

目次

河北南部城市臭氧和 VOCs 的污染特征及传输贡献 ..... 赵江伟, 聂赛赛, 于玉洁, 王帅, 崔建升, 王玮, 任晓伟, 朱烁 (4775)

基于卫星和地面监测的河西走廊 O<sub>3</sub> 浓度时空分布及潜在源区分析 ..... 李锦超, 曹春, 方锋, 唐千惠, 梁朕月 (4785)

海南岛臭氧污染时空变化及敏感性特征 ..... 符传博, 丹利, 佟金鹤, 徐文帅 (4799)

华东地区对流层 O<sub>3</sub> 和前体物 HCHO 及 NO<sub>2</sub> 的时空特征 ..... 王晓雯, 刘昊霞, 王扬, 宋宜凯 (4809)

2006 ~ 2020 年广东省大气甲醛排放演变特征 ..... 明桂英, 朱曼妮, 沙青娥, 张雪驰, 饶思杰, 陈诚, 刘慧琳, 郑君瑜 (4819)

淄博市涂装行业 VOCs 排放水平及减排潜力 ..... 黄玥润, 杨文, 王秀艳, 王雨燕, 程颖, 王帅 (4832)

西安市城市降尘和土壤尘 PM<sub>10</sub> 和 PM<sub>2.5</sub> 中碳组分特征 ..... 沈利娟, 王红磊, 孙杰娟, 刘诗云, 刘焕武, 赵天良 (4843)

长江流域径流模拟及其对极端降雨的响应 ..... 高爽, 遆超普, 汤水荣, 王心亮, 王慧勇, 孟磊, 颜晓元 (4853)

黄河流域内蒙古段水化学同位素特征及水体转化关系 ..... 裴森森, 段利民, 苗平, 潘浩, 崔彩琪, 张波, 籍健勋, 罗艳云, 刘廷玺 (4863)

古堆泉域岩溶地下水水化学特征及成因 ..... 唐春雷, 申豪勇, 赵春红, 王志恒, 谢浩, 赵一, 梁永平 (4874)

华北平原典型城市(石家庄)地下水重金属污染源解析与健康风险评价 ..... 陈慧, 赵鑫宇, 常帅, 宋圆梦, 赵波, 卢梦淇, 赵鑫宇, 陈慧, 陈昊达, 高赛, 王琳静, 崔建升, 张璐璐 (4884)

湖南东江湖表层沉积物重金属的空间分布、形态及生态风险 ..... 张同亮, 衣丽霞, 黎常成, 袁首枢, 豆奕轩, 田胜艳, 林尚璇 (4896)

太湖水华前表层水 CDOM 的光谱特征与来源解析 ..... 王永强, 卢少勇, 黄蔚, 韩镇阳, 国晓春 (4906)

白洋淀典型水域 COD 的组成及各组分贡献 ..... 李琦, 张超, 张文强, 温胜芳, 单保庆, 季恺悦 (4915)

白洋淀典型抗生素的源解析及其特定源风险评估 ..... 宋圆梦, 赵波, 卢梦淇, 赵鑫宇, 陈慧, 陈昊达, 高赛, 王琳静, 崔建升, 张璐璐 (4927)

雅鲁藏布江中游河流生态系统健康状态对水环境因子的响应 ..... 李晓东, 杨清, 刘惠秋, 巢欣, 杨胜烟, 巴桑 (4941)

鄱阳湖典型河湖交汇区浮游植物现状分析 ..... 于新平, 陈宇炜, 刘金福, 王俊颖, 徐光锋, 邹浩月, 陈楠, 夏雨 (4954)

不同臭臭程度下城市河道浮游植物群落结构、多样性和功能群 ..... 张琪琪, 曾劼, 尹卓, 冯杰, 刘静, 修宇鑫, 刘国, 许春阳 (4965)

反硝化脱氮对太湖蓝藻水华态势的影响 ..... 李昌杰, 许海, 詹旭, 张铮惠, 朱梦圆, 邹伟, 肖曼, 倪子怡, 朱慧 (4977)

密云水库入库河流微生物群落演替对氮素形态转化的影响 ..... 辛苑, 张耀方, 李添雨, 叶芝茵, 申佩弘, 魏源送, 高超龙, 宋舒兴, 张俊亚 (4985)

城市尾水氮代谢过程中芽孢杆菌对微藻作用机制 ..... 赵志瑞, 马超, 颜嘉晨, 李书缘, 李晴, 胡紫如, 呼庆, 刘硕, 万敬敏 (4996)

高效异养硝化-好氧反硝化菌 *Glutamicibacter* sp. WS1 低温下对多种氮源的脱氮特性及氮代谢机制 ..... 魏渤惠, 罗晓, 吕鹏翼, 马文凯, 苏金卫, 李伟, 崔建升 (5006)

大环内酯类抗生素在饮用水处理过程中的污染特征及其氯化反应机制 ..... 岑霞, 程思宇, 石宗民, 谢卓鸿, 张凌菱, 杨滨, 应光国 (5017)

不同堆肥工艺处理的城市污水污泥对滨海湿地土壤中养分释放特征和潜力的影响 ..... 贾培寅, 王馨, 花玉婷, 姜志翔 (5025)

淮河流域安徽段水体和沉积物微塑料赋存特征及风险评估 ..... 张海强, 高良敏, 葛娟, 赵兴兰, 张振, 慕明, 邱宇辉 (5036)

黄河三角洲湿地表层沉积物中微塑料的分布、来源和风险评估 ..... 耿娜, 赵广明, 张大海, 袁红明, 李先国 (5046)

固原市农田土壤微塑料的分布特征及风险评估 ..... 马贵, 丁家富, 周悦, 周炎炎, 廖影云, 海金涛, 王欢 (5055)

鄱阳湖湿地淹水与非淹水状态下微塑料表面细菌群落分布特征 ..... 赵俊凯, 陈旭, 胡婷婷, 廖轶颖, 邹龙, 简敏菲, 刘淑丽 (5063)

聚苯乙烯微塑料对铜绿假单胞菌生物膜形成和结构变化的影响 ..... 陶辉, 于多, 杨兰, 陈泽扬, 周灵沁, 罗雲鑫 (5071)

聚苯乙烯微塑料对小白菜生长、生理生化及冠层温度特性的影响 ..... 郭冰林, 丰晨晨, 陈悦, 林迪, 李岚涛 (5080)

聚乙烯与磺胺二甲嘧啶复合胁迫对大豆种子萌发及幼苗生长生理特征的影响 ..... 赵肖琼, 张恒慧, 赵润柱, 张新梅 (5092)

离子类型、强度和铁氧化物影响下微塑料的迁移行为及模型计算 ..... 张然, 于可飞, 黄磊, 陈雅丽, 马杰, 徐莉萍, 李永涛 (5102)

土地利用和气候变化对农牧交错带生态系统服务的影响 ..... 徐文彬, 饶良懿 (5114)

有机碳流失对土壤侵蚀的响应及其驱动因素: 基于 Meta 分析 ..... 刘小岚, 黄金权, 齐瑜洁, 李威闻, 刘纪根, 陈燕飞, 高绣纺 (5125)

平衡施肥与秸秆覆盖对紫色土坡耕地养分及其化学计量的影响 ..... 张高宁, 徐绮雯, 何丙辉, 李天阳, 冯梦蝶, 梁珂 (5135)

稀土-重金属共污染土壤中真菌群落结构特征及主导影响因素 ..... 罗颖, 李敬伟, 袁浩, 包智华 (5145)

周年轮作休耕对土壤 AMF 群落和团聚体稳定性的影响 ..... 鲁泽让, 夏梓泰, 芦美, 赵吉霞, 李永梅, 王自林, 范茂攀 (5154)

华北平原典型城市土壤微生物群落时空变化规律及其驱动因子 ..... 赵鑫宇, 陈慧, 常帅, 宋圆梦, 赵波, 卢梦淇, 崔建升, 张璐璐 (5164)

高量秸秆还田配施芽孢杆菌对沙化土壤细菌群落及肥力的影响 ..... 聂扬眉, 步连燕, 陈文峰, 安德荣, 韦革宏, 王红雷 (5176)

基于大田试验的铅镉复合污染土壤中甜糯玉米低积累特性 ..... 唐乐斌, 李龙, 宋波, 董心月, 韦美溜 (5186)

不同阻控措施对生菜中镉铅累积及品质的影响 ..... 周洪印, 李嘉琦, 包立, 夏运生, 王晟, 吴龙华, 张乃明 (5196)

纳米氧化铜对镉胁迫下小油菜生理生化和重金属累积的影响 ..... 王诗琪, 孙约兵, 黄青青, 徐应明, 董如茵, 孟庆尧 (5204)

不同污染区巨菌草生物炭内源污染物分布及其生物毒性 ..... 刘莉雅, 崔红标, 刘笑生, 张雪, 董婷婷, 章腾, 周静 (5214)

CuFeO<sub>2</sub> 改性生物炭对四环素的吸附特性 ..... 刘国成, 张新旺, 信帅帅, 王倩文, 阎清华, 周成智, 辛言君 (5222)

基于 Meta 分析的全氟化合物对鱼类生态毒性效应 ..... 陆宏, 周锦阳, 杨帆, 王蓓莉, 程治文, 申哲民, 袁涛 (5231)

基于 PMF 模型的县域尺度土壤重金属来源分析及风险评估 ..... 郑永立, 温汉辉, 蔡立梅, 罗杰, 汤端阳, 武妙, 李慧, 李鼎 (5242)

基于 PMF-PCA/APCS 与 PERI 的菏泽油田牡丹种植区表层土壤重金属潜在来源识别及生态风险评估 ..... 赵庆令, 李清彩, 安茂国, 于林松, 万鑫, 曹付恒, 韩文撑, 陈娟, 王天鸽 (5253)

重庆市煤矸山周边农产品镉健康风险评价及土壤环境基准值推导 ..... 马杰, 余泽蕾, 王胜蓝, 邓力, 孙静, 刘萍, 徐敏 (5264)

安徽典型硫铁矿集中开采区土壤重金属污染特征及来源解析 ..... 贾晗, 刘军省, 王晓光, 鞠林雪, 何鑫, 周建伟, 张羲 (5275)

湘东北典型河源区土壤重金属分布特征、来源解析及潜在生态风险评估 ..... 杨振宇, 廖超林, 邹炎, 谢伍晋, 陈晓威, 张驭飞 (5288)

不同含量外源镉在土壤中的变化特征 ..... 周子阳, 庞瑞, 宋波 (5299)

CO<sub>2</sub> 泡沫混凝土碳封存潜力分析 ..... 张源, 他旭鹏, 覃述兵, 郝佑民 (5308)

综合环境社会经济指标的优先污染物筛选方法研究: 以电子废物拆解为例 ..... 陈源, 蔡震, 李金惠 (5316)

《环境科学》征订启事(4808) 《环境科学》征稿简则(4831) 信息(4842, 5124, 5153)

# 西安市城市降尘和土壤尘 $PM_{10}$ 和 $PM_{2.5}$ 中碳组分特征

沈利娟<sup>1,2</sup>, 王红磊<sup>2\*</sup>, 孙杰娟<sup>3</sup>, 刘诗云<sup>4</sup>, 刘焕武<sup>3</sup>, 赵天良<sup>2</sup>

(1. 无锡学院大气与遥感学院, 无锡 214105; 2. 南京信息工程大学中国气象局气溶胶-云-降水重点开放实验室, 南京 210044; 3. 西安市环境监测站, 西安 710119; 4. 中科三清科技有限公司, 北京 100193)

**摘要:** 为研究西安市城市降尘和土壤尘  $PM_{10}$  和  $PM_{2.5}$  中碳组分污染特征, 丰富大气降尘的成分谱库, 于2015年4~5月收集了西安市城区5个点位的城市降尘和周边16个点位的土壤尘样品, 通过ZDA-CY01颗粒物再悬浮采样器获得  $PM_{10}$  和  $PM_{2.5}$  的滤膜样品, 使用Model5L-NDIR型OC和EC分析仪测定了样品中的有机碳(OC)和元素碳(EC), 定量分析了西安市城市降尘和土壤尘  $PM_{10}$  和  $PM_{2.5}$  中碳组分特征及其主要来源。结果表明, 不同站点降尘  $PM_{10}$  和  $PM_{2.5}$  中OC的占比差异较大, 分别为6.0%~19.4%和7.6%~29.8%。不同站点降尘  $PM_{10}$  和  $PM_{2.5}$  中EC的占比较小, 在城市站点的占比分别为0.6%~2.2%和0.2%~3.6%, 而在多数外围土壤尘中几乎检测不到EC的存在。 $PM_{10}$  中含碳组分的占比为: 城市降尘 > 外部对照 > 河滩土 > 土壤尘,  $PM_{2.5}$  中含碳组分的占比为: 城市降尘 > 土壤尘 > 外部对照 > 河滩土。不同站点降尘含碳气溶胶均以OC为主, 在城市降尘中相对较低, 在  $PM_{10}$  和  $PM_{2.5}$  中OC占总碳(TC)的比值分别为85.2%~95.3%和87.9%~98.9%; 在土壤尘中OC的占比较高, 均超过99%。含碳物质主要集中在细颗粒物中。不同城市站点降尘中碳组分的分布具有一致性, 不同土壤尘中碳组分的差异较大。城市和土壤降尘中碳组分主要受生物质燃烧、燃煤、汽油车和柴油车尾气等污染源的影响,  $PM_{10}$  和  $PM_{2.5}$  中含碳气溶胶的来源贡献率存在差异。

**关键词:** 西安; 城市降尘; 土壤尘; 碳组分; 来源解析

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)09-4843-10 DOI: 10.13227/j.hjlx.202210051

## Pollution Characteristics of Carbonaceous Components in $PM_{10}$ and $PM_{2.5}$ of Road Dust Fall and Soil Dust in Xi'an

SHEN Li-juan<sup>1,2</sup>, WANG Hong-lei<sup>2\*</sup>, SUN Jie-juan<sup>3</sup>, LIU Shi-yun<sup>4</sup>, LIU Huan-wu<sup>3</sup>, ZHAO Tian-liang<sup>2</sup>

(1. School of Atmosphere and Remote Sensing, Wuxi University, Wuxi 214105, China; 2. Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 3. Xi'an Environmental Monitoring Station, Xi'an 710119, China; 4. Clear Science & Technology Co., Ltd., Beijing 100193, China)

**Abstract:** To investigate the pollution characteristics of carbonaceous components in  $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$  of road dust fall and soil dust in Xi'an and enrich their source profiles, samples from five sites of road dust fall and 16 sites of soil dust were collected in Xi'an from April to May 2015. The ZDA-CY01 particulate matter resuspension sampler was used to obtain  $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$  samples, and the Model5L-NDIR OC and EC analyzer were used to determine the concentrations of organic carbon (OC) and elemental carbon (EC) in  $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$ . The pollution and sources of carbonaceous aerosol in  $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$  were investigated by analyzing OC and EC characteristics, ratio, and the principal component analysis statistical model. The results showed that the proportions of OC in  $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$  at the various dust fall sites differed, ranging from 6.0% to 19.4% and 7.6% to 29.8%, respectively. The ratios of EC in  $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$  at the different dust fall sites were relatively small, accounting for 0.6%~2.2% and 0.2%~3.6% in urban sites, respectively; however, EC was almost undetectable in most peripheral soil dust. The proportions of carbonaceous components in  $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$  followed the order of urban road dust fall > external control dust > river beach soil dust > soil dust and urban road dust fall > soil dust > external control dust > river beach soil dust, respectively. OC dominated the carbonaceous aerosols at the different sites, which was relatively low in urban road dust fall. The OC to total carbon (TC) ratios in  $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$  at urban road dust fall were 85.2%~95.3% and 87.9%~98.9%, respectively. The OC to TC ratios in  $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$  of soil dust were relatively high, exceeding 99%. Carbonaceous components were primarily concentrated in fine particles. The pollution distribution of carbonaceous components in the urban road dust fall sites was consistent, whereas that in the different soil dust sites were quite different. The carbonaceous components in urban road dust fall and soil dust were primarily affected by pollutant source emissions such as biomass burning, coal burning, gasoline, and diesel vehicle exhaust. There were differences in the source contribution rates of carbonaceous aerosols in  $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$ .

**Key words:** Xi'an; urban road dust fall; soil dust; carbonaceous components; source apportionment

城市化的快速发展,使得工业源、交通源、建筑业和生活源等人为源高度集中,这导致城市地区大气颗粒物污染严重且组分复杂,可对环境空气质量、人体健康和城市生态系统造成较大危害<sup>[1~3]</sup>。大气降尘的粒径较大,往往不易被直接吸收,但是其可通过沉降过程降落到地表,其中有毒有害的物质可在植被、土壤和水体中沉积,并可通过食物链进行传递和累积,进而对生态环境和人体健康造成严

重危害<sup>[4,5]</sup>。目前,已针对大气降尘的时空分布特征、污染来源特征以及生态环境和人体健康风险评估等方面开展了大量的深入研究<sup>[5~12]</sup>。许妍等<sup>[8]</sup>研究了天津城市交通道路扬尘排放特征及空间分布,

收稿日期: 2022-10-07; 修订日期: 2022-11-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(41830965, 41805096); 无锡学院引进人才科研启动专项(2023-r035)

作者简介: 沈利娟(1987~),女,博士,讲师,主要研究方向为大气气溶胶来源特征, E-mail: shenlijuan\_428@163.com

\* 通信作者, E-mail: hongleiwang@nuist.edu.cn



南、西和北方位各采集 3 个,河滩样品 2 个,主导上风向样品 1 个,外部对照样品 1 个(表 1)。

城市扬尘采样点分布在未央区的经开区城市运动公园(运动公园)、莲湖区的高压开关厂站(开关厂)、长安区环保局(环保局)、灞桥区纺织城国控点(纺织城)和莲湖区与碑林区交界处的西安市环境监测超级站(超级站)(图 1),代表了城区主要

的工业、居民和商业等排放源(表 1)。在受体监测点周围(1 km 范围内)布设采样点,每个受体采样点四周采集 4~8 个样品,共采集 31 个样品。在样品采集时,选取周边没有或远离其他局部污染源的地方,用毛刷采集楼房、仓库等建筑物的窗台、储物架等平台上积累时间较长的降尘,采集量约 50~200 g,同时做好采样记录带回实验室。

表 1 采样点信息

Table 1 Information about the observation sites

| 采样类型  | 采样点  | 经度(E)/(°)       | 纬度(N)/(°)     | 类别          | 样品数/个 |
|-------|------|-----------------|---------------|-------------|-------|
| 土壤风沙尘 | 东    | 109.06 ~ 109.09 | 34.14 ~ 34.21 | 农田土         | 3     |
|       | 西    | 108.36 ~ 108.46 | 34.09 ~ 34.15 | 农田土         | 3     |
|       | 南    | 108.53 ~ 109.01 | 34.05 ~ 34.08 | 农田土         | 3     |
|       | 北    | 108.36 ~ 109.04 | 34.11 ~ 34.33 | 农田土         | 3     |
|       | 河滩   | 108.52 ~ 109.06 | 34.26 ~ 34.27 | 河滩土         | 2     |
|       | 主导风向 | 109.25          | 34.43         | 农田土         | 1     |
|       | 外部对照 | 109.05          | 34.42         | 农田土         | 1     |
| 城市扬尘  | 超级站  | 108.93          | 34.25         | 文教商业混合区     | 7     |
|       | 开关厂  | 108.89          | 34.27         | 工业和居民混合区    | 8     |
|       | 运动公园 | 108.95          | 34.35         | 商住混合区       | 4     |
|       | 纺织城  | 109.05          | 34.25         | 工业、交通和居民混合区 | 6     |
|       | 环保局  | 108.90          | 34.16         | 商住混合区       | 6     |

## 1.2 样品前处理

开放源样品的采集通常不能直接获取代表性的源构成物质,获得的样品均为全粒径。为了获得与环境空气中颗粒物粒度相匹配的真实的源样品,对采集的源样品需进一步处理。首先将采集到的源样品置于实验室自然阴干,而后采用 150 目标准尼龙筛进行筛分处理,再用再悬浮采样器进行特定动力学粒径的样品采集。

## 1.3 滤膜样品制备

为了获得与环境空气中颗粒物粒径相匹配的真实的源样品,本研究采用 ZDA-CY01 颗粒物再悬浮采样器模拟污染源颗粒物样品进入环境中的过程,完成对开放源  $PM_{10}$  和  $PM_{2.5}$  等不同粒径颗粒物滤膜样品的制备。

颗粒物再悬浮采样器(ZDA-CY01)由西安市环境监测站联合陕西正大环保科技有限公司与西安建筑科技大学共同研制。ZDA-ZXF-01 型颗粒物再悬浮采样器主要由控制系统、送样系统、再悬浮舱、空气过滤系统、切割器、气路控制系统以及外部连接部件组成。其中,送样系统将干燥、筛分好的颗粒物送进悬浮舱,利用颗粒物悬浮空气动力学原理模拟再悬浮环境。悬浮舱是颗粒物进入大气环境中再悬浮的密封箱体,通过 4 个均匀分布的开口向悬浮舱提供洁净空气,切割器由不同切割头完成对  $PM_{10}$  和  $PM_{2.5}$  的分粒径采样,气路控制系统是再悬浮的动力来源,通过可控元件,提供满足切割器采样要求的

实验环境。

## 1.4 滤膜称重

$PM_{2.5}$  与  $PM_{10}$  的颗粒物滤膜整个过程要进行两次称重,分别是采样前初重(M1)和采样后滤膜重量(M2),称重使用仪器精度为十万分之一( $10 \mu\text{g}$ )的电子天平(Mettler Toledo XA105,瑞士)。样品称量前膜盒进行超声波振荡清洗,滤膜进行热处理,用铝膜包裹在  $900^\circ\text{C}$  条件下于马弗炉(D64,天津继红五金机电厂)中烘烤 2 h 以去除膜上的原有碳成分。滤膜装盒编号后需在恒温( $25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ )和恒湿( $40\% \pm 5\%$ )条件下平衡 24 h,才能进行称量。称量后滤膜应放置在  $4^\circ\text{C}$  的冰箱中保存待用。

## 1.5 碳组分样品分析

碳组分分析使用 Model5L-NDIR 型 OC 和 EC 分析仪(Sunset Laboratory Inc),采用热光透射法,该仪器遵循 NIOSH870 温度协议,OC 和 EC 的最低检出限为  $0.05 \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ ,详细原理介绍参见文献[31, 32]。由于 OC 在碳化过程中会形成裂解碳(optical pyrolyzed carbon, OPC),根据 IMPROVE 分析协议将 OC 定义为:  $\text{OC} = \text{OC1} + \text{OC2} + \text{OC3} + \text{OC4} + \text{OPC}$ ,将 EC 定义成:  $\text{EC} = \text{EC1} + \text{EC2} + \text{EC3} + \text{EC4} + \text{EC5} + \text{EC6} - \text{OPC}$ 。

## 1.6 质量控制

为确保数据的准确性,整个实验过程中必须要进行规范化实施,称重期间和采样时操作必须携带口罩和丁腈橡胶手套,保证过程无携带污染。称量过

程中每张滤膜须进行多次称量取平均值,保证误差值小于 $\pm 40 \mu\text{g}$ . 开放源样品制备过程质控:源样品在阴干和过筛过程中,保持样品的自然粒度. 为避免新的污染物引入对样品造成成分分析影响,粉末样品过筛时使用尼龙筛. 每一类样品过筛完成后,用毛刷和吸尘器将筛子吹扫干净,再用超纯水充分冲洗晾干后,再进行下一个样品的筛分处理. 每采一组样品后,对采样切割头和滤膜托进行清洗,以避免样品在各部件中的残留及相互污染,保证切割粒径的准确性和样品的代表性. 每次再悬浮采样后,使用超纯水对混合箱进行清洗和擦拭,使残留悬浮颗粒快速沉降,而后启动通气设备净化箱内空气. 便携式稀释通道仪采样和 OC 和 EC 样品分析质控措施参见文献[33].

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同降尘和土壤尘中碳组分的含量水平

由图 2 可知不同站点降尘  $\text{PM}_{10}$  和  $\text{PM}_{2.5}$  中 OC

的占比(质量分数)差异较大,分别为 6.0%~19.4% 和 7.6%~29.8%. 运动公园站采集的降尘中 OC 占比最高,运动公园为商住混合区,公园内和周边无明显污染源,东面约 400 m 为未央路,正北方向 5 km 有西安城北供热公司,西北 10 km 有大唐渭河发电厂. 在采样期间,西安市盛行偏北风,因此运动公园主要受到交通源和电厂燃煤锅炉源的影响. 李超等<sup>[34]</sup>研究表明在工业锅炉排放的  $\text{PM}_{2.5}$  中,含碳组分含量较高,OC 和 EC 的占比分别为 3.7%~21.4% 和 4.2%~24.6%. 马召辉等<sup>[35]</sup>在北京市 11 类排放源中发现流动排放源  $\text{PM}_{2.5}$  中 OC 和 EC 比例最高,在柴油车排放汽车尾气中的占比可达 40%~46%;道路扬尘中 OC 的占比也较高,可达 7.0%~11.4%. 唐孝炎<sup>[36]</sup>研究也表明,OC 是扬尘  $\text{PM}_{2.5}$  的主要组分,可占  $\text{PM}_{2.5}$  的 18.4%. 城市东部采集的土壤尘中 OC 占比最低,由图 1 可知东部 3 个站点位于灞桥区东侧,与临潼区和蓝田县交界附近,其东面多为郊区农田,靠近秦岭山脉东部,受城市影响较小.

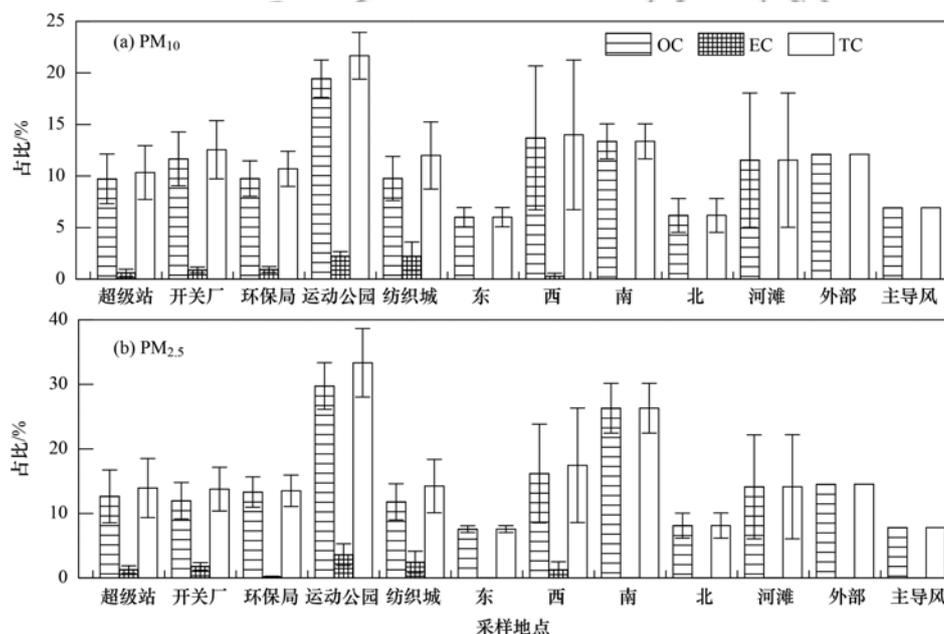


图 2 不同站点  $\text{PM}_{10}$  和  $\text{PM}_{2.5}$  中含碳气溶胶的占比

Fig. 2 Proportions of carbonaceous aerosols in  $\text{PM}_{10}$  and  $\text{PM}_{2.5}$  from different sites

在其余城市站点中  $\text{PM}_{10}$  和  $\text{PM}_{2.5}$  中 OC 的占比差异较小,分别为 9.7%~11.8% 和 11.8%~13.3%. 由表 1 可知开关厂和纺织城站点均为工业和居民混合区,但是 OC 的含量要低于运动公园. 这主要是由于工业类型差异造成,高压开关厂和纺织城的工业类型不涉及燃煤锅炉,因此排放的污染物中含碳气溶胶较低.

在外围土壤尘站点,北部点位  $\text{PM}_{10}$  和  $\text{PM}_{2.5}$  中 OC 的占比分别为 6.2% 和 8.1%, 与东部点位结果类似. 由图 1 可知北部点位位于城市上风向,受城

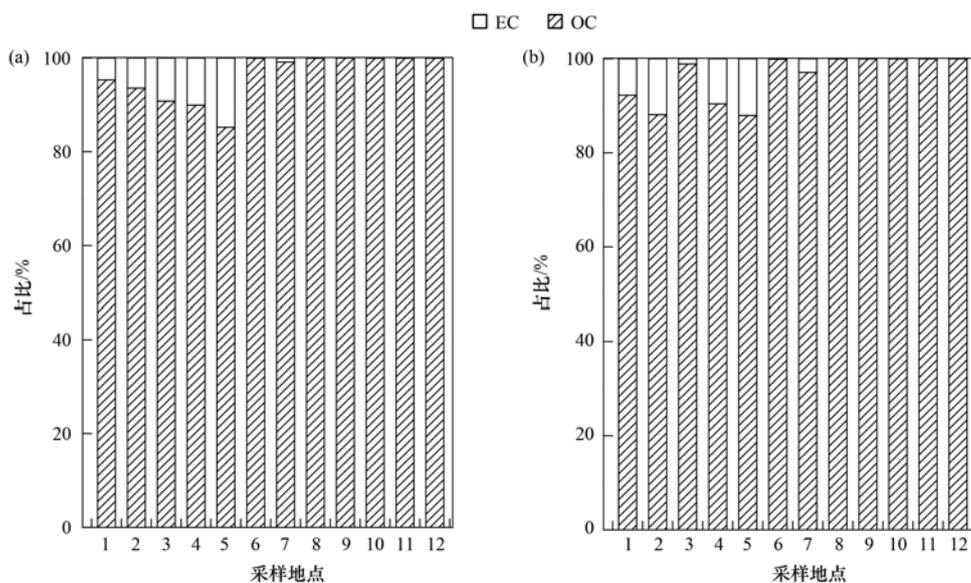
市影响较小,且与东部点位距离较近,因此两者 OC 含量类似. 南部点位和西部地位  $\text{PM}_{10}$  和  $\text{PM}_{2.5}$  中 OC 的占比较高,受到城市的影响较大. 位于城市下方向的南部点位中 OC 在  $\text{PM}_{2.5}$  中的占比高达 26.3%, 这也表明城市细粒子对下风向降尘的影响较大. 河滩点位  $\text{PM}_{10}$  和  $\text{PM}_{2.5}$  中 OC 的占比分别为 11.5% 和 14.1%, 远高于东部和北部点位. 这有可能是受到下垫面的影响,河滩土与农田存在较大差异,农田每年种植农作物,需要对土壤进行翻种,表层土与深层土混合,而河滩土不存在翻

种,因此降尘可以在河滩土表面累积.在主导风向  $PM_{10}$  和  $PM_{2.5}$  中 OC 的占比分别为 6.9% 和 7.8%,与北部点位类似.值得注意的是在外部对照点  $PM_{10}$  和  $PM_{2.5}$  中 OC 的占比较高,分别为 12.1% 和 14.5%.外部对照点虽然距离西安较远,但是靠近铜川市,相距 22 km,其西部 9 km 为延西高速和包茂高速,东部 11 km 为京昆高速,西侧 2 km 为 G210 国道,因此该点位受到交通源和外来输送的影响较大.

由图 2 可知不同站点降尘  $PM_{10}$  和  $PM_{2.5}$  中 EC 的占比较小,在城市站点的占比分别为 0.6% ~ 2.2% 和 0.2% ~ 3.6%,而在多数外围土壤尘中几乎检测不到 EC 的存在. EC 主要来自含碳物质的不完全燃烧过程<sup>[14]</sup>,在城市地区主要来自交通源、工业源和生活源等排放<sup>[14,15]</sup>,因此在城市降尘中可观测到相对较高比例的 EC.在外围土壤尘中,由于受到城市影响较小,EC 的含量较低.

由图 2 可知在所有采样站点中 OC 和 EC 在  $PM_{2.5}$  的占比要高于在  $PM_{10}$  中占比,这说明含碳物质主要集中在细颗粒物中.尤其 EC,在  $PM_{2.5}$  中的占比更高,在某些点位 EC 在  $PM_{2.5}$  中占比是在  $PM_{10}$  中占比的 2 倍以上.而 OC 在  $PM_{2.5}$  占比与在  $PM_{10}$  中占比相比均未超过 2 倍.这说明,EC 相比 OC 更加集中在细颗粒物中.

由图 3 可知不同站点降尘含碳气溶胶均以 OC 为主,在城市降尘中相对较低,在  $PM_{10}$  和  $PM_{2.5}$  中 OC 占总碳 (TC) 的比值分别为 85.2% ~ 95.3% 和 87.9% ~ 98.9%; 在土壤尘中的占比较高,均超过 99%.不同城市站点由于排放源的差异,TC 中 OC 和 EC 的占比差异较大.含碳气溶胶中 EC 在运动公园和纺织城点位的占比较高,在超级站点位较低.在环保局点位  $PM_{2.5}$  中含碳气溶胶中 EC 的占比较低,仅为 1.1%.在土壤尘中西部点位  $PM_{2.5}$  中 EC 占 TC 的比例较高,可达 2.9%.



(a)  $PM_{10}$ , (b)  $PM_{2.5}$ ; 1. 超级站, 2. 开关厂, 3. 环保局, 4. 运动公园, 5. 纺织城, 6. 东, 7. 西, 8. 南, 9. 北, 10. 河滩, 11. 外部对照, 12. 主导风向

图 3 不同站点  $PM_{10}$  和  $PM_{2.5}$  中 OC 和 EC 占总碳的比例

Fig. 3 Mass fractions of OC and EC in total carbon of  $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$  from different sites

## 2.2 不同降尘中碳组分的分布因子

图 4 给出了不同扬尘源  $PM_{10}$  颗粒物中的含碳气溶胶详细的排放特征.从中可知 5 个城市点位扬尘  $PM_{10}$  中含碳气溶胶组成类似. OC4 的占比最高,为 31.6% ~ 35.4%,不同点位的差异较小.其次是 OC2,占比为 17.9% ~ 20.7%. OC3 和 OC1 的占比类似,分别为 14.1% ~ 14.9% 和 9.7% ~ 13.6%. EC 组分中 EC2 的占比最高,为 5.7% ~ 10.7%; 其次是 EC1 和 EC3,占比分别为 4.5% ~ 7.6% 和 2.2% ~ 4.2%; 其余 EC 组分的占比较低.在城市站点,含碳气溶胶主要来自人为源的影响,例如交通尾气、烹

饪源和工业源等,因此不同站点扬尘中碳组分的分布具有一致性.

由图 4 可知土壤尘  $PM_{10}$  中碳组分的差异较大.在东部点位为:  $OC3 > OC4 > OC1 > OC2$ ,在西部点位为:  $OC4 > OC2 > OC1 > OC3$ ,在南部点位为:  $OC4 > OC1 > OC2 > OC3$ ,在北部点位为:  $OC4 > OC3 > OC2 > OC1$ ,在河滩点位为:  $OC3 > OC2 > OC1 > OC4$ ,在外部对照点位为:  $OC4 > OC3 > OC1 > OC2$ ,在主导风向点位为:  $OC2 > OC4 > OC1 > OC3$ . EC 组分中 EC1 和 EC6 的占比较高,在西部点位、主导风向点位和河滩点位 EC1 的占比较高,在东部点位、南部点位和河滩点位

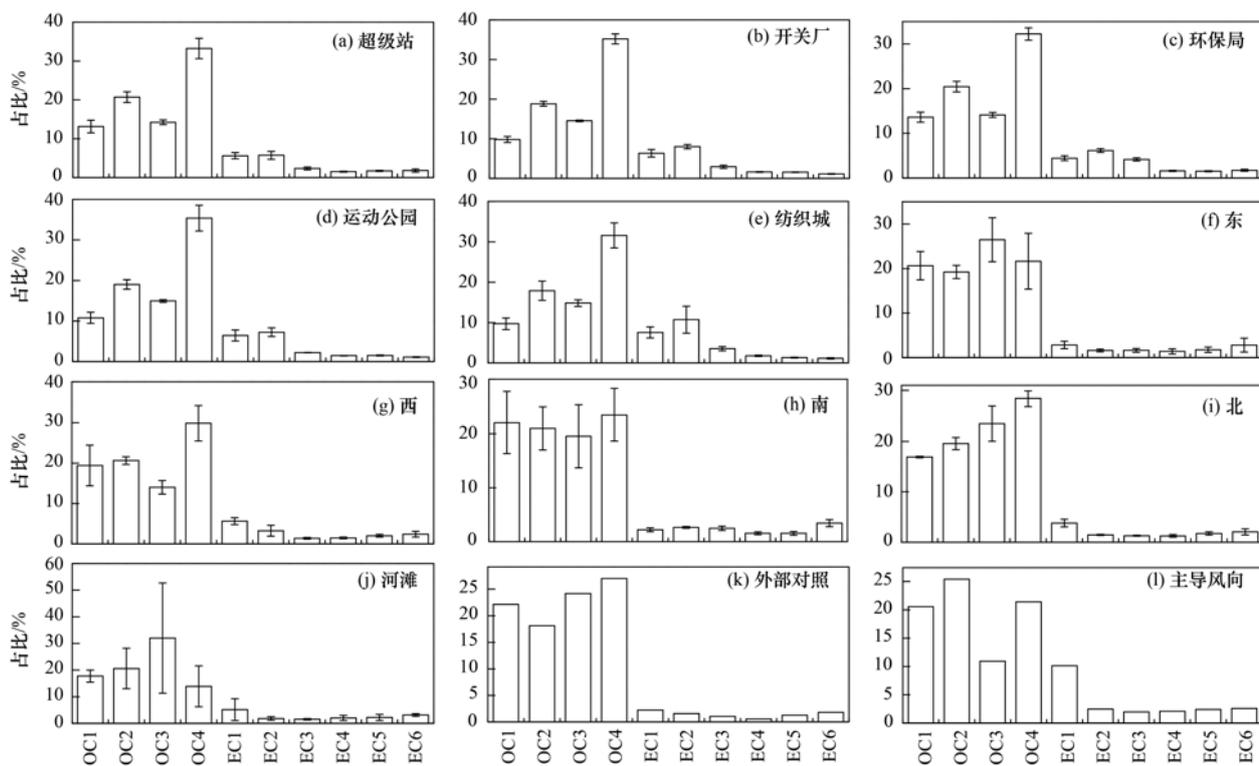


图 4 不同站点  $PM_{10}$  碳气溶胶排放特征

Fig. 4 Ingredient composition profiles of carbonaceous aerosols in  $PM_{10}$  from different sites

EC6 占比较高. 总体来看, 河滩土和主导风向站点碳组分分布与其他土壤尘相比差异较大. 土壤尘中碳组分的差异与站点的地理位置和下垫面类型有关, 受城

市影响大的地区碳组分分布与城市点位类似, 具体原因已在上文分析, 在此不再赘述.

图 5 给出了不同扬尘源  $PM_{2.5}$  颗粒物中的含碳

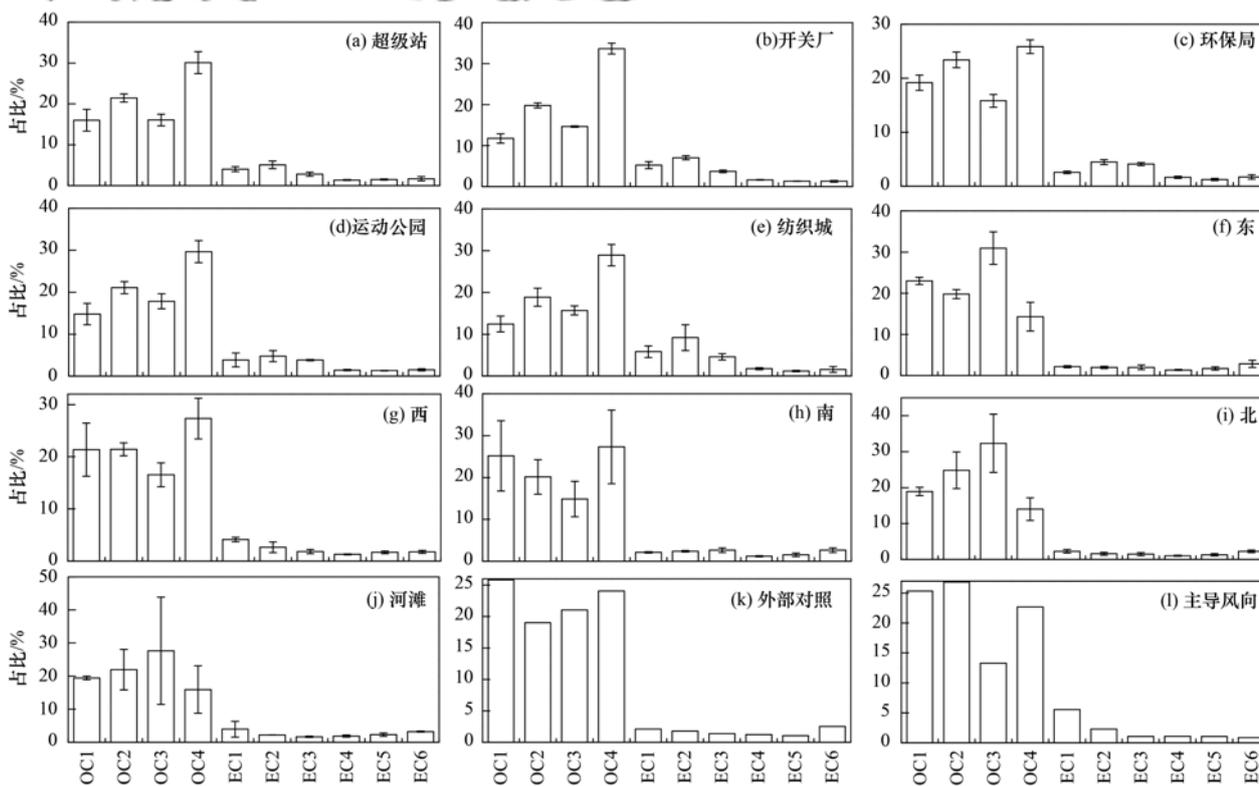


图 5 不同站点  $PM_{2.5}$  碳气溶胶排放特征

Fig. 5 Ingredient composition profiles of carbonaceous aerosols in  $PM_{2.5}$  from different sites

气溶胶详细的排放特征. 从中可知, 不同扬尘源在  $PM_{2.5}$  中的碳组分分布与在  $PM_{10}$  中的分布类似. 城市站点中 OC4 占比较高, 为 25.9%~33.7%. 其次是 OC2, 占比为 18.9%~23.4%; OC3 和 OC1 的占比类似, 分别为 14.6%~17.8% 和 11.8%~19.2%. EC 组分中 EC2 的占比最高, 为 4.5%~9.2%; 其次是 EC1 和 EC3, 占比分别为 2.6%~5.8% 和 2.8%~4.6%; 其余 EC 组分的占比较低.

由图 5 可知土壤尘  $PM_{2.5}$  中碳组分的差异较大, 与  $PM_{10}$  中类似. 在东部点位为: OC3 > OC1 > OC2 > OC4, 在西部点位为: OC4 > OC2 > OC1 > OC3, 在南部点位为: OC4 > OC1 > OC2 > OC3, 在北部点位为: OC4 > OC3 > OC2 > OC1, 在河滩点位为: OC3 > OC2 > OC1 > OC4, 在外部对照点位为: OC1 > OC4 > OC3 > OC2, 在主导风向点位为: OC2 > OC1 > OC4 > OC3. EC 组分中 EC1 和 EC6 占比较高.

总体来看城市扬尘  $PM_{10}$  和  $PM_{2.5}$  中 OC4、OC2、OC3、OC1 和 EC2 的占比较高, 而在土壤尘  $PM_{10}$  和  $PM_{2.5}$  中 OC4、OC3、OC2、OC1、EC1 和 EC6 的占比较高. 不同站点碳组分的详细组成存在明显差异, 可通过含碳气溶胶的排放特征数据, 对不同扬尘类型进行精细溯源.

### 2.3 降尘中含碳组分来源解析

OC/EC 可以用来分析颗粒物的二次来源. 当 OC/EC 大于 2 时, 表明有二次有机碳存在<sup>[37]</sup>. 由于土壤尘中 EC 的含量非常低, 因此仅计算了城市点位的 OC/EC. 由图 6 可知城市点位降尘  $PM_{10}$  和  $PM_{2.5}$  中 OC/EC 均大于 2, 分别为 9.2~33.0 和 10.1~52.2, 说明在城市降尘中含碳组分中二次来源的贡献较高. OC/EC 还可以用来判断含碳气溶胶的来源. 不同站点 OC/EC 存在显著差异.  $PM_{10}$  中 OC/EC

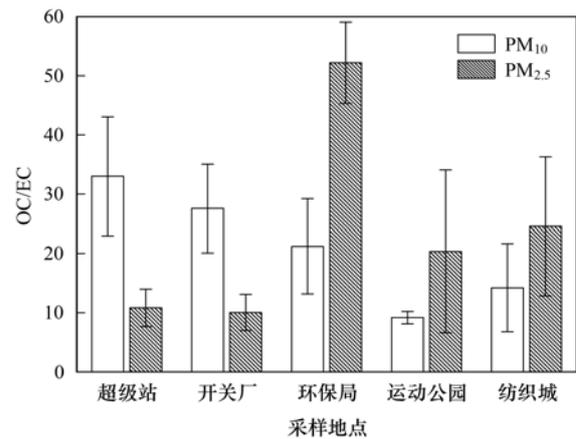


图 6 不同城市点位降尘  $PM_{10}$  和  $PM_{2.5}$  中 OC/EC 值

Fig. 6 OC/EC in  $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$  from different urban road dust fall sites

在超级站最高, 在运动公园最低;  $PM_{2.5}$  中 OC/EC 在环保局最高, 开关厂最低.

有研究表明, OC1 主要来源于生物质燃烧, OC3 和 OC4 是道路扬尘中丰富的碳组分<sup>[38]</sup>; OPC 是大气中水溶性极性化合物的主要成分<sup>[39]</sup>; OC2 是燃煤源中丰富的碳组分, EC1 和 EC2 是汽油车尾气中丰富的碳组分, OC1、OC4、EC2、EC3、EC4、EC5 和 EC6 主要来源于柴油车尾气<sup>[13,33,40]</sup>. 此外, OC1、OC2、EC3 和 EC5 还来自局部的燃烧源排放<sup>[33,42]</sup>. 因此, 根据降尘  $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  中 11 种碳组分的含量可以定性判断其主要来源.

因子分析是根据变量之间的相关性强弱提取公因子, 正交反差最大旋转使每一个主因子只与最少数量的变量有相关关系, 而使足够多的因子负荷均很小, 以便对因子的意义做出更合理的解释<sup>[43]</sup>. 运用 SPSS 16.0 软件对碳组分质量浓度数据进行最大方差旋转因子分析, 为解析组分来源提供依据, 结果见表 2.

表 2  $PM_{10}$  和  $PM_{2.5}$  中含碳组分因子分析结果

Table 2 Factor analysis results based on different carbonaceous fractions in  $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$

| 项目    | $PM_{10}$      |      |               |      | $PM_{2.5}$     |      |               |      |
|-------|----------------|------|---------------|------|----------------|------|---------------|------|
|       | 城市降尘(KMO=0.85) |      | 土壤尘(KMO=0.68) |      | 城市降尘(KMO=0.83) |      | 土壤尘(KMO=0.72) |      |
|       | 因子1            | 因子2  | 因子1           | 因子2  | 因子1            | 因子2  | 因子1           | 因子2  |
| OC1   | 0.9            | 0.2  | 0.7           | 0.4  | 0.9            | 0.2  | 0.9           | 0.1  |
| OC2   | 0.9            | 0.3  | 0.7           | 0.7  | 0.9            | 0.3  | 0.8           | 0.6  |
| OC3   | 0.8            | 0.5  | 0.1           | 0.9  | 0.9            | 0.4  | 0.2           | 0.9  |
| OC4   | 0.8            | 0.4  | 0.4           | 0.9  | 0.8            | 0.5  | 0.3           | 0.9  |
| OPC   | 0.6            | 0.6  | 0.8           | 0.6  | 0.4            | 0.7  | 0.8           | 0.4  |
| EC1   | 0.4            | 0.8  | 0.7           | 0.6  | 0.3            | 0.9  | 0.6           | 0.7  |
| EC2   | 0.1            | 0.9  | 0.4           | 0.9  | 0.1            | 0.9  | 0.3           | 0.9  |
| EC3   | 0.4            | 0.7  | 0.5           | 0.8  | 0.6            | 0.7  | 0.4           | 0.9  |
| EC4   | 0.7            | 0.7  | 0.9           | 0.36 | 0.8            | 0.6  | 0.75          | 0.6  |
| EC5   | 0.8            | 0.54 | 0.9           | 0.2  | 0.8            | 0.5  | 0.9           | 0.3  |
| EC6   | 0.9            | 0.2  | 0.9           | 0.2  | 0.9            | 0.2  | 0.9           | 0.2  |
| 解释率/% | 78.1           | 9.8  | 74.4          | 12.8 | 76.4           | 11.0 | 73.8          | 14.5 |

由表2所示,城市降尘和土壤尘  $PM_{10}$  和  $PM_{2.5}$  中碳组分均提取了2个因子作为有效主因子, KMO (Kaiser-Meyer-Olkin) 的值为 0.7~0.9, 表明主成分分析结果可信. 前2种主因子因子载荷的累积方差贡献率为 87.2%~88.3%, 能够反映主要的污染源信息.

$PM_{10}$  城市降尘中, 因子1的载荷贡献率达到 78.1%, OC1、OC2、OC3、OC4、EC4、EC5 和 EC6 贡献较大, 主要是生物质燃烧、道路扬尘、燃煤和柴油车尾气的贡献. 因子2的载荷贡献率仅为 9.8%, EC1 和 EC2 的贡献比例最大, 其次是 OPC、EC3 和 EC4, 主要是汽油车尾气排放的贡献.  $PM_{10}$  土壤尘中, 因子1的载荷贡献率达到 74.4%, OC1、OC2、OPC、EC1、EC4、EC5 和 EC6 贡献较大, 主要是生物质燃烧、燃煤、汽油车和柴油车尾气排放的贡献. 因子2的载荷贡献率为 12.8%, OC2、OC3、OC4、EC1、EC2 和 EC3 的贡献较大, 主要是燃煤、道路扬尘、局部的燃烧源和汽油车尾气排放的贡献.

$PM_{2.5}$  城市降尘中, 因子1的载荷贡献率为 76.4%, 与  $PM_{10}$  中类似, OC1、OC2、OC3、OC4、EC4、EC5 和 EC6 贡献较大, 主要是生物质燃烧、道路扬尘、燃煤和柴油车尾气的贡献. 因子2的载荷贡献率为 11.0%, EC1 和 EC2 的贡献最大, 其次是 OPC、EC3 和 EC4, 主要是汽油车尾气排放的贡献.  $PM_{2.5}$  土壤尘中, 因子1的载荷贡献率为 73.8%, OC1、OC2、OPC、EC1、EC4、EC5 和 EC6 贡献较大, 主要是生物质燃烧、燃煤、汽油车和柴油车尾气排放的贡献. 因子2的载荷贡献率为 14.5%, OC2、OC3、OC4、EC1、EC2 和 EC3 的贡献较大, 主要是燃煤、道路扬尘、局部的燃烧源和汽油车尾气排放的贡献. 在  $PM_{2.5}$  中因子1的载荷贡献率稍低于  $PM_{10}$  中, 而因子2的载荷贡献率高于  $PM_{10}$  中. 西安市城市和土壤降尘中碳组分主要受生物质燃烧、燃煤、汽油车和柴油车尾气等污染源的影响,  $PM_{10}$  和  $PM_{2.5}$  中含碳气溶胶的来源贡献率存在差异.

### 3 结论

(1) 不同站点降尘  $PM_{10}$  和  $PM_{2.5}$  中 OC 的占比差异较大, 分别为 6.0%~19.4% 和 7.6%~29.8%. 不同站点降尘  $PM_{10}$  和  $PM_{2.5}$  中 EC 的占比较小, 在城市站点的占比分别为 0.6%~2.2% 和 0.2%~3.6%, 而在多数外围土壤尘中几乎检测不到 EC 的存在.  $PM_{10}$  中含碳组分的占比为: 城市降尘 > 外部对照 > 河滩土 > 土壤尘,  $PM_{2.5}$  中含碳组分的占比为: 城市降尘 > 土壤尘 > 外部对照 > 河滩土.

(2) 不同站点降尘含碳气溶胶均以 OC 为主, 在城市降尘中相对较低, 在  $PM_{10}$  和  $PM_{2.5}$  中 OC 占总碳 (TC) 的比值分别为 85.2%~95.3% 和 87.9%~98.9%; 在土壤尘中的占比较高, 均超过 99%. 降尘中 OC 和 EC 在  $PM_{2.5}$  的占比要高于在  $PM_{10}$  中占比, 含碳物质主要集中在细颗粒物中. 不同城市站点降尘中碳组分的分布具有一致性, 不同土壤尘中碳组分的差异较大.

(3) 城市点位降尘  $PM_{10}$  和  $PM_{2.5}$  中 OC/EC 均大于 2, 分别为 9.2~33.0 和 10.1~52.2, 说明在城市降尘含碳组分中二次来源的贡献较高. 城市和土壤降尘中碳组分主要受生物质燃烧、燃煤、汽油车和柴油车尾气等污染源的影响,  $PM_{10}$  和  $PM_{2.5}$  中含碳气溶胶的来源贡献率存在差异.

### 参考文献:

- [1] Zhuang X L, Wang Y S, He H, *et al.* Haze insights and mitigation in China: an overview [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2014, **26**(1): 2-12.
- [2] 李越洋, 姬亚芹, 王士宝, 等. 天津市春季道路降尘  $PM_{2.5}$  中重金属污染特征及健康风险评估 [J]. *环境科学研究*, 2018, **31**(5): 853-859.  
Li Y Y, Ji Y Q, Wang S B, *et al.* Pollution characteristics and health risk assessment of  $PM_{2.5}$ -bound heavy metals in road dust deposition during spring in Tianjin city [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2018, **31**(5): 853-859.
- [3] An Z S, Huang R J, Zhang R Y, *et al.* Severe haze in northern China: a synergy of anthropogenic emissions and atmospheric processes [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, **116**(18): 8657-8666.
- [4] Hou S N, Zheng N, Tang L, *et al.* Pollution characteristics, sources, and health risk assessment of human exposure to Cu, Zn, Cd and Pb pollution in urban street dust across China between 2009 and 2018 [J]. *Environment International*, 2019, **128**: 430-437.
- [5] Farmer A M. The effects of dust on vegetation—a review [J]. *Environmental Pollution*, 1993, **79**(1): 63-75.
- [6] 赵静琦, 姬亚芹, 李越洋, 等. 天津市道路车流量特征分析 [J]. *环境科学研究*, 2019, **32**(3): 399-405.  
Zhao J Q, Ji Y Q, Li Y Y, *et al.* Distribution characteristics of traffic volume for typical roads in Tianjin city [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, **32**(3): 399-405.
- [7] Janhäll S. Review on urban vegetation and particle air pollution—Deposition and dispersion [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **105**: 130-137.
- [8] 许妍, 周启星. 天津城市交通道路扬尘排放特征及空间分布研究 [J]. *中国环境科学*, 2012, **32**(12): 2168-2173.  
Xu Y, Zhou Q X. Emission characteristics and spatial distribution of road fugitive dust in Tianjin, China [J]. *China Environmental Science*, 2012, **32**(12): 2168-2173.
- [9] 张忠诚, 谢宇琪, 张智杰, 等. 基于两种受体模型的太原市大气降尘来源解析及季节变化特征 [J]. *中国环境科学*, 2022, **42**(6): 2577-2586.  
Zhang Z C, Xie Y Q, Zhang Z J, *et al.* Source apportionment and seasonal variation characteristics of atmospheric dustfall in Taiyuan by two receptor models [J]. *China Environmental Science*, 2022, **42**(6): 2577-2586.

- [10] Khan R K, Strand M A. Road dust and its effect on human health: a literature review[J]. *Epidemiology and Health*, 2018, **40**, doi: 10.4178/epih.e2018013.
- [11] 赵静琦, 姬亚芹, 张蕾, 等. 基于样方法的天津市春季道路扬尘 PM<sub>2.5</sub> 中水溶性离子特征及来源解析[J]. *环境科学*, 2018, **39**(5): 1994-1999.
- Zhao J Q, Ji Y Q, Zhang L, *et al.* Characteristics and source apportionment of water-soluble inorganic ions in road dust PM<sub>2.5</sub> during spring in Tianjin using the quadrat sampling method[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(5): 1994-1999.
- [12] 李树立, 姬亚芹, 朱振宇, 等. 天津市秋季道路降尘粒度乘数的分布特征[J]. *环境化学*, 2017, **36**(3): 480-485.
- Li S L, Ji Y Q, Zhu Z Y, *et al.* Distribution of the particle size multiplier of road dust fall during autumn in Tianjin [J]. *Environmental Chemistry*, 2017, **36**(3): 480-485.
- [13] 张伟, 姬亚芹, 李树立, 等. 天津市春季道路降尘 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 中碳组分特征[J]. *环境科学研究*, 2018, **31**(2): 239-244.
- Zhang W, Ji Y Q, Li S L, *et al.* Characteristics of carbon fractions in PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> of road dust fall during spring in Tianjin City[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2018, **31**(2): 239-244.
- [14] 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.
- [15] Wu X F, Vu T V, Shi Z B, *et al.* Characterization and source apportionment of carbonaceous PM<sub>2.5</sub> particles in China-A review [J]. *Atmospheric Environment*, 2018, **189**: 187-212.
- [16] Mauderly J L, Chow J C. Health effects of organic aerosols[J]. *Inhalation Toxicology*, 2008, **20**(3): 257-288.
- [17] Tsigaridis K, Kanakidou M. The present and future of secondary organic aerosol direct forcing on climate [J]. *Current Climate Change Reports*, 2018, **4**(2): 84-98.
- [18] 霍婷婷, 董发勤, 刘孟清, 等. 不同粒径降尘重金属赋存与有机碳关联性分析[J]. *中国环境科学*, 2020, **40**(1): 52-62.
- Huo T T, Dong F Q, Liu M Q, *et al.* Correlation analysis between concentrations of heavy metal species and organic carbon in dustfall with different particle size[J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(1): 52-62.
- [19] 张静, 吴琳, 杨志文, 等. 典型道路路边空气颗粒物中碳组分的组成特征[J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(9): 2561-2566.
- Zhang J, Wu L, Yang Z W, *et al.* Characterization of carbonaceous in PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> at urban roadside environment [J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(9): 2561-2566.
- [20] 马妍, 姬亚芹, 国纪良, 等. 天津市春季样方法道路扬尘碳组分特征及来源分析[J]. *环境科学*, 2019, **40**(6): 2540-2545.
- Ma Y, Ji Y Q, Guo J L, *et al.* Characteristics and source apportionment of carbon components in road dust PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> during spring in Tianjin derived by using the quadrat sampling method [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(6): 2540-2545.
- [21] Chen Q C, Hua X Y, Li J W, *et al.* Diurnal evolutions and sources of water-soluble chromophoric aerosols over Xi'an during haze event, in Northwest China [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **786**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.147412.
- [22] 任鹏杰, 尉鹏, 赵森, 等. 偏东风输送导致的关中地区冬季 PM<sub>2.5</sub> 重污染个例研究[J]. *环境科学研究*, 2021, **34**(5): 1033-1043.
- Ren P J, Wei P, Zhao S, *et al.* A case study of PM<sub>2.5</sub> heavy pollution caused by easterly wind transport in Guanzhong area in winter[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2021, **34**(5): 1033-1043.
- [23] 尉鹏, 赵钰涵, 任鹏杰, 等. 关中地区 PM<sub>2.5</sub> 污染过程的主要参数特征和 EMD 统计分析[J]. *环境科学研究*, 2020, **33**(8): 1740-1748.
- Wei P, Zhao Y H, Ren P J, *et al.* Primary parameter characteristics of PM<sub>2.5</sub> pollution process and EMD analysis in Guanzhou area[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, **33**(8): 1740-1748.
- [24] Wu C, Liu L, Wang G H, *et al.* Important contribution of N<sub>2</sub>O<sub>5</sub> hydrolysis to the daytime nitrate in Xi'an, China during haze periods: isotopic analysis and WRF-Chem model simulation[J]. *Environmental Pollution*, 2021, **288**, doi: 10.1016/j.envpol.2021.117712.
- [25] 白杨, 杨剑, 陈鹏, 等. 基于空间插值的西安市重空气污染期间主要污染物时空变化特征及相关性分析[J]. *环境科学研究*, 2020, **33**(4): 809-819.
- Bai Y, Yang J, Chen P, *et al.* Spatiotemporal characteristics and relationships of main air-pollutants during a typical heavy air pollution in Xi'an city based on a spatial interpolation method [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, **33**(4): 809-819.
- [26] 陈前, 陈庆彩. 西安市大气棕碳污染特性及发色团种类[J]. *环境科学*, 2021, **42**(3): 1236-1244.
- Chen Q, Chen Q C. Pollution characteristics and chromophore types of brown carbon in Xi'an [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(3): 1236-1244.
- [27] 康宝荣, 刘立忠, 刘焕武, 等. 关中地区秋冬季颗粒物二次有机碳的估算[J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(9): 3663-3670.
- Kang B R, Liu L Z, Liu H W, *et al.* Estimation of secondary organic carbon in PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> in Guanzhong area in autumn and winter [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(9): 3663-3670.
- [28] 杨毅, 张亚楠, 刘焕武, 等. 西安市冬季 PM<sub>2.5</sub> 中 WSOC 的光谱特性和来源解析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(9): 3924-3931.
- Yang Y, Zhang Y N, Liu H W, *et al.* Spectral characteristics and source analysis of WSOC of PM<sub>2.5</sub> in winter of Xi'an [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(9): 3924-3931.
- [29] 牟臻, 陈庆彩, 王羽琴, 等. 西安市 PM<sub>2.5</sub> 中碳质气溶胶污染特征[J]. *环境科学*, 2019, **40**(4): 1529-1536.
- Mu Z, Chen Q C, Wang Y Q, *et al.* Characteristics of carbonaceous aerosol pollution in PM<sub>2.5</sub> in Xi'an [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(4): 1529-1536.
- [30] 杜川利, 余兴, 李星敏, 等. 西安郊区泾河秋、冬季大气黑碳变化及粒径特征[J]. *环境科学研究*, 2013, **26**(7): 712-720.
- Du C L, Yu X, Li X M, *et al.* Analysis of variation and particle size characteristics of black carbon at Jinghe, suburban of Xi'an in autumn and winter [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2013, **26**(7): 712-720.
- [31] 康宝荣, 刘立忠, 刘焕武, 等. 关中地区细颗粒物碳组分特征及来源解析[J]. *环境科学*, 2019, **40**(8): 3431-3437.
- Kang B R, Liu L Z, Liu H W, *et al.* Pollution characteristics and sources of carbonaceous components in PM<sub>2.5</sub> in the Guanzhong area [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(8):

- 3431-3437.
- [32] Bian Q J, Alharbi B, Shareef M M, *et al.* Sources of PM<sub>2.5</sub> carbonaceous aerosol in Riyadh, Saudi Arabia[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, **18**(6): 3969-3985.
- [33] 王红磊, 刘思晗, 孙杰娟, 等. 机动车源和民用燃料源颗粒物中有机碳和元素碳的排放特征[J]. *环境科学*, 2023, **44**(4): 1890-1898.  
Wang H L, Liu S H, Sun J J, *et al.* Emission characteristics of organic carbon and elemental carbon in PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> from vehicle exhaust and civil combustion fuels [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(4): 1890-1898.
- [34] 李超, 李兴华, 段雷, 等. 燃煤工业锅炉可吸入颗粒物的排放特征[J]. *环境科学*, 2009, **30**(3): 650-655.  
Li C, Li X H, Duan L, *et al.* Emission characteristics of PM<sub>10</sub> from coal-fired industrial boiler [J]. *Environmental Science*, 2009, **30**(3): 650-655.
- [35] 马召辉, 梁云平, 张健, 等. 北京市典型排放源 PM<sub>2.5</sub> 成分谱研究[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(12): 4043-4052.  
Ma Z H, Liang Y P, Zhang J, *et al.* PM<sub>2.5</sub> profiles of typical sources in Beijing[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(12): 4043-4052.
- [36] 唐孝炎, 张远航, 邵敏, 等. 大气环境化学[M]. (第二版). 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [37] Chow J C, Watson J G, Lu Z Q, *et al.* Descriptive analysis of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> at regionally representative locations during SJVAQS/AUSPEX [J]. *Atmospheric Environment*, 1996, **30**(12): 2079-2112.
- [38] Chow J C, Watson J G, Kuhns H, *et al.* Source profiles for industrial, mobile, and area sources in the Big Bend Regional Aerosol Visibility and Observational study [J]. *Chemosphere*, 2004, **54**(2): 185-208.
- [39] Li W F, Bai Z P. Characteristics of organic and elemental carbon in atmospheric fine particles in Tianjin, China[J]. *Particuology*, 2009, **7**(6): 432-437.
- [40] 曹军骥, 李顺诚, 李杨, 等. 2003 年秋冬季西安大气中有机碳和元素碳的理化特征及其来源解析[J]. *自然科学进展*, 2005, **15**(12): 1460-1466.
- [41] Demir T, Karakaş D, Yenisoğut-Karakaş S. Source identification of exhaust and non-exhaust traffic emissions through the elemental carbon fractions and Positive Matrix Factorization method [J]. *Environmental Research*, 2022, **204**, doi: 10.1016/j.envres.2021.112399.
- [42] Aswini A R, Hegde P, Nair P R, *et al.* Seasonal changes in carbonaceous aerosols over a tropical coastal location in response to meteorological processes [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **656**: 1261-1279.
- [43] van Wingerde B, van Ginkel J. SPSS syntax for combining results of principal component analysis of multiply imputed data sets using generalized procrustes analysis [J]. *Applied Psychological Measurement*, 2021, **45**(3): 231-232.



## CONTENTS

|   |  |
|---|--|
| Pollution Characteristics and Transport contributions of Ambient Ozone and Volatile Organic Compounds in Southern Hebei Cities .....  | ZHAO Jiang-wei, NIE Sai-sai, YU Yu-jie, <i>et al.</i> (4775)         |
| Temporal and Spatial Distributions of O <sub>3</sub> Concentration and Potential Source Area Analysis of Hexi Corridor Based on Satellite and Ground Monitoring .....   | LI Jin-chao, CAO Chun, FANG Feng, <i>et al.</i> (4785)               |
| Spatial and Temporal Variations in Ozone Pollution and Sensitivity Characteristics in Hainan Island .....   | FU Chuan-bo, DAN Li, TONG Jin-he, <i>et al.</i> (4799)               |
| Temporal and Spatial Characteristics of Troposphere O <sub>3</sub> and Precursors HCHO and NO <sub>2</sub> in East China .....  | WANG Xiao-wen, LIU Min-xia, WANG Yang, <i>et al.</i> (4809)          |
| Evolution Characteristics of Atmospheric Formaldehyde Emissions in Guangdong Province from 2006 to 2020 .....   | MING Gui-ying, ZHU Man-ni, SHA Qing-e, <i>et al.</i> (4819)          |
| VOCs Emission Level and Emission Reduction Potential of Coating Industry in Zibo .....  | HUANG Yue-run, YANG Wen, WANG Xiu-yan, <i>et al.</i> (4832)          |
| Pollution Characteristics of Carbonaceous Components in PM <sub>10</sub> and PM <sub>2.5</sub> of Road Dust Fall and Soil Dust in Xi'an .....   | SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, SUN Jie-juan, <i>et al.</i> (4843)      |
| Runoff Simulation and Its Response to Extreme Precipitation in the Yangtze River Basin .....  | GAO Shuang, TI Chao-pu, TANG Shui-rong, <i>et al.</i> (4853)         |
| Water Chemical Isotope Characteristics and Water Transformation Relationship in Mongolian Section of the Yellow River Basin .....   | PEI Sen-sen, DUAN Li-min, MIAO Ping, <i>et al.</i> (4863)            |
| Hydrochemical Characteristics and Formation Causes of Ground Karst Water Systems in Gudui Spring Catchment .....  | TANG Chun-lei, SHEN Hao-yong, ZHAO Chun-hong, <i>et al.</i> (4874)   |
| Source Analysis and Health Risk Assessment of Heavy Metals in the Groundwater of Shijiazhuang, a Typical City in North China Plain .....  | CHEN Hui, ZHAO Xin-yu, CHANG Shuai, <i>et al.</i> (4884)             |
| Spatial Distribution, Speciation, and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Dongjiang Lake, Hunan Province .....   | ZHANG Tong-liang, YI Li-xia, LI Chang-cheng, <i>et al.</i> (4896)    |
| Spectral Characteristics and Source Analysis of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Surface Water of Taihu Lake Before Cyanobacterial Blooming .....   | WANG Yong-qiang, LU Shao-yong, HUANG Wei, <i>et al.</i> (4906)       |
| Chemical Oxygen Demand(COD) Composition and Contribution in Typical Waters of Baiyangdian Lake .....  | LI Qi, ZHANG Chao, ZHANG Wen-qiang, <i>et al.</i> (4915)             |
| Source Apportionment and Source-specific Risk of Typical Antibiotics in Baiyangdian Lake .....  | SONG Yuan-meng, ZHAO Bo, LU Meng-qi, <i>et al.</i> (4927)            |
| Response of River Ecosystem Health Status to Water Environmental Factors in the Middle Reaches of Yarlung Zangbo River .....  | LI Xiao-dong, YANG Qing, LIU Hui-qiu, <i>et al.</i> (4941)           |
| Analysis on the Current Situation of Phytoplankton in the Typical River- Lake Ecotone of Lake Poyang .....  | YU Xin-ping, CHEN Yu-wei, LIU Jin-fu, <i>et al.</i> (4954)           |
| Phytoplankton Community Structure, Diversity, and Functional Groups in Urban River Under Different Black and Odorous Levels .....   | ZHANG Qi-qi, ZENG Jie, YIN Zhuo, <i>et al.</i> (4965)                |
| Influence of Denitrification on Cyanobacterial Blooms Trends in Lake Taihu, China .....   | LI Chang-jie, XU Hai, ZHAN Xu, <i>et al.</i> (4977)                  |
| Effects of Nitrogen Speciation Transformation on Microbial Community Succession in Input Rivers of Miyun Reservoir .....  | XIN Yuan, ZHANG Yao-fang, LI Tian-yu, <i>et al.</i> (4985)           |
| Action Mechanism of <i>Bacillus</i> on Microalgae During Nitrogen Metabolism in Urban Tailwater .....   | ZHAO Zhi-ni, MA Chao, YAN Jia-chen, <i>et al.</i> (4996)             |
| Nitrogen Removal Characteristics and Metabolism Mechanism of High-Efficiency Cold-Tolerant Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Bacterium <i>Glutamicibacter</i> sp. WS1 for Various Nitrogen Sources at Low Temperature ..... | WEI Bo-hui, LUO Xiao, LÜ Peng-yi, <i>et al.</i> (5006)               |
| Pollution Characteristics of Macrolide Antibiotics During Drinking Water Treatment and Their Chlorination Reaction Mechanism .....  | CEN Xia, CHENG Si-yu, SHI Zong-min, <i>et al.</i> (5017)             |
| Effects of Different Biochar and Effective Microorganism Agent Improvement Approaches on the Nutrient Release Characteristics and Potential of Compost .....  | JIA Pei-yin, WANG Xin, HUA Yu-ting, <i>et al.</i> (5025)             |
| Occurrence Characteristics and Risk Assessment of Microplastics in Water and Sediments of Anhui Section of Huaihe River Basin .....   | ZHANG Hai-qiang, GAO Liang-min, GE Juan, <i>et al.</i> (5036)        |
| Distribution, Sources, and Risk Assessment of Microplastics in Surface Sediments of Yellow River Delta Wetland .....  | GENG Na, ZHAO Guang-ming, ZHANG Da-hai, <i>et al.</i> (5046)         |
| Distribution Characteristics and Risk Assessment of Microplastics in Farmland Soil in Guyuan .....  | MA Gui, DING Jia-fu, ZHOU Yue, <i>et al.</i> (5055)                  |
| Distribution Characteristics of Microplastic Surface Bacterial Communities Under Flooded and Non-flooded Conditions in Nanjishan Wetland of Poyang Lake .....   | ZHAO Jun-kai, CHEN Xu, HU Ting-ting, <i>et al.</i> (5063)            |
| Influence of Polystyrene Microplastics on the Formation and Structural Change of <i>Pseudomonas aeruginosa</i> Biofilm .....  | TAO Hui, YU Duo, YANG Lan, <i>et al.</i> (5071)                      |
| Effects of Polystyrene Microplastics on Growth, Physiology, Biochemistry, and Canopy Temperature Characteristics of Chinese Cabbage Pakchoi ( <i>Brassica chinensis</i> L.) .....   | GUO Bing-lin, FENG Chen-chen, CHEN Yue, <i>et al.</i> (5080)         |
| Effects of Combined Stress of Polyethylene and Sulfamethazine on Seed Germination, Seedling Growth, and Physiological Characteristics of Soybean .....  | ZHAO Xiao-qiong, ZHANG Heng-hui, ZHAO Run-zhu, <i>et al.</i> (5092)  |
| Transport and Model Calculation of Microplastics Under the Influence of Ionic Type, Strength, and Iron Oxide .....  | ZHANG Ran, YU Ke-fei, HUANG Lei, <i>et al.</i> (5102)                |
| Impacts of Land Use and Climate Change on Ecosystem Services in Agro-pastoral Ecotone .....   | XU Wen-bin, RAO Liang-yi (5114)                                      |
| Response of Organic Carbon Loss to Soil Erosion and Its Drivers; A Meta-analysis .....  | LIU Xiao-lan, HUANG Jin-quan, QI Yu-jie, <i>et al.</i> (5125)        |
| Effects of Balanced Fertilization and Straw Mulching on Soil Nutrients and Stoichiometry in Purple Soil Slope .....   | ZHANG Gao-ning, XU Qi-wen, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (5135)         |
| Characteristics and Dominant Influencing Factors of the Fungal Community Structure in Soils Co-contaminated with Rare Earth Elements and Heavy Metals .....   | LUO Ying, LI Jing-wei, YUAN Hao, <i>et al.</i> (5145)                |
| Effects of Annual Crop Rotation and Fallow on Soil AMF Community and Aggregate Stability .....  | LU Ze-rang, XIA Zi-tai, LU Mei, <i>et al.</i> (5154)                 |
| Spatial-temporal Changes and Driving Factors of Soil Microbial Communities in a Typical City of North China Plain .....   | ZHAO Xin-yu, CHEN Hui, CHANG Shuai, <i>et al.</i> (5164)             |
| Effect of High-volume Straw Returning and Applying <i>Bacillus</i> on Bacterial Community and Fertility of Desertification Soil .....   | NIE Yang-mei, BU Lian-yan, CHEN Wen-feng, <i>et al.</i> (5176)       |
| Low Accumulation Characteristics of Sweet-waxy Maize in Pb and Cd Complex Contaminated Soils Based on Field Trials .....  | TANG Le-bin, LI Long, SONG Bo, <i>et al.</i> (5186)                  |
| Effects of Different Control Measures on Cadmium and Lead Accumulation and Quality in Lettuce .....   | ZHOU Hong-yin, LI Jia-qi, BAO Li, <i>et al.</i> (5196)               |
| Effects of Nano-copper Oxide on Physiobiochemical Properties of <i>Brassica chinensis</i> L. and Its Heavy Metal Accumulation Under Cadmium Stress .....  | WANG Shi-qi, SUN Yue-bing, HUANG Qing-qing, <i>et al.</i> (5204)     |
| Distribution and Biototoxicity of Endogenous Pollutants in <i>Pennisetum</i> sp. Biochar from Different Polluted Areas .....  | LIU Li-ya, CUI Hong-biao, LIU Xiao-sheng, <i>et al.</i> (5214)       |
| Adsorption Characteristics of Tetracycline by CuFeO <sub>2</sub> -modified Biochar .....  | LIU Guo-cheng, ZHANG Xin-wang, XIN Shuai-shuai, <i>et al.</i> (5222) |
| Ecological Toxic Effect of Perfluorinated Compounds on Fish Based on Meta-analysis .....  | LU Hong, ZHOU Jin-yang, YANG Fan, <i>et al.</i> (5231)               |
| Source Analysis and Risk Assessment of Heavy Metals in Soil of County Scale Based on PMF Model .....  | ZHENG Yong-li, WEN Han-hui, CAI Li-mei, <i>et al.</i> (5242)         |
| Potential Source Identification and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Soil of Heze Oil Peony Planting Area Based on PMF-PCA/APCS and PERI .....   | ZHAO Qing-ling, LI Qing-cai, AN Mao-guo, <i>et al.</i> (5253)        |
| Health Risk Assessment and Environmental Benchmark of Cadmium in Farmland Soils around the Gangue Heap of Coal Mine, Chongqing .....  | MA Jie, SHE Ze-lei, WANG Sheng-lan, <i>et al.</i> (5264)             |
| Pollution Characteristics and Sources of Heavy Metals in Soil of a Typical Pyrite Concentrated Mining Area in Anhui Province .....  | JIA Han, LIU Jun-xing, WANG Xiao-guang, <i>et al.</i> (5275)         |
| Distribution Characteristics, Source Analysis and Potential Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Typical River Source Areas of Northeastern Hunan Province .....  | YANG Zhen-yu, LIAO Chao-lin, ZOU Yan, <i>et al.</i> (5288)           |
| Variation Characteristics of Exogenous Cadmium with Different Contents in Red Soil .....  | ZHOU Zi-yang, PANG Rui, SONG Bo (5299)                               |
| Analysis of Carbon Storage Potential of CO <sub>2</sub> Foamed Concrete .....   | ZHANG Yuan, TA Xu-peng, QIN Shu-bing, <i>et al.</i> (5308)           |
| Research on the Screening Method of Priority Pollutants with Integrated Environmental Socio-economic Indicators: Example of E-waste Dismantling .....   | CHEN Yuan, CAI Zhen, LI Jin-hui (5316)                               |