

目次

持久性、迁移性和潜在毒性化学品环境健康风险与控制研究现状及趋势分析 张少轩, 陈安娜, 陈成康, 景侨楠, 刘建国 (3017)

我国厨余垃圾资源化技术的多维绩效评价 杨光, 史波芬, 周传斌 (3024)

基于 MSPA 和电路理论的京津冀城市群热环境空间网络 乔治, 陈嘉悦, 王楠, 卢应爽, 贺瞳, 孙宗耀, 徐新良, 杨浩, 李莹, 王方 (3034)

城市空间格局与热环境响应关系:以合肥市为例 陈媛媛, 姚侠妹, 偶春, 张清怡, 姚晓洁 (3043)

天津市“十三五”期间 PM_{2.5} 减排效果评估 肖致美, 徐虹, 蔡子颖, 张裕芬, 刘茂辉, 孙猛, 李鹏, 杨宁, 戴运峰 (3054)

清洁取暖对保定市采暖期 PM_{2.5} 中碳质气溶胶的影响 罗宇睿, 张凯, 赵好希, 任家豪, 段菁春, 李欢欢, 关健, 郭志强, 李博文 (3063)

南京地区细颗粒物污染输送影响及潜在源区 谢放尖, 郑新梅, 窦焱焱, 杨峰, 刘春蕾, 李洁, 谢轶嵩, 王艳, 胡建林, 陈长虹 (3071)

大气环流型对珠三角 2015~2020 年臭氧变化的影响 汪瑶, 刘润, 辛繁 (3080)

热带气旋对海南岛臭氧污染的影响分析 符传博, 丹利, 佟金鹤, 徐文帅 (3089)

基于 CMAQ 和 HYSPLIT 模式的日照市夏季臭氧污染成因和来源分析 林鑫, 全纪龙, 王伊凡, 陈羽翔, 刘永乐, 张鑫, 敖丛杰, 刘浩天 (3098)

2016~2020 年成都市控制 PM_{2.5} 和 O₃ 污染的健康效益评价 张莹, 田琪琪, 魏晓钰, 张少波, 胡文东, 李明刚 (3108)

深圳市 2022 年春季新冠疫情管控期间空气质量分析 刘婵芳, 张傲星, 房庆, 叶毓婧, 杨红龙, 陈炯恺, 吴雯潞, 侯岳, 莫佳佳, 傅宗攻 (3117)

贵州省生物质燃烧源大气污染物排放清单 王艳妮, 杨敬婷, 黄贤峰, 程燕, 陆标, 顾兆林 (3130)

西安市大气降水的主要化学组分及其来源 周东, 黄智浦, 李思敏, 王森, 牛振川, 熊晓虎, 冯雪 (3142)

宜昌市大气微塑料的分布、呼吸暴露及溯源 刘立明, 王超, 巩文雯, 陆安祥, 任东, 涂清, 贾漫珂 (3152)

雅鲁藏布江水化学演变规律 江平, 张全发, 李思悦 (3165)

无定河流域地表水硝酸盐浓度的时空分布特征及来源解析 徐奇峰, 夏云, 李书鉴, 王万洲, 李志 (3174)

太浦河水体与沉积物中重金属的季节变化特征与污染评价 罗鹏程, 涂耀仁, 孙婷婷, 刘生辉, 高佳欣, 寇佳怡, 顾心彤, 段艳平 (3184)

北京市北运河水体中抗生素污染特征及风险评估 蒋宝, 隋珊珊, 孙成一, 王亚玲, 荆降龙, 凌文翠, 李珊珊, 李国傲 (3198)

氮和氧同位素示踪伊洛河河水硝酸盐来源及转化过程 郭文静, 张东, 蒋浩, 吴洋洋, 张郭妙, 段慧真, 许梦军, 麻冰涓, 陈昊, 黄兴宇 (3206)

淮河下游湖泊表层水和沉积物中 PPCPs 分布特征及风险评估 武宇圣, 黄天寅, 张家根, 田永静, 庞燕, 许秋瑾 (3217)

西宁市浅层地下水化学特征及形成机制 刘春燕, 于开宁, 张英, 荆继红, 刘景涛 (3228)

叶尔羌河流域平原区地下水污染风险评价 闫志云, 曾妍妍, 周金龙, 孙英, 马常莲 (3237)

密云水库细菌群落组成结构及影响因素 陈颖, 王佳文, 梁恩航, 陈倩 (3247)

可见光激发下模拟海水中四环素光降解的机制和路径 许恒韬, 付小航, 丰卫华, 王挺 (3260)

纳米零价铁改性生物炭对水中氨氮的吸附特性及机制 陈文静, 石峻岭, 李雪婷, 张李金, 刘富强, 陈正祝, 庞维海, 杨殿海 (3270)

高锰酸钾改性椰壳生物炭对水中 Cd(II) 和 Ni(II) 的去除性能及机制 张凤智, 王敦球, 曹星洋, 刘桥京, 岳甜甜, 刘立恒 (3278)

镧改性净水污泥水热炭对水体中磷的吸附特性及底泥内源磷的固定 何李文泽, 陈钰, 孙飞, 李艳君, 杨顺生, 张志鹏 (3288)

城镇生活污水处理厂出水硝酸盐浓度及同位素组成的影响因素 张东, 葛文彪, 赵爱萍, 高振朋, 陈昊, 张琮, 蒋浩, 吴文阳, 廖琪, 李成杰, 黄兴宇, 麻冰涓 (3301)

基于 Meta 分析的污水处理工艺对微塑料去除效果影响 符立松, 侯磊, 王艳霞, 李晓琳, 王万宾, 梁启斌 (3309)

我国自然生态系统氮沉降临界负荷评估 黄静文, 刘磊, 顾晓元, 凌超普 (3321)

气候变化和人类活动对东部沿海地区 NDVI 变化的影响分析 金岩松, 金凯, 王飞, 刘春霞, 秦鹏, 宗全利, 刘佩茹, 陈明利 (3329)

基于 InVEST 模型和 PLUS 模型的环杭州湾生态系统碳储量 丁岳, 王柳柱, 桂峰, 赵晨, 朱望远 (3343)

河西走廊中段荒漠绿洲土壤生态化学计量特征 孙雪, 龙永丽, 刘乐, 刘继亮, 金丽琼, 杜海峰, 陈凌云 (3353)

乌梁素海东部流域非生长季草地土壤细菌群落结构的垂向差异 李文宝, 张博尧, 史玉娇, 郭鑫, 李兴月 (3364)

芦芽山华北落叶松林土壤剖面细菌群落分布格局 毛晓雅, 刘晋仙, 贾彤, 吴铁航, 柴宝峰 (3376)

植被类型对黄土高原露天复垦土壤碳循环功能基因的影响 赵蛟, 马静, 朱燕峰, 于昊辰, 张琦, 陈浮 (3386)

施用生物炭对麦田土壤细菌群落多样性和冬小麦生长的影响 姚丽茹, 李伟, 朱良正, 曹布仓, 韩娟 (3396)

甜龙竹不同种植年限对土壤真菌群落的影响 朱书红, 辉朝茂, 赵秀婷, 刘蔚漪, 张仲富, 刘会会, 张文君, 朱礼月, 涂丹丹 (3408)

生物炭对热带地区辣椒种植土壤 N₂O 排放及其功能基因的影响 陈琦琦, 王紫君, 陈云忠, 王誉琴, 朱启林, 胡天怡, 胡煜杰, 伍延正, 孟磊, 汤水荣 (3418)

覆膜和有机无机配施对夏玉米农田温室气体排放及水氮利用的影响 蒋洪雨, 雷琪, 张彪, 吴淑芳 (3426)

不同类型地膜覆盖对土壤质量、根系生长和产量的影响 穆晓国, 高虎, 李梅花, 赵欣茹, 郭宁, 靳磊, 李建设, 叶林 (3439)

基于 PMF 模型的某铅锌冶炼城市降尘重金属污染评价及来源解析 陈明, 王琳玲, 曹柳, 李名闯, 申哲民 (3450)

云南 5 城市道路扬尘 PM_{2.5} 中重金属含量表征及健康风险 韩新宇, 郭晋源, 史建武, 李定霜, 王怡明, 宁平 (3463)

兰州市黄河风情线地表积尘及周边绿地土壤重金属污染特征及风险评价 李军, 李开明, 王晓槐, 焦亮, 臧飞, 毛潇萱, 杨云钦, 台喜生 (3475)

PMF 和 RF 模型联用的土壤重金属污染来源解析与污染评价:以西北某典型工业园区为例 高越, 吕童, 张鑫凯, 张博哈, 毕思琪, 周旭, 张炜, 曹红斌, 韩增玉 (3488)

基于 APCS-MLR 受体模型和地统计法的矿区周边农用地土壤重金属来源解析 张传华, 王钟书, 刘力, 刘燕 (3500)

PCA-APCS-MLR 和地统计学的典型农田土壤重金属来源解析 王美华 (3509)

三峡库区稻田土壤重金属污染特征及风险评价 刘娅君, 李彩霞, 梅楠, 张美平, 张成, 王定勇 (3520)

皖江经济带耕地重金属健康风险评价及环境基准 刘海, 魏伟, 潘海, 宋阳, 靳磊, 李建设, 叶林, 黄健敏 (3531)

张家口市万全区某种植区土壤重金属污染评价与来源分析 安永龙, 殷秀兰, 李文娟, 金爱芳, 鲁青原 (3544)

滁州市表层土壤重金属含量特征、源解析及污染评价 汤金来, 赵宽, 胡睿鑫, 徐涛, 王宜萱, 杨扬, 周葆华 (3562)

矿业废弃地重金属形态分布特征与迁移转化影响机制分析 魏洪斌, 罗明, 向奎, 查理思, 杨慧丽 (3573)

基于成土母质的矿产资源基地土壤重金属生态风险评价与来源解析 卫晓峰, 孙紫坚, 陈自然, 魏浩, 孙厚云, 刘卫, 傅大庆 (3585)

不同种类蔬菜重金属富集特征及健康风险 祁浩, 庄坚, 庄重, 王琪, 万亚男, 李花粉 (3600)

山东省典型灌溉区土壤-小麦重金属健康风险评估 王菲, 费敏, 韩冬锐, 李春芳, 曹文涛, 姚磊, 曹见飞, 吴泉源 (3609)

基于机器学习方法的小麦镉富集因子预测 牛硕, 李艳玲, 杨阳, 商艳萍, 王天齐, 陈卫平 (3619)

《环境科学》征订启事(3062) 《环境科学》征稿简则(3116) 信息(3164, 3259, 3572)

清洁取暖对保定市采暖期 PM_{2.5} 中碳质气溶胶的影响

罗宇骞¹, 张凯^{1*}, 赵好希¹, 任家豪¹, 段菁春¹, 李欢欢¹, 关健², 郭志强³, 李博文¹

(1. 中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012; 2. 保定市生态环境监控中心, 保定 071000; 3. 保定市气象局, 保定 071000)

摘要: 为了研究清洁取暖措施对保定市 PM_{2.5} 中碳质气溶胶浓度和来源的影响, 于 2014 年和 2019 年冬季采暖期在保定市采集 PM_{2.5} 样品, 用 DRI Model 2001A 热光碳分析仪测定样品中 OC 和 EC 的浓度. 结果表明, 2014 年采暖期 PM_{2.5} 中 $\rho(\text{OC})$ 和 $\rho(\text{EC})$ 平均值分别为 60.92 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 18.15 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 2019 年采暖期 PM_{2.5} 中 $\rho(\text{OC})$ 和 $\rho(\text{EC})$ 平均值分别为 36.63 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 6.07 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 与 2014 年相比 2019 年 OC、EC 浓度分别下降了 39.87% 和 66.56%, EC 下降幅度大于 OC, 且 2019 年气象条件与 2014 年相比更不利于污染物扩散. 通过对 OC 和 EC 相关性分析和 SOC 估算, 发现 2014 年和 2019 年保定市 OC 和 EC 相关性 R^2 分别为 0.874 和 0.811, 表明保定市 OC 和 EC 具有较为一致的来源. 2014 年和 2019 年 $\rho(\text{SOC})$ 的平均值分别为 16.59 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 11.31 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 对 OC 的贡献率分别为 27.23% 和 30.87%, 表明与 2014 年相比 2019 年一次污染下降但二次污染上升, 说明大气氧化性增强. 对碳质气溶胶的污染来源分析发现, 清洁取暖实施前后 2014 年和 2019 年大气中的碳质气溶胶均来自生物质燃烧、煤燃烧和汽车尾气排放, 但 2019 年与 2014 年相比来自生物质燃烧和燃煤的贡献减少. OC 和 EC 浓度的下降得益于清洁取暖对燃煤源和生物质燃烧源的管控, 同时, 清洁取暖措施的实施降低了一次排放对保定市 PM_{2.5} 中碳质气溶胶的贡献.

关键词: PM_{2.5}; 有机碳(OC); 元素碳(EC); 清洁取暖; 保定市

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)06-3063-08 DOI: 10.13227/j.hjkx.202206055

Effect of Clean Heating on Carbonaceous Aerosols in PM_{2.5} During the Heating Period in Baoding

LUO Yu-qian¹, ZHANG Kai^{1*}, ZHAO Yu-xi¹, REN Jia-hao¹, DUAN Jing-chun¹, LI Huan-huan¹, GUAN Jian², GUO Zhi-qiang³, LI Bo-wen¹

(1. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. Monitoring Center of Ecological Environment of Baoding, Baoding 071000, China; 3. Baoding Meteorological Bureau, Baoding 071000, China)

Abstract: In order to study the effects of clean heating measures on the concentration and source of carbonaceous aerosols in PM_{2.5} in Baoding, we collected PM_{2.5} samples in Baoding during the winter heating periods of 2014 and 2019. The concentrations of OC and EC in the samples were determined by using a DRI Model 2001A thermo-optical carbon analyzer. The results showed that the average values of $\rho(\text{OC})$ and $\rho(\text{EC})$ in the heating period in 2014 were 60.92 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ and 18.15 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, and the average values of $\rho(\text{OC})$ and $\rho(\text{EC})$ in the heating period in 2019 were 36.63 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ and 6.07 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Compared with those in 2014, the concentrations of OC and EC decreased by 39.87% and 66.56%, respectively, in 2019; the decrease in EC was larger than that in OC, and the meteorological conditions in 2019 were more severe than those in 2014, which was not conducive to the spread of pollutants. The correlation analysis and SOC estimation of OC and EC indicated that the correlation R^2 of OC and EC in Baoding in 2014 and 2019 were 0.874 and 0.811, respectively, indicating that OC and EC in Baoding had relatively consistent sources. The average values of $\rho(\text{SOC})$ in 2014 and 2019 were 16.59 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ and 11.31 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, respectively, and the contribution rates to OC were 27.23% and 30.87%, respectively. This showed that in 2019, compared with that in 2014, the primary pollution decreased, but the secondary pollution increased, and the atmospheric oxidation increased. The analysis of the pollution sources of carbonaceous aerosols revealed that in 2014 and 2019 before and after the implementation of clean heating, the carbonaceous aerosols in the atmosphere were mainly from biomass combustion, coal combustion, and vehicle exhaust emissions. However, the contribution from biomass burning and coal burning decreased in 2019 compared to that in 2014. The decrease in OC and EC concentrations was attributed to the control of coal-fired and biomass-fired sources by clean heating. At the same time, the implementation of clean heating measures reduced the contribution of primary emissions to carbonaceous aerosols in PM_{2.5} in Baoding City.

Key words: PM_{2.5}; organic carbon (OC); elemental carbon (EC); clean heating; Baoding City

随着中国经济、城市化和工业化的快速发展, 颗粒物(PM)污染已经成为影响空气污染的首要问题^[1-3]. 碳组分是颗粒物的主要成分之一, 对大气能见度、全球气候变化^[4]、空气质量和人类健康都有重要影响, 含碳物质较多的颗粒被认为比那些富含硫酸盐和硝酸盐的无机颗粒毒性更大^[5,6]. 碳质气溶胶的来源与燃料燃烧密切相关, 特别是机动车尾气排放和取暖燃煤排放^[7], 有研究指出煤炭是中国碳质气溶胶排放的主要贡献者^[8,9], 煤炭燃烧产生

的颗粒物中含有大量的碳质成分, 包括有机碳(OC)、元素碳(EC)和碳酸碳(CC)^[10,11], 其中 OC 和 EC 占 PM_{2.5} 的质量分数为 20%~50%, 甚至可达 80%^[12]. OC 包括污染源直接排放的一次有机碳

收稿日期: 2022-06-06; 修订日期: 2022-08-05

基金项目: 大气重污染成因与治理攻关项目(DQGG0304-05, DQGG2021101); 国家自然科学基金项目(41205093, 42075182)

作者简介: 罗宇骞(1999~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为大气颗粒物有机组分分析, E-mail: luoyuqian@foxmail.com

* 通信作者, E-mail: zhangkai@cras.org.cn

(POC),也包括经过二次生成的二次有机碳(SOC). EC 主要来源于生物质或化石燃料的燃烧过程,在大气中不容易发生化学反应,所以也常常用作一次排放的示踪物来估算二次有机碳(SOC)的生成. 根据已有的排放估计,中国被认为是全球碳质气溶胶的最重要贡献者之一^[19].

中国对碳质气溶胶的研究主要集中在珠三角^[13]、长三角^[14,15]、川渝地区和京津冀^[16~18]等城市,总体来看京津冀地区含碳气溶胶浓度高于珠三角、长三角地区. 京津冀地区是中国最发达的城市群之一,大气颗粒物受到人为排放的影响很大^[19]. 近年来,京津冀地区燃煤和生物质燃烧对 PM_{2.5} 的贡献逐渐降低^[20],但燃煤源依然是该地区 PM_{2.5} 的主要来源之一,其中保定市的燃煤源对 PM_{2.5} 的贡献最高,特别在秋冬采暖期 PM_{2.5}、OC 和 EC 浓度较高^[17].

保定市位于河北省西北部,太行山东麓北部,燕山山脉南侧,冀中平原西部,介于北纬 38°10′~40°00′,东经 113°40′~116°20′之间,紧邻北京市,一直以来就面临严重的大气颗粒物污染问题. 2013~2016 年保定市空气质量综合指数排名一直位于全国重点城市的倒数 5 名以内,2014 年为京津冀及周边“2+26”城市(“2+26”城市)中排名倒数第一,空气污染严重. 2015 年保定市开始实施多项大气污染治理措施,空气质量开始持续好转^[21],其中治煤除燃煤小锅炉淘汰外,清洁取暖(包括“气代煤、电代煤”、使用清洁煤、劣质散煤专项治理和集中供暖等)是最主要的措施. 2019 年保定市空气质量综合

指数从 2014 年“2+26”城市中排名倒数第一提升为倒数第七,在“2+26”城市中排名变化最大.

为了探究保定市“清洁取暖”措施对 PM_{2.5} 中碳质气溶胶浓度和来源的影响,本文利用 2014 年和 2019 年清洁取暖措施实施前、后保定市采暖期采样数据,通过 SOC 估算、相关性分析和主成分分析法等方法,对保定市 PM_{2.5} 中碳质气溶胶质量浓度和来源变化进行研究.

1 材料与方法

1.1 样品采集

2014 年 PM_{2.5} 采样点为河北省保定市环境监控中心,采样时间为 2014 年 1 月 20 日至 2014 年 3 月 11 日; 2019 年 PM_{2.5} 采样点为保定市接待中心,采样时间为 2019 年 2 月 1 日至 2019 年 3 月 9 日. 保定市环境监控中心位于保定市莲池区东风东路,保定市接待中心位于保定市竞秀区创业路(图 1),采样点周边以居民区为主,无明显工业源,主要受当地生活排放源、交通源等影响. 2014 年和 2019 年两个站点采样期间在线 PM_{2.5} 浓度数据差异分别为 3.39% 和 5.51%,数据差异不大,说明保定市主城区内 PM_{2.5} 空间分布较为均匀,因此选取这两个观测点可以代表保定市大气气溶胶污染状况^[22]. 降雪、大风或仪器故障时停止采集样品,2014 年采集样品 47 个,其中空白膜 6 张,有效样品 41 个; 2019 年采集样品 43 个,其中空白膜 5 张,有效样品 37 个.

采样设备为武汉天虹仪表责任有限公司生产的 TH-16A 四通道大气颗粒物智能采样仪,4 个通道采



图 1 “2+26”城市分布及采样点位置示意

Fig. 1 The “2+26” urban distribution and location of sampling sites

样流量分别为 16.7 L·min⁻¹, 其中两个通道分别采集直径为 47 mm 的 Teflon 膜和石英膜, 采样周期为 23 h, 另外两个通道放备用膜, 定期更换. 采样前对采样设备进行流量校准. 采样期间, 每隔 7 d 采集一组空白膜样品.

1.2 膜处理与分析

采样前石英膜预先置于马弗炉中, 500℃ 焙烧 4h, 消除可能存在的有机物和杂质, 冷却至室温后放在温度为 (20 ± 1)℃、相对湿度为 (50 ± 5)% 的恒温恒湿箱中平衡 48h 以上, 用十万分之一天平 (0.01mg) 称量 3 次后放入膜盒中保存. 样品采集后用同一天平重复以上平衡和称量操作.

采用美国沙漠所研制的 DRI Model 2001A 热光碳分析仪分析样品中碳质气溶胶, 利用 IMPROVE (interagency monitoring of protected visual environment) 分析协议规定的热光反射法测定样品中 OC (OC₁、OC₂、OC₃、OC₄) 和 EC (EC₁、EC₂、EC₃) 的浓度^[23-26].

1.3 在线数据来源与气象评估方法

环境空气质量监测数据来自中国环境监测总站发布的保定市 2014、2017 和 2019 年逐小时数据. 气象数据来源于中国气象数据网发布的地面逐小时数据, 选取保定市气象站同期气温、风速和风向等资料.

为研究气象要素变化对保定市大气污染物浓度影响, 本文利用本课题组建立的城市尺度大气污染物输送扩散理论评估方法对保定市 PM_{2.5} 浓度开展气象要素变化的评估.

2 结果与讨论

2.1 PM_{2.5}、OC 和 EC 浓度特征

保定市 2014 年采暖期 $\rho(\text{OC})$ 和 $\rho(\text{EC})$ 分别为 60.92 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 18.15 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 2019 年采暖期分别为 36.63 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 6.07 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (图 2), 2017 年采暖期 $\rho(\text{OC})$ 和 $\rho(\text{EC})$ 分别为 57.12 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 14.16 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ^[23]. 与 2014 年采暖期相比, 2017 年采暖期 OC 和 EC 分别下降 6.24% 和 21.98%, 2019 年采暖期 OC 和 EC 分别下降了 39.87% 和 66.56%, 2019 年采暖期相较于 2017 年采暖期分别下降 35.87% 和 57.13%, 2017 年和 2019 年相较于 2014 年 EC 下降的幅度都大于 OC. EC 主要来自一次污染物的排放, EC 下降的幅度大于 OC 说明保定市来自一次排放源贡献下降^[27]. Fang 等^[28] 研究发现燃煤是京津冀地区 EC 的主要来源 (2012 ~ 2013 全年平均贡献了 50%), 因此保定市 EC 的下降幅度大于 OC 得益于燃煤源排放减少, 这与 2015 年以来保定

市开始推行的清洁取暖政策, 取缔散煤和燃煤锅炉, 劣质散煤专项治理的时间线相一致^[29,30]. 2015 年保定市启动清洁取暖工作, 主城区和各区县采取集中供暖方式, 农村地区则以“煤改气, 煤改电” (“双替代”) 为主, 保定市主城区集中供热率由 2014 年的 39% 升至 2017 年的 100%, 各区县主城区平均达到 80% 以上. 2015 ~ 2016 年, 保定市完成 190 个村、 8.7×10^4 户清洁取暖工作, 2017 年, 完成 1685 个村、 74×10^4 户, 截至到 2019 年 6 月底, 累计完成 163.36×10^4 户的清洁取暖工作, 共替代散烧煤 $237.03 \times 10^4 \text{ t}$ ^[27], 从 2014 年、2017 年和 2019 年保定市采暖期大气中的碳质气溶胶观测数据可知, 2014 ~ 2019 年一直呈下降趋势, 特别是从 2017 年后下降幅度显著增加, 这可能与保定市清洁取暖的范围和位置有关. 2015 ~ 2017 年保定市清洁取暖范围主要是保定市主城区和北部区县, 2018 ~ 2019 年保定市清洁取暖范围主要在保定市南部区县和农村, 到 2019 年底保定市全部完成清洁取暖工作, 2017 ~ 2019 年间 OC 和 EC 下降幅度大于 2014 ~ 2017 年, 说明农村地区散烧煤的取代工作对 OC 和 EC 的减排贡献很大.

已有研究表明保定市冬季来自正南方向短距离气团携带污染物浓度高于西北气团^[31], 因此保定市南部区县清洁取暖对保定市空气质量改善影响高于北部区县, 在南部区县和农村地区进一步实施清洁取暖后, 保定市 OC 和 EC 浓度下降幅度进一步加大. 保定市在开展清洁取暖工作的同时, 也实施了多项其它大气污染治理措施, 如从严治企、强力抑尘和严厉控车等, 但对 PM_{2.5} 来源解析分析可知^[27], 民用燃煤源的治理在保定市空气质量改善中起了最重要的作用. 由此可以推知保定市 2014 ~ 2019 年冬季采暖期 OC 和 EC 浓度的下降与此期间实施的一系列大气污染治理措施有关, 特别是清洁取暖措施的实施对农村地区散煤的治理和能源结构的调整.

大气污染物浓度下降, 除了与人为减排的努力有关外, 与气象要素变化也密不可分. 本文以 2014 年为基准年, 对 2017 年和 2019 年的气象要素进行评估, 用于分析后两年同期的气象要素变化对于 PM_{2.5} 浓度下降的影响 (表 1). 相对 2014 年, 2017 年 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 下降了 24.1 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 其中 2017 年气象条件不利于污染物扩散, 使 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 增加了 1.5 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 与基准年相比增加 0.92%, 大气污染物排放控制减排下降了 25.6 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 与基准年相比下降 15.69%. 2019 年相对 2014 年, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 下降了 61.8 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 其中 2019 年气象条件同样不利于污染物扩散, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 增加了 9.4 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 与基准年

相比增加 5.76%, 而减排下降了 71.2 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 与基准年相比下降 43.63%. 保定市 2017 和 2019 年相对

于 2014 气象条件更加不利于扩散, 保定市空气质量的改善为“人努力”的结果.

表 1 保定市 2014、2017 和 2019 年气象要素变化和污染物减排对 $\text{PM}_{2.5}$ 影响的评估结果¹⁾

Table 1 Evaluation results of the impact of changes in meteorological elements and pollutant emission reduction on $\text{PM}_{2.5}$ in Baoding in 2014, 2017, and 2019

| 项目 | 时段 | 2014 年 | 2017 年 | 2014 年 | 2019 年 |
|--|-------------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 平均值/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ | 1~3 月 | 163.2 | 139.1 | 163.2 | 101.4 |
| $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 差值/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ | | | -24.1 | | -61.8 |
| 程度/% | | | -14.77 | | -37.87 |
| 气象影响 | 浓度/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ | | 1.5 | | 9.4 |
| | 程度/% | | 0.92 | | 5.76 |
| 减排影响 | 浓度/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ | | -25.6 | | -71.2 |
| | 程度/% | | -15.69 | | -43.63 |

1) 负值表示下降, 正值表示增加

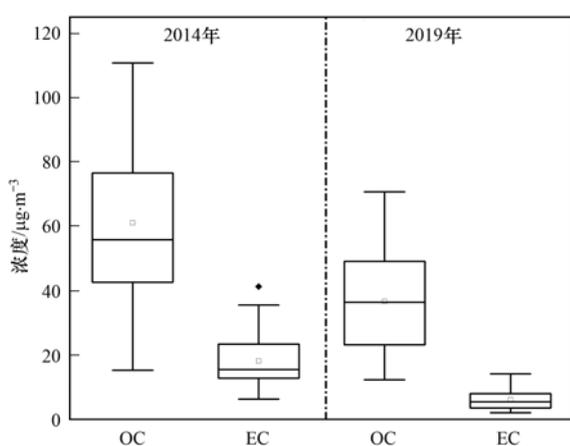


图 2 OC 和 EC 浓度统计值

Fig. 2 Statistics of OC and EC concentrations

2.2 与京津冀其他城市的对比

北京市 2016~2017 年采暖期相较于 2015~2016 年采暖期 OC 上升了 5.64%, EC 下降了 44.28% (表 2), 2017~2018 年采暖期相较于 2016~2017 年采暖期 OC 下降了 42.45%, EC 下降了 70.12%~84.06%. 北京市 2015~2018 年采暖期期间 OC 和 EC 均有不同程度下降, 其中 EC 下降幅度大于 OC, 2015~2018 年采暖期 EC 下降幅度超过 70%, 有研究表明, 北京市出现污染时常伴有偏南风, 即受南部沿太行山污染物传输影响^[32], 随着保定市北部九区县 2015 年清洁取暖工程实施到 2017 年的基本结束, 不仅保定市 $\text{PM}_{2.5}$ 中 OC 和 EC 下降, 北京市 OC 和 EC 也出现了非常明显的下降, 说明清

表 2 不同研究中 OC 和 EC 浓度/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

Table 2 Concentrations of OC and EC in different studies/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

| 城市 | 采样时间 | OC 浓度 | EC 浓度 | 文献 |
|------------------------|-----------------------|--------------|-------------|------|
| 保定 | 2014-01~2014-03 | 60.92 | 18.15 | 本研究 |
| | 2019-02~2019-03 | 36.63 | 6.07 | 本研究 |
| 北京 | 2015-04~2016-03(冬季) | 22.70 ± 5.87 | 9.01 ± 3.73 | [25] |
| | 2016-12-28~2017-01-22 | 23.98 | 5.02 | [37] |
| | 2017-12~2018-12(冬季) | 13.8 ± 8.7 | 0.8~1.5 | [24] |
| 天津 | 2014-01~2014-04 采暖季 | 19.3 ± 9.9 | 4.5 ± 3.0 | [38] |
| | 2017-11-28~2017-12-30 | 15.63 | 4.19 | [34] |
| | 2018-12-05~2019-01-30 | 18.69 ± 7.95 | 4.98 ± 2.08 | [39] |
| 石家庄 | 2013 年 | 41.20 | 8.59 | [35] |
| | 2016-12-28~2017-01-22 | 35.75 | 9.22 | [37] |
| “2+26”城市 ¹⁾ | 2017 年采暖期 | 25.9 ± 18.5 | / | |
| | 2018 年采暖期 | 30.9 ± 20.7 | / | [33] |
| | 2019 年采暖期 | 21.8 ± 11.6 | / | |

1) “2+26”城市 2017、2018 和 2019 年采暖期无 EC 浓度数据

洁取暖政策对降低 $\text{PM}_{2.5}$ 中 OC 和 EC 效果明显. 天津市 2017 年采暖期相较于 2014 年采暖期 OC 和 EC 分别下降了 19.02% 和 6.89% (表 2), 2018~2019 年采暖期相较于 2017 年采暖期 OC 和 EC 上升了 19.58% 和 18.85%. 天津市 2014、2017 和 2018 ~

2019 年采暖期间 OC 和 EC 在稳定水平上下波动. 石家庄市 2016~2017 年采暖期 OC 相较于 2013 年下降了 13.23%, 但 EC 上升了 7.33%.

“2+26 城市”2019 年采暖期 OC 较 2017 年采暖期下降了 15.8%, 较 2018 年采暖期下降了

29.4%, 2019 年采暖期 EC 相较于 2017 年采暖期下降了 3.0%, 较 2018 年采暖期下降了 1.2% [33]. “2+26”城市 OC 和 EC 在 2017~2019 年采暖期期间呈现下降趋势, 其中 OC 下降幅度大于 EC. 与天津市和石家庄市相比, 保定市 OC 和 EC 下降幅度大, 其原因与天津市和石家庄市大气颗粒物中 OC 和 EC 主要来源与保定市的不同有关, 天津市主要来源于汽油车尾气、道路扬尘、燃煤与生物质燃烧 [34], 石家庄市主要来源于工业排放、机动车尾气、燃煤和二次有机碳等 [35]. 保定市 OC 和 EC 下降幅度大于“2+26”城市, 且保定市 EC 下降幅度大于 OC, “2+26”城市 OC 下降幅度大于 EC, 由此可以进一步说明保定市来自煤炭和生物质燃烧的一次排放的减少, 这与相关研究者 2015~2019 年在南京市 [36] 的研究相似, 表明保定市采取的清洁取暖措施对 PM_{2.5} 中的碳组分控制有成效.

2.3 二次有机碳的估算

OC/EC 的值为 2, 一般被认为是一次和二次有机气溶胶形成的界限 [40]. 2014 年和 2019 年冬季采暖期 OC/EC 分别为 3.38 ± 0.57 和 6.50 ± 1.34 , 平均值都大于 2, 其中 2019 年 OC/EC 明显高于 2014 年, 表明保定市碳质气溶胶中二次有机碳组分占比在 2014~2019 年期间有升高的趋势. OC/EC 只能定性描述 SOC, 为了定量描述 SOC, 常采用 OC/EC 最小比值法估算 SOC 的量 [41], 计算公式如下所示:

$$\text{SOC} = \text{OC} - \text{EC} \times (\text{OC}/\text{EC})_{\min} \quad (1)$$

式中, SOC 为估算的二次有机碳的量; OC 和 EC 为总有机碳和元素碳质量浓度; $(\text{OC}/\text{EC})_{\min}$ 为所观测到的 OC/EC 最小值, 2014 年和 2019 年 $(\text{OC}/\text{EC})_{\min}$ 分别为 2.44 和 4.17. 经计算, 保定市 2014 年 $\rho(\text{SOC})$ 平均值为 $16.59 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 在 OC 中的占比为 27.23%. 2019 年 $\rho(\text{SOC})$ 为 $11.31 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 在 OC 中的占比为 30.87%. 保定市 2014 年 SOC 高于 2019 年, 但 SOC 在 OC 中的占比低于 2019 年. 已有研究表明保定市及周边地区 O₃ 浓度近年来有升高趋势 [21, 42], 说明大气氧化性增强导致二次污染升高.

通过 OC 和 EC 的相关性分析可以识别碳质气溶胶的来源, 若相关性好, 表明 OC 和 EC 的污染来源具有一致性, 反之则表明污染来源复杂. 由图 3 可知, 2014 年和 2019 年保定市 OC 和 EC 相关系数 R^2 分别为 0.874 和 0.811, 说明在 2014 年和 2019 年保定市 OC 和 EC 可能均具有较为一致的来源. 2019 年相关性略低, 说明 2019 年 OC 的二次来源有所增强. 2014 年和 2019 年 OC 与 EC 拟合的直线斜率分别为 3.087 和 4.277, 这一比值介于 2.5~10.5 之间, 表明其主要来源为煤炭和生物质燃烧 [26].

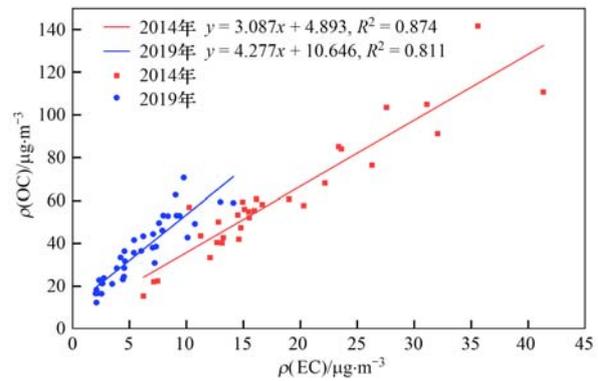


图 3 OC 与 EC 相关性分析

Fig. 3 OC and EC correlation analysis

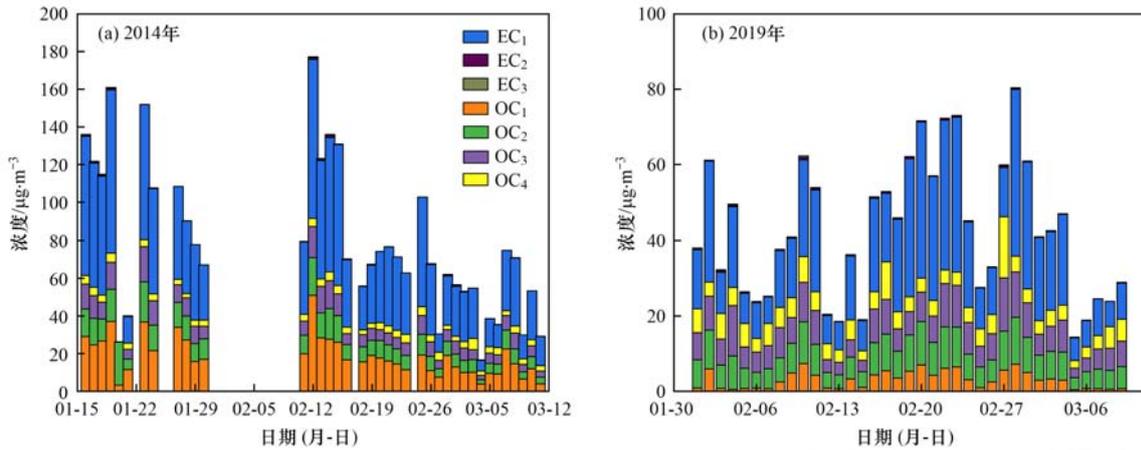
2.4 污染来源分析

热光反射法 (TOR) 在测定颗粒物中 OC 和 EC 同时, 也测得 7 个碳质组分的质量分数 (OC₁、OC₂、OC₃、OC₄、EC₁、EC₂ 和 EC₃), 源谱测试结果发现, 不同排放源排放的 7 个碳组分浓度都有差异, 其中 OC₁ 主要是生物质燃烧排放的碳组分, OC₂ 是燃煤源中最丰富的碳组分, EC₁ 是汽油车尾气中丰富的碳组分, EC₂ 和 EC₃ 是柴油车尾气中丰富的碳组分 [43, 44]. 根据不同地点不同方法的源解析结果, 已有研究对 OC₃ 和 OC₄ 的分类有所偏差, OC₃ 和 OC₄ 可能是汽油车尾气、燃煤或者道路扬尘的主要组分. 具体可以根据采样点主要排放源加以判断.

2014 年采暖期 $\rho(\text{OC}_1)$ 、 $\rho(\text{OC}_2)$ 、 $\rho(\text{OC}_3)$ 、 $\rho(\text{OC}_4)$ 、 $\rho(\text{EC}_1)$ 、 $\rho(\text{EC}_2)$ 和 $\rho(\text{EC}_3)$ 分别为: 18.34、9.64、8.27、3.59、38.90、0.24 和 0.09 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; 2019 年采暖期 $\rho(\text{OC}_1)$ 、 $\rho(\text{OC}_2)$ 、 $\rho(\text{OC}_3)$ 、 $\rho(\text{OC}_4)$ 、 $\rho(\text{EC}_1)$ 、 $\rho(\text{EC}_2)$ 和 $\rho(\text{EC}_3)$ 分别为: 3.10、7.33、7.32、4.93、19.69、0.27 和 0.07 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (图 4). 2019 年采暖期与 2014 年采暖期相比, OC₁、OC₂、OC₃、EC₁ 和 EC₃ 分别下降了 83.11%、23.97%、11.48%、49.39% 和 27.26%, OC₄ 和 EC₂ 分别上升了 37.41% 和 14.52%. 其中代表生物质燃烧的 OC₁ 下降幅度最大, 说明颗粒物中来自生物质燃烧的贡献减少. 2014 年采暖期碳组分浓度大小为: EC₁ > OC₁ > OC₂ > OC₃ > OC₄ > EC₂ > EC₃, EC₁ 和 OC₁ 浓度较高, 其它 5 种浓度较低, 说明汽油车尾气和生物质燃烧排放是保定市 2014 年碳气溶胶的主要来源. 燃煤源的特征组分 OC₂ 浓度在 7 个碳组分中占比也较高, 表明燃煤排放也是保定市城区碳组分的主要来源之一. 2019 年采暖期碳组分浓度大小为: EC₁ > OC₂ > OC₃ > OC₄ > OC₁ > EC₂ > EC₃, EC₁、OC₂ 和 OC₃ 浓度较高, 其它 4 种浓度较低, 由于采样点处于居民区, 无局部排放源, 说

明汽车尾气、煤炭燃烧是保定市碳质气溶胶的主要来源. 2014 年和 2019 年采暖期保定市 EC_1 的浓度在 7 种成分中均为最高, 说明在 2014 ~ 2019 年汽车尾气源对碳质气溶胶的贡献变化不大, 汽油车尾气一直是保定市碳质气溶胶的主要来源. 而 2014 年

OC_1 浓度在 OC 各组分中最高, OC_2 次之, 2019 年 OC_2 浓度在 OC 各组分中最高, OC_1 浓度最低, 说明 2014 ~ 2019 年期间保定市含碳组分来自生物质燃烧的部分减少, 由此可说明 2014 ~ 2019 年间, 保定市对生物质燃烧的治理效果显著.



01-30 ~ 02-10 为春节期间, 工作人员休假, 故未采样

图 4 不同时期 OC 和 EC 各组分浓度

Fig. 4 Concentrations of OC and EC components in different periods

为了进一步研究和确定保定市碳质气溶胶的来源, 利用 SPSS 软件对 2014 年采暖期和 2019 年采暖期 $PM_{2.5}$ 样品中 7 个碳组分进行主成分分析, 提取特征值大于 1 的因子, 并采用正交旋转使不同组分的因子载荷差异化便于进行因子识别^[26,45,46], 2014 年得到 3 个特征值大于 1 的因子, 2019 年得到 2 个特征值大于 1 的因子(表 3).

2014 年采暖期因子 1 的贡献率最大, 为 62.31%, OC_1 、 OC_2 、 OC_3 、 EC_1 和 EC_2 是其主要贡献因子; 因子 2 的贡献率为 18.76%, EC_2 和 EC_3 是其主要贡献因子; 因子 3 的贡献率为 14.53%, 主要受 OC_4 的影响. 2019 年采暖期因子 1 的贡献率为 58.88%, OC_1 、 OC_2 和 OC_3 是其主要贡献因

子, 因子 2 的贡献率为 21.63%, OC_4 和 EC_3 是主要贡献因子. 由此分析, 保定市 2014 年采暖期和 2019 年采暖期大气中的碳组分均来自于生物质燃烧、燃煤燃烧和汽车尾气排放. 但 2014 年采暖期因子 1 的贡献率(62.31%) 大于 2019 年采暖期中因子 1 中贡献率(58.88%), 且从以上分析可得代表生物质燃烧的指示物 OC_1 的下降幅度大于代表汽油车尾气的 EC_1 , 代表煤炭燃烧的指示物 OC_2 的下降幅度也达到 23.97%, 说明 2019 年采暖期相较于 2014 年采暖期来自燃煤和生物质燃烧的贡献有所下降, 因此可推知 OC 和 EC 的浓度下降得益于清洁取暖对煤炭和生物质燃烧的管控.

表 3 碳组分主成分分析结果

Table 3 Principal component analysis results of carbon components

| 组分 | 2014 年 | | | 2019 年 | |
|--------|----------------|--------|-------------|----------------|--------|
| | 因子 1 | 因子 2 | 因子 3 | 因子 1 | 因子 2 |
| OC_1 | 0.897 | -0.263 | -0.216 | 0.881 | -0.312 |
| OC_2 | 0.930 | -0.337 | -0.056 | 0.964 | -0.185 |
| OC_3 | 0.940 | -0.193 | 0.028 | 0.879 | 0.160 |
| OC_4 | 0.206 | 0.036 | 0.975 | 0.391 | 0.769 |
| EC_1 | 0.930 | -0.241 | 0.101 | 0.792 | -0.577 |
| EC_2 | 0.736 | 0.651 | -0.056 | 0.815 | 0.242 |
| EC_3 | 0.599 | 0.781 | -0.057 | 0.444 | 0.611 |
| 贡献率/% | 62.31 | 18.76 | 14.53 | 58.88 | 21.63 |
| 特征值 | 4.362 | 1.313 | 1.017 | 4.12 | 1.51 |
| 来源 | 生物质燃烧、燃煤和机动车尾气 | | 机动车尾气、扬尘和燃煤 | 生物质燃烧、燃煤和机动车尾气 | |

3 结论

(1) 2019 年采暖期与 2014 年采暖期相比 OC

和 EC 分别下降了 39.87% 和 66.56%, EC 下降幅度大于 OC, 2014 ~ 2019 年 OC 和 EC 呈现下降趋势.

(2) 清洁取暖的范围和位置与 OC 和 EC 下降的

幅度有关,从 2017 年开始在农村实施清洁取暖后下降幅度显著提高,说明农村地区散烧煤的取代工作对 OC 和 EC 的减排贡献很大。与京津冀和“2+26”城市比较,保定市 OC 和 EC 下降幅度大于天津市、石家庄市和“2+26”城市,且保定市 EC 下降幅度大于 OC,由此可以进一步说明近年来保定市来自煤炭和生物质燃烧的一次排放的减少,近些年保定市进行的清洁取暖措施对 PM_{2.5} 中的碳组分控制卓有成效。

(3) 对 2014 年和 2019 年 PM_{2.5} 中 7 种碳组分进行主成分分析发现,保定市 2014 年和 2019 年大气中的碳组分均来自于生物质燃烧、煤炭燃烧和汽车尾气排放。2014 年代表燃煤和生物质燃烧源的因子 1 的贡献率大于 2019 年中因子 1 的,说明 2019 年相较于 2014 年来自燃煤和生物质燃烧的贡献有所下降,因此可推知 OC 和 EC 的浓度下降得益于清洁取暖对煤炭和生物质燃烧的管控。

参考文献:

- [1] Gao J H, Woodward A, Vardoulakis S, *et al.* Haze, public health and mitigation measures in China: a review of the current evidence for further policy response [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **578**:148-157.
- [2] Pui D Y H, Chen S C, Zuo Z L. PM_{2.5} in China: measurements, sources, visibility and health effects, and mitigation[J]. *Particology*, 2014, **13**, 1-26.
- [3] Gao J J, Wang K, Wang Y, *et al.* Temporal-spatial characteristics and source apportionment of PM_{2.5} as well as its associated chemical species in the Beijing-Tianjin-Hebei region of China[J]. *Environmental Pollution*, 2018, **233**: 714-724.
- [4] Spracklen D V, Mickley L J, Logan J A, *et al.* Impacts of climate change from 2000 to 2050 on wildfire activity and carbonaceous aerosol concentrations in the western United States [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2009, **114** (D20), doi: 10.1029/2008JD010966.
- [5] Park M, Joo H S, Lee K, *et al.* Differential toxicities of fine particulate matters from various sources[J]. *Scientific Reports*, 2018, **8**(1), doi: 10.1038/s41598-018-35398-0.
- [6] Lelieveld J, Evans J S, Fnais M, *et al.* The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale[J]. *Nature*, 2015, **525**(7569): 367-371.
- [7] Bai H L, Liu X K, Liu X F, *et al.* Carbon isotope seasonal characteristics of fine carbonaceous aerosol in Jinzhong City, Shanxi Province, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2021, **246**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.118164.
- [8] Streets D G, Bond T C, Carmichael G R, *et al.* An inventory of gaseous and primary aerosol emissions in Asia in the year 2000 [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2003, **108** (D21), doi: 10.1029/2002JD003093.
- [9] Bond T C, Streets D G, Yarber K F, *et al.* A technology-based global inventory of black and organic carbon emissions from combustion[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2004, **109** (D14), doi: 10.1029/2003JD003697.
- [10] 曹国良, 张小曳, 王亚强, 等. 中国大陆黑碳气溶胶排放清单[J]. *气候变化研究进展*, 2006, **2**(6): 259-264.
Cao G L, Zhang X Y, Wang Y Q, *et al.* Inventory of black carbon emission from China [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2006, **2**(6): 259-264.
- [11] Dai Y C, Nasir M, Zhang Y L, *et al.* Comparison of DGT with traditional extraction methods for assessing arsenic bioavailability to *Brassica chinensis* in different soils [J]. *Chemosphere*, 2018, **191**: 183-189.
- [12] Nunes T V, Pio C A. Carbonaceous aerosols in industrial and coastal atmospheres [J]. *Atmospheric Environment. Part A. General Topics*, 1993, **27**(8): 1339-1346.
- [13] Lu M H, Zheng J Y, Huang Z J, *et al.* Insight into the characteristics of carbonaceous aerosols at urban and regional sites in the downwind area of Pearl River Delta region, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **778**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.146251.
- [14] Ming L L, Jin L, Li J, *et al.* PM_{2.5} in the Yangtze River Delta, China: chemical compositions, seasonal variations, and regional pollution events[J]. *Environmental Pollution*, 2017, **223**: 200-212.
- [15] 张颖龙, 李莉, 吴伟超, 等. 嘉善冬季碳质气溶胶变化特征及其来源解析[J]. *环境科学*, 2021, **42**(9): 4116-4125.
Zhang Y L, Li L, Wu W C, *et al.* Variation characteristics and source analysis of carbonaceous aerosols in winter in Jiashan [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(9): 4116-4125.
- [16] Wang L L, Li W J, Sun Y, *et al.* PM_{2.5} characteristics and regional transport contribution in five cities in southern North China plain, during 2013-2015 [J]. *Atmosphere*, 2018, **9**(4), doi: 10.3390/atmos9040157.
- [17] Xu H, Xiao Z M, Chen K, *et al.* Spatial and temporal distribution, chemical characteristics, and sources of ambient particulate matter in the Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **658**: 280-293.
- [18] Cui Y, Cao W, Ji D S, *et al.* Estimated contribution of vehicular emissions to carbonaceous aerosols in urban Beijing, China [J]. *Atmospheric Research*, 2021, **248**, doi: 10.1016/j.atmosres.2020.105153.
- [19] 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.
- [20] Qi M X, Jiang L, Liu Y X, *et al.* Analysis of the characteristics and sources of carbonaceous aerosols in PM_{2.5} in the Beijing, Tianjin, and Langfang region, China [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2018, **15**(7), doi: 10.3390/ijerph15071483.
- [21] 苟银寅, 张凯, 李金娟, 等. 保定市大气污染变化趋势及特征[J]. *环境科学*, 2020, **41**(10): 4413-4425.
Gou Y Y, Zhang K, Li J J, *et al.* Variational trend and characteristics of air pollution in Baoding City [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(10): 4413-4425.
- [22] 吕文丽, 张凯, 支敏康, 等. 冬季 NH₃ 和液态水含量对 PM_{2.5} 中 SNA 形成的影响与敏感性分析[J]. *环境科学研究*, 2021, **34**(5): 1053-1062.
Lü W L, Zhang K, Zhi M K, *et al.* Influences of NH₃ and AWC on the formation of SNA in PM_{2.5} in winter and sensitivity analysis [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2021, **34** (5): 1053-1062.
- [23] 王慧杰, 孟晓郁, 王静, 等. 保定市空气 PM_{2.5} 中碳组分污染特征及来源分析[J]. *环境科学与技术*, 2020, **43**(9): 163-169.
Wang H J, Meng X Y, Wang J, *et al.* Pollution characteristics and source analysis of carbon components in PM_{2.5} of ambient air in Baoding City [J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, **43**(9): 163-169.
- [24] 董贵明, 唐贵谦, 张军科, 等. 北京南部城区 PM_{2.5} 中碳质组分特征[J]. *环境科学*, 2020, **41**(10): 4374-4381.

- Dong G M, Tang G Q, Zhang J K, *et al.* Characteristics of carbonaceous species in PM_{2.5} in southern Beijing [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(10): 4374-4381.
- [25] 张婷婷, 马文林, 亓学奎, 等. 北京城区PM_{2.5}有机碳和元素碳的污染特征及来源分析[J]. *环境化学*, 2018, **37**(12): 2758-2766.
- Zhang T T, Ma W L, Qi X K, *et al.* Characteristics and sources of organic carbon and elemental carbon in PM_{2.5} in the urban areas of Beijing[J]. *Environmental Chemistry*, 2018, **37**(12): 2758-2766.
- [26] 彭小乐, 郝庆菊, 温天雪, 等. 重庆市北碚城区气溶胶中有机碳和元素碳的污染特征[J]. *环境科学*, 2018, **39**(8): 3502-3510.
- Peng X L, Hao Q J, Wen T X, *et al.* Pollution characteristics of organic carbon and elemental carbon in atmospheric aerosols in Beibei District, Chongqing[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(8): 3502-3510.
- [27] Ji D S, Li J W, Shen G F, *et al.* Environmental effects of China's coal ban policy: results from in situ observations and model analysis in a typical rural area of the Beijing-Tianjin-Hebei region, China[J]. *Atmospheric Research*, 2022, **268**, doi: 10.1016/j.atmosres.2022.106015.
- [28] Fang W Z, Du K, Andersson A, *et al.* Dual-Isotope constraints on seasonally resolved source fingerprinting of black carbon aerosols in sites of the four emission hot spot regions of China [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, **123**(20): 11735-11747.
- [29] 张凯, 吕文丽, 王婉, 等. 保定市大气污染来源与燃煤治理成效[J]. *环境科学研究*, 2019, **32**(10): 1720-1729.
- Zhang K, Lv W L, Wang W, *et al.* Sources of air pollution and effects of coal combustion treatment in Baoding City[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, **32**(10): 1720-1729.
- [30] 李欢欢, 牛璨, 张凯, 等. 保定市2013~2019年秋冬季污染物浓度变化特征[J]. *中国环境科学*, 2021, **41**(7): 3076-3087.
- Li H H, Niu C, Zhang K, *et al.* Variation characteristics of pollutant concentration in autumn and winter from 2013 to 2019 in Baoding City [J]. *China Environmental Science*, 2021, **41**(7): 3076-3087.
- [31] 郑悦, 程方, 张凯, 等. 保定市大气污染特征和潜在输送源分析[J]. *环境科学研究*, 2020, **33**(2): 260-270.
- Zheng Y, Cheng F, Zhang K, *et al.* Characteristics and potential transport source identification of atmospheric pollution in Baoding City[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, **33**(2): 260-270.
- [32] 王杰, 张逸琴, 高健, 等. 2016~2018年采暖季太行山沿线城市PM_{2.5}污染特征分析[J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(11): 4521-4529.
- Wang J, Zhang Y Q, Gao J, *et al.* Characteristics of PM_{2.5} in cities along the Taihang Mountains during the heating season of 2016~2018[J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(11): 4521-4529.
- [33] 刀谓, 吉东生, 张显, 等. 京津冀及周边地区采暖季PM_{2.5}化学组分变化特征[J]. *环境科学研究*, 2021, **34**(1): 1-10.
- Dao X, Ji D S, Zhang X, *et al.* Characteristics of chemical composition of PM_{2.5} in Beijing-Tianjin-Hebei and its surrounding areas during the heating period[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2021, **34**(1): 1-10.
- [34] 姜建芳, 侯丽丽, 齐梦溪, 等. 天津市采暖季PM_{2.5}中碳组分污染特征及来源分析[J]. *生态环境学报*, 2020, **29**(6): 1181-1188.
- Jiang J F, Hou L L, Qi M X, *et al.* Pollution characteristics and sources of carbonaceous components in PM_{2.5} during heating season in Tianjin [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, **29**(6): 1181-1188.
- [35] 姜建彪, 常青, 冯媛, 等. 石家庄市大气颗粒物中有机碳和元素碳的季节变化特征[J]. *环境监控与预警*, 2017, **9**(2): 41-45.
- Jiang J B, Chang Q, Feng Y, *et al.* Seasonal variation of organic carbon and elemental carbon in atmospheric particles in Shijiazhuang [J]. *Environmental Monitoring and Forewarning*, 2017, **9**(2): 41-45.
- [36] 谢添, 曹芳, 章炎麟, 等. 2015~2019年南京北郊碳质气溶胶组成变化[J]. *环境科学*, 2022, **43**(6): 2858-2866.
- Xie T, Cao F, Zhang Y L, *et al.* Changes in carbonaceous aerosol in the northern suburbs of Nanjing from 2015 to 2019 [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(6): 2858-2866.
- [37] 张俊峰, 韩力慧, 程水源, 等. 京津冀地区典型城市大气细颗粒物碳质组分污染特征及来源[J]. *环境科学研究*, 2020, **33**(8): 1729-1739.
- Zhang J F, Han L H, Cheng S Y, *et al.* Characteristics and sources of carbon pollution of fine particulate matter in typical cities in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, **33**(8): 1729-1739.
- [38] 史国良, 陈刚, 田瑛泽, 等. 天津大气PM_{2.5}中碳组分特征和来源分析[J]. *环境污染与防治*, 2016, **38**(1): 1-7.
- Shi G L, Chen G, Tian Y Z, *et al.* Characteristic and sources of carbon fractions in PM_{2.5} in Tianjin urban area [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2016, **38**(1): 1-7.
- [39] 于涛, 刘亚妮, 任丽红, 等. 中国典型沿海城市冬季PM_{2.5}中碳组分的污染特征及来源解析[J]. *环境化学*, 2022, **41**(1): 113-124.
- Yu T, Liu Y N, Ren L H, *et al.* Pollution characteristics and sources analysis of carbon components in PM_{2.5} in winter at typical coastal cities of China [J]. *Environmental Chemistry*, 2022, **41**(1): 113-124.
- [40] Chow J C, Watson J G, Lu Z Q, *et al.* Descriptive analysis of PM_{2.5} and PM₁₀ at regionally representative locations during SJAQS/AUSPEX [J]. *Atmospheric Environment*, 1996, **30**(12): 2079-2112.
- [41] 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.
- [42] Zhao S M, Hu B, Gao W K, *et al.* Effect of the "coal to gas" project on atmospheric NO_x during the heating period at a suburban site between Beijing and Tianjin [J]. *Atmospheric Research*, 2020, **241**, doi: 10.1016/j.atmosres.2020.104977.
- [43] 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.
- [44] 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.
- [45] 张蕾, 姬亚芹, 张军, 等. 盘锦市秋冬季节PM_{2.5}中碳组分特征及来源解析[J]. *环境科学*, 2018, **39**(7): 3051-3056.
- Zhang L, Ji Y Q, Zhang J, *et al.* Characteristics and sources of carbon components in PM_{2.5} during autumn and winter in Panjin City [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(7): 3051-3056.
- [46] 牟臻, 陈庆彩, 王羽琴, 等. 西安市PM_{2.5}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_{2.5} in Xi'an [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(4): 1529-1536.

CONTENTS

| | |
|--|--|
| Research Status and Trend Analysis of Environmental and Health Risk and Control of Persistent, Mobile, and Toxic Chemicals | ZHANG Shao-xuan, CHEN An-na, CHEN Cheng-kang, <i>et al.</i> (3017) |
| Assessment of the Multidimensional Performances of Food Waste Utilization Technologies in China | YANG Guang, SHI Bo-fen, ZHOU Chuan-bin (3024) |
| Spatial Network of Urban Heat Environment in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration Based on MSPA and Circuit Theory | QIAO Zhi, CHEN Jia-yue, WANG Nan, <i>et al.</i> (3034) |
| Relationship Between Urban Spatial Pattern and Thermal Environment Response in Summer: A Case Study of Hefei City | CHEN Yuan-yuan, YAO Xia-mei, OU Chun, <i>et al.</i> (3043) |
| Assessment of Emission Reduction Effect of Major Air Pollution Control Measures on PM _{2.5} Concentrations During 13th Five-Year Period in Tianjin | XIAO Zhi-mei, XU Hong, CAI Zi-ying, <i>et al.</i> (3054) |
| Effect of Clean Heating on Carbonaceous Aerosols in PM _{2.5} During the Heating Period in Baoding | LUO Yu-qian, ZHANG Kai, ZHAO Yu-xi, <i>et al.</i> (3063) |
| Transport Influence and Potential Sources of PM _{2.5} Pollution for Nanjing | XIE Fang-jian, ZHENG Xin-mei, DOU Tao-tao, <i>et al.</i> (3071) |
| Impact of Atmospheric Circulation Patterns on Ozone Changes in the Pearl River Delta from 2015 to 2020 | WANG Yao, LIU Run, XIN Fan (3080) |
| Effects of Tropical Cyclones on Ozone Pollution in Hainan Island | FU Chuan-bo, DAN Li, TONG Jin-he, <i>et al.</i> (3089) |
| Analysis of Causes and Sources of Summer Ozone Pollution in Rizhao Based on CMAQ and HYSPLIT Models | LIN Xin, TONG Ji-long, WANG Yi-fan, <i>et al.</i> (3098) |
| Health Benefit Evaluation for PM _{2.5} as Well as O ₃ _{8h} Pollution Control in Chengdu, China from 2016 to 2020 | ZHANG Ying, TIAN Qi-qi, WEI Xiao-yu, <i>et al.</i> (3108) |
| Impacts of COVID-19 Lockdown on Air Quality in Shenzhen in Spring 2022 | LIU Chan-fang, ZHANG Ao-xing, FANG Qing, <i>et al.</i> (3117) |
| Emission Inventory of Airborne Pollutants from Biomass Combustion in Guizhou Province | WANG Yan-ni, YANG Jing-ting, HUANG Xian-feng, <i>et al.</i> (3130) |
| Main Chemical Components in Atmospheric Precipitation and Their Sources in Xi'an | ZHOU Dong, HUANG Zhi-pu, LI Si-min, <i>et al.</i> (3142) |
| Distribution, Respiratory Exposure, and Traceability of Atmospheric Microplastics in Yichang City | LIU Li-ming, WANG Chao, GONG Wen-wen, <i>et al.</i> (3152) |
| Hydrochemical Evolution in the Yarlung Zangbo River Basin | JIANG Ping, ZHANG Quan-fa, LI Si-yue (3165) |
| Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Nitrate in Surface Water of Wuding River Basin | XU Qi-feng, XIA Yun, LI Shu-jian, <i>et al.</i> (3174) |
| Seasonal Variation Characteristics and Pollution Assessment of Heavy Metals in Water and Sediment of Taipu River | LUO Peng-cheng, TU Yao-jen, SUN Ting-ting, <i>et al.</i> (3184) |
| Pollution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics in Beiyun River Basin in Beijing | JIANG Bao, SUI Shan-shan, SUN Cheng-yi, <i>et al.</i> (3198) |
| Tracking Riverine Nitrate Sources and Transformations in the Yiluo River Basin by Nitrogen and Oxygen Isotopes | GUO Wen-jing, ZHANG Dong, JIANG Hao, <i>et al.</i> (3206) |
| Distribution Characteristics and Risk Assessment of PPCPs in Surface Water and Sediments of Lakes in the Lower Reaches of the Huaihe River | WU Yu-sheng, HUANG Tian-yin, ZHANG Jia-gen, <i>et al.</i> (3217) |
| Characteristics and Driving Mechanisms of Shallow Groundwater Chemistry in Xining City | LIU Chun-yan, YU Kai-ning, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (3228) |
| Groundwater Pollution Risk Assessment in Plain Area of the Yarkant River Basin | YAN Zhi-yun, ZENG Yan-yan, ZHOU Jin-long, <i>et al.</i> (3237) |
| Composition Structure and Influence Factors of Bacterial Communities in the Miyun Reservoir | CHEN Ying, WANG Jia-wen, LIANG En-hang, <i>et al.</i> (3247) |
| Photo-Degradation Mechanism and Pathway for Tetracycline in Simulated Seawater Under Irradiation of Visible Light | XU Heng-tao, FU Xiao-hang, FENG Wei-hua, <i>et al.</i> (3260) |
| Adsorption Characteristics and Mechanism of Ammonia Nitrogen in Water by Nano Zero-valent Iron-modified Biochar | CHEN Wen-jing, SHI Jun-ling, LI Xue-ting, <i>et al.</i> (3270) |
| Removal Performance and Mechanism of Potassium Permanganate Modified Coconut Shell Biochar for Cd(II) and Ni(II) in Aquatic Environment | ZHANG Feng-zhi, WANG Dun-qiu, CAO Xing-feng, <i>et al.</i> (3278) |
| Phosphorus Adsorption in Water and Immobilization in Sediments by Lanthanum-modified Water Treatment Sludge Hydrochar | HE Li-wenze, CHEN Yu, SUN Fei, <i>et al.</i> (3288) |
| Factors Affecting Nitrate Concentrations and Nitrogen and Oxygen Isotope Values of Effluents from Waste Water Treatment Plant | ZHANG Dong, GE Wen-biao, ZHAO Ai-ping, <i>et al.</i> (3301) |
| Effects of Wastewater Treatment Processes on the Removal Efficiency of Microplastics Based on Meta-analysis | FU Li-song, HOU Lei, WANG Yan-xia, <i>et al.</i> (3309) |
| Assessment of Critical Loads of Nitrogen Deposition in Natural Ecosystems of China | HUANG Jing-wen, LIU Lei, YAN Xiao-yuan, <i>et al.</i> (3321) |
| Impacts of Climate Change and Human Activities on NDVI Change in Eastern Coastal Areas of China | JIN Yan-song, JIN Kai, WANG Fei, <i>et al.</i> (3329) |
| Ecosystem Carbon Storage in Hangzhou Bay Area Based on InVEST and PLUS Models | DING Yue, WANG Liu-zhu, GUI Feng, <i>et al.</i> (3343) |
| Soil Stoichiometry Characterization in the Oasis-desert Transition Zone of Linze, Zhangye | SUN Xue, LONG Yong-li, LIU Le, <i>et al.</i> (3353) |
| Vertical Differences in Grassland Bacterial Community Structure During Non-Growing Season in Eastern Ulansuhai Basin | LI Wen-bao, ZHANG Bo-yao, SHI Yu-jiao, <i>et al.</i> (3364) |
| Distribution Pattern of Bacterial Community in Soil Profile of <i>Larix principis-rupprechtii</i> Forest in Luya Mountain | MAO Xiao-ya, LIU Jin-xian, JIA Tong, <i>et al.</i> (3376) |
| Effects of Vegetation Types on Carbon Cycle Functional Genes in Reclaimed Soil from Open Pit Mines in the Loess Plateau | ZHAO Jiao, MA Jing, ZHU Yan-feng, <i>et al.</i> (3386) |
| Effects of Biochar Application on Soil Bacterial Community Diversity and Winter Wheat Growth in Wheat Fields | YAO Li-ru, LI Wei, ZHU Yuan-zheng, <i>et al.</i> (3396) |
| Effects of Different Planting Years of <i>Dendrocalamus brandisii</i> on Soil Fungal Community | ZHU Shu-hong, HUI Chao-mao, ZHAO Xiu-ting, <i>et al.</i> (3408) |
| Effects of Biochar Amendment on N ₂ O Emission and Its Functional Genes in Pepper Growing Soil in Tropical Areas | CHEN Qi-qi, WANG Zi-jun, CHEN Yun-zhong, <i>et al.</i> (3418) |
| Effects of Mulching and Application of Organic and Chemical Fertilizer on Greenhouse Gas Emission and Water and Nitrogen Use in Summer Maize Farmland | JIANG Hong-li, LEI Qi, ZHANG Biao, <i>et al.</i> (3426) |
| Effects of Different Types of Plastic Film Mulching on Soil Quality, Root Growth, and Yield | MU Xiao-guo, GAO Hu, LI Mei-hua, <i>et al.</i> (3439) |
| Pollution Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in Atmospheric Deposition in a Lead-zinc Smelting City Based on PMF Model | CHEN Ming, WANG Lin-ling, CAO Liu, <i>et al.</i> (3450) |
| Characterization and Health Risk of Heavy Metals in PM _{2.5} from Road Fugitive Dust in Five Cities of Yunnan Province | HAN Xin-yu, GUO Jin-yuan, SHI Jian-wu, <i>et al.</i> (3463) |
| Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Dusts and Surrounding Green Land Soils from Yellow River Custom Tourist Line in Lanzhou | LI Jun, LI Kai-ming, WANG Xiao-huai, <i>et al.</i> (3475) |
| Source Apportionment and Pollution Assessment of Soil Heavy Metal Pollution Using PMF and RF Model: A Case Study of a Typical Industrial Park in Northwest China | GAO Yue, LÜ Tong, ZHANG Yun-kai, <i>et al.</i> (3488) |
| Source Analysis of Soil Heavy Metals in Agricultural Land Around the Mining Area Based on APCS-MLR Receptor Model and Geostatistical Method | ZHANG Chuan-hua, WANG Zhong-shu, LIU Li, <i>et al.</i> (3500) |
| Source Analysis of Heavy Metals in Typical Farmland Soils Based on PCA-APCS-MLR and Geostatistics | WANG Mei-hua (3509) |
| Characteristics and Risk Evaluation of Heavy Metal Contamination in Paddy Soils in the Three Gorges Reservoir Area | LIU Ya-jun, LI Cai-xia, MEI Nan, <i>et al.</i> (3520) |
| Health Risk Assessment and Environmental Benchmark of Heavy Metals in Cultivated Land in Wanjiang Economic Zone | LIU Hai, WEI Wei, SONG Yang, <i>et al.</i> (3531) |
| Evaluation and Source Analysis of Soil Heavy Metal Pollution in a Planting Area in Wanquan District, Zhangjiakou City | AN Yong-long, YIN Xiu-lan, LI Wen-juan, <i>et al.</i> (3544) |
| Heavy Metal Concentration, Source, and Pollution Assessment in Topsoil of Chuzhou City | TANG Jin-lai, ZHAO Kuan, HU Rui-xin, <i>et al.</i> (3562) |
| Analysis on the Distribution Characteristics and Influence Mechanism of Migration and Transformation of Heavy Metals in Mining Wasteland | WEI Hong-bin, LUO Ming, XIANG Lei, <i>et al.</i> (3573) |
| Ecological Risk Assessment and Source Apportionment of Heavy Metals in Mineral Resource Base Based on Soil Parent Materials | WEI Xiao-feng, SUN Zi-jian, CHEN Zi-ran, <i>et al.</i> (3585) |
| Enrichment Characteristics of Heavy Metals and Health Risk in Different Vegetables | QI Hao, ZHUANG Jian, ZHUANG Zhong, <i>et al.</i> (3600) |
| Health Risk Assessment of Heavy Metals in Soil and Wheat Grain in the Typical Sewage Irrigated Area of Shandong Province | WANG Fei, FEI Min, HAN Dong-nui, <i>et al.</i> (3609) |
| Prediction of Cadmium Uptake Factor in Wheat Based on Machine Learning | NIU Shuo, LI Yan-ling, YANG Yang, <i>et al.</i> (3619) |