

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)
太原市夏季降水中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)	

盘锦市秋冬季节 PM_{2.5} 中碳组分特征及来源解析

张蕾¹, 姬亚芹^{1*}, 张军², 王士宝¹, 李越洋¹, 赵静琦¹, 张伟¹

(1. 南开大学环境科学与工程学院, 国家环境保护城市空气颗粒物污染防治重点实验室, 天津 300350; 2. 盘锦市环境保护监测站, 盘锦 124010)

摘要: 为研究盘锦市秋冬季节大气 PM_{2.5} 中碳组分的污染特征和来源, 于 2016 年 10 月和 2017 年 1 月采集盘锦市 3 个点位 PM_{2.5} 样品, 通过 OC/EC 比值法, EC 示踪法以及主成分分析法对 PM_{2.5} 中碳组分进行污染特征分析及来源解析。结果表明, 盘锦市秋冬季节 PM_{2.5} 浓度均超过环境空气质量标准 (GB 3095-2012) 二级标准, 秋季 OC 和 EC 的平均浓度为 10.02 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 3.91 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 冬季为 16.04 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 5.62 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; 采样期间秋冬季节 OC/EC 均大于 2.0, 说明各采样点位在秋冬季节均可能存在二次污染, Spearman 相关分析及线性拟合可知开发区 OC 与 EC 来源复杂, 第二中学及文化公园 OC 和 EC 可能具有同源性; 通过 EC 示踪法对 SOC 进行定量估算, 得出秋季 SOC 浓度为 7.21 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 冬季为 23.07 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 对结果进行不确定性分析, 可知秋冬季节 SOC 不确定性的绝对误差和相对误差均在可接受范围内; 通过主成分分析得出盘锦市秋冬季节 PM_{2.5} 中碳组分主要来源于煤烟尘、生物质燃烧以及机动车尾气。

关键词: 盘锦市; 有机碳 (OC); 元素碳 (EC); 二次有机碳 (SOC); 来源解析

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)07-3051-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.201712118

Characteristics and Sources of Carbon Components in PM_{2.5} During Autumn and Winter in Panjin City

ZHANG Lei¹, JI Ya-qin^{1*}, ZHANG Jun², WANG Shi-bao¹, LI Yue-yang¹, ZHAO Jing-qi¹, ZHANG Wei¹

(1. State Environmental Protection Key Laboratory of Urban Ambient Air Particulate Matter Pollution Prevention and Control, College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300350, China; 2. Panjin Environmental Monitoring Center, Panjin 124010, China)

Abstract: In order to study the pollution characteristics and sources of carbon in Panjin City during autumn and winter, PM_{2.5} samples were collected at three monitoring points in October 2016 and January 2017. Pollution characteristics and sources of carbon components in PM_{2.5} were analyzed by the OC/EC ratio method, EC tracer method, and principal component analysis method. The results showed that the PM_{2.5} concentration exceeded the ambient air quality standard (GB 3095-2012) and that the average concentrations of OC and EC were 10.02 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ and 3.91 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ in autumn, respectively, and 16.04 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ and 5.62 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ in winter. According to the OC/EC ratio method, the OC/EC ratios were more than 2.0 during the sampling periods, indicating that there was secondary pollution in autumn and winter. Spearman correlation analysis and linear fitting indicated that the OC and EC sources were complex in development zones and that secondary school and cultural park areas may have similar sources during autumn and winter. SOC was quantitatively estimated by the EC tracer method, with concentrations of 7.21 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ and 23.07 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ in autumn and winter, respectively. The absolute and relative errors of SOC uncertainty were 0.98 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ and 14.00% in autumn, respectively, and 1.87 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ and 8.21% in winter. Based on the method of principal component analysis, the carbon components in autumn and winter were mainly derived from coal combustion, biomass burning, and vehicle exhaust.

Key words: Panjin City; organic carbon (OC); elemental carbon (EC); secondary organic carbon (SOC); source apportionment

碳质气溶胶是大气颗粒物的重要组成部分, 气溶胶中碳组分主要包括有机碳 (OC)、无机碳 (EC) 和碳酸盐碳 (CC)^[1]。其中, OC 包括污染源直接排放进入空气中的一次有机碳 (primary organic carbon, POC) 和由 POC 经光化学反应生成的二次有机碳 (secondary organic carbon, SOC)^[2], OC 中含有多环芳烃、正构烷烃、有机酸、羧基化合物 (醛类、酮类) 和杂环化合物等有害物质, 部分甚至具有较强的致癌性^[3]; SOC 具有较强的吸湿性, 对霾的形成以及气候变化具有重要影响^[4]。EC 来自于化

石燃料或生物质的不完全燃烧, 由污染源直接排放^[5], EC 由于其生物化学惰性, 具有较长的环境周期, 对地球辐射热量及人类健康都有重要的影响^[6]。CC 在沙尘气溶胶中含量较高, 在城市气溶胶中含量一般较低^[7], 本文不做研究。

大气颗粒物中, 81.9% 的 OC 和 84.9% 的 EC

收稿日期: 2017-12-16; 修订日期: 2018-01-08

作者简介: 张蕾 (1992~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大气污染及其控制, E-mail: 995421075@qq.com

* 通信作者, E-mail: jiyaqin@nankai.edu.cn

集中于细颗粒物中^[8]。因此,近年来针对 $\text{PM}_{2.5}$ 中碳质气溶胶的研究较多^[9-12],但对中国东北地区的研究却十分有限,盘锦市位于辽宁省中南部,是我国重要的石油石化基地,盘锦市 2014 年和 2015 年 $\text{PM}_{2.5}$ 年均值均超过《环境空气质量标准》(GB 3095-2012)二级标准限值。本研究通过采集盘锦市 2016 年 10 月及 2017 年 1 月的 $\text{PM}_{2.5}$ 样品,分析盘锦市秋冬季节 OC 和 EC 的污染特征和来源,以期为盘锦市碳质气溶胶的防治提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集

采样点位为盘锦市开发区、文化公园、第二中学(图 1)。采样时段为 2016 年 10 月 14~28 日以及 2017 年 1 月 4~17 日;采样设备为武汉天虹公司的中流量颗粒物采样器;采样滤膜为石英滤膜($\Phi 90$ mm)。采样前统一对流量进行校准,每日 08:00 至次日 08:00 进行连续 24 h 采样;采样期间,每日在文化公园采集一组全程空白滤膜样品,用于质控,采集有效滤膜共 223 张;采样结束后,将滤膜置于冰柜中 -4°C 保存。



图 1 采样点位示意

Fig. 1 Sampling sites in Panjin City

1.2 样品分析

使用美国沙漠研究所研制的 DRI MODEL2001 热光碳分析仪 (Thermal/optical carbon Analyzer), 分析总碳 (TC)、有机碳 (OC) 和元素碳 (EC)。具体分析方法为:用裁膜刀从石英滤膜上切出 0.558 cm^2 的样品放入样品炉中,当炉内通入纯 He 时,程序分 120°C (OC1)、 250°C (OC2)、 450°C (OC3) 和 550°C (OC4) 这 4 个温度段加热升温,同时吸收有机碳和分解产物进入二氧化锰氧化炉中,滤膜上的有机碳被转化为 CO_2 ;上述过程结束后,载气变为含 2% 氧气的氦气,分别于 550°C (EC1)、 700°C (EC2) 和 800°C (EC3) 逐步加热,此时样品中的 EC

被氧化形成 CO_2 。各个温度梯度下产生的 CO_2 ,经镍催化,在还原环境下转化为可通过火焰离子化检测器 (FID) 检测的 CH_4 。OC 碳化过程中形成的碳化物称之为裂解碳 (OPC)。将 OC 定义为 $\text{OC1} + \text{OC2} + \text{OC3} + \text{OC4} + \text{OPC}$,将 EC 定义为 $\text{EC1} + \text{EC2} + \text{EC3} - \text{OPC}$ 。

1.3 质量保证与质量控制

采样前,将空白石英膜放入 600°C 的马弗炉中烘 2 h,以降低滤膜中的挥发分对称重和组分含量的影响,滤膜在烘烤后放入恒温恒湿天平室中平衡 3 d,采样后放入恒温恒湿天平室中平衡 3 d,采样前后每张滤膜称量 2 次取均值,保证误差小于 $\pm 0.005\text{ mg}$ 。

样品分析前后,采用 CH_4/CO_2 标准气体对仪器进行校正,确保初始和最终 FID 信号漂移在 $\pm 3\%$ 以内、校准峰面积相对偏差在 5% 以内;每 10 个样品中随机抽出 1 个样品进行平行分析,前后误差在 10% 内可进行后续样品的分析;每周测量仪器的系统空白以及实验室空白。

2 结果与讨论

2.1 $\text{PM}_{2.5}$ 与 OC、EC 浓度特征

开发区、文化公园和第二中学秋季 $\text{PM}_{2.5}$ 均值分别为 (73.07 ± 26.44) 、 (57.73 ± 16.84) 和 $(126.95 \pm 84.65)\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 均值分别为 (89.68 ± 39.24) 、 (94.01 ± 46.92) 和 $(89.35 \pm 43.87)\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。以环境空气质量标准二级标准日均浓度限值 ($75\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 作为衡量标准,可知盘锦市秋季第二中学 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度超标 1.69 倍,盘锦市冬季 3 个采样点位均超过国家标准限值。3 个采样点位秋冬季节 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度对比如图 2 所示,从中可以明显看出第二中学秋季 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度高于冬季,由于秋季

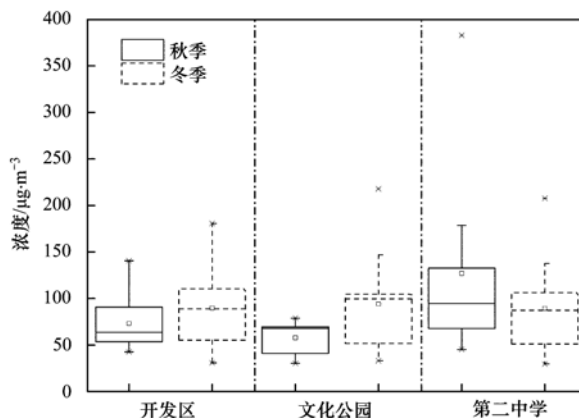


图 2 采样点位秋冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 对比

Fig. 2 Comparison of $\text{PM}_{2.5}$ between autumn and winter

采样期间在第二中学出现 PM_{2.5} 浓度严重超标所致。

图 3 为采样期间各点位 OC 和 EC 的浓度。从中可见,采样期间 3 个点位秋季 OC 的浓度范围为 1.69 ~ 36.85 μg·m⁻³ (平均浓度 10.02 μg·m⁻³); EC 的浓度范围为 1.30 ~ 8.87 μg·m⁻³ (平均浓度 3.91 μg·m⁻³); 冬季 OC 的浓度范围为 6.32 ~

77.17 μg·m⁻³ (平均浓度 16.04 μg·m⁻³), EC 的浓度范围为 2.38 ~ 32.66 μg·m⁻³ (平均浓度为 5.62 μg·m⁻³), 盘锦市秋季 OC 和 EC 的浓度明显小于冬季,与冬季工业生产与煤炭燃烧对 OC 和 EC 产生的影响较大有关,此外,冬季容易形成逆温,不利于扩散稀释,也会导致碳质气溶胶的累积。

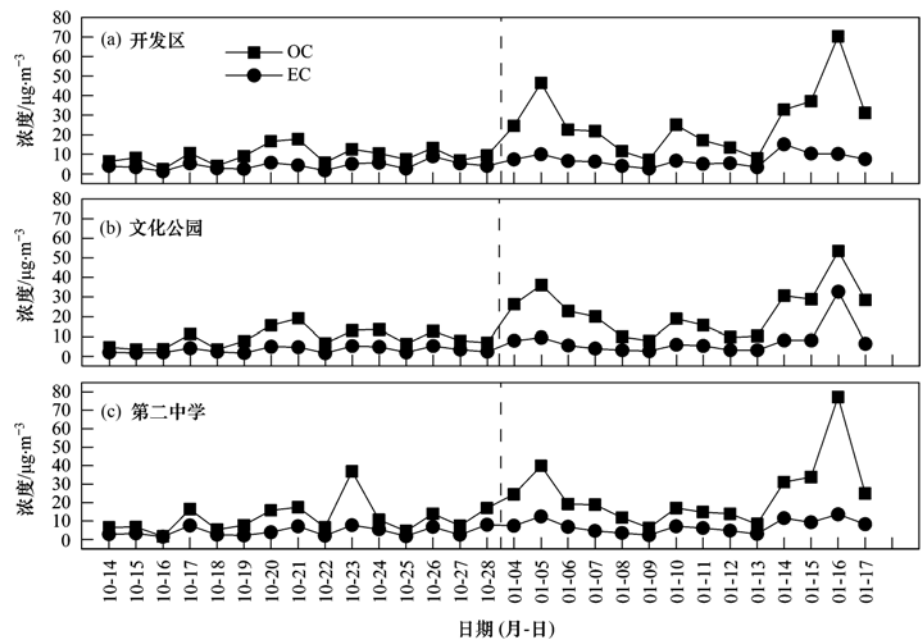


图 3 采样点位 OC 与 EC 浓度特征
Fig. 3 Concentration characteristics of OC and EC

2.2 OC/EC 特征及碳组分间相关性研究

OC/EC 值常被用来判断是否会产生二次污染,这对于控制气溶胶有机污染具有重要意义,若 OC/EC 值超过 2.0,则表明存在二次污染^[13]。如图 4 所示,采样期间秋季 OC/EC 值分别为文化公园(2.89) > 第二中学(2.59) > 开发区(2.36); 冬季 OC/EC 值分别为开发区(3.51) > 文化公园(3.49) > 第二中学

(3.19),说明各采样点位在秋冬季均可能存在二次污染,需针对 SOC 作进一步分析。许多研究通过 OC/EC 比例推断碳质气溶胶的来源,然而,因为 OC/EC 的比值通常会受到 SOA 形成的影响,基于 OC/EC 比值的源识别可能会存在较大的偏差。

考虑到 OC 与 EC 间来源是否存在关联或者一致性,对 3 个采样点位 OC 和 EC 进行 Spearman 相关分析,结果如表 1。3 个采样点位 OC 与 EC 之间具有线性相关关系($P < 0.05$),故对其进行线性拟合(图 5),可知开发区秋季和冬季 R^2 小于 0.5,相关性较差^[14],说明开发区 PM_{2.5} 中 OC 与 EC 来源复杂,其他两个点位的 R^2 均大于 0.5,说明 OC 与 EC 可能具有同源性^[15]。开发区临近工业生产和油气公司,工艺过程源以及石化会对 OC 和 EC 的来源产生一定的影响,使得此处的碳质气溶胶可能存在来源复杂的情况。文化公园与第二中学相距较近,临近居民生活区,所以具有一定的同源性。

2.3 二次有机碳估计

由于 EC 主要来自于化石燃料和生物质的不完全燃烧,因此可以作为一次排放碳质气溶胶的示踪

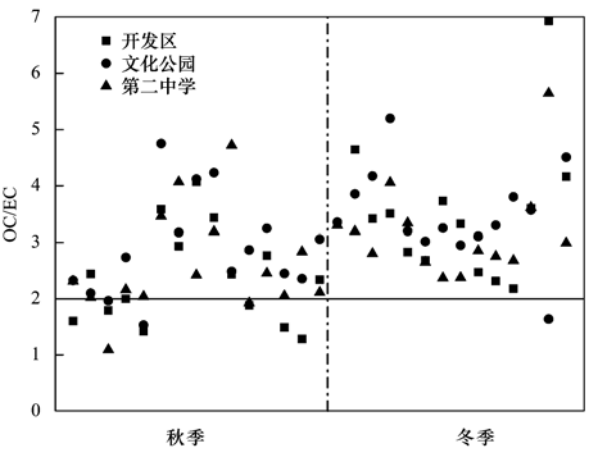


图 4 采样点位 OC/EC 特征
Fig. 4 Features of OC/EC for the sampling sites

表 1 秋冬季节 3 个采样点位 OC 与 EC 相关性分析

Table 1 Correlation between OC and EC in autumn and winter

项目	冬季			秋季		
	开发区	文化公园	第二中学	开发区	文化公园	第二中学
斯皮尔曼相关系数	0.952 **	0.960 **	0.960 **	0.729 **	0.746 **	0.918 **
双尾检验 P 值	0.000	0.000	0.000	0.002	0.001	0.000

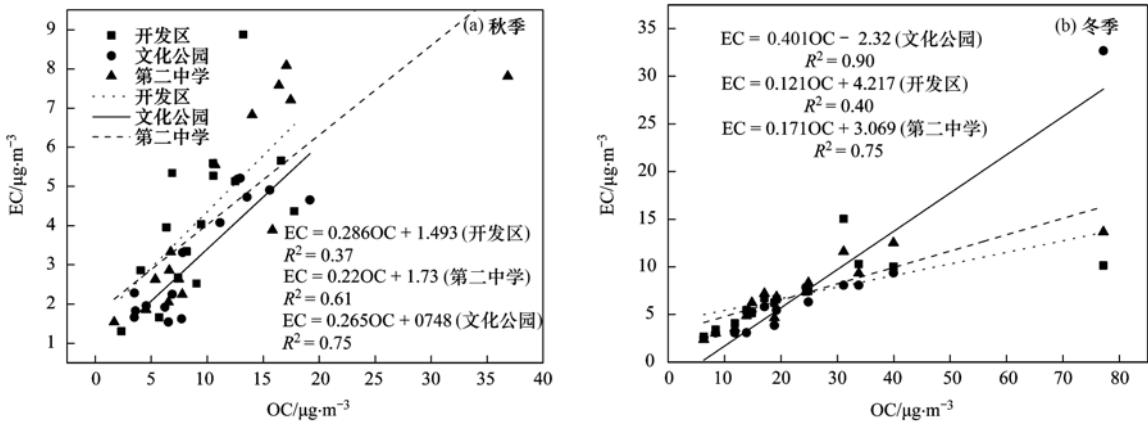


图 5 采样点位 OC 与 EC 线性拟合结果

Fig. 5 Linear fitting results of OC and EC for the sampling points

物^[16]. EC 示踪法常被用于 SOC 的定量估算. EC 示踪法的基本假设为: 颗粒物中的 EC 和 POC 通常有相同来源, 且具有较好的相关性. 基于这一假设, Lim 等^[17]提出了识别 SOC 的公式:

$$OC_{pri} = EC \times (OC/EC)_{pri} + N \quad (1)$$

$$OC_{sec} = OC_{tot} - OC_{pri} \quad (2)$$

式中, OC_{pri} 、 $(OC/EC)_{pri}$ 、 N 、 OC_{sec} 和 OC_{tot} 分别代表 POC、一次燃烧源排放的 OC/EC 比值、一次非燃烧源有机碳、SOC 和总 OC.

在很多研究中, $(OC/EC)_{pri}$ 用样本中 OC/EC 比值的最小值来代替, 认为这种情况下几乎没有 SOC 生成. 但实际上该最小值会被许多因素影响, 如气象条件、源排放的浮动等. 由于离线采样的

样本数较少, 本研究选取各季 OC/EC 比值最低的 6 个样本, 用其 OC 与 EC 的质量浓度数据做线性相关分析, 回归曲线的截距即 N , 斜率即 $(OC/EC)_{pri}$, 由此可得盘锦市秋季 $(OC/EC)_{pri}$ 为 0.656, N 为 0.243; 冬季 $(OC/EC)_{pri}$ 为 0.642, N 为 -3.255, 根据公式 (1) 和 (2) 得出秋季和冬季二次有机碳浓度分别为 $7.21 \mu g \cdot m^{-3}$ 和 $23.07 \mu g \cdot m^{-3}$. SOC 的生成通常与反应所需气象条件和前体物有关. 从当地相关部门获取采样期间的气象数据和 NO_x 、 SO_2 监测值, 可知虽然盘锦市冬季温度较低, 但是与秋季相比, 相对湿度相当, 风速较低, 同时逆温现象出现频繁, 以及二次前体物 NO_x 、 SO_2 等排放量较大 (如图 6), 使得冬季 SOC

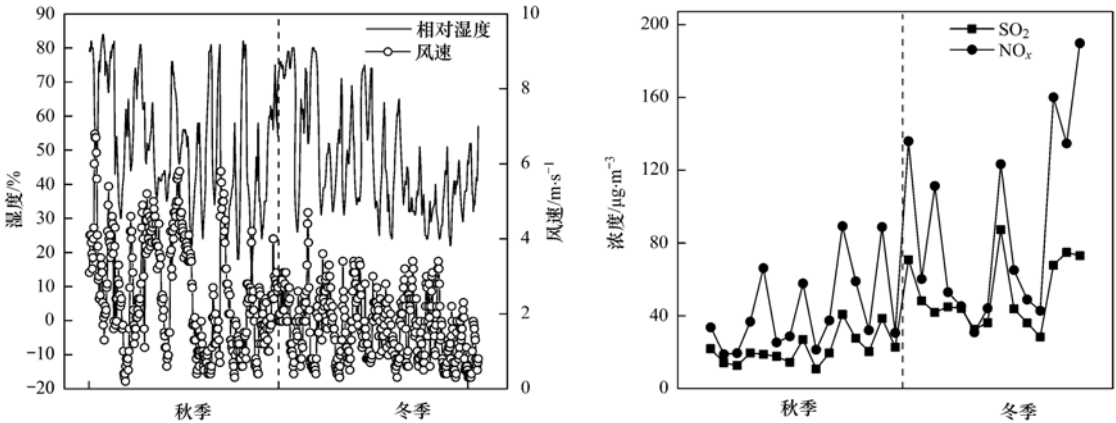


图 6 盘锦市采样期间秋冬季节气象数据及 NO_x 、 SO_2 变化特征

Fig. 6 Variation characteristics of meteorological data and NO_x and SO_2 during sampling

的含量超过秋季。

SOC 的估算方法得到了广泛的应用^[18~20],但是公式中存在的不确定性会对结果产生的影响并没有得到相关的研究,本研究对不确定性参数 OC/EC 通过 crystal ball 软件进行蒙特卡罗模拟^[21],确定 OC/EC 的不确定性. 将 OC/EC 定义为预测变量,进行 200 次试验,得到秋季和冬季的不确定性分别为 25.85% 和 25.94%. 将公式(1)和(2)代入误差传递公式可得绝对误差传递公式(3)和相对误差传递公式(4):

$$\Delta N = \frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i = \frac{\partial OC_{sec}}{\partial (OC/EC)_{pri}} \Delta (OC/EC)_{pri} \quad (3)$$

$$\frac{\Delta N}{N} = \left| \frac{\partial \ln f}{\partial x_i} \right| \Delta x_i = \left| \frac{\partial \ln OC_{sec}}{\partial (OC/EC)_{pri}} \right| \Delta (OC/EC)_{pri} \quad (4)$$

OC_{sec} (SOC) 不确定性的绝对误差与相对误差分别为:

$$\Delta N = EC \times (OC/EC)_{pri} \quad (5)$$

$$\frac{\Delta N}{N} = \frac{EC \times \Delta (OC/EC)_{pri}}{OC_{tot} - EC \times (OC/EC)_{pri} - N} \quad (6)$$

根据(5)和(6)可得秋季 SOC 不确定性的绝对误差和相对误差分别为 0.98 μg·m⁻³ 和 14.00%; 冬季 SOC 不确定性的绝对误差和相对误差分别为 1.87 μg·m⁻³ 和 8.21%. 通过对 SOC 的不确定性进行分析可知,本研究方法所得 (OC/EC)_{pri} 对 SOC 产生的不确定性在可接受范围内,由于没有相关的数据进行对比分析,本研究所得不确定性可为今后的不确定性分析研究提供数据支持.

2.4 碳组分来源解析

利用 SPSS 软件,对 8 种碳组分的浓度值做主成分分析,结果如表 2 所示,秋冬季节 KMO (Kaiser-Meyer-Olkin) 检验值分别为 0.835 和 0.782 (>0.6),可进行主成分分析. 秋季提取出 2 个因子,贡献率达到 77.96%; 冬季仅有一个贡献率较大的因子,贡献率达到 69.97%. 秋冬季节因子 1 的高荷载均为 OC1、OC2、OC3、OC4 和 EC1,秋季因子 2 的 EC2 和 EC3 作用显著. 其中 OC1 主要来源于生物质燃烧^[22], OC2 主要来源于煤烟尘^[23], EC2 和 EC3 主要来源于柴油车尾气排放^[24], OC3、OC4 和 EC1 主要来源于汽油车尾气排放^[25, 26]. 根据秋冬季节提取的特征组分可知,盘锦市秋冬季节碳质气溶胶的主要来源均为煤烟尘、生物质燃烧以及汽柴油机动车尾气.

表 2 旋转后的因子载荷矩阵

Table 2 Rotated component matrix of principle component analysis	秋季		冬季
	因子 1	因子 2	因子 1
OC1	0.899	0.038	0.966
OC2	0.968	-0.150	0.984
OC3	0.886	-0.300	0.967
OC4	0.937	-0.232	0.792
EC1	0.960	-0.065	0.949
EC2	0.430	0.764	0.438
EC3	0.453	0.767	0.738
OPC	0.412	-0.046	0.706
解释方差/%	61.11	16.85	69.97
累计解释方差/%	77.96		69.97

3 结论

(1) 盘锦市秋季 PM_{2.5} 的浓度顺序为第二中学 > 开发区 > 文化公园,冬季为文化公园 > 开发区 > 第二中学; 秋季 OC 的平均浓度为 10.02 μg·m⁻³, EC 的平均浓度为 3.91 μg·m⁻³; 冬季 OC 的平均浓度为 16.04 μg·m⁻³, EC 的平均浓度为 5.62 μg·m⁻³.

(2) 根据 OC/EC 比值法研究,得出采样期间秋冬季 OC/EC 均大于 2.0,说明各采样点位在秋冬季均可能存在二次污染; Spearman 相关性分析结果表明,OC 和 EC 具有显著的相关关系,故对其进行线性拟合,可知开发区秋季和冬季相关性较弱,说明开发区 PM_{2.5} 中 OC 与 EC 来源复杂,其他两个点位的相关性较强,说明 OC 和 EC 可能具有同源性.

(3) 通过 EC 示踪法对 SOC 进行定量估算,得出二次有机碳浓度秋季为 7.21 μg·m⁻³,冬季为 23.07 μg·m⁻³; 对结果进行不确定性分析,可知秋季 SOC 不确定性的绝对误差为 0.98 μg·m⁻³,相对误差为 14.00%; 冬季 SOC 不确定性的绝对误差为 1.87 μg·m⁻³,相对误差为 8.21%.

(4) 通过主成分分析法对盘锦市秋冬季的碳来源进行分析,可知盘锦市秋冬季节 PM_{2.5} 中碳组分主要来源于煤烟尘,生物质燃烧以及机动车尾气.

参考文献:

[1] 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.
[2] 王果, 迪丽努尔·塔力甫, 买里克扎提·买合木提, 等. 乌鲁木齐市 PM_{2.5} 和 PM_{2.5-10} 中碳组分季节性变化特征[J]. 中国环境科学, 2016, 36(2): 356-362.
Wang G, Dilnur T, Mailikezhati M, et al. Seasonal changes of carbonaceous species in PM_{2.5}, PM_{2.5-10} in Urumqi[J]. China Environmental Science, 2016, 36(2): 356-362.
[3] 段凤魁, 贺克斌, 刘威德, 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]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2007, **1**(8): 1-8.
- [4] 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.
- [5] Glasius M, Hansen A M K, Claeys M, *et al.* Composition and sources of carbonaceous aerosols in Northern Europe during winter [J]. Atmospheric Environment, 2018, **173**: 127-141.
- [6] Masiello C A. New directions in black carbon organic geochemistry[J]. Marine Chemistry, 2004, **92**(1-4): 201-213.
- [7] Huang L, Brook J R, Zhang W, *et al.* Stable isotope measurements of carbon fractions (OC/EC) in airborne particulate: a new dimension for source characterization and apportionment[J]. Atmospheric Environment, 2006, **40**(15): 2690-2705.
- [8] Chen S J, Liao S H, Jian W J, *et al.* Particle size distribution of aerosol carbons in ambient air[J]. Environment International, 1997, **23**(4): 475-488.
- [9] 田鹏山, 曹军骥, 韩永明, 等. 关中地区冬季 PM_{2.5} 中碳气溶胶的污染特征及来源解析[J]. 环境科学, 2016, **37**(2): 427-433.
- Tian P S, Cao J J, Han Y M, *et al.* Pollution characteristics and sources of carbonaceous aerosol in PM_{2.5} during winter in Guanzhong area[J]. Environmental Science, 2016, **37**(2): 427-433.
- [10] 张霖琳, 王超, 朱红霞, 等. 北京混合功能区夏冬季细颗粒物组分特征及来源比较[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(1): 36-41.
- Zhang L L, Wang C, Zhu H X, *et al.* Characterization and source apportionment of PM_{2.5} in mixed function area during summer and winter, Beijing[J]. China Environmental Science, 2016, **36**(1): 36-41.
- [11] 窦筱艳, 徐珣, 刘宇, 等. 西宁市城区冬季 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 中有机碳、元素碳污染特征[J]. 中国环境监测, 2016, **32**(2): 44-49.
- Dou X Y, Xu X, Liu Y, *et al.* Characteristics of organic carbon and elemental carbon in PM_{2.5} and PM₁₀ in Xining in the winter [J]. Environmental Monitoring in China, 2016, **32**(2): 44-49.
- [12] 程娜, 钱冠磊, 段炼, 等. 峨边地区大气 PM_{2.5} 中汞形态污染及其与碳组分的关系[J]. 环境科学, 2017, **38**(2): 438-444.
- Cheng N, Qian G L, Duan L, *et al.* Correlation of speciated mercury with carbonaceous components in atmospheric PM_{2.5} in Shengsi region[J]. Environmental Science, 2017, **38**(2): 438-444.
- [13] 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.
- [14] 刘珊, 彭林, 温彦平, 等. 太原市 PM_{2.5} 中有机碳和元素碳的污染特征[J]. 环境科学, 2015, **36**(2): 396-401.
- Liu S, Peng L, Wen Y P, *et al.* Pollution characteristics of organic and elemental carbon in PM_{2.5} in Taiyuan [J]. Environmental Science, 2015, **36**(2): 396-401.
- [15] 刘凤娟, 彭林, 白慧玲, 等. 朔州市市区 PM_{2.5} 中元素碳、有机碳的分布特征[J]. 环境科学, 2015, **36**(3): 787-793.
- Liu F X, Peng L, Bai H L, *et al.* Characteristics of organic carbon and elemental carbon in PM_{2.5} in Shuozhou City [J]. Environmental Science, 2015, **36**(3): 787-793.
- [16] 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.
- [17] Lim H J, Turpin B J. Origins of primary and secondary organic aerosol in Atlanta: results of time-resolved measurements during the Atlanta supersite experiment [J]. Environmental Science & Technology, 2002, **36**(21): 4489-4496.
- [18] 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.
- [19] Day M C, Zhang M H, Pandis S N. Evaluation of the ability of the EC tracer method to estimate secondary organic carbon [J]. Atmospheric Environment, 2015, **112**: 317-325.
- [20] Kim W, Lee H, Kim J, *et al.* Estimation of seasonal diurnal variations in primary and secondary organic carbon concentrations in the urban atmosphere: EC tracer and multiple regression approaches[J]. Atmospheric Environment, 2012, **56**: 101-108.
- [21] 钟流举, 郑君瑜, 雷国强, 等. 大气污染物排放源清单不确定性定量分析方法及案例研究[J]. 环境科学研究, 2007, **20**(4): 15-20.
- Zhong L J, Zheng J Y, Lei G Q, *et al.* Quantitative uncertainty analysis in air pollutant emission inventories: methodology and case study[J]. Research of Environmental Sciences, 2007, **20**(4): 15-20.
- [22] 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.
- [23] Xu H M, Cao J J, Chow J C, *et al.* Inter-annual variability of wintertime PM_{2.5} chemical composition in Xi'an, China: evidences of changing source emissions[J]. Science of the Total Environment, 2016, **545-546**: 546-555.
- [24] Watson J G, Chow J C, Lowenthal D H, *et al.* Differences in the carbon composition of source profiles for diesel- and gasoline-powered vehicles [J]. Atmospheric Environment, 1994, **28**(15): 2493-2505.
- [25] 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.
- [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.

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)