

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.2
第41卷 第2期

目次

基于GAM模型分析中国典型区域网格化PM _{2.5} 长期变化影响因素	南洋, 张倩倩, 张碧辉 (499)
我国PCDD/Fs网格化大气排放清单	陈露露, 黄韬, 陈凯杰, 宋世杰, 高宏, 马建民 (510)
成都平原PM _{2.5} 中碳质组分时空分布特征与来源	史芳天, 罗彬, 张巍, 刘培川, 郝宇放, 杨文文, 谢绍东 (520)
南京江北新区冬季PM _{2.5} 中化学组分的昼夜变化特征及其来源解析	邱晨晨, 于兴娜, 丁铨, 时政, 张瑞芳, 侯思宇, 侯新红 (529)
南京北郊四季PM _{2.5} 中有机胺的污染特征及来源解析	李栩婕, 施晓雯, 马嫣, 郑军 (537)
长三角背景点夏季大气PM _{2.5} 中正构烷烃和多环芳烃的污染特征和来源解析	薛国艳, 王格慧, 吴灿, 谢郁宁, 陈玉宝, 李杏茹, 王心培, 李大鹏, 张思, 葛双双, 丁志健 (554)
2017年秋季长春市PM _{2.5} 中多环芳烃的污染来源及健康风险评价	张艺璇, 曹芳, 郑涵, 张东东, 翟晓瑶, 范美益, 章炎麟 (564)
京津冀及周边区域PM _{2.5} 叠加沙尘重污染过程特征及预报效果分析	朱媛媛, 高愈霄, 柴文轩, 王帅, 李亮, 王威, 王光, 刘冰, 王晓彦, 李健军 (574)
河南省臭氧污染特征与气象因子影响分析	齐艳杰, 于世杰, 杨健, 尹沙沙, 程家合, 张瑞芹 (587)
河南省气溶胶光学特性的时空变化特征	张瑞芳, 于兴娜 (600)
黑炭气溶胶质谱仪(SP-AMS)分析春季PM _{2.5} 中水溶性有机气溶胶	黄雯倩, 陈彦彤, 李旭东, 赵竹子, 马帅帅, 叶招莲, 盖鑫磊 (609)
南京市黑碳气溶胶时间演变特征及其主要影响因素	杨晓旻, 施双双, 张晨, 王红磊, 王振彬, 朱彬 (620)
连云港不同功能区挥发性有机物污染特征及臭氧生成潜势	乔月珍, 陈凤, 李慧鹏, 赵秋月 (630)
挥发性有机物污染控制方案的运行费用效能比较	羌宁, 史天哲, 缪海超 (638)
西安市大气降水污染和沉降特征及其来源解析	丁铨, 于兴娜, 侯思宇 (647)
4种动物养殖场空气中抗生素耐药菌的生物多样性及群落结构	沙云菲, 孙兴滨, 辛文鹏, 高浩泽, 程首涛, 高敏, 王旭明 (656)
辽宁省2000~2030年机动车排放清单及情景分析	金嘉欣, 孙世达, 王芃, 林应超, 王婷, 吴琳, 魏宁, 常俊雨, 毛洪钧 (665)
国六柴油机DPF再生时VOCs排放特性	钱枫, 薛常鑫, 许小伟, 马东, 李朋, 祝能 (674)
南小河流域地表水和地下水的稳定同位素和水化学特征及其指示意义	郭亚文, 田富强, 胡宏昌, 刘亚平, 赵思晗 (682)
乐安河中下游重金属时空分布特征及风险评价	余杨, 吕雅宁, 王伟杰, 渠晓东, 刘聚涛, 温春云 (691)
温榆河水环境质量与浮游植物群落结构的时空变化及其相互关系	朱利英, 陈媛媛, 刘静, 王亚炜, 王春荣, 魏源送, 张育新 (702)
新安江水库河口区水质及藻类群落结构高频变化	宣文怡, 朱广伟, 黎云祥, 吴志旭, 郑文婷, 兰佳, 王裕成, 许海, 朱梦圆 (713)
环渤海芦苇湿地磷的吸附容量及释放风险评估	宋佳伟, 徐刚, 张扬, 吕迎春 (728)
洱海藻类水华高风险期沉积物氮磷释放通量时空变化	刘思儒, 赵继东, 肖尚斌, 倪兆奎, 王圣瑞 (734)
西安市降雪中DOM荧光特性和来源分析	杨毅, 韩丽媛, 刘焕武, 雷颖, 李兢, 徐会宁 (743)
透水砖铺装的设施构造对运行效果的影响	张佳炜, 刘勇, 金建荣, 李田 (750)
微米SiC/石墨烯复合物光催化降解罗丹明B	朱红庆, 杨兵, 魏世强, 杨静静, 张进忠 (756)
锰铁改性针簇莫来石对水中BPA和EE2的去除	周秋红, 龙天渝, 何靖, 郭劲松, 高俊敏 (763)
载钼磁性水热生物炭的制备及其除磷性能	宋小宝, 何世颖, 冯彦房, 花昀, 唐婉莹, 朱秋蓉, 薛利红, 杨林章 (773)
复合金属改性生物炭对水体中低浓度磷的吸附性能	孙婷婷, 高菲, 小莉, 黎睿, 董磊 (784)
磁性硅藻土负载纳米过氧化钙对水中磷酸盐吸附	徐楚天, 李大鹏, 张帅, 耿雪, 陈丽媛, 宋小君, 郭超然, 黄勇 (792)
污水厂尾水受纳河段沉积物磷形态及释放风险效应	汤宁, 李如忠, 王丰庆, 何瑞亮, 刘超 (801)
生物膜生态浮床对城市尾水净化特征分析	赵志瑞, 张佳瑶, 李铎, 李方红 (809)
磁凝凝对市政污水中抗生素抗性基因和重金属抗性基因的削减效能	于雯超, 郑利兵, 魏源送, 王哲晓, 张鹤清, 黄光华, 焦赞仪, 吴振军 (815)
四环素抗生素对污泥中四环素抗性基因丰度和表达水平的作用影响	阮晓慧, 钱雅洁, 薛罡, 高品 (823)
异养硝化细菌Pseudomonas aeruginosa YL的脱氮过程及N ₂ O产生特性	杨垒, 崔坤, 任勇翔, 郭淋凯, 张志昊, 肖倩, 陈宁, 汪旭晖 (831)
包埋厌氧氨氧化菌的环境因子影响特性及群落结构分析	王晓瞳, 杨宏, 苏杨, 刘旭妍 (839)
包埋反硝化填料强化二级出水深度脱氮性能研究及中试应用	周亚坤, 杨宏, 王少伦, 何海超, 刘宗跃, 苏扬, 张辉 (849)
厌氧时间对间歇进水-间歇曝气的好氧颗粒污泥系统影响	张杰, 王玉颖, 李冬, 曹思雨, 李帅 (856)
除磷颗粒诱导的同步短程硝化反硝化除磷颗粒污泥工艺	李冬, 刘博, 王文琪, 张杰 (867)
桂西南地区地球化学异常区农田重金属空间分布特征及污染评价	王佛鹏, 肖乃川, 周浪, 虎瑞, 宋波 (876)
青藏高原表土重金属污染评价与来源解析	杨安, 王艺涵, 胡健, 刘小龙, 李军 (886)
黄河三角洲不同植物群落土壤酶活性特征及影响因子分析	莫雪, 陈斐杰, 游冲, 刘福德 (895)
管理措施对黄土高原油松人工林土壤水溶性碳氮及其三维荧光特征的影响	宋亚辉, 张娇阳, 刘鸿飞, 薛蕊, 李秧秧 (905)
生物炭输入对不同滨岸带土壤营养元素有效态变化的影响	周慧华, 袁旭音, 熊钰婷, 韩年, 叶宏萌, 陈耀祖 (914)
水热炭减少稻田氨挥发损失的效果与机制	余姗, 薛利红, 花昀, 李德天, 谢斐, 冯彦房, 孙庆业, 杨林章 (922)
接种菌根真菌对湿生植物根际土壤硝化反硝化活性的影响及其微生物机制	刘猷, 王磊, 曹湛波, 段灏 (932)
基于漂浮箱法和扩散模型测定淡水养殖鱼塘甲烷排放通量的比较	胡涛, 黄健, 丁颖, 孙志荣, 徐梦凡, 刘树伟, 邹建文, 吴双 (941)
超高效液相色谱串联质谱法同时测定叶菜中13种抗生素	陈乾, 刘洋, 肖丽君, 邹德玉, 刘海学, 吴惠惠 (952)
青菜中镉的吸收和累积对硒的响应规律	余焱, 罗丽韵, 刘哲, 付平南, 李花粉 (962)
两种不同镉富集能力油菜品种耐性机制	卞建林, 郭俊梅, 王学东, 杨俊兴, 杨军, 陈同斌, 曹柳, 成永霞, 任战红, 王杰, 周小勇 (970)
可生物降解螯合剂GLDA强化三叶草修复镉污染土壤	贺玉龙, 余江, 谢世前, 李佩柔, 周宽, 何欢 (979)
我国畜禽粪便重金属含量特征及土壤累积风险分析	穆虹宇, 庄重, 李彦明, 乔玉辉, 陈清, 熊静, 郭丽莉, 江荣凤, 李花粉 (986)
畜禽粪便和桃树枝工业化堆肥过程中微生物群落演替及其与环境因子的关系	蔡涵冰, 冯雯雯, 董永华, 马中良, 曹慧锦, 孙俊松, 张保国 (997)
4种粪便堆肥过程中抗生素的降解特性	朱为静, 朱凤香, 王卫平, 洪春来, 姚燕来 (1005)
《环境科学》征订启事	(553)
《环境科学》征稿简则	(655)
信息	(664, 755, 885)

成都平原 PM_{2.5} 中碳质组分时空分布特征与来源

史芳天¹, 罗彬², 张巍², 刘培川², 郝宇放¹, 杨文文¹, 谢绍东^{1*}

(1. 北京大学环境科学与工程学院, 北京 100871; 2. 四川省生态环境监测总站, 成都 610000)

摘要: 为了探究成都平原碳质气溶胶污染特征及来源, 于德阳、成都和眉山三地采集了 1 a 的 PM_{2.5} 样品, 利用光热透射法测量其有机碳(OC)和元素碳(EC). 3 个点年均碳质气溶胶的质量浓度($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)分别为眉山(OC:15.8 $\pm$ 9.6, EC:6.6 $\pm$ 5.3) > 成都(OC:13.0 $\pm$ 7.5, EC:4.7 $\pm$ 3.6) > 德阳(OC:9.6 $\pm$ 6.1, EC:3.4 $\pm$ 2.6), 对应的总碳质气溶胶(TCA)在 PM_{2.5} 中的占比分别为 36%、34% 和 30%. 由 EC 示踪法估算获得二次有机碳(SOC)在 OC 中的占比分别为眉山 38%、成都 46% 和德阳 47%. OC 和 EC 质量浓度季节变化显著, 呈现出秋冬季高夏季低的特征, 在 2013 年 10 月 12~13 日、12 月 2~7 日和 2014 年 1 月中下旬出现峰值, 同期气溶胶中 K⁺ 质量浓度激增, 说明这些污染过程中生物质燃烧有重要贡献. PMF 模型对碳质气溶胶来源解析结果表明, 该地区总碳(TC)的主要来源为生物质燃烧源(46%~56%)、二次有机气溶胶源(26%~38%)、机动车排放源(9%~12%)、扬尘源(3%~4%)、燃煤源(2%~3%)和工业源(1%~2%), 生物质燃烧源全年范围内对 TC 有显著贡献, 尤以秋冬两季贡献最高.

关键词: 有机碳; 元素碳; 成都平原; 二次有机碳(SOC); 源解析; 生物质燃烧

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)02-0520-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201908217

Spatio-Temporal Variations and Source Apportionment of Carbonaceous Species in PM_{2.5} Across Multiple Sampling Locations in the Chengdu Plain

SHI Fang-tian¹, LUO Bin², ZHANG Wei², LIU Pei-chuan², HAO Yu-fang¹, YANG Wen-wen¹, XIE Shao-dong^{1*}

(1. College of Environmental Sciences and Engineering, Peking University, Beijing 100871, China; 2. Sichuan Environmental Monitoring Centre, Chengdu 610000, China)

Abstract: To understand the characteristics and sources of carbonaceous aerosols, one-year PM_{2.5} samples were analyzed for their organic carbon (OC) and elemental carbon (EC) content, following the thermal/optical transmission protocol in three cities [Deyang (DY), Chengdu (CD), and Meishan (MS)] in the Chengdu Plain. The observed annual average concentrations ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) were in the following order: MS (15.8 $\pm$ 9.6 OC and 6.6 $\pm$ 5.3 EC) > CD (13.0 $\pm$ 7.5 OC and 4.7 $\pm$ 3.6 EC) > DY (9.6 $\pm$ 6.1 OC and 3.4 $\pm$ 2.6 EC). Organic matter (1.6OC) and EC was regarded as the total carbonaceous aerosols (TCA) amount, and the TCA/PM_{2.5} ratios at the three above-mentioned cities were 36%, 34%, and 30% respectively. The EC-trace method was used to estimate secondary organic carbon (SOC), which accounted for 38%, 46%, and 47% of total OC in MS, CD, and DY. Daily variations of OC and EC concentrations exhibited significant daily variations, with simultaneous peaks on Oct. 12th to 13th, 2013, Dec. 2nd to 7th, 2013, and mid-to-late Jan., 2014. The surging concentrations of K⁺ during the pollution period implied the contribution of biomass burning to heavy pollution. Six sources were resolved by the positive matrix factorization (PMF) model, whose contributions to the total carbon (TC) were: biomass burning (46%-56%), secondary aerosols (26%-38%), vehicle emission (9%-12%), fugitive dust (3%-4%), coal combustion (2%-3%), and industry emission (1%-2%). Biomass burning activities presented a significant influence on TC throughout the year, especially in autumn and winter.

Key words: organic carbon; elemental carbon; the Chengdu Plain; secondary organic carbon(SOC); source apportionment; biomass burning

成都平原是四川省人口密度最高、发展最快, 也是污染最为严重的区域之一. 成都平原西临海拔 4 km 的高原, 受盆地地形的影响, 全年地面风速小, 相对湿度大, 导致污染物扩散条件差、容易聚集. 有研究表明, 我国西南地区碳质气溶胶高达 19.3 ~ 35.0 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ^[1~6], 成都市 2010~2015 年间有机气溶胶含量较 2006 年下降 38%, 然其浓度在全国范围内仍处于较高水平^[7]. 我国已开展了大量关于碳质气溶胶的野外观测和实验室研究, 内容包括碳质气溶胶的排放清单^[8,9]、时空变化特征^[10~12]、来源解析等方面^[13~15]. 然而, 关于成都平原 PM_{2.5} 中碳质组

分时空分布特征与来源研究相对较少, 已有研究存在覆盖范围较小、采样时间不连续等缺点. 为此, 本研究在成都平原设置 3 个监测点, 采集了 1 a (2013 年 8 月~2014 年 8 月) 的 PM_{2.5} 样品, 并利用 NIOSH thermal/optical transmission (TOT) 法测量其 OC 和 EC, 旨在了解成都平原大气 PM_{2.5} 中 OC 和 EC 的浓度水平、时空变化特征以及 OC 和 EC 的关系, 识别

收稿日期: 2019-08-27; 修订日期: 2019-10-10

基金项目: 四川省环境保护重大科技专项(2013HBZX01); 国家重点研发计划项目(2018YFC0214000)

作者简介: 史芳天(1992~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为大气污染控制理论与技术, E-mail: fts@pku.edu.cn

* 通信作者, E-mail: sdxie@pku.edu.cn

不同季节 SOC 的浓度及在 OC 中的占比和成都平原碳质气溶胶的主要来源,以期为成都平原碳质气溶胶的控制及颗粒物污染治理提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 样品采集及分析

设置的 3 个采样点分别位于德阳广汉市沙堆村、成都武侯区人民南路和眉山彭山县牧马镇,具体监测点位分布见图 1,采样期间成都市主导风向为北风,3 m·s⁻¹ 以上的风速通常来自北方和东北方向,见图 2. 各采样点位信息概括和采集的样品数如表 1 所示. 采样时间为 2013 年 8 月~2014 年 8 月,每 6 d 采集一个样品,从当日 10:00 至次日 10:00. 采样仪器是武汉天虹的 TH-16A 四通道采样器,各通道流量为 16.7 L·min⁻¹,其中 3 个通道使用 Teflon 膜,所得样品用于 PM_{2.5} 质量浓度、离子和元素分析,另一个通道使用石英膜,所得样品进行有机碳/元素碳分析. 石英膜在采样前先在 550℃ 的马弗炉中预热 5.5 h,去除采样膜上有机物的影响. Teflon 滤膜采样前后均需在恒温恒湿 (20℃ ± 1℃ 温度; 40% ± 3% 相对湿度) 的超净室平衡 24 h 后才可称重,减少环境变化带来的误差.

采样后的 Teflon 滤膜用超纯水超声萃取后经过 0.45 μm 的滤头过滤,过滤后的溶液使用 Dionex

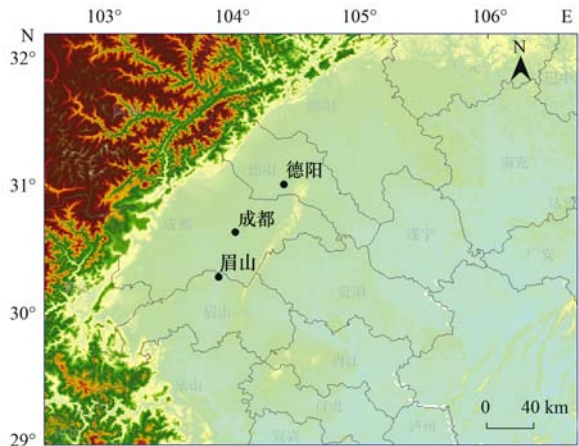


图 1 采样点地理位置

Fig. 1 Map of Chengdu Plain and sampling sites

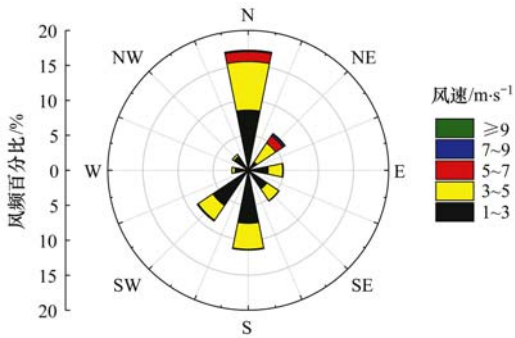


图 2 采样期间成都市风向和风速

Fig. 2 Wind speed and wind direction frequency diagram during sampling period in Chengdu

表 1 采样点概括

Table 1 Description of sampling sites

地点	经纬度	周围环境	样品数/个
德阳市广汉市	104. 41°E, 31. 02°N	郊区点,周边为农田	71
成都市武侯区	104. 03° E, 30. 65° N	城市点,商业生活区,紧邻主干道	74
眉山市牧马镇	103. 01°E, 30. 30° N	郊区点,周边为农村生活区和农田	72

ICS-2000 离子色谱测试 Na⁺、NH₄⁺、K⁺、Mg²⁺、Ca²⁺、Cl⁻、SO₄²⁻ 和 NO₃⁻ 这 8 种水溶性离子的质量浓度;采用 Agilent 7500c 电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS) (Agilent Technologies Co. Ltd, USA) 测量 Mg、Al、K、Ca、V、Cr、Mn、Fe、Co、Ni、Cu、Zn、As、Se、Mo、Cd、Ba 和 Pb 这 18 种无机元素质量浓度;使用 Sunset 实验室的光热透射法 (TOT) 碳分析仪测量有机碳/元素碳质量浓度.

1.2 PMF 模型

正矩阵因子法 PMF (positive matrix factorization) 是一种常用的受体模型,它最早是 Paatero 和 Tapper 提出的. 该方法无需输入源谱信息和气象参数,现已被广泛应用于颗粒物的来源解析研究中. 具体方法将采集到的样品作为一个矩阵 X,通过最小二乘法确定最小目标函数 Q(E),进而确定污染源贡献率

G 和污染源廓线 F,再根据污染源廓线来对源进行识别.

2 结果与讨论

2.1 OC 和 EC 质量浓度的时空分布特征

2.1.1 OC 和 EC 质量浓度水平及其时间变化

采样期间成都平原 PM_{2.5} 的平均质量浓度为 (78.4 ± 48.7) μg·m⁻³,超过国家空气质量二级标准 (35 μg·m⁻³) 两倍,其中 OC 和 EC 的平均质量浓度分别为 (12.8 ± 8.3) μg·m⁻³ 和 (4.9 ± 4.2) μg·m⁻³. OC 和 EC 质量浓度呈现显著的时间变化特征,统计后发现,该地区 OC、EC 的质量浓度水平呈现出冬季 (12 月至次年 2 月) > 秋季 (9~11 月) ≈ 春季 (3~5 月) > 夏季 (6~8 月),其中 12 和 1 月最高、其次是 10 月,眉山点 5 月份碳质气溶胶也呈现

较高质量浓度,见图3和表2. 碳质气溶胶的季节变化特征主要是由气象条件和排放强度在不同季节的变化所导致的. 夏季 OC 和 EC 的质量浓度较低,可能是由于夏季气压较低,大气边界层升高,利于碳质气溶胶的扩散,此外,成都平原夏季降水量的增加也对污染物起到了一定的清除作用.

由图3还可以看出,12、1、10和5月气溶胶中的 K^+ 质量浓度很高,因此可以认为这4个月碳质气溶胶有可能来源于生物质燃烧. 进一步分析发现,碳质气溶胶在2013年的10月、12月以及2014年1月中下旬3个点同步出现数次重污染过程,呈现明显的区域性特征. 2013年10月12~13日,3个采样点 $PM_{2.5}$ 质量浓度高达 $130.2 \sim 152.0 \mu g \cdot m^{-3}$, OC

和 EC 的质量浓度分别达到 $14.9 \sim 32.8 \mu g \cdot m^{-3}$ 和 $10.3 \sim 12.8 \mu g \cdot m^{-3}$, 15日完全消散时 $PM_{2.5}$ 质量浓度降至 $24.5 \sim 26.2 \mu g \cdot m^{-3}$, 污染过程中 K^+ 质量浓度约为10月15日的10倍; OC 的质量浓度在5月均出现小峰值, K^+ 质量浓度也有明显升高,特别是两个乡村站点高于 $2.5 \mu g \cdot m^{-3}$, 据此初步判断这些污染过程是生物质燃烧所致. 2013年12月上旬和2014年1月中下旬的数次污染事件中,德阳、成都和眉山三地的 $PM_{2.5}$ 最高值分别达到215.2、187.0和245.5 $\mu g \cdot m^{-3}$, K^+ 质量浓度也同步升高,污染过程中平均气压大于1020 hPa,平均风速小于 $3 m \cdot s^{-1}$,可初步推测冬季的重污染事件是由生物质燃烧贡献的增加和不利的气象条件共同作用的结果.

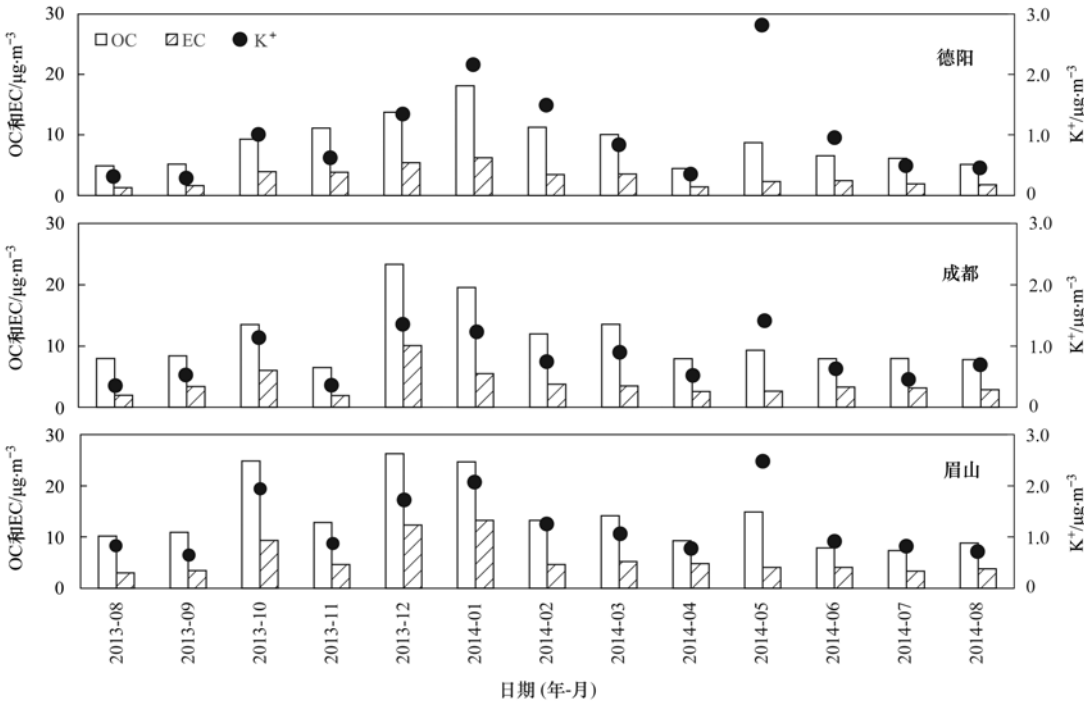


图3 OC、EC 和 K^+ 质量浓度月份变化特征

Fig. 3 Monthly variations of OC, EC and K^+ concentrations

表2 OC、EC、 K^+ 、OC/EC 和 TCA/ $PM_{2.5}$ 季节与年度均值

Table 2 Seasonal and annual means of OC, EC, K^+ concentrations, OC/EC, and TCA/ $PM_{2.5}$ ratios

地点	季节	EC/ $\mu g \cdot m^{-3}$	OC/ $\mu g \cdot m^{-3}$	OC/EC	$K^+ / \mu g \cdot m^{-3}$	TCA/ $PM_{2.5} / \%$
德阳	夏季	1.9 ± 1.0	5.7 ± 2.1	3.3 ± 1.0	0.6 ± 0.3	32.1 ± 11.8
	秋季	3.0 ± 3.3	8.2 ± 6.9	4.1 ± 1.8	0.7 ± 0.6	29.3 ± 17.1
	冬季	5.2 ± 2.0	14.2 ± 5.4	2.9 ± 0.7	1.5 ± 0.8	27.7 ± 10.0
	春季	2.6 ± 1.2	8.2 ± 3.6	3.2 ± 0.7	1.2 ± 1.6	32.1 ± 8.2
成都	夏季	2.8 ± 1.5	7.9 ± 3.2	3.3 ± 1.5	0.5 ± 0.3	35.8 ± 12.1
	秋季	4.5 ± 3.7	10.7 ± 5.8	3.4 ± 1.5	0.8 ± 0.6	32.0 ± 6.7
	冬季	7.5 ± 4.1	20.7 ± 7.1	3.1 ± 1.3	1.2 ± 0.4	35.0 ± 10.5
	春季	2.9 ± 1.3	10.3 ± 4.1	3.7 ± 0.9	0.9 ± 0.8	30.0 ± 10.0
眉山	夏季	3.6 ± 1.4	8.7 ± 2.6	2.5 ± 0.7	0.8 ± 0.2	38.5 ± 9.6
	秋季	5.6 ± 4.9	15.8 ± 9.8	3.9 ± 1.7	1.1 ± 0.8	37.7 ± 7.6
	冬季	10.8 ± 6.3	23.0 ± 9.9	2.4 ± 0.9	1.7 ± 0.9	37.6 ± 9.6
	春季	4.7 ± 1.5	12.8 ± 5.3	2.8 ± 0.9	1.4 ± 1.2	30.3 ± 9.6

2.1.2 OC 和 EC 质量浓度空间变化特征

图 4 给出了 3 个采样点采样期间 OC 和 EC 质量浓度 ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 的分布,由图 4 可见,眉山 ($\text{OC}:15.8 \pm 9.6$; $\text{EC}:6.6 \pm 5.3$) > 成都 ($\text{OC}:13.0 \pm 7.5$; $\text{EC}:4.7 \pm 3.6$) > 德阳 ($\text{OC}:9.6 \pm 6.1$; $\text{EC}:3.4 \pm 2.6$). 由图 2 所示的全年风速风向频率统计可知,采样期间成都平原主导风向是北风, $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上的风速通常来自北方和东北方向,位于上风向的德阳点碳质气溶胶浓度最低,下风向的眉山点浓度最高. Turpin 等^[16]曾提出 OC 和有机物(OM)间的转化系数,城市采样点为 1.6 ± 0.2 ,老化气溶胶为 $1.9 \sim 2.3$,生物质燃烧为 $2.2 \sim 2.6$ ^[7]. 据此本研究采用 OM 的计算公式为: $\text{OM} = 1.6 \times \text{OC}$,总碳质气溶胶(TCA)的含量为 OM 和 EC 的总和. 于是,得到 3 个采样点 $\text{TCA}/\text{PM}_{2.5}$ 从大到小分别为眉山(36.3%) > 成都(33.5%) > 德阳(29.8%),与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度高低一致,可见碳质气溶胶是成都平原细颗粒物污染的重要组分.

与已有研究对比发现,成都平原 $\text{PM}_{2.5}$ 和 TC ($\text{OC} + \text{EC}$) 的平均质量浓度 ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 均低于北京 ($\text{OC}:17.1$; $\text{EC}:5.6$)^[17],但高于上海 ($\text{OC}:9.1$; $\text{EC}:2.4$) 和广州 ($\text{OC}:15$; $\text{EC}:2$) 等南方城市^[18,19],与同处四川盆地的重庆浓度相当 ($\text{OC}:13.2$; $\text{EC}:3.1$)^[20].

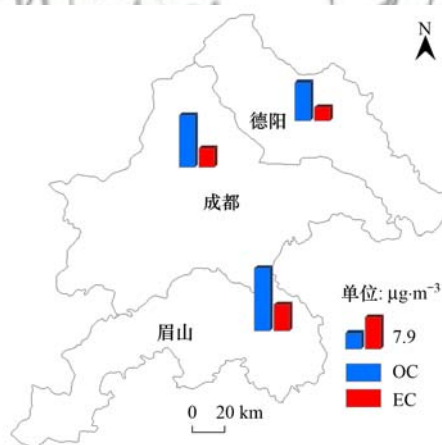


图 4 OC 和 EC 质量浓度空间的分布

Fig. 4 Spatial variations of OC and EC concentrations

2.2 OC 与 EC 的关系

OC 可以通过一次源直接排放(一次有机碳, POC),也可以通过挥发性有机化合物(VOCs)的气粒转化二次生成(二次有机碳, SOC). POC 主要来自化石燃料燃烧、生物质燃烧以及生物排放(如植物碎片)等过程,而 EC 主要来自于燃烧过程的排放,所以常用 EC 作为一次燃烧生成的 OC 的示踪物,因此 OC 和 EC 的关系能够一定程度上评估碳质气溶胶的一次来源^[16]. 3 个点各季节 OC 和 EC 关系的

相关性如图 5 所示,德阳和成都采样点 OC 和 EC 相关性较好, R^2 值在 0.66 ~ 0.84 的范围内,眉山采样点 OC 和 EC 在春、夏两季相关性较差,表明眉山采样点在春夏两季 EC 和 OC 受到不同排放源的影响.

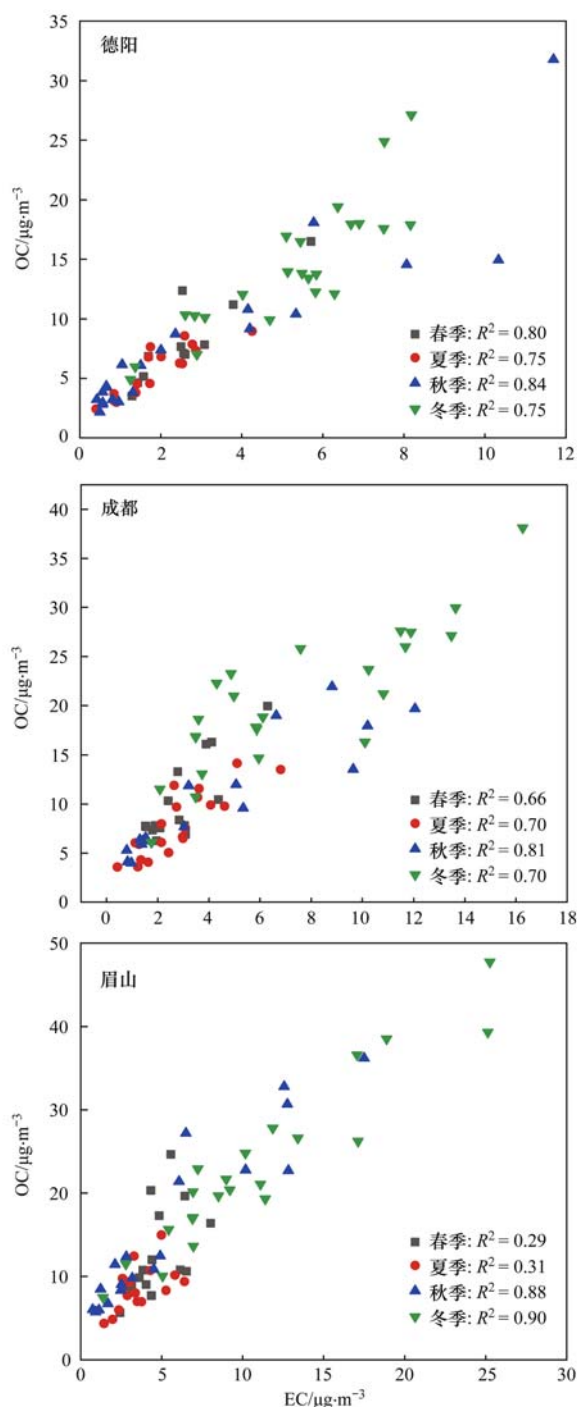


图 5 不同季节 OE 与 EC 散点图

Fig. 5 Scatter plots of OC and EC concentrations in different seasons

OC/EC 比值是局地碳质气溶胶排放和区域 SOC 转化的综合结果,常被用来识别碳质气溶胶的来源,燃煤和生物质燃烧源的 OC/EC 比值较高,分别为 $8.5 \sim 12$ 和 $7 \sim 11.5$ ^[21,22];临近道路的机动车排放源中 OC/EC 值相对较低,在 $2.5 \sim 5$ 范围内;工

业排放源中 OC/EC 略微升高至 3.5 ~ 5.5^[7]. 由表 2 可见,德阳、成都和眉山站点 OC/EC 值分别为 3.4 ± 1.3、3.3 ± 1.3 和 2.9 ± 1.3,秋季和春季 OC/EC 值相对较高,可能受生物质燃烧源的影响. 与相同采样时段(2013 ~ 2014 年)、相同分析方法(TOT)的其他研究相比,成都平原 OC/EC 值与重庆(3.6)、北京(3.4)和上海(3.7)较为接近,低于广州(7.2)^[17~20].

2.3 SOC 的估算

如 2.2 节所述,EC 可被用作 POC 的示踪物,假定一次来源 OC/EC 值不变的条件下,常用 EC 估算法计算 SOC 的值,公式为:

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

$$= \text{OC} - \text{EC} \times (\text{OC}/\text{EC})_{\text{primary}} \quad (3)$$

式中, $(\text{OC}/\text{EC})_{\text{primary}}$ 表示一次排放中的 OC/EC 值,本文选取 OC/EC 值最小的 5% 的数据中的中位数作为 $(\text{OC}/\text{EC})_{\text{primary}}$ ^[23].

德阳、成都和眉山三地的 PM_{2.5} 中 SOC 年均值分别为 (4.5 ± 3.0)、(6.0 ± 3.7) 和 (5.9 ± 3.8) μg·m⁻³,分别占到 OC 的 47%、46% 和 38%. SOC 与 SOC/OC 的季节变化特征如图 6 所示,从中可知, SOC 浓度均呈现夏季低值和冬季高值, SOC/OC 高值却发生在春季和夏季,但眉山点秋季 SOC 和 SOC/OC 同时出现最高值.

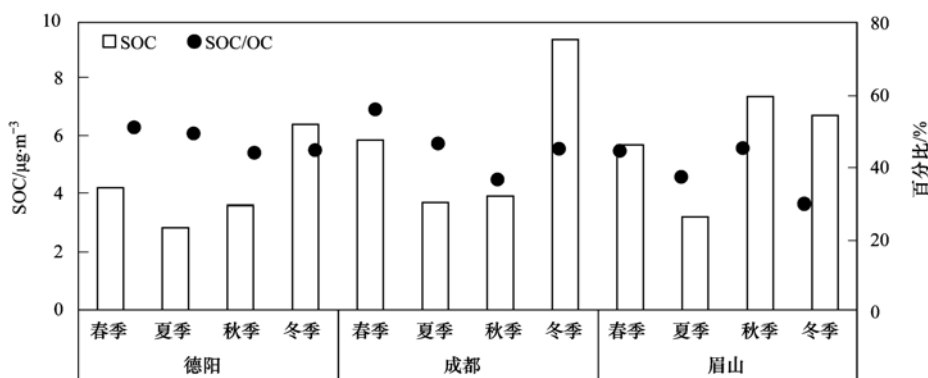


图 6 SOC 与 SOC/OC 的季节变化

Fig. 6 Seasonal variations of SOC concentrations and SOC/OC ratios

2.4 OC 和 EC 来源解析

利用 PMF 模型识别出 6 类源,分别是二次气溶胶源、生物质燃烧源、燃煤源、工业源、扬尘源和机动车排放源,图 7 和图 8 分别展示了它们的源特征和采样期间每天的解析结果.

因子 1 中含有高浓度的二次无机离子(SNA): NH_4^+ 、 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 分别占各自总量的 71%、75% 和 74%,此外对 OC 的贡献高达 35.8%,且在冬季浓度更高,因此判断因子 1 为二次气溶胶源. 因子 2 中 OC 和 EC 的贡献分别为 46% 和 66%,K 的贡献也是所有因子中最高 (40%),还含有一定量的 SNA 和较高浓度的 Cl^- ,符合生物质燃烧源的特征^[1],结合时间序列,该因子在 10、12 和 1 月贡献较高,与秸秆露天焚烧活动和用于烹饪、取暖的民用生物质燃料燃烧活动时间吻合,因此识别为生物质燃烧源. 因子 3 中 Cl^- 占其总质量的 76%, Cl^- 是燃烧源的重要指示物,该因子还含有较高浓度的 OC、EC、K 和 Al,As 和 Se 是燃煤源的指示物^[24],在因子 3 中的贡献分别为 62% 和 48%,结合时间序列,因子 3 在冬季的贡献略高,因此判断为燃煤源. 因子 4 中 Mo、Cr、Ni、Fe、Mn 和 Co 等金属元素百分比较高,Mn 和 Fe 是钢铁冶炼的示踪物^[25],Mo、Ni 等金属可能

来自于冶炼厂和有色金属厂^[20],因此判断其为工业来源. 因子 5 中各元素浓度较低,其中 Mg、Al、K、Ca、Fe 和 Ba 等元素百分比贡献突出,Al、K、Ca、Fe 和 Ba 等元素均可作为扬尘的标识元素,因此判断该因子为扬尘源. 扬尘源中的 OC 可能来自于天然有机物质,如路边的植物碎片和土壤微生物等^[26],此外,由于采样点临近道路,扬尘源中的 EC 可能来自机动车的不完全燃烧排放和汽车轮胎的磨损. 因子 6 中 NH_4^+ 、 SO_4^{2-} 、OC、EC 和 Zn 等浓度较高,Mn、Fe、Cu、Cd 和 Pb 等百分比贡献突出,Zn 存在于汽车轮胎的硫化剂和润滑油中,Zn 和 TC 被看作是汽油机动车的示踪物^[27],因此判断因子 6 是机动车排放源.

图 8 给出了各采样点 TC 来源解析结果随采样时间的变化过程,从中可见,不同季节各采样点 TC 的来源有所不同,生物质燃烧源和二次气溶胶源常年对 TC 都有较大贡献,特别是 12、1 和 10 月生物质燃烧源的贡献较大;机动车排放源和工业源的贡献季节特征不显著,在全年均存在;燃煤源在冬季的贡献比例高于其他季节;扬尘源在时间变化趋势上的一致性较差,表现出局地源的特征. 统计采样期间 TC 的源贡献可知,生物质燃烧源对 TC 的贡献为

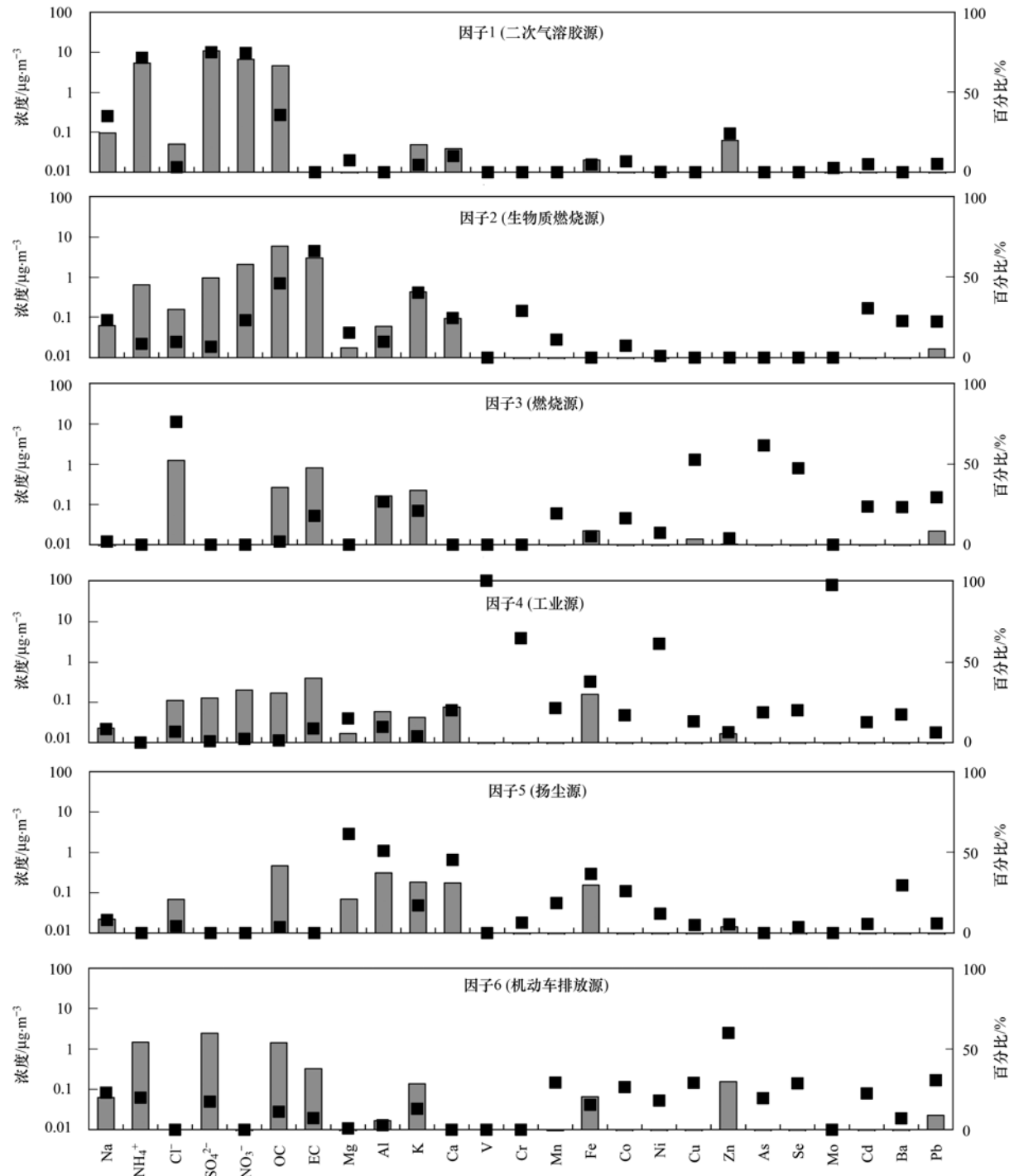


图7 PMF 解析出的源谱

Fig. 7 Contribution profile identified by PMF model

46%~56%,二次气溶胶源为26%~38%,机动车排放源为9%~12%,扬尘源为3%~4%,燃煤源为2%~3%,工业源为1%~2%。

图9统计了各采样点OC和EC的源贡献,结果显示,生物质燃烧和二次气溶胶源对OC的贡献最大,高达81%~84%,其次是机动车排放源对OC的贡献(9%~12%),再次是扬尘源(3%~4%)、燃煤源(2%)和工业源(1%~2%)。由图9还可以看出,大气中EC主要来源贡献为:生物质燃烧>机动车

排放源>燃煤源>工业源,其中生物质燃烧源的贡献达到86%~88%。

生物质燃烧源在眉山点的贡献浓度最大($10.2\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$);二次气溶胶源在3个点浓度相当($4.0\sim 4.8\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$);机动车排放源对TC也有明显贡献,3个点中德阳站点机动车的贡献最小($1.0\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$),成都和眉山贡献相当($1.7\sim 1.9\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$);扬尘源与机动车排放源呈现类似的空间特征,这可能是由于成都和眉山站点附近城建活

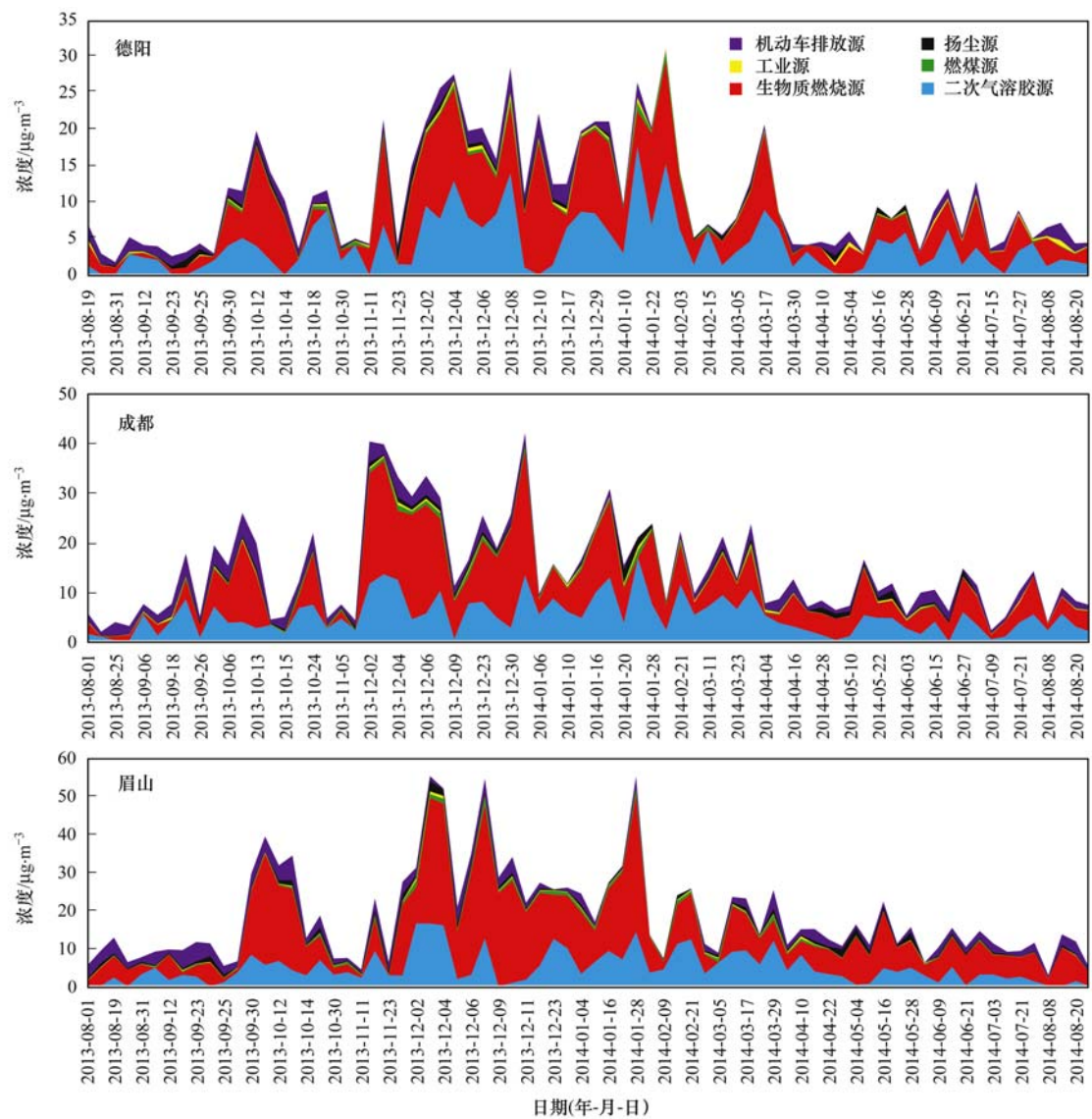


图 8 各采样点气溶胶中 TC 的源贡献随采样时间的变化过程

Fig. 8 Time series of six sources' contributions to total carbon (TC)

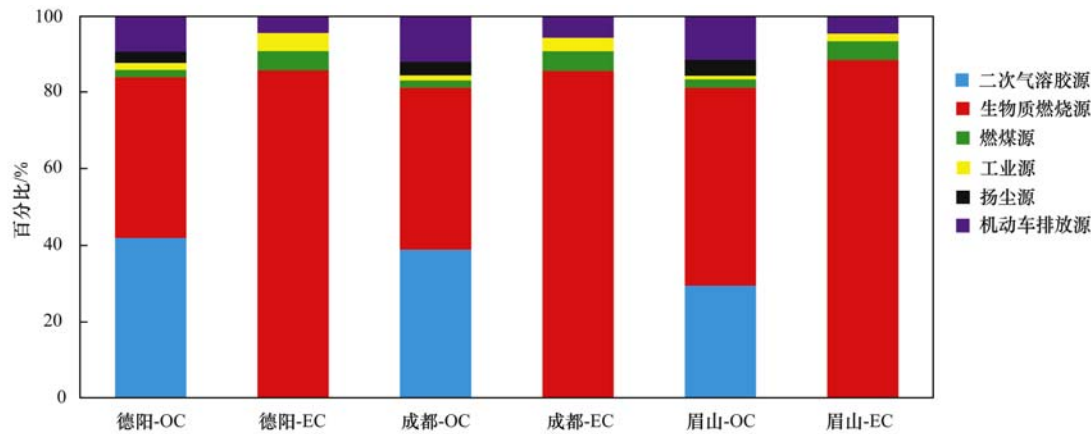


图 9 各采样点气溶胶中 OC 和 EC 的源贡献

Fig. 9 Contributions of six sources to OC and EC

动较多所致;工业源在德阳点贡献更高,德阳是四川知名的重工业城市,是全球最大的铸锻钢制造基地.

3 结论

(1) 成都平原大气 OC 和 EC 的质量浓度

($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 水平呈现出眉山(OC: 15.8 ± 9.6 , EC: 6.6 ± 5.3) > 成都(OC: 13.0 ± 7.5 , EC: 4.7 ± 3.6) > 德阳(OC: 9.6 ± 6.1 , EC: 3.4 ± 2.6) 的空间分布特征, 亦即由北至南碳质气溶胶浓度呈现逐渐增加趋势, 这与该地区常年表现出偏北风的流场是一致的, 大气中的碳质气溶胶随风的流向由上风向的德阳传输至眉山一带; 在时间变化上表现出明显的季节变化特征, 呈现出冬高夏低的季节特征, 2013 年的 10 月、12 月和 2014 年 1 月中下旬同步出现数次重污染过程, 并伴随 K⁺ 浓度明显升高, 说明秋冬季还受到生物质燃烧源的显著影响。

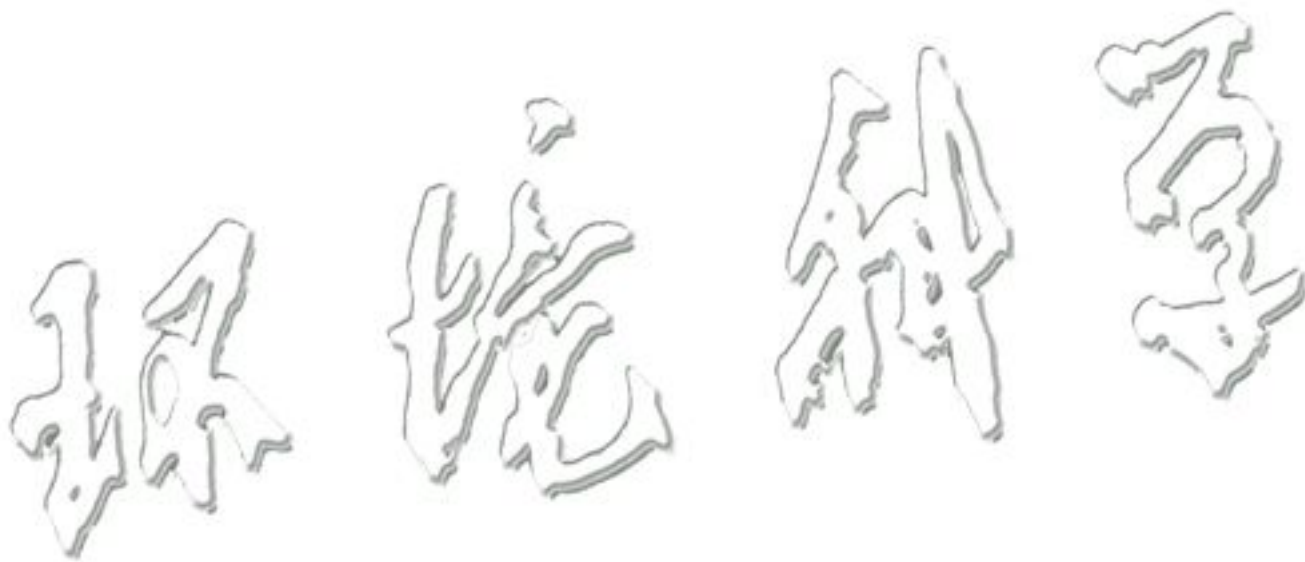
(2) 德阳和成都两点 OC 与 EC 的相关性较好, 眉山点 OC 和 EC 在春夏两季相关性较差, 可能受到不同来源的影响。OC/EC 值分别为德阳 3.4、成都 3.3 和眉山 2.9。OC/EC 值在春秋两季较高可能是受到秸秆焚烧活动的影响。

(3) PMF 模型解析出 OC 的主要来源为生物质燃烧源(42%~52%)、二次有机气溶胶源(30%~42%)、机动车排放源(9%~12%)、扬尘源(3%~4%)、燃煤源(2%)和工业源(1%~2%); EC 的主要来源为生物质燃烧源(86%~88%)、机动车排放源(5%~6%)、燃煤源(5%)、工业源(2%~5%)。生物质燃烧源在全年范围内都对碳质气溶胶有显著贡献, 尤以秋冬两个季节贡献最高。德阳站点机动车和扬尘源的贡献最小, 工业源贡献相对较大。

参考文献:

- [1] Chen Y, Xie S D, Luo B, *et al.* Characteristics and origins of carbonaceous aerosol in the Sichuan Basin, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **94**: 215-223.
- [2] Tao J, Zhang L M, Engling G, *et al.* Chemical composition of PM_{2.5} in an urban environment in Chengdu, China: Importance of springtime dust storms and biomass burning[J]. *Atmospheric Research*, 2013, **122**: 270-283.
- [3] Huang Y M, Liu Y, Zhang L Y, *et al.* Characteristics of carbonaceous aerosol in PM_{2.5} at Wanzhou in the southwest of China[J]. *Atmosphere*, 2018, **9**(2): 37.
- [4] Wang H B, Tian M, Chen Y, *et al.* Seasonal characteristics, formation mechanisms and source origins of PM_{2.5} in two megacities in Sichuan Basin, China[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, **18**(2): 865-881.
- [5] Yang W W, Xie S D, Zhang Z Q, *et al.* Characteristics and sources of carbonaceous aerosol across urban and rural sites in a rapidly urbanized but low-level industrialized city in the Sichuan Basin, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, **26**(26): 26646-26663.
- [6] 陈源, 谢绍东, 罗彬. 成都市大气细颗粒物组成和污染特征分析(2012—2013 年)[J]. *环境科学学报*, 2016, **36**(3): 1021-1031.
Chen Y, Xie S D, Luo B. Composition and pollution characteristics of fine particles in Chengdu from 2012 to 2013 [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(3): 1021-1031.
- [7] Wu X F, Vu T V, Shi Z B, *et al.* Characterization and source apportionment of carbonaceous PM_{2.5} particles in China - A review[J]. *Atmospheric Environment*, 2018, **189**: 187-212.
- [8] Chow J C, Watson J G, Lowenthal D H, *et al.* PM_{2.5} source profiles for black and organic carbon emission inventories[J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(31): 5407-5414.
- [9] 付加锋, 齐蒙, 刘倩. 黑碳气溶胶排放量测算及空间分布研究[A]. 见: 2017 中国环境科学学会科学与技术年会论文集(第一卷)[C]. 厦门: 中国环境科学学会, 2017. 1530-1541.
- [10] Zhao P S, Dong F, Yang Y D, *et al.* Characteristics of carbonaceous aerosol in the region of Beijing, Tianjin, and Hebei, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **71**: 389-398.
- [11] 周一鸣, 韩珣, 王瑾瑾, 等. 南京春季北郊地区大气 PM_{2.5} 中主要化学组分及碳同位素特征[J]. *环境科学*, 2018, **39**(10): 4439-4445.
Zhou Y M, Han X, Wang J J, *et al.* Chemical constitution and carbon isotopic compositions of PM_{2.5} in the northern suburb of Nanjing in spring[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(10): 4439-4445.
- [12] Peng C, Tian M, Chen Y, *et al.* Characteristics, Formation mechanisms and potential transport pathways of PM_{2.5} at a rural background site in Chongqing, southwest China[J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2019, **19**(9): 1980-1992.
- [13] Zhang R J, Jing J S, Tao J, *et al.* Chemical characterization and source apportionment of PM_{2.5} in Beijing: seasonal perspective [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, **13**(14): 7053-7074.
- [14] 樊啸辰, 郎建垒, 程水源, 等. 北京市大气环境 PM_{2.5} 和 PM₁ 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_{2.5}, PM₁ and their carbonaceous components in Beijing[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(10): 4430-4438.
- [15] Wu S P, Xu C, Dai L H, *et al.* Source apportionment of PM_{2.5} at urban and suburban sites in a port city of southeastern China [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2019, **19**(9): 2017-2031.
- [16] Turpin B J, Huntzicker J J. Secondary formation of organic aerosol in the Los Angeles Basin: a descriptive analysis of organic and elemental carbon concentrations [J]. *Atmospheric Environment. Part A. General Topics*, 1991, **25**(2): 207-215.
- [17] Ji D S, Zhang J K, He J, *et al.* Characteristics of atmospheric organic and elemental carbon aerosols in urban Beijing, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2016, **125**: 293-306.
- [18] Chang Y H, Deng C R, Cao F, *et al.* Assessment of carbonaceous aerosols in Shanghai, China-Part 1: long-term evolution, seasonal variations, and meteorological effects[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, **17**(16): 9945-9964.
- [19] Cui H, Mao P, Zhao Y, *et al.* Patterns in atmospheric carbonaceous aerosols in China: emission estimates and observed concentrations[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, **15**(15): 8657-8678.
- [20] Chen Y, Xie S D, Luo B, *et al.* Particulate pollution in urban Chongqing of southwest China: historical trends of variation, chemical characteristics and source apportionment[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **584-585**: 523-534.
- [21] Wang L P, Zhou X H, Ma Y J, *et al.* Carbonaceous aerosols over China—review of observations, emissions, and climate

- forcing[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, **23**(2): 1671-1680.
- [22] Sun K, Qu Y, Wu Q, *et al.* Chemical characteristics of size-resolved aerosols in winter in Beijing [J]. Journal of Environmental Sciences, 2014, **26**(8): 1641-1650.
- [23] Pio C, Cerqueira M, Harrison R M, *et al.* OC/EC ratio observations in Europe: Re-thinking the approach for apportionment between primary and secondary organic carbon [J]. Atmospheric Environment, 2011, **45**(34): 6121-6132.
- [24] Hao Y F, Meng X P, Yu X P, *et al.* Exploring the characteristics and sources of carbonaceous aerosols in the agro-pastoral transitional zone of Northern China[J]. Environmental Pollution, 2019, **249**: 589-597.
- [25] Dai Q L, Bi X H, Wu J H, *et al.* Characterization and source identification of heavy metals in ambient PM₁₀ and PM_{2.5} in an integrated iron and steel industry zone compared with a background site[J]. Aerosol and Air Quality Research, 2015, **15**(3): 875-887.
- [26] Hao Y F, Meng X P, Yu X P, *et al.* Characteristics of trace elements in PM_{2.5} and PM₁₀ of Chifeng, northeast China; insights into spatiotemporal variations and sources [J]. Atmospheric Research, 2018, **213**: 550-561.
- [27] Rogge W F, Medeiros P M, Simoneit B R T. Organic marker compounds in surface soils of crop fields from the San Joaquin Valley fugitive dust characterization study [J]. Atmospheric Environment, 2007, **41**(37): 8183-8204.



CONTENTS

Influencing Factors of Long-term Variations on Gridded PM _{2.5} of Typical Regions in China Based on GAM Model	NAN Yang, ZHANG Qian-qian, ZHANG Bi-hui (499)
Gridded Atmospheric Emission Inventory of PCDD/Fs in China	CHEN Lu-lu, HUANG Tao, CHEN Kai-jie, <i>et al.</i> (510)
Spatio-Temporal Variations and Source Apportionment of Carbonaceous Species in PM _{2.5} Across Multiple Sampling Locations in the Chengdu Plain	SHI Fang-tian, LUO Bin, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (520)
Diurnal Variations and Source Apportionment of Water-soluble Ions in PM _{2.5} During Winter in Nanjing Jiangbei New Area	QIU Chen-chen, YU Xing-na, DING Cheng, <i>et al.</i> (529)
Characterization, Seasonal Variation, and Source Apportionments of Particulate Amines (PM _{2.5}) in Northern Suburb of Nanjing	LI Xu-jie, SHI Xiao-wen, MA Yan, <i>et al.</i> (537)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of <i>n</i> -Alkanes and PAHs in Summertime PM _{2.5} at Background Site of Yangtze River Delta	XUE Guo-yan, WANG Ge-hui, WU Can, <i>et al.</i> (554)
Source Apportionment and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in PM _{2.5} in Changchun City, Autumn of 2017	ZHANG Yi-xuan, CAO Fang, ZHENG Han, <i>et al.</i> (564)
Heavy Pollution Characteristics and Assessment of PM _{2.5} Predicted Model Results in Beijing-Tianjin-Hebei Region and Surrounding Areas During November 23 to December 4, 2018	ZHU Yuan-yuan, GAO Yu-xiao, CHAI Wen-xuan, <i>et al.</i> (574)
Analysis of Characteristics and Meteorological Influence Factors of Ozone Pollution in Henan Province	QI Yan-jie, YU Shi-jie, YANG Jian, <i>et al.</i> (587)
Spatio-Temporal Distribution and Variation Characteristics of Aerosol Optical Properties in Henan Province	ZHANG Rui-fang, YU Xing-na (600)
Analysis of Water Soluble Organic Aerosol in Spring PM _{2.5} with Soot Particle Aerosol Mass Spectrometry (SP-AMS)	HUANG Wen-qian, CHEN Yan-tong, LI Xu-dong, <i>et al.</i> (609)
Temporal Evolution and Main Influencing Factors of Black Carbon Aerosol in Nanjing	YANG Xiao-min, SHI Shuang-shuang, ZHANG Chen, <i>et al.</i> (620)
Pollution Characteristics and Ozone Formation Potential of Ambient Volatile Organic Compounds(VOCs) in Summer and Autumn in Different Functional Zones of Lianyungang, China	QIAO Yue-zhen, CHEN Feng, LI Hui-peng, <i>et al.</i> (630)
Operation and Maintenance of Cost-Effective Volatile Organic Compounds Abatement Alternatives	QIANG Ning, SHI Tian-zhe, MIAO Hai-chao (638)
Pollution and Deposition Characteristics of Precipitation and Its Source Apportionment in Xi'an City	DING Cheng, YU Xing-na, HOU Si-yu (647)
Bacterial Diversity and Community Structure Antibiotic-resistant Bacteria in Bioaerosol of Animal Farms	SHA Yun-fei, SUN Xing-bin, XIN Wen-peng, <i>et al.</i> (656)
Vehicle Emission Inventory and Scenario Analysis in Liaoning from 2000 to 2030	JIN Jia-xin, SUN Shi-da, WANG Peng, <i>et al.</i> (665)
VOCs Emission Characteristics of DPF Regeneration in National VI Diesel Engine	QIAN Feng, XUE Chang-xin, XU Xiao-wei, <i>et al.</i> (674)
Characteristics and Significance of Stable Isotopes and Hydrochemistry in Surface Water and Groundwater in Nanxiaohegou Basin	GUO Ya-wen, TIAN Fu-qiang, HU Hong-chang, <i>et al.</i> (682)
Spatio-Temporal Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Middle and Lower Reaches of Le'an River	YU Yang, LÜ Ya-ning, WANG Wei-jie, <i>et al.</i> (691)
Spatio-temporal Evolution and Relationship of Water Environment Quality and Phytoplankton Community in Wenyu River	ZHU Li-ying, CHEN Yuan-yuan, LIU Jing, <i>et al.</i> (702)
High-Frequency Dynamics of Water Quality and Phytoplankton Community in Inflowing River Mouth of Xin'anjiang Reservoir, China	DA Wen-yi, ZHU Guang-wei, LI Yun-xiang, <i>et al.</i> (713)
Phosphorus Storage Capacity and Loss Risk in Coastal Reed Wetland Surrounding Bohai Sea	SONG Jia-wei, XU Gang, ZHANG Yang, <i>et al.</i> (728)
Spatio-Temporal Variation of Release Flux of Sediment Nitrogen and Phosphorus in High-Risk Period of Algal Bloom in Lake Erhai	LIU Si-ru, ZHAO Ji-dong, XIAO Shang-bin, <i>et al.</i> (734)
Fluorescence Characteristics and Source Analysis of DOM in Snowfall of Xi'an	YANG Yi, HAN Li-yuan, LIU Huan-wu, <i>et al.</i> (743)
Performance Assessment of Permeable Interlocking Concrete Pavement Facility Structure	ZHANG Jia-wei, LIU Yong, JIN Jian-rong, <i>et al.</i> (750)
Photocatalytic Degradation of Rhodamine B with Micro-SiC/Graphene Composite Under Visible Light Irradiation	ZHU Hong-qing, YANG Bing, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i> (756)
Removal of BPA and EE2 from Water by Mn-Fe Embedded in Acicular Mullite	ZHOU Qiu-hong, LONG Tian-yu, HE Jing, <i>et al.</i> (763)
Fabrication of La-MHTC Composites for Phosphate Removal; Adsorption Behavior and Mechanism	SONG Xiao-bao, HE Shi-ying, FENG Yan-fang, <i>et al.</i> (773)
Adsorption of Low-Concentration Phosphorus from Water by Composite Metal Modified Biochar	SUN Ting-ting, GAO Fei, LIN Li, <i>et al.</i> (784)
Phosphate Adsorption from Water on CaO ₂ -loaded Magnetic Diatomite	XU Chu-tian, LI Da-peng, ZHANG Shuai, <i>et al.</i> (792)
Phosphorus Forms and Release Risk of Sediments in Urban Sewage Treatment Plant Effluent and Receiving Stream Reach	TANG Ning, LI Ru-zhong, WANG Yu-qing, <i>et al.</i> (801)
Purification Characteristics of Urban Tail Water from Sewage Treatment Plant by Biofilm Ecological Floating Bed	ZHAO Zhi-rui, ZHANG Jia-yao, LI Duo, <i>et al.</i> (809)
Removal Performance of Antibiotic Resistance Genes and Heavy Metal Resistance Genes in Municipal Wastewater by Magnetic-Coagulation Process	YU Wen-chao, ZHENG Li-bing, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (815)
Effect of Tetracycline Antibiotic on Abundance and Transcriptional Expression Level of Tetracycline Resistance Genes in Activated Sludge	RUAN Xiao-hui, QIAN Ya-jie, XUE Gang, <i>et al.</i> (823)
Denitrification Process and N ₂ O Production Characteristics of Heterotrophic Nitrifying Bacterium <i>Pseudomonas aeruginosa</i> YL	YANG Lei, CUI Shen, REN Yong-xiang, <i>et al.</i> (831)
Environmental Factors Influence and Microbial Community Structure Analysis of Entrapped Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria	WANG Xiao-tong, YANG Hong, SU Yang, <i>et al.</i> (839)
Research on Denitrification Performance of Enhanced Secondary Effluent by Embedded Denitrification Filler and Pilot Application	ZHOU Ya-kun, YANG Hong, WANG Shao-lun, <i>et al.</i> (849)
Temporal Anaerobic Effect on Aerobic Granular Sludge with Intermittent Influent-Intermittent Aeration	ZHANG Jie, WANG Yu-ying, LI Dong, <i>et al.</i> (856)
Simultaneous Short-Cut Nitrification-Denitrification Phosphorus Removal Granules Induced by Phosphorus Removal Granules	LI Dong, LIU Bo, WANG Wen-qi, <i>et al.</i> (867)
Spatial Distribution Characteristics and Pollution Assessment of Heavy Metals on Farmland of Geochemical Anomaly Area in Southwest Guangxi	WANG Fo-peng, XIAO Nai-chuan, ZHOU Lang, <i>et al.</i> (876)
Evaluation and Source of Heavy Metal Pollution in Surface Soil of Qinghai-Tibet Plateau	YANG An, WANG Yi-han, HU Jian, <i>et al.</i> (886)
Characteristics and Factors of Soil Enzyme Activity for Different Plant Communities in Yellow River Delta	MO Xue, CHEN Fei-jie, YOU Chong, <i>et al.</i> (895)
Effects of Management Measures on Soil Water-soluble Carbon and Nitrogen and Their Three-Dimensional Fluorescence Characteristics of <i>Pinus tabulaeformis</i> Plantations on Loess Plateau	SONG Ya-hui, ZHANG Jiao-yang, LIU Hong-fei, <i>et al.</i> (905)
Effects of Biochar Input on Changes of Available Nutrient Elements in Riparian Soils with Different Landuse Types	ZHOU Hui-hua, YUAN Xu-yin, XIONG Yu-ting, <i>et al.</i> (914)
Effect of Applying Hydrochar for Reduction of Ammonia Volatilization and Mechanisms in Paddy Soil	YU Shan, XUE Li-hong, HUA Yun, <i>et al.</i> (922)
Effects of Mycorrhizal Fungi on Nitrification and Denitrification in the Rhizospheric Soil of Aquatic Plants and Its Microbial Mechanism	LIU Duo, WANG Lei, CAO Zhan-bo, <i>et al.</i> (932)
Comparison of Floating Chamber and Diffusion Model Methods for Measuring Methane Emissions from Inland Fish-Aquaculture Ponds	HU Tao, HUANG Jian, DING Ying, <i>et al.</i> (941)
Simultaneous Quantitative Detection of Thirteen Common Antibiotics in Leafy Vegetables by Ultra-High Performance Liquid Chromatography-Tandem Mass Spectrometry	CHEN Qian, LIU Yang, XIAO Li-jun, <i>et al.</i> (952)
Accumulation and Translocation of Cd in <i>Brassica rapa</i> Under the Influence of Selenium	YU Yao, LUO Li-yun, LIU Zhe, <i>et al.</i> (962)
Tolerance Mechanism and Cadmium Enrichment Abilities in Two <i>Brassica napus</i> L. Cultivars	BIAN Jian-lin, GUO Jun-mei, WANG Xue-dong, <i>et al.</i> (970)
Enhanced Phytoextraction of Cadmium Contaminated Soil by <i>Trifolium Repens</i> with Biodegradable Chelate GLDA	HE Yu-long, YU Jiang, XIE Shi-qian, <i>et al.</i> (979)
Heavy Metal Contents in Animal Manure in China and the Related Soil Accumulation Risks	MU Hong-yu, ZHUANG Zhong, LI Yan-ming, <i>et al.</i> (986)
Microbial Community Succession in Industrial Composting with Livestock Manure and Peach Branches and Relations with Environmental Factors	CAI Han-bing, FENG Wen-wen, DONG Yong-hua, <i>et al.</i> (997)
Degradation Characteristics of Antibiotics During Composting of Four Types of Feces	ZHU Wei-jing, ZHU Feng-xiang, WANG Wei-ping, <i>et al.</i> (1005)