左旋葡聚糖与 OC 的相关性也很好(相关性系数分别为 0.75 和 0.79),这说明它们的同源性强,生物质燃烧是采样期间非常重要的一个污染源,而 K^+ 和左旋葡聚糖与 EC 亦有一定相关性(相关性系数分别为 0.66 和 0.65),但相比 SOC 和 OC 较弱,说明生物质燃烧亦贡献了较多 EC,但是绝大部分生物质燃烧的排放物最终转化成 SOC,这很有可能与颗粒物在传输过程中的老化有关。

2.3.3 生物质燃烧对 OC 的贡献

本研究通过受体示踪物方法,利用示踪物左旋葡聚糖与 OC 浓度通过下式对生物质燃烧贡献进行估算^[43].

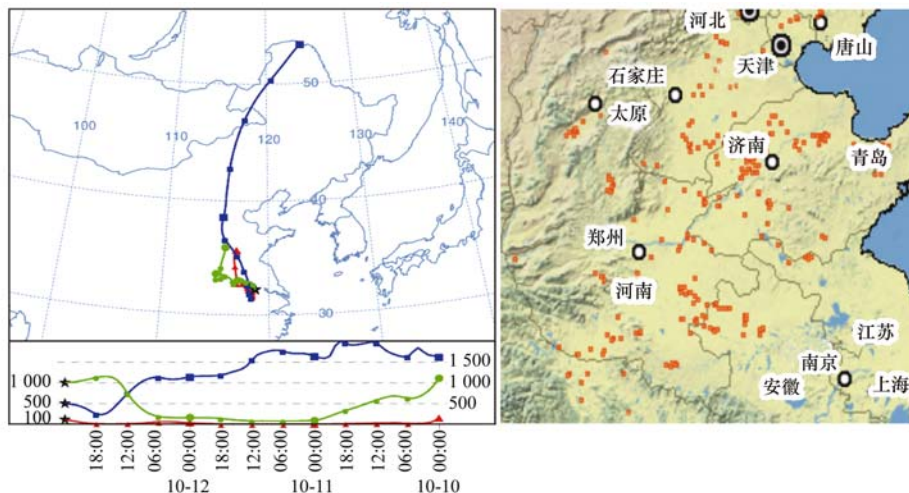


图5 10月13日72h后向轨迹模拟和10月8~10日火点数据

Fig. 5 The 72 h backward trajectories of air mass arriving in the northern suburb of Nanjing on October 13 and fire point data for October 8-10

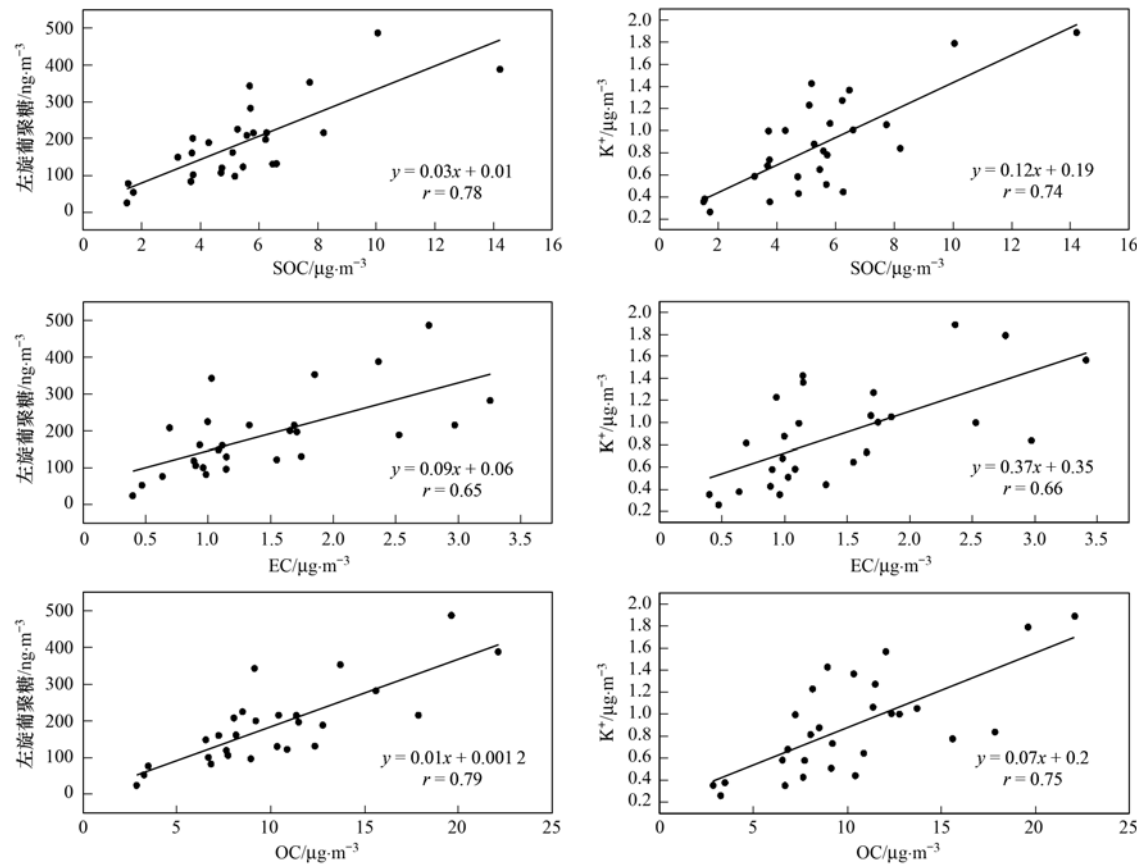


图 6 K⁺ 和左旋葡聚糖与 SOC、OC、EC 的相关关系

Fig. 6 Correlation between levoglucosan or potassium and SOC, EC, or OC

生物质燃烧贡献(%) = $\frac{(\text{左旋葡聚糖}/\text{OC})_{\text{样品}}}{(\text{左旋葡聚糖}/\text{OC})_{\text{源}}}$

式中, $(\text{左旋葡聚糖}/\text{OC})_{\text{样品}}$ 代表本次采样左旋葡聚糖与 OC 的平均比值(1.8%); $(\text{左旋葡聚糖}/\text{OC})_{\text{源}}$ 代表生物质燃烧源谱中左旋葡聚糖与 OC 的比值, 参考 Zhang 等^[44]对中国谷类秸秆燃烧排放的 PM_{2.5} 中左旋葡聚糖对 OC 的平均排放因子 8.3%, 估算结果为 21.9%, 高于浙江临安^[42](5.5%), 说明采样期间生物质燃烧对南京北郊 OC 的贡献较大, 由此可见, 生物质燃烧对于南京北郊秋季的污染影响不可忽视. 13~16 号污染期间左旋葡聚糖与 OC 的平均比值为 2.5%, 生物质燃烧对 OC 的贡献估算结果为 30.1%, 这也证实了生物质燃烧是造成本次污染的重要原因之一.

3 结论

(1) 2015 年秋季南京北郊区 PM_{2.5} 平均浓度为 $(54.1 \pm 28.9) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, OC 和 EC 的平均浓度分别为 $(11.3 \pm 4.9) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $(1.1 \pm 0.9) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 变化趋势与 PM_{2.5} 相似. OC/EC 的平均值为 7.4, 表明研究区域可能受到燃煤排放和生物质燃烧排放的影

响. 和 2011 年同期相比, 本研究中 SOC 占 OC 的质量分数略有上升, 表明南京北郊的二次污染程度依然严重.

(2) 采样期间南京北郊的 PM_{2.5}、OC、EC 和 SOC 浓度都体现出夜晚 > 白天的特征, 白天 OC 和 EC 的相关性好于夜晚, 因为夜晚的风速小于白天, 不利于污染物的扩散, 并且夜晚空气的相对湿度远高于白天, 容易产生更多的 SOC.

(3) PM_{2.5}、左旋葡聚糖和 SOC 浓度在 13~16 号之间达到高峰, 根据后向轨迹和火点数据分析可知南京北郊在 13~16 号受到来自河北等地生物质燃烧远距离输送的影响, 22~24 号的污染可能主要是由附近的一次排放源和不利的天气条件造成的. K⁺ 和左旋葡聚糖与 OC、EC 和 SOC 的相关性较强, 生物质燃烧对 OC 的贡献估算结果为 21.9%, 说明生物质燃烧对南京北郊秋季的污染影响较大.

参考文献:

[1] Kleefeld S, Hoffer A, Krivácsy Z, et al. Importance of organic and black carbon in atmospheric aerosols at mace head, on the West Coast of Ireland (53°19'N, 9°54'W) [J]. Atmospheric Environment, 2002, 36(28): 4479-4490.

[2] Matsumoto H, Inoue K. Mutagenicity of a polar portion in the

- neutral fraction separated from organic extracts of airborne particulates[J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 1987, **16**(4): 409-416.
- [3] Schauer J J, Mader B T, DeMinter J T, *et al.* ACE-Asia Intercomparison of a thermal-optical method for the determination of particle-phase organic and elemental carbon [J]. Environmental Science & Technology, 2003, **37**(5): 993-1001.
- [4] Kuhlbusch T A J. Ocean chemistry: black carbon and the carbon cycle[J]. Science, 1998, **280**(5371): 1903-1904.
- [5] Zhang Y L, Liu D, Shen C D, *et al.* Development of a preparation system for the radiocarbon analysis of organic carbon in carbonaceous aerosols in China[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2010, **268**(17-18): 2831-2834.
- [6] 段凤魁, 贺克斌, 刘咸德, 等. 含碳气溶胶研究进展: 有机碳和元素碳[J]. 环境工程学报, 2007, **1**(8): 1-8.
- Duan F K, He K B, Liu X D, *et al.* Review of carbonaceous aerosol studies: organic carbon and elemental carbon [J]. Environmental Engineering, 2007, **1**(8): 1-8.
- [7] 尚倩, 李子华, 杨军, 等. 南京冬季大气气溶胶粒子谱分布及其对能见度的影响[J]. 环境科学, 2011, **32**(9): 2750-2760.
- Shang Q, Li Z H, Yang J, *et al.* Size distributions of aerosol particles and the impact on visibility in winter of Nanjing[J]. Environmental Science, 2011, **32**(9): 2750-2760.
- [8] Menon S, Hansen J, Nazarenko L, *et al.* Climate effects of blackcarbon aerosols in China and India[J]. Science, 2002, **297**(5590): 2250-2253.
- [9] 刘浩, 张家泉, 张勇, 等. 黄石市夏季昼间大气 PM_{10} 与 $PM_{2.5}$ 中有机碳、元素碳污染特征[J]. 环境科学学报, 2014, **34**(1): 36-42.
- Liu H, Zhang J Q, Zhang Y, *et al.* Pollution characteristics of organic carbon and elemental carbon in atmospheric particles during the summer day in Huangshi City[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, **34**(1): 36-42.
- [10] 樊晓燕, 温天雪, 徐仲均, 等. 北京大气颗粒物碳质组分粒径分布的季节变化特征[J]. 环境化学, 2013, **32**(5): 742-747.
- Fan X Y, Wen T X, Xu Z J, *et al.* Characteristics and size distributions of organic and element carbon of atmospheric particulate matters in Beijing, China [J]. Environmental Chemistry, 2013, **32**(5): 742-747.
- [11] 张桂香, 闫雨龙, 郭利利, 等. 太原市大气 $PM_{2.5}$ 中碳质组成及变化特征[J]. 环境科学, 2015, **36**(3): 780-786.
- Zhang G X, Yan Y L, Guo L L, *et al.* Composition and variation characteristics of atmospheric carbonaceous species in $PM_{2.5}$ in Taiyuan, China[J]. Environmental Science, 2015, **36**(3): 780-786.
- [12] 张媛, 耿红, 张东鹏, 等. 生物质燃烧和采暖燃煤对太原市大气 $PM_{2.5}$ 的影响[J]. 安徽农业科学, 2016, **44**(5): 109-112, 118.
- Zhang Y, Geng H, Zhang D P, *et al.* Influences of biomass and coal burning on ambient fine particulate matter over Taiyuan City [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2016, **44**(5): 109-112, 118.
- [13] 张玉洽, 杨迎春, 李杰, 等. 东南亚生物质燃烧对我国春季 $PM_{2.5}$ 质量浓度影响的数值模拟[J]. 环境科学研究, 2016, **29**(7): 952-962.
- Zhang Y Q, Yang Y C, Li J, *et al.* Modeling the impacts of biomass burning in Southeast Asia on $PM_{2.5}$ over China in spring [J]. Research of Environmental Sciences, 2016, **29**(7): 952-962.
- [14] Urban R C, Lima-Souza M, Caetano-Silva L, *et al.* Use of levoglucosan, potassium, and water-soluble organic carbon to characterize the origins of biomass-burning aerosols [J]. Atmospheric Environment, 2012, **61**: 562-569.
- [15] Kundu S, Kawamura K, Andreae T W, *et al.* Diurnal variation in the water-soluble inorganic ions, organic carbon and isotopic compositions of total carbon and nitrogen in biomass burning aerosols from the LBA-SMOCC campaign in Rondônia, Brazil [J]. Journal of Aerosol Science, 2010, **41**(1): 118-133.
- [16] Fu P Q, Kawamura K, Chen J, *et al.* Diurnal variations of organic molecular tracers and stable carbon isotopic composition in atmospheric aerosols over Mt. Tai in the North China Plain: an influence of biomass burning [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2012, **12**(18): 8359-8375.
- [17] 王飞, 朱彬, 康汉清, 等. APS-SMPS-WPS 对南京夏季气溶胶数浓度的对比观测[J]. 中国环境科学, 2011, **31**(9): 1416-1423.
- Wang F, Zhu B, Kang H Q, *et al.* Comparative observations on summer aerosol number concentration measured by APS-SMPS-WPS in Nanjing area[J]. China Environmental Science, 2011, **31**(9): 1416-1423.
- [18] 吴梦龙, 郭照冰, 刘凤玲, 等. 南京市 $PM_{2.5}$ 中有机碳和元素碳污染特征及影响因素[J]. 中国环境科学, 2013, **33**(7): 1160-1166.
- Wu M L, Guo Z B, Liu F L, *et al.* Pollution characteristics and influencing factors of organic and elemental carbon in $PM_{2.5}$ in Nanjing [J]. China Environmental Science, 2013, **33**(7): 1160-1166.
- [19] 陈魁, 银燕, 魏玉香, 等. 南京大气 $PM_{2.5}$ 中碳组分观测分析[J]. 中国环境科学, 2010, **30**(8): 1015-1020.
- Chen K, Yin Y, Wei Y X, *et al.* Characteristics of carbonaceous aerosols in $PM_{2.5}$ in Nanjing[J]. China Environmental Science, 2010, **30**(8): 1015-1020.
- [20] 银燕, 童尧青, 魏玉香, 等. 南京市大气细颗粒物化学成分分析[J]. 大气科学学报, 2009, **32**(6): 723-733.
- Yin Y, Tong Y Q, Wei Y X, *et al.* The analysis of chemistry composition of fine-mode particles in Nanjing[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2009, **32**(6): 723-733.
- [21] 段卿, 安俊琳, 王红磊, 等. 南京北郊夏季大气颗粒物中有机碳和元素碳的污染特征[J]. 环境科学, 2014, **35**(7): 2460-2467.
- Duan Q, An J L, Wang H L, *et al.* Pollution characteristics of organic and elemental carbon in atmospheric particles in Nanjing Northern Suburb in summer[J]. Environmental Science, 2014, **35**(7): 2460-2467.
- [22] 吴梦龙, 郭照冰, 刘凤玲, 等. 南京市大气颗粒物中有机碳和元素碳粒径分布特征[J]. 环境科学, 2014, **35**(2): 451-457.
- Wu M L, Guo Z B, Liu F L, *et al.* Size distributions of organic carbon and elemental carbon in Nanjing aerosol particles [J]. Environmental Science, 2014, **35**(2): 451-457.
- [23] 周敏, 陈长虹, 王红丽, 等. 上海秋季典型大气高污染过程中有机碳和元素碳的变化特征[J]. 环境科学学报, 2013, **33**(1): 181-188.
- Zhou M, Chen C H, Wang H L, *et al.* The variation

- characteristics of organic and element carbon during air pollution episodes in autumn in Shanghai, China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, **33**(1): 181-188.
- [24] 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.
- [25] 沈铁迪, 王体健, 陈璞珑, 等. 南京城区夏秋季能见度与 PM_{2.5} 化学成分的关系 [J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(3): 652-658.
- Shen T D, Wang T J, Chen P L, *et al.* Relationship between atmospheric visibility and chemical composition of PM_{2.5} in the summer and autumn of Nanjing [J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(3): 652-658.
- [26] 王帆, 韩婧, 张俊, 等. 西安城区大气 PM_{2.5} 中有机碳与元素碳的污染特征 [J]. *环境保护科学*, 2015, **41**(2): 80-85.
- Wang F, Han J, Zhang J, *et al.* Simple analysis of pollution characteristics of organic carbon and elemental carbon in PM_{2.5} in the atmosphere of Xi'an City [J]. *Environmental Protection Science*, 2015, **41**(2): 80-85.
- [27] 成海容, 王祖武, 冯家良, 等. 武汉市城区大气 PM_{2.5} 的碳组分与源解析 [J]. *生态环境学报*, 2012, **21**(9): 1574-1579.
- Cheng H R, Wang Z W, Feng J L, *et al.* Carbonaceous species composition and source apportionment of PM_{2.5} in urban atmosphere of Wuhan [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, **21**(9): 1574-1579.
- [28] 王珍, 郭军, 陈卓. 贵阳市秋、冬季 PM_{2.5} 中碳组分污染特征及来源分析 [J]. *地球与环境*, 2015, **43**(3): 285-289.
- Wang Z, Guo J, Chen Z. Characteristics and source analysis of carbonaceous aerosol in PM_{2.5} of Guiyang City, P. R. China during autumn-winter period [J]. *Earth and Environment*, 2015, **43**(3): 285-289.
- [29] 彭超, 翟崇治, 王欢博, 等. 万州城区夏季、冬季 PM_{2.5} 中有机碳和元素碳的浓度特征 [J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(6): 1638-1644.
- Peng C, Zhai C Z, Wang H B, *et al.* Characteristics of organic carbon and elemental carbon in PM_{2.5} in the urban Wanzhou area in summer and winter [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(6): 1638-1644.
- [30] 瞿群, 杨毅红, 宋丹林, 等. 成都典型秸秆燃烧季节 PM_{2.5} 中化学成分研究 [J]. *气候与环境研究*, 2016, **21**(4): 439-448.
- Qu Q, Yang Y H, Song D L, *et al.* Chemical characterization of PM_{2.5} at urban Chengdu during the typical biomass burning season [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2016, **21**(4): 439-448.
- [31] 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 Y H, 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.
- [32] Duan J C, Tan J H, Wang S L, *et al.* Roadside, urban, and rural comparison of size distribution characteristics of PAHs and carbonaceous components of Beijing, China [J]. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 2012, **69**(4): 337-349.
- [33] Schauer J J, Kleeman M J, Cass G R, *et al.* Measurement of emissions from air pollution sources. 5. C₁-C₃₂ organic compounds from gasoline-powered motor vehicle [J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, **36**(6): 1169-1180.
- [34] He L Y, Hu M, Huang X F, *et al.* Measurement of emissions of fine particulate organic matter from Chinese cooking [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, **38**(38): 6557-6564.
- [35] Chen Y J, Zhi G R, Feng Y L, *et al.* Measurements of emission factors for primary carbonaceous particles from residential raw-coal combustion in China [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, **33**(20): L20815.
- [36] Chow J C, Watson J G, Lu Z Q, *et al.* Descriptive analysis of PM_{2.5} and PM₁₀ at regionally representative locations during SJVAQS/AUSPEX [J]. *Atmospheric Environment*, 1996, **30**(12): 2079-2112.
- [37] 霍宗权, 沈振兴, 田晶, 等. 西安市大气 PM₁₀ 中水溶性有机碳的季节变化及来源分析 [J]. *西安交通大学学报*, 2010, **44**(9): 128-132.
- Huo Z Q, Shen Z X, Tian J, *et al.* Seasonal variation and source identification of water-soluble organic carbon in PM₁₀ over Xi'an, China [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2010, **44**(9): 128-132.
- [38] 郭安可, 郭照冰, 张海潇, 等. 南京北郊冬季 PM_{2.5} 中水溶性离子以及碳质组分特征分析 [J]. *环境化学*, 2017, **36**(2): 248-256.
- Guo A K, Guo Z B, Zhang H X, *et al.* Analysis of water soluble ions and carbon component in PM_{2.5} in the northern suburb of Nanjing in winter [J]. *Environmental Chemistry*, 2017, **36**(2): 248-256.
- [39] 方小珍, 吴琳, 刘明月, 等. 廊坊市秋季环境空气中颗粒物组分昼夜变化特征研究 [J]. *环境科学学报*, 2017, **37**(4): 1243-1250.
- Fang X Z, Wu L, Liu M Y, *et al.* Diurnal variation of ambient PM_{2.5} and PM₁₀ compositions in autumn in Langfang City [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, **37**(4): 1243-1250.
- [40] Yu X Y, Cary R A, Laulainen N S. Primary and secondary organic carbon downwind of Mexico City [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, **9**(18): 6793-6814.
- [41] Turpin B J, Cary R A, Huntzicker J J. An in situ, time-resolved analyzer for aerosol organic and elemental carbon [J]. *Aerosol Science and Technology*, 1990, **12**(1): 161-171.
- [42] 罗运阔, 陈尊裕, 张轶男, 等. 中国南部四背景地区春季大气碳质气溶胶特征与来源 [J]. *中国环境科学*, 2010, **30**(11): 1543-1549.
- Luo Y K, Chen Z Y, Zhang Y N, *et al.* Characteristics and sources of carbonaceous aerosols in spring at four background sites in South China [J]. *China Environmental Science*, 2010, **30**(11): 1543-1549.
- [43] Wang Q Q, Shao M, Liu Y, *et al.* Impact of biomass burning on urban air quality estimated by organic tracers: Guangzhou and Beijing as cases [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(37): 8380-8390.
- [44] Zhang Y X, Shao M, Zhang Y H, *et al.* Source profiles of particulate organic matters emitted from cereal straw burnings [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2007, **19**(2): 167-175.

CONTENTS

Spatial-Temporal Change Evolution of PM _{2.5} in Typical Regions of China in Recent 20 Years	LUO Yi, DENG Qiong-fei, YANG Kun, <i>et al.</i> (3003)
Evaluation the Extent of Health Damage Caused by PM _{2.5} Particulate in Xi'an City	WEI Guo-ru, SHI Xing-min (3014)
Analysis of Chemical Composition, Source and Evolution of Submicron Particles in Xianghe, Hebei Province	JIANG Qi, WANG Fei, SUN Ye-le (3022)
Characteristics and Source Analysis of Carbonaceous Components of PM _{2.5} During Autumn in the Northern Suburb of Nanjing	XU Zu-fei, CAO Fang, GAO Song, <i>et al.</i> (3033)
Comparison of Chemical Components Characteristics of PM _{2.5} Between Haze and Clean Periods During Summertime in Lin'an	LIANG Lin-lin, SUN Jun-ying, ZHANG Yang-mei, <i>et al.</i> (3042)
Characteristics and Sources of Carbon Components in PM _{2.5} During Autumn and Winter in Panjin City	ZHANG Lei, JI Ya-qin, ZHANG Jun, <i>et al.</i> (3051)
Aerosol Optical Properties and Light Absorption Enhancement of EC During Wintertime in Nanjing	HUANG Cong-cong, MA Yan, ZHENG Jun (3057)
Concentration, Solubility, and Dry Deposition Flux of Trace Elements in Fine and Coarse Particles in Qingdao During Summer	LI Peng-zhi, LI Qian, SHI Jin-hui, <i>et al.</i> (3067)
Characteristics and Sources of Dissolved Heavy Metals in Summer Precipitation of Taiyuan City, China	YE Ai-ling, CHENG Ming-chao, ZHANG Lu, <i>et al.</i> (3075)
Characteristics of and Factors Affecting Atmospheric CO ₂ Concentration in Hangzhou	PU Jing-jiao, XU Hong-hui, JIANG Yu-jun, <i>et al.</i> (3082)
Treatment Status and Emission Characteristics of Volatile Organic Compounds from Typical Industrial Sources	JING Sheng-ao, WANG Hong-li, ZHU Hai-lin, <i>et al.</i> (3090)
Characteristics of Industrial VOCs Emission Sources and Control Technology Application in a Prefecture-level City Region-Based on Qinhuangdao City	 HU Xu-rui, HU Xiao-yu, WANG Can (3096)
Pollution Condition and Health Risk Assessment of VOCs in Fermentation Exhaust from Penicillin Production	GUO Bin, YAO Rui-jing, ZHANG Shuo, <i>et al.</i> (3102)
Measurements of OC and EC Emission Factors for Light-duty Gasoline Vehicles	HUANG Cheng, HU Qing-yao, LU Jun (3110)
Pollution Levels and Risk Assessment of Heavy Metals from Atmospheric Deposition in Nanjing	TIAN Chun-hui, YANG Ruo-zhu, Gulizhaer Yilihamu, <i>et al.</i> (3118)
Contamination Levels and Source Analysis of Heavy Metals in the Finer Particles of Urban Road Dust from Xi'an, China	SHI Dong-qi, LU Xin-wei (3126)
pCO ₂ in the Main Rivers of the Three Gorges Reservoir and Its Influencing Factors	LUO Jia-chen, MAO Rong, LI Si-yue (3134)
Major Ionic Features and Their Possible Controls in the Surface Water and Groundwater of the Jinghe River	KOU Yong-chao, KUA Kun, LI Zhou, <i>et al.</i> (3142)
Urban Runoff Phosphorus Removal Pathways in Bioretention Systems	LI Li-qing, LIU Yu-qing, YANG Jia-min, <i>et al.</i> (3150)
Succession Characteristics of Phytoplankton Functional Groups and Their Relationships with Environmental Factors in Dianshan Lake, Shanghai	 YANG Li, ZHANG Wei, SHANG Guang-xia, <i>et al.</i> (3158)
Spatio-temporal Variations of Diatom Community and Their Relationship with Water Environment in Fuxian Lake	LI Rui, CHEN Guang-jie, KANG Wen-gang, <i>et al.</i> (3168)
Effects of Algal Blooms and Their Degradation on the Sediment-water Micro-interface	WANG Yong-ping, XIE Rui, CHAO Jian-ying, <i>et al.</i> (3179)
Effect of Biochar on Root Morphological Characteristics of Wetland Plants and Purification Capacity of Constructed Wetland	XU De-fu, PAN Qian-cheng, LI Ying-xue, <i>et al.</i> (3187)
Preparation of Mn-Co/Ceramic Honeycomb Catalyst and Its Performance on Catalytic Ozonation of Hydroquinone	ZHANG Lan-he, GAO Wei-wei, CHEN Zi-cheng, <i>et al.</i> (3194)
Degradation Mechanism of Tetracycline Using Fe/Cu Oxides as Heterogeneous Activators of Peroxymonosulfate	LI Jing, BAO Jian-guo, DU Jiang-kun, <i>et al.</i> (3203)
Behavior and Mechanisms of Cd(II) Adsorption from Water by Niobate-Modified Titanate Nanosheets	KANG Li, LIU Wen, LIU Xiao-na, <i>et al.</i> (3212)
Trace Amounts of Phosphorus Removal Based on the in-suit Oxidation Products of Iron or Manganese in a Biofilter	CAI Yan-an, BI Xue-jun, ZHANG Jia-ning, <i>et al.</i> (3222)
Effect of Preparation Methods on Phosphate Adsorption by Iron-Titanium Binary Oxide: Coprecipitation and Physical Mixing	ZHONG Yan, WANG Jiang-yan, CHEN Jing, <i>et al.</i> (3230)
Effects of Conductivity on Performance of a Combined System of Anaerobic Acidification, Forward Osmosis, and a Microbial Fuel Cell	LU Yu-qin, LIU Jin-meng, WANG Xin-hua, <i>et al.</i> (3240)
COD Requirement for Biological Phosphorus Removal Granule System Under Different Phosphorus Concentrations	LI Dong, CAO Mei-zhong, GUO Yue-zhou, <i>et al.</i> (3247)
Effect of Substrate Concentration on SAD Collaborative Nitrogen and Carbon Removal Efficiency in an ABR Reactor	ZHANG Min, JIANG Ying, WANG Yao-qi, <i>et al.</i> (3254)
Evaluation of Advanced Nitrogen Removal from Coking Wastewater Using Sulfide Iron-containing Sludge as a Denitrification Electron Donor	 FU Bing-bing, PAN Jian-xin, MA Jing-de, <i>et al.</i> (3262)
Stability of Nitrification Combined with Limited Filamentous Bulking Under Intermittent Aeration	GAO Chun-di, SUN Da-yang, AN Ran, <i>et al.</i> (3271)
Filamentous Sludge Microbial Community of a SBR Reactor Based on High-throughput Sequencing	HONG Ying, YAO Jun-qin, MA Bin, <i>et al.</i> (3279)
Impact of Nano Zero-Valent Iron (NZVI) on Methanogenic Activity, Physiological Traits, and Microbial Community Structure in Anaerobic Digestion	 SU Run-hua, DING Li-li, REN Hong-qiang (3286)
Effects of Gas/Water Ratio on the Characteristics of Nitrogen Removal and the Microbial Community in Post Solid-Phase Denitrification Biofilter Process	 ZHANG Qian, JI Fang-ying, FU Xu-fang, <i>et al.</i> (3297)
Comparison of Extraction Methods of Extracellular Polymeric Substances from Activated Sludge	SUN Xiu-yue, TANG Zhu, YANG Xin-ping (3306)
Identification and Characterization of a Hypothermic Alkaliphilic Aerobic Denitrifying Bacterium <i>Pseudomonas monteilii</i> Strain H97	CAI Xi, HE Teng-xia, YE Qing, <i>et al.</i> (3314)
Isolation, Identification, and Biodegradation Behaviors of a Perfluorooctane Sulfonic Acid Precursor (PreFOSs) Degrading Bacterium from Contaminated Soil	 ZHAO Shu-yan, ZHOU Tao, WANG Bo-hui, <i>et al.</i> (3321)
Microbial Community Distributions in Soils of an Oil Exploitation Site	CAI Ping-ping, NING Zhuo, HE Ze, <i>et al.</i> (3329)
Characteristics of Soil Physicochemical Properties and Enzyme Activities over Different Reclaimed Years in a Copper Tailings Dam	WANG Rui-hong, JIA Tong, CAO Miao-wen, <i>et al.</i> (3339)
Risk Analysis of Heavy Metal Contamination in Farmland Soil Around a Bauxite Residue Disposal Area in Guangxi	GUO Ying, LI Yu-bing, XUE Sheng-guo, <i>et al.</i> (3349)
Occurrence and Distribution of Phthalate Esters in Urban Soils of Chongqing City	YANG Zhi-hao, HE Ming-jing, YANG Ting, <i>et al.</i> (3358)
Profile Distribution of Paddy Soil Organic Carbon and Its Influencing Factors in Chengdu Plain	LI Shan, LI Qi-quan, WANG Chang-quan, <i>et al.</i> (3365)
Correlation Between Soil Organic and Inorganic Carbon and Environmental Factors in Cotton Fields in Different Continuous Cropping Years in the Oasis of the Northern Tarim Basin	 ZHAO Jing-jing, GONG Lu, AN Shen-qun, <i>et al.</i> (3373)
Soil Organic Carbon Components and Their Correlation with Soil Physicochemical Factors in Four Different Land Use Types of the Northern Tarim Basin	 AN Shen-qun, GONG Lu, LI Yang-mei, <i>et al.</i> (3382)
Short-term Mechanism of Warming-induced Stability for Organic Carbon in the Karst Plateau Soil	TANG Guo-yong, ZHANG Chun-hua, LIU Fang-yan, <i>et al.</i> (3391)
Effects of Boron Treatment on Arsenic Uptake and Efflux in Rice Seedlings	ZHU Yi, SUN Guo-xin, CHEN Zheng, <i>et al.</i> (3400)
Comparative Analysis of Different Soil Amendment Treatments on Rice Heavy Metal Accumulation and Yield Effect in Pb and Cd Contaminated Farmland	 HU Xue-fang, TIAN Zhi-qing, LIANG liang, <i>et al.</i> (3409)
Seasonal Variation in Surface Ozone and Its Effect on the Winter Wheat and Rice in Nanjing, China	ZHAO Hui, ZHENG You-fei, WEI Li, <i>et al.</i> (3418)
Hair Mercury Concentrations in Residents of Fuling and Zhongxian in the Three Gorges Reservoir Region and Their Influence Factors	CHENG Nan, XIE Qing, FAN Yu-fei, <i>et al.</i> (3426)
Removal of Typical Antibiotics During Aerobic Composting of Human Feces	SHI Hong-lei, WANG Xiao-chang, LI Qian (3434)
Effect of COD/SO ₄ ²⁻ Ratio on Anaerobic Digestion of Penicillin Bacterial Residues	QIANG Hong, LI Yu-you, PEI Meng-fu (3443)
Characteristics of Odor Emissions from Fresh Compost During Storage and Application	HE Pin-jing, JIANG Ning-ling, XU Xian, <i>et al.</i> (3452)
Effects of the Veterinary Antibiotic Sulfamethazine on Ammonia Volatilization from a Paddy Field Treated with Conventional Synthetic Fertilizer and Manure	 PANG Bing-kun, ZHANG Jing-sha, WU Jie, <i>et al.</i> (3460)