

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

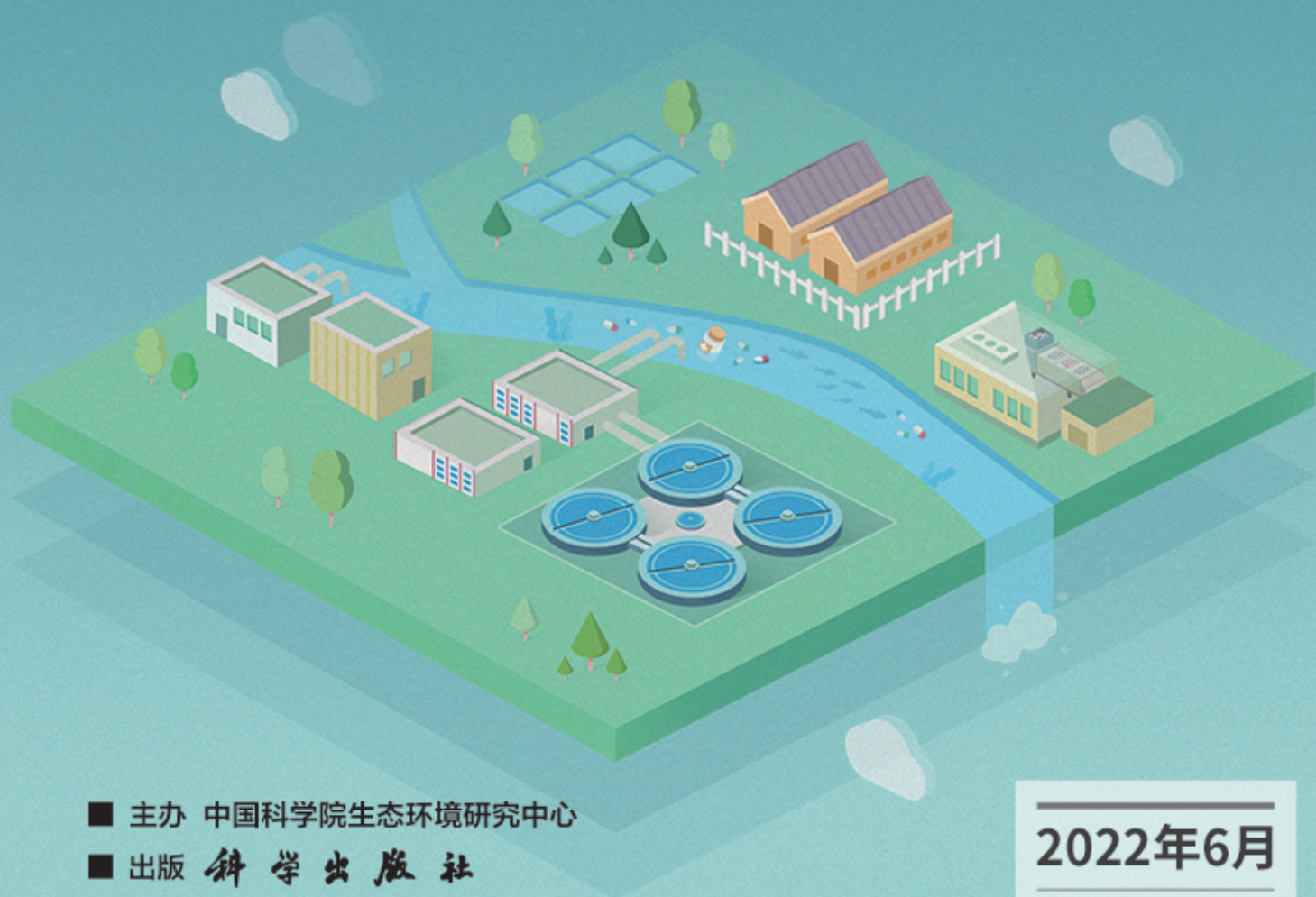
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

长江中游典型饮用水水源中药物的时空分布及风险评价

武俊梅, 魏琳, 彭晶倩, 何鹏, 施鸿媛, 汤冬梅, 吴振斌



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年6月

第43卷 第6期
Vol.43 No.6

目次

COVID-19 管控期间气象条件变化对京津冀 PM _{2.5} 浓度影响	邱雨露, 陈磊, 朱佳, 马志强, 李梓铭, 郭恒, 唐颖潇 (2831)
新冠疫情管控措施对郑州市 PM _{2.5} 浓度、粒径分布、组分和来源的影响	黄兵役, 王申博, 和兵, 薛若雨, 高更宇, 张瑞芹 (2840)
COVID-19 管控期间苏州市 PM _{2.5} 中金属元素浓度变化及来源解析	缪青, 杨倩, 吴也正, 魏恒, 周民锋, 张晓华, 邹强 (2851)
2015 ~ 2019 年南京北郊碳质气溶胶组成变化	谢添, 曹芳, 章炎麟, 林煜棋, 范美益, 宋文怀, 鲍孟盈, 项妍琨, 赵祝钰, 杨笑影, 谢锋, 张煜炯, 俞浩然, 张子金, 邢佳莉 (2858)
基于受体和化学传输的综合模型解析重庆 PM _{2.5} 来源	彭超, 李振亮, 曹云攀, 蒲茜, 方维凯, 王晓宸, 汪凌韬 (2867)
保定市冬季 PM _{2.5} 的氧化潜势特征及其影响来源分析	吴继炎, 杨池, 张春燕, 范美益, 吴爱坪, 章炎麟 (2878)
南京江北新区 PM _{2.5} 中水溶性有机氮的污染特征及其来源	关璐, 丁铖, 张毓秀, 胡建林, 于兴娜 (2888)
广西十万大山背景点 PM _{2.5} 中非极性有机气溶胶组成及来源解析	邢佳莉, 曹芳, 王谦, 张煜炯, 章炎麟 (2895)
大气多环芳烃区域迁移转化模型比较与关键影响因素: 以京津冀地区为例	张馨露, 刘世杰, 韩美丽, 苏超, 张志鹏, 马琳琳, 李洋, 程苗苗 (2906)
基于过程分析的京津冀区域典型城市臭氧成因	唐颖潇, 姚青, 蔡子颖, 丁净, 樊文雁, 杨旭, 韩素芹 (2917)
天津市 PM _{2.5} -O ₃ 复合污染特征及气象影响分析	肖致美, 李源, 孔君, 李鹏, 蔡子颖, 高璟, 徐虹, 戴运峰, 邓小文 (2928)
2016 ~ 2020 年山东省空气质量时空分布特征及影响因素分析	周梦鸽, 杨依, 孙媛, 张凤英, 李永华 (2937)
河南省臭氧污染趋势特征及敏感性变化	晏洋洋, 尹沙沙, 何秦, 秦凯, 张瑞芹 (2947)
热带气旋对珠三角秋季臭氧污染的影响	赵伟, 吕梦瑶, 卢清, 高博, 梁小明, 刘明, 孙家仁, 陈来国, 范绍佳 (2957)
武汉市夏季大气挥发性有机物实时组成及来源	苏维峰, 孔少飞, 郑煌, 陈楠, 祝波, 全继宏, 祁士华 (2966)
运城市夏季大气挥发性有机物污染特征及来源解析	温肖宇, 赵文婷, 罗淑贞, 张强, 王姝涛, 马俊杰, 刘新罡 (2979)
我国地表水新烟碱类杀虫剂对水生生物安全的威胁	范丹丹, 刘红玲, 杨柳燕 (2987)
长江中游典型饮用水水源中药物的时空分布及风险评价	武俊梅, 魏琳, 彭晶倩, 何鹏, 施鸿媛, 汤冬梅, 吴振斌 (2996)
内蒙古东北部地区地下-地表饮用水源多环芳烃污染特征与风险	张坤峰, 昌盛, 付青, 樊月婷, 王思瑞, 孙兴滨, 王山军 (3005)
不同尺度土地利用方式对地表水环境质量的影响及驱动机制	宋静雯, 张学霞, 姜东旸, 赵丞豪, 李鹏飞 (3016)
高原湖泊周边浅层地下水: 氮素时空分布及驱动因素	李桂芳, 杨恒, 叶远行, 陈清飞, 崔荣阳, 陈安强, 张丹 (3027)
青海湖沉积物重金属分布及其潜在生态风险分析	张雅然, 车霏霏, 付正辉, 许野, 李薇 (3037)
东江湖表层沉积物重金属污染特征与潜在生态风险评价	赵晓亮, 李响, 卢洪斌, 卢少勇, 王涛, 张森霖, 国晓春, 张静, 弥启欣, 刘晓贺, 宋书峰 (3048)
湖泊沉积物有机磷释放动力学特征及水质风险	刘哲哲, 倪兆奎, 刘思儒, 李晓秀, 王圣瑞 (3058)
长三角一体化示范区青浦区水体表层沉积物有机质分布特征、来源解析及污染评价	张智博, 段艳平, 涂耀仁, 罗鹏程, 高峻 (3066)
香溪河流域微塑料的分布特征及其迁移规律分析	陈圣盛, 李卫明, 张坤, 熊伟唯, 张续同, 刘子健 (3077)
城市水体微塑料垂向分布下附着细菌群落结构和功能响应	陈玉芳, 闫振华, 张燕, 赵海洲 (3088)
2015 ~ 2020 年洪泽湖浮游植物群落结构及其环境影响因子	屈宁, 邓建明, 张祯, 蔡永久, 龚志军, 李明 (3097)
嘉兴南湖不同湖区浮游植物群落结构特征与环境因子关系	王雅雯, 李迎鹤, 张博, 郭云艳, 陈俊伊, 韩松 (3106)
近 20 年来广东省农业面源污染负荷时空变化与来源分析	葛小君, 黄斌, 袁再健, 王栋栋, 王泉泉, 陈佳村, 谢真越 (3118)
长江上游平原丘陵区农业非点源污染输出特征和驱动机制	谭少军, 刘洋, 朱小婕, 刘荷, 邵景安, 邓华 (3128)
高分辨率数据驱动的流域非点源污染输出风险评估方法	顾晶晶, 冶涛涛, 董甲平, 蒋云钟, 曹引, 赵红莉 (3140)
不同面源强度影响下城市河流溶解性有机质光谱特征变化	陈旭东, 高良敏 (3149)
生态沟渠-生物滞留池组合控制农村径流污染	石雷, 杨小丽, 吴青宇, 王亦铭, 徐佳莹 (3160)
不同水力扰动强度对老化 PSMPs 在泥水两相间迁移的影响	吴香香, 艾萍, 李大鹏 (3168)
北京市中心城区屋面径流污染特征及来源分析	席玥, 郭婧, 陶蕾, 田颖, 陈吉吉, 吴悦, 徐藤, 荆红卫, 刘保献 (3177)
不同植被绿色屋顶径流水质年际变化特征	章孙逊, 张守红, 葛德, 闫婧, 杨航, 王任重远, 魏良怡, 张成玉 (3187)
可见光促有机物诱导铁还原的多相类芬顿体系强化效能与机制	曹丝雨, 许路, 付权超, 金鑫, 石炬, 金鹏康 (3195)
4 种典型抗生素在反硝化体系中的去除特性	唐佳, 陈茜, 覃牧川, 唐溪, 唐崇俭 (3204)
农业废弃物基生物炭对水溶液中镉的吸附效果与机制	龚沛云, 孙丽娟, 宋科, 孙雅菲, 秦秦, 周斌, 薛永 (3211)
腐殖酸-重金属对 ANAMMOX 菌脱氮性能的影响及其动力学分析	李芸, 崔楠, 熊星星, 黄志远, 李泽兵, 王东亮, 李朝明, 许丹, 李军 (3221)
2000 ~ 2020 年西南地区植被 NDVI 对气候变化和人类活动响应特征	徐勇, 黄雯婷, 窦世卿, 郭振东, 李欣怡, 郑志威, 靖娟利 (3230)
黄河三角洲湿地不同植被类型下土壤营养元素空间分布及其生态学特征	孙德斌, 栗云召, 于君宝, 杨继松, 杜朝红, 孙丹丹, 凌越, 马元庆, 周迪, 王雪宏, 赵佳怡 (3241)
青藏高原东北部地区表层土壤中全氟化合物的分布特征及来源解析	温祥洁, 陈朝辉, 徐维新, 吴小娟, 郝云庆, 刘伟, 印红玲, 方淑红 (3253)
西南典型“退耕还林”区土地利用/覆被变化对土壤中硒及重金属含量的影响	刘永林, 刘属灵, 吴梅, 田兴磊, 刘双燕 (3262)
贵州普定喀斯特关键带土壤重金属形态特征及风险评价	张倩, 韩贵琳 (3269)
南丹盆地东部山区土壤锆分布特征及其影响因素分析	董秋瑶, 赖书雅, 宋超, 温皓天, 严明疆, 杨振京 (3278)
神农架川金丝猴栖息地重金属污染特征及风险评价	严佳莉, 于紫玲, 余辉亮, 向明灯, 王传华 (3288)
石灰泡石钝化后两种轮作模式对重度镉污染农田土壤的利用及修复	许璐, 周春海, 刘梅, 孔辉, 李元, 黄志红 (3299)
水稻磷盈亏对镉吸收转运的影响	谭文韬, 霍洋, 周航, 仇银燕, 曾鹏, 辜娇峰, 廖柏寒 (3308)
改良剂调控下水稻镉累积和土壤溶解性有机质光谱特征的响应	罗会龙, 陈娟, 张云慧, 袁贝, 杨宾, 张昊, 杜平 (3315)
土壤真菌群落对五台山亚高山草甸退化的响应	罗正明, 赫磊, 刘晋仙, 胡砚秋, 周妍英, 郑庆荣, 柴宝峰 (3328)
小麦与不同作物多样化轮作对土壤真菌群落的影响	靳海洋, 岳俊芹, 闫雅倩, 张德奇, 杨程, 张素瑜, 李向东, 邵运辉, 方保停, 王汉芳, 秦峰 (3338)
重庆农田土壤有机碳稳定性同位素空间分布特征	廖宇琴, 龙娟, 木志坚, 文首鑫, 李翠莲, 杨志敏, 赵秀兰 (3348)
长江三角洲 2018 年土壤 NO 排放特征	廖加强, 薛金, 王文锦, 朱永慧, 朱安生, 黄凌, 王杨君, 李莉 (3357)
基于多源数据的城市扩张中热环境演变及响应	梁建设, 白永平, 杨雪蕊, 高祖桥, 李玲蔚, 张春悦, 王倩 (3365)
《环境科学》征订启事 (3004) 《环境科学》征稿简则 (3047) 信息 (3252, 3298, 3327)	

新冠疫情管控措施对郑州市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度、粒径分布、组分和来源的影响

黄兵役¹, 王申博¹, 和兵^{2*}, 薛若雨¹, 高更宇¹, 张瑞芹³

(1. 郑州大学化学学院, 郑州 450001; 2. 河南省郑州生态环境监测中心, 郑州 450007; 3. 郑州大学生态与环境学院, 郑州 450001)

摘要: 新冠肺炎疫情(COVID-19)管控期间是一次典型的极限减排情景,是研究管控措施对大气颗粒物影响的重要机会. 本研究于2020年1月16~31日利用在线观测仪器对郑州市 $\text{PM}_{2.5}$ 进行观测,分别探究管控前(2020年1月16~23日)与管控期间(2020年1月24~31日) $\text{PM}_{2.5}$ 浓度、粒径分布、化学组分、来源解析和传输影响的变化特征. 结果表明,相较于管控前,管控期间郑州市大气 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度下降4.8%. 粒径分布特征表明,管控期间0.06~1.6 μm 的颗粒物质量浓度和数浓度下降显著. $\text{PM}_{2.5}$ 组分特征表明, SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 NH_4^+ 等二次无机离子是 $\text{PM}_{2.5}$ 中占比最大的组分,管控期间 NO_3^- 浓度的下降对 $\text{PM}_{2.5}$ 的下降有显著贡献. 采用正定矩阵因子分解模型(PMF)解析 $\text{PM}_{2.5}$ 来源,结果表明郑州市 $\text{PM}_{2.5}$ 主要来源为二次源、燃烧源、机动车源、工业源和扬尘源,管控期间机动车源、工业源和扬尘源等源排放下降. 利用后向轨迹法和潜在源贡献因子法评估传输的影响,结果表明管控期间周边地区的传输对郑州市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的影响下降. 综上,未来郑州市应持续管控机动车源和工业源,并加强区域联防联控.

关键词: 郑州市; 疫情; 颗粒物; 粒径分布; 化学组分; 正定矩阵因子分解(PMF)

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)06-2840-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202109082

Influence of COVID-19 Prevention and Control Measures on $\text{PM}_{2.5}$ Concentration, Particle Size Distribution, Chemical Composition, and Source in Zhengzhou, China

HUANG Bing-yi¹, WANG Shen-bo¹, HE Bing^{2*}, XUE Ru-yu¹, GAO Geng-yu¹, ZHANG Rui-qin³

(1. College of Chemistry, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Henan Zhengzhou Ecological Environment Monitoring Center, Zhengzhou 450007, China; 3. School of Ecology and Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: The COVID-19 lockdown was a typical occurrence of extreme emission reduction, which presented an opportunity to study the influence of control measures on particulate matter. Observations were conducted from January 16 to 31, 2020 using online observation instruments to investigate the characteristics of $\text{PM}_{2.5}$ concentration, particle size distribution, chemical composition, source, and transport before (January 16-23, 2020) and during (January 24-31, 2020) the COVID-19 lockdown in Zhengzhou. The results showed that the atmospheric $\text{PM}_{2.5}$ concentration decreased by 4.8% during the control period compared with that before the control in Zhengzhou. The particle size distribution characteristics indicated that there was a significant decrease in the mass concentration and number concentration of particles in the size range of 0.06 to 1.6 μm during the control period. The chemical composition characteristics of $\text{PM}_{2.5}$ showed that secondary inorganic ions (sulfate, nitrate, and ammonium) were the dominant component of $\text{PM}_{2.5}$, and the significant increase in $\text{PM}_{2.5}$ was mainly owing to the decrease in NO_3^- concentration during the control period. The main sources of $\text{PM}_{2.5}$ identified by the positive matrix factorization (PMF) model were secondary sources, combustion sources, vehicle sources, industrial sources, and dust sources. The emissions from vehicle sources, industrial sources, and dust sources decreased significantly during the control period. The results of analyses using the backward trajectory method and potential source contribution factor method indicated that the effects of transport from surrounding areas on $\text{PM}_{2.5}$ concentration decreased during the control period. In summary, vehicle and industrial sources should be continuously controlled, and regional combined prevention and control should be strengthened in the future in Zhengzhou.

Key words: Zhengzhou; COVID-19 epidemic; particulate matter; size distribution; chemical composition; positive matrix factorization (PMF)

随着城市化进程的加快,大气细颗粒物($\text{PM}_{2.5}$)成为城市大气的重要污染物之一^[1]. 由于 $\text{PM}_{2.5}$ 比表面积大,并且在大气中寿命长,对大气能见度和人类健康造成不利影响^[2,3]. $\text{PM}_{2.5}$ 化学组分和粒径分布能反映颗粒物的来源和在大气中的演变^[4,5]. $\text{PM}_{2.5}$ 化学组分中包括水溶性离子、碳组分和地壳元素等^[6]. 水溶性离子包括水溶性钙、镁、钾和钠等金属离子以及硫酸根(SO_4^{2-})、硝酸根(NO_3^-)和铵根(NH_4^+)等二次离子(SNA). 碳组分主要包括元素碳(EC)和有机碳(OC),OC由成百上千种有机化合物组成,分为一次有机碳(POC)和二次有机碳(SOC).

Yu等^[7]的研究对郑州市冬季颗粒物组分分析表明, SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 NH_4^+ 是 $\text{PM}_{2.5}$ 化学组分中主要组分; Cheng等^[8]的研究利用大气颗粒物组分解析济南市颗粒物的来源,结果表明燃煤和生物质燃烧是济南市大气污染的主要来源.

近年来国内外专家学者针对大气颗粒物的粒径

收稿日期: 2021-09-09; 修订日期: 2021-11-05

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0212403); 郑州市大气攻关项目(20200321A)

作者简介: 黄兵役(1995~),男,硕士研究生,主要研究方向为大气颗粒物污染与来源解析, E-mail: 1033638499@qq.com

* 通信作者, E-mail: 925232064@qq.com

分布特征开展了大量研究. Shen 等^[9]的研究对长三角 $10\text{ nm} \sim 10\text{ }\mu\text{m}$ 颗粒物粒径分布特征进行分析,发现颗粒物数浓度和其粒径分布受不同来源的气团的影响显著; Qi 等^[10]的研究对长三角西部地区 $6 \sim 800\text{ nm}$ 的颗粒物进行分析,发现长三角大气中积聚模态数浓度最高,沿海地区大气中积聚模态粒子数浓度最低; 尚倩等^[11]的研究对南京冬季大气气溶胶粒子谱分布及其对能见度的影响进行分析,发现颗粒物数浓度谱具有明显的双峰型日变化特征与人类活动及大气边界层的状况变化有关; 韩冰雪等^[12]的研究对广州城区夏季大气颗粒物数浓度谱分布特征进行分析,发现颗粒物数浓度峰值通常与交通高峰及强太阳辐射相关.

随着经济的高速发展,机动车源、燃烧源、工业源和工地扬尘等排放的一次颗粒物促进了城市的 $\text{PM}_{2.5}$ 的上升^[13,14]. 郑州市作为新兴城市, $\text{PM}_{2.5}$ 已成为严重制约空气质量及威胁市民生活健康的重要因素,因此迫切需要对郑州市 $\text{PM}_{2.5}$ 的浓度、组分、粒径分布和来源进行研究. 2020 年冬季我国暴发了新型冠状病毒疫情,期间郑州市及周边省市区实施管控措施,机动车源、工业源和工地扬尘等人为源排放减少,是一次典型的极限减排情景. Xu 等^[15]的研究对新冠管控前后兰州市颗粒物数浓度的研究,结果表明疫情管控期间 PM_{10} 浓度降幅达到 50%; Liu 等^[16]的研究对杭州大气颗粒物组分特征进行研究,发现疫情管控期间机动车源和工业源等排放的一次气溶胶降幅明显,但大气中二次气溶胶和长江三角洲的传输影响对 $\text{PM}_{2.5}$ 贡献显著; 朱媛媛等^[17]的研究对“2+26”城市疫情期间污染减排的效果进行评估,结果表明气态前体物 NO_2 和 SO_2 受机动车源、工业源和扬尘源等源排放下降而降幅明显,炼焦、钢铁和火电等重点行业排放量变化较小,民用散煤排放量上升. 可见对疫情管控前后 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度、粒径分布和组分的研究能够深入了解污染源减排与颗粒物之间的内在联系.

为评估疫情管控措施对郑州市 $\text{PM}_{2.5}$ 的影响,本研究于 2020 年 1 月 16 ~ 31 日利用一系列在线监测仪器在郑州市进行连续观测,通过对比分析管控前后郑州市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度、粒径分布和组分等特征,探讨疫情管控前后郑州市 $\text{PM}_{2.5}$ 的变化规律,结合源解析模型分析污染源减排以及气团传输对 $\text{PM}_{2.5}$ 的影响,以为制定减排策略提供典型情景和数据支撑.

1 材料与方法

1.1 采样地点和时间

采样点位于郑州大学主校区资源与材料产业协

同创新中心 6 楼(图 1). 采样高度距地面约 14 m, 采样平台开阔,采样点临近郑州市西四环路,周围无大型工业、农业和高大建筑物. 观测期为 2020 年 1 月 16 ~ 31 日. 新冠疫情(COVID-19)发生后,2020 年 1 月 24 日郑州市宣布实施如交通管制和企事业停工停产等封城管控措施,1 月 24 ~ 31 日郑州市机动车和工业等典型污染源排放逐渐降低,因此将观测数据分为两部分,2020 年 1 月 16 ~ 23 日为管控前,2020 年 1 月 24 ~ 31 日为管控期间.

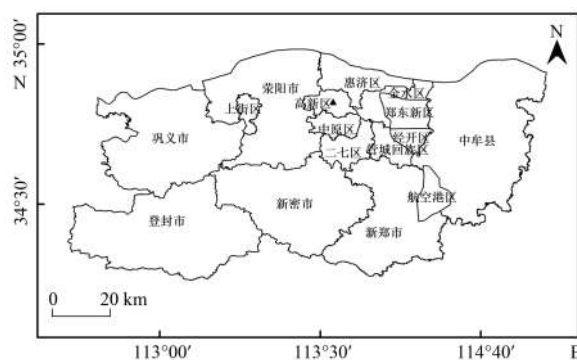


图 1 采样点位分布示意

Fig. 1 Location of the sampling site

1.2 采样仪器

采用美国 cooper environment services 公司的 xact-625 型环境空气金属在线分析仪、美国 sunset lab 公司 model-4 型全自动半连续式碳分析仪、美国赛默飞公司的 urg-9000D 气溶胶及气体组分在线离子色谱监测系统,分别对 $\text{PM}_{2.5}$ 中元素、OC 和 EC 以及水溶性离子浓度进行在线观测,各仪器原理和质控方法分析见文献[18 ~ 21]. 采用美国热电公司系列仪器监测环境大气中臭氧(O_3)、二氧化硫(SO_2)、氮氧化物(NO_x)、一氧化碳(CO)、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} . 使用武汉易谷自动公司的气象站监测气象参数,包括温度、湿度、风速和风向等.

采用电子低压撞击器(electrical low pressure impactor, ELPI+, 芬兰 Dekati 公司),实时测量颗粒物不同粒径下颗粒物浓度,采样流速为 $10.0\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$. 工作原理:颗粒物被荷电器充上一定水平的电荷,其后在低压串联的撞击器内依照空气动力学粒径分组收集^[22]. 撞击器将颗粒分成 14 级,粒径范围为 $0.006 \sim 10\text{ }\mu\text{m}$, $0.006 \sim 0.017\text{ }\mu\text{m}$ 的颗粒物测量不确定度相对较高,但整体测量的粒径分布、浓度数据经过检测表现良好,已广泛用于大气颗粒物浓度的测量^[23 ~ 25].

郑州大学点位 ELPI+ 测量颗粒物质量浓度与热电仪器测量颗粒物质量浓度相关性见图 2,观测期间二者测量的 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度相关性显著, $\text{PM}_{2.5-10}$ 质量浓度相关性较差,这主要是较大粒径的

颗粒物的密度和质量会影响 ELPI + 测量的不确定度^[26]. 热电仪器和 ELPI + 两种仪器的数值差异主要受不同检测方法影响, 仪器检测方法详见文献[27,28]. 由图 2(c) 可知郑州大学点位热电仪器测量 $PM_{2.5}$ 数据与郑州市国控点位测量 $PM_{2.5}$ 数据相关性显著, 表明郑州大学点位采样 $PM_{2.5}$ 数据可有效用于郑州市 $PM_{2.5}$ 变化趋势的评估.

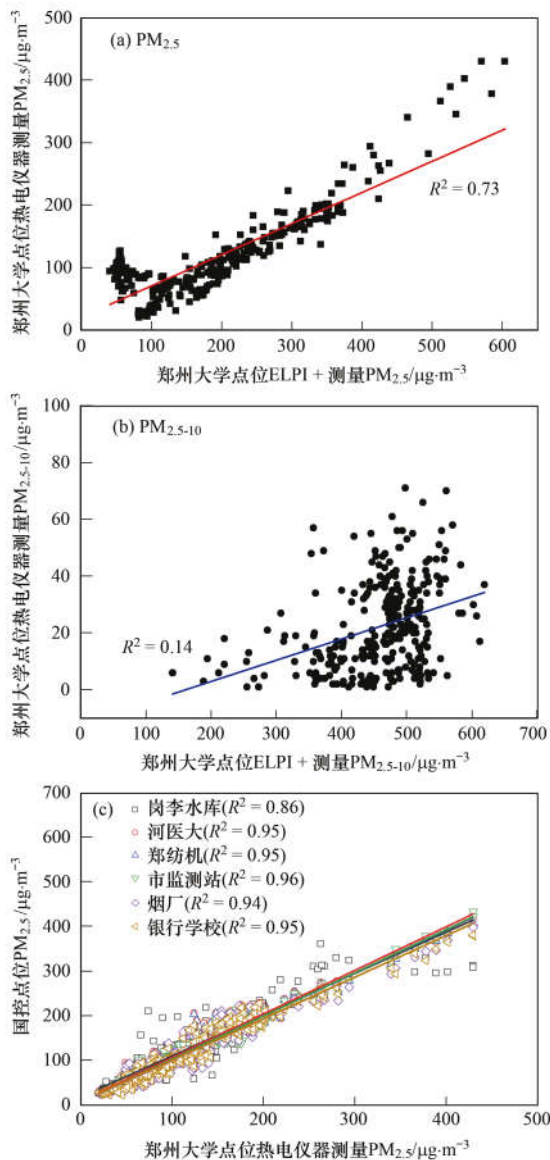


图 2 郑州大学点位的热电仪器测量值与 ELPI + 测量 $PM_{2.5}$ 和 $PM_{2.5-10}$ 的数据以及郑州市国控点位 $PM_{2.5}$ 浓度的相关性

Fig. 2 Correlation of data between thermoelectric instruments and ELPI + measurements of $PM_{2.5}$ and $PM_{2.5-10}$ at the Zhengzhou University site and correlation of $PM_{2.5}$ concentrations between the Zhengzhou University site and state-controlled sites in Zhengzhou

1.3 分析方法

组分重构是将 $PM_{2.5}$ 组分进行分类重组, 可以更好地反映样品间组分的差异. CM 和 OM 重构方法见式(1)和式(2).

$$CM = 2.29 \times [Al] + 2.49 \times [Si] + 1.63 \times [Ca] + 2.42 \times [Fe] \quad (1)$$

$$OM = 1.6 \times [OC] \quad (2)$$

式中, CM 为金属元素重构后的地壳物质, OM 为有机碳重构后的有机物, $[Al]$ 、 $[Si]$ 、 $[Ca]$ 、 $[Fe]$ 和 $[OC]$ 分别为该组分在 $PM_{2.5}$ 的浓度, ($\mu g \cdot m^{-3}$).

SOC 利用最小比值法^[29]计算:

$$SOC = OC - EC \times (OC/EC)_{\min} \quad (3)$$

式中, $(OC/EC)_{\min}$ 为采样期间 OC/EC 的最小值.

利用正定矩阵因子分解模型 (PMF) 解析 $PM_{2.5}$ 的污染来源和贡献率, 模型需要输入 $PM_{2.5}$ 组分及组分的不确定度, 利用权重分析计算各组分数据的误差, 通过最小二乘法迭代计算和误差估算最终可以得出 $PM_{2.5}$ 的主要污染源和贡献率. 其主要公式如下:

$$x_{ij} = \sum_{k=1}^p g_{ik} f_{kj} + e_{ij} \quad (4)$$

式中, x_{ij} 为 i 个样品中测得的样品 j 的浓度, g_{ik} 为源贡献矩阵, f_{kj} 为源成分谱矩阵, e_{ij} 为第 i 个样品中第 j 个样品数据的残差. PMF 计算方法详细说明见文献[30].

利用 HYSPLIT 对郑州大学点位 ($113^{\circ}32'E$, $34^{\circ}48'N$) 计算疫情管控前后 $PM_{2.5}$ 的来源和远距离传输的路径. 高度设置为 500 m, 轨迹时长为 24 h, 使用 TrajStat 进行轨迹聚类, 将轨迹覆盖区域进行网格化, 网格大小为 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$, 计算得到 PSCF 值和 WPSCF 值. PSCF 值高的网格为潜在源区. 为减少 PSCF 值误差, 将 PSCF 值通过加权计算后得到 WPSCF 值, PSCF 值和 WPSCF 值计算方法参考文献[31].

2 结果与讨论

2.1 常规污染物和气象参数

观测期间常规污染物和气象参数平均浓度见表 1, 管控前和管控期间 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 分别为 84.5% 和 91.3%, 表明郑州市大气颗粒物主要以 $PM_{2.5}$ 为主. 与管控前相比, 管控期间 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度降幅分别为 4.8% 和 11.8%, 郑州市大气颗粒物污染改善显著. 管控期间气态污染物 NO_2 、 NO_x 和 NO 浓度大幅下降, 降幅分别为 38.1%、51.9% 和 76.2%, 这可能是疫情发生后的封城政策导致机动车排放显著下降^[32]; 与之相反, 气态污染物中 SO_2 、 O_3 和 CO 的浓度上升, 增幅分别为 19.9%、75.5% 和 15.3%, 其中 O_3 的浓度增幅最大, 这可能是受春节期间温度上升和 $PM_{2.5}$ 浓度下降光强增大的影响, 期间如钢铁和炼焦等高污染产业以及散煤、生物质燃烧和供暖等

生活源排放量增大使得SO₂和CO浓度上升^[33]。观测期间常规污染物和气象参数日变化见图3,由图3(a)可知观测期间出现多次 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 超过100 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的污染过程。根据PM_{2.5}质量浓度变化和疫情管控措施实施时间,将观测期间分为不同阶段:管控前1月16~18日为污染过程1;管控前1月19

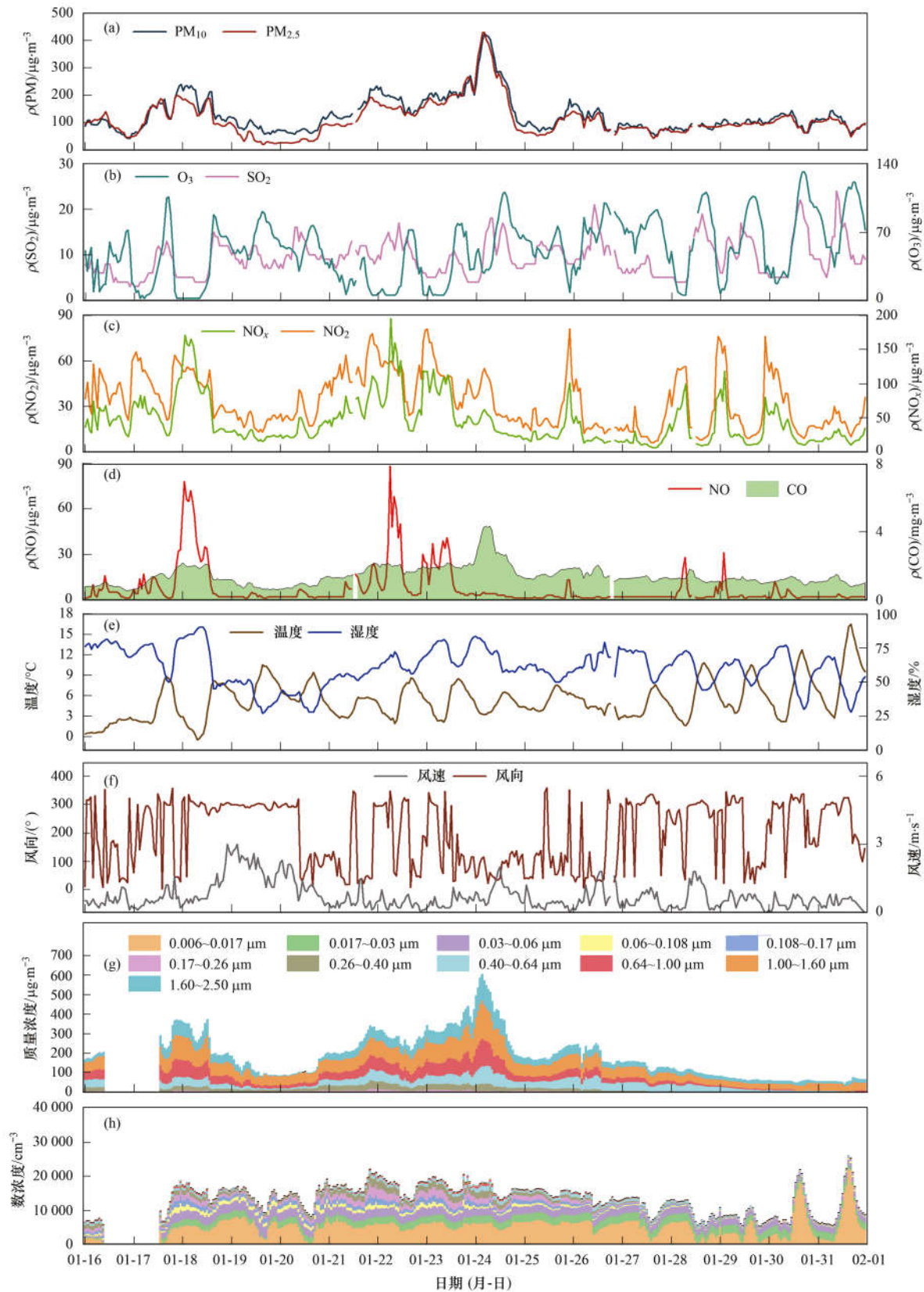


图3 观测期间常规污染物、气态污染物和颗粒物粒径分布的时间序列

Fig. 3 Time series of the concentration of conventional pollutants, gaseous pollutants, and particle size distribution during the observation period

~20 日为清洁天 1; 管控前 1 月 21~23 日为污染过程 2; 管控期间 1 月 24~25 日为污染过程 3; 管控期间 1 月 26~31 日为清洁天 2; 气象参数中, 不同时间段温度变化较小, 湿度、持续性风向和风速变化较大. 污染过程 1、污染过程 2、污染过程 3 和清洁天 2 中湿度较高 (大于 50%), 持续性风向和大于 $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的风速主要出现在清洁天 1 和清洁天 2 中. 管控期间 1 月 24 日, $\text{PM}_{2.5}$ 、 NO_x 和 CO 浓度先上升后减小, SO_2 浓度呈早晚双峰分布, 这可能是在管控初期, 风速较低和湿度较高的气象条件使得大气中污染物浓度仍在积累, 随着管控措施的实施, 污染物浓度逐渐降低, 民用散煤和供暖等生活源排放量使得 SO_2 浓度上升^[34].

表 1 观测期间常规污染物和气象参数平均浓度及降幅

Table 1 Average concentrations and decreased percentage of conventional and gaseous pollutant and meteorological parameters during the observation period

项目	管控前 ($n=192$)	管控期间 ($n=192$)	降幅 ¹⁾ /%
$\rho(\text{PM}_{2.5})/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	114.9 ± 59.4	109.4 ± 71.4	4.8
$\rho(\text{PM}_{10})/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	135.9 ± 57.7	119.8 ± 71.9	11.8
$\rho(\text{SO}_2)/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	8.5 ± 3.2	10.2 ± 4.4	-19.9
$\rho(\text{O}_3)/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	37.5 ± 27.2	65.8 ± 30.1	-75.5
$\rho(\text{NO}_2)/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	41.2 ± 15.9	25.5 ± 16.4	38.1
$\rho(\text{NO}_x)/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	59.5 ± 36.8	28.6 ± 20.7	51.9
$\rho(\text{NO})/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	12.2 ± 16.9	2.9 ± 3.7	76.2
$\rho(\text{CO})/\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$	1.3 ± 0.5	1.5 ± 0.7	-15.3
湿度/%	60.8 ± 16.4	60.3 ± 11.1	0.9
温度/ $^{\circ}\text{C}$	5 ± 3	6 ± 3	-20.0
风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	1 ± 1	1 ± 0	30.2

1) 负值表示该数值增加

2.2 粒径分布特征

$\text{PM}_{2.5}$ 粒径分布见图 3(g) 和图 3(h), 颗粒物的质量浓度随着粒径增大而增大, 其中 $1 \sim 2.5 \mu\text{m}$ 的颗粒物质量浓度在 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度中占比超过 50%, 表明 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的主导粒径为 $1 \sim 2.5 \mu\text{m}$ 的颗粒物. 管控期间, 颗粒物质量浓度下降, 但 $0.4 \sim 0.64 \mu\text{m}$ 的颗粒物质量浓度上升, 这可能主要来源

于大气中二次反应的生成^[35]. 颗粒物的数浓度随粒径增大而减小, 其中 $0.006 \sim 1 \mu\text{m}$ 的颗粒物数浓度在 $\text{PM}_{2.5}$ 数浓度中占比超过 99%, 表明 $\text{PM}_{2.5}$ 数浓度主要集中在小于 $1 \mu\text{m}$ 的颗粒物粒径段. 管控期间, $0.006 \sim 0.017 \mu\text{m}$ 和 $0.017 \sim 0.03 \mu\text{m}$ 的颗粒物数浓度出现增长, 这可能是管控前较高浓度的大粒径颗粒物会对小粒径颗粒物进行吸附^[36], 而管控期间大气中氮氧化物浓度的减少和 O_3 浓度上升, 使得光化学反应显著增强, 促进了 $0.006 \sim 0.03 \mu\text{m}$ 的颗粒物生成^[37].

管控前, 相较于清洁天, 污染过程中 $0.4 \sim 1.6 \mu\text{m}$ 的颗粒物质量浓度显著增加; 管控期间, 相较于清洁天, 污染过程中 $0.4 \sim 1.6 \mu\text{m}$ 的颗粒物质量浓度显著增加; 相较于管控前的清洁天, 管控后的清洁天 $0.4 \sim 1.6 \mu\text{m}$ 的颗粒物质量浓度显著增加; 相较于管控前的污染过程 2, 管控期间的污染过程 3 中 $0.4 \sim 1.6 \mu\text{m}$ 的颗粒物质量浓度显著增加, 这可能主要来源于大气中二次反应的生成^[38~40]; 综上, $0.4 \sim 1.6 \mu\text{m}$ 的颗粒物质量浓度对污染过程影响显著, 管控期间 $0.4 \sim 1.6 \mu\text{m}$ 的颗粒物质量浓度上升.

2.3 组分特征

观测期间 $\text{PM}_{2.5}$ 组分浓度、降幅及其对 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度降幅贡献率见表 2, $\text{PM}_{2.5}$ 组分主要为 EC、OM、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NH_4^+ 、CM、重金属 (metals) 和其他组分 (others), 二次离子 SNA 在 $\text{PM}_{2.5}$ 组分中占比均为最大, 表明郑州市 $\text{PM}_{2.5}$ 主要来自二次气溶胶. 管控期间, EC、OM、 NO_3^- 和 CM 浓度下降, SO_4^{2-} 和 NH_4^+ 浓度上升, CM 浓度降幅最大 (30.1%), 对 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度下降的贡献率为 23.9%, SO_4^{2-} 浓度上升, 这可能是管控措施如工地停工和扬尘下降等对 CM 的下降影响显著, 但钢铁和炼焦等高污染产业以及燃煤电厂和供暖等基本民生保障的产业持续生产, 使得 SO_4^{2-} 浓度反而上升; NO_3^- 浓度降幅为 4.9%, 对 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度降幅贡献率最大 (24.4%),

表 2 观测期间 $\text{PM}_{2.5}$ 组分浓度、降幅及其对 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度降幅贡献率

Table 2 Concentration and decreasing percentage of the chemical composition of $\text{PM}_{2.5}$ and the contribution proportions of the decreased mass concentration of $\text{PM}_{2.5}$ during the observation period

组分	管控前浓度/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	管控期间浓度/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	降幅 ¹⁾ /%	贡献率/%
EC	4.5	3.6	19.4	14.5
OM	17.4	17.1	1.7	4.9
SO_4^{2-}	10.5	14.3	-36.1	-63.4
NO_3^-	30.0	28.6	4.9	24.4
NH_4^+	15.9	16.6	-4.6	-12.1
CM	4.8	3.3	30.1	23.9
metals	1.5	2.5	-63.5	-16.2
others	4.5 ± 2.2	5.6 ± 2.5	-24.9	-18.5

1) 负值表示该数值增加

结合上述 NO_x 浓度的下降,表明机动车源排放的减少对 PM_{2.5} 下降有显著贡献^[41].

OC 和 EC 是 PM_{2.5} 的重要组分,可借助 OC/EC 的值判断碳组分来源,OC/EC 在 0.5 ~ 4.2 表示碳组分主要来源于机动车源^[42,43],在 2.5 ~ 10.5 表示主要来源于燃煤源^[44]. 郑州市颗粒物 OC/EC 管控前为 2.7 ± 0.5,管控期间为 3.2 ± 0.7,结合上述管控期间机动车源排放减少导致 NO_x 浓度的下降,表明管控前 PM_{2.5} 碳组分来源于机动车源和燃煤源,管控期间 PM_{2.5} 碳组分主要来源于燃煤源. POC 管控前为 (8.5 ± 5.7) μg·m⁻³,管控期间为 (6.9 ± 4.5) μg·m⁻³,表明管控措施对 POC 减排有成效. 管控期间 SOC (3.8 ± 1.4) μg·m⁻³ 明显高于管控前 (2.6 ± 1.7) μg·m⁻³,这可能因为管控期间 O₃ 的浓度上升,光化学反应增强的影响.

不同时间段 PM_{2.5} 组分质量分数见图 4,管控前,与清洁天相比,污染过程中 NO₃⁻ 质量分数上升,CM 质量分数下降;与污染过程 1 相比,污染过程 2 组分中 SO₄²⁻、NO₃⁻ 和 NH₄⁺ 的质量分数分别下降 4.0%、4.2% 和 3.6%, EC、OM、CM 和 metals 质量分数上升,OM 上升最大 (6.9%),这可能是气象条件的变化使得大气中污染物逐渐积累;管控期间,与清洁天相比,污染过程中 EC 和 NO₃⁻ 质量分数上

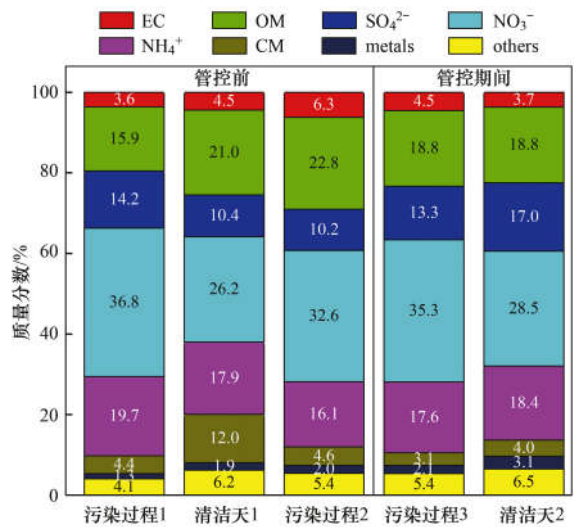


图 4 不同时间段 PM_{2.5} 组分质量分数

Fig. 4 Proportion of chemical composition of PM_{2.5} in different periods

升, SO₄²⁻ 和 NH₄⁺ 质量分数下降;与管控前的污染过程 2 相比,管控期间的污染过程 3 组分中 SO₄²⁻、NO₃⁻ 和 NH₄⁺ 的浓度和质量分数均上升,EC、OM 和 CM 浓度和质量分数均下降,这可能是管控初期大气中仍存在较高浓度的污染物,促进了大气中的二次反应^[45]. 与管控前的清洁天相比,管控期间的清洁天组分中 EC、OM 和 CM 质量分数均下降,

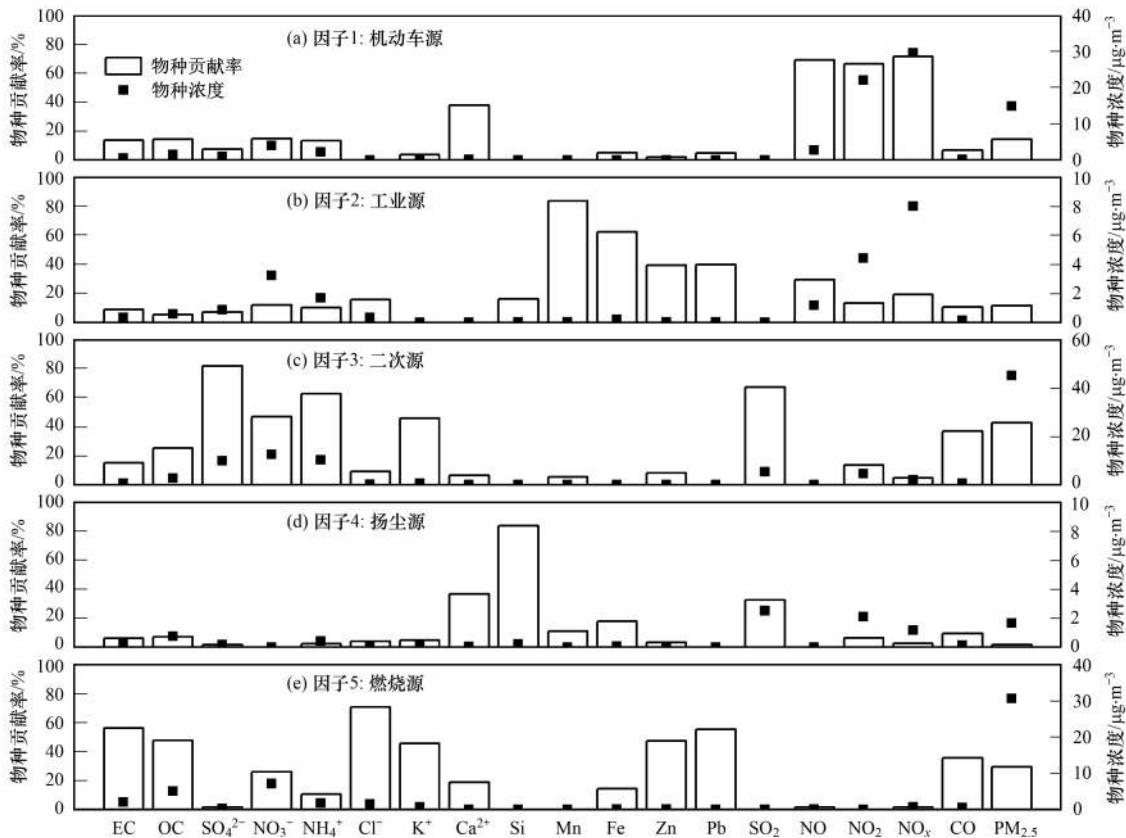


图 5 PMF 源解析因子

Fig. 5 Factor profiles identified by PMF model

SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 NH_4^+ 质量分数上升, SO_4^{2-} 质量分数上升最大(6.6%),这可能是疫情发生后郑州市采取管控措施降低了大气中的污染物浓度,但钢铁和炼焦等高污染产业、燃煤电厂和民用散煤以及供暖锅炉等生活源促进了的 SO_4^{2-} 和 NH_4^+ 生成. 综上, NO_3^- 质量分数的上升对污染过程影响显著,管控期间大气中仍有 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 NH_4^+ 生成.

2.4 来源解析

利用 PMF 对样品数据进行源解析,输入数据包

括观测期间的 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度、组分浓度(EC、OC、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NH_4^+ 、 Cl^- 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、Si、Mn、Fe、Zn 和 Pb)、气态污染物浓度(SO_2 、NO、 NO_2 、 NO_x 和 CO)和不确定度. $\text{PM}_{2.5}$ 化学组分和气态污染物可以用来分析颗粒物来源^[46],将 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度作为总变量,依次选取 4~8 个因子,分别计算 30 次,最后选取 5 个因子作为源解析结果,观测期间源解析各贡献源的物种因子见图 5. 对因子来源的判别主要依据为:因子 1 中贡献最高为 NO、 NO_2 和

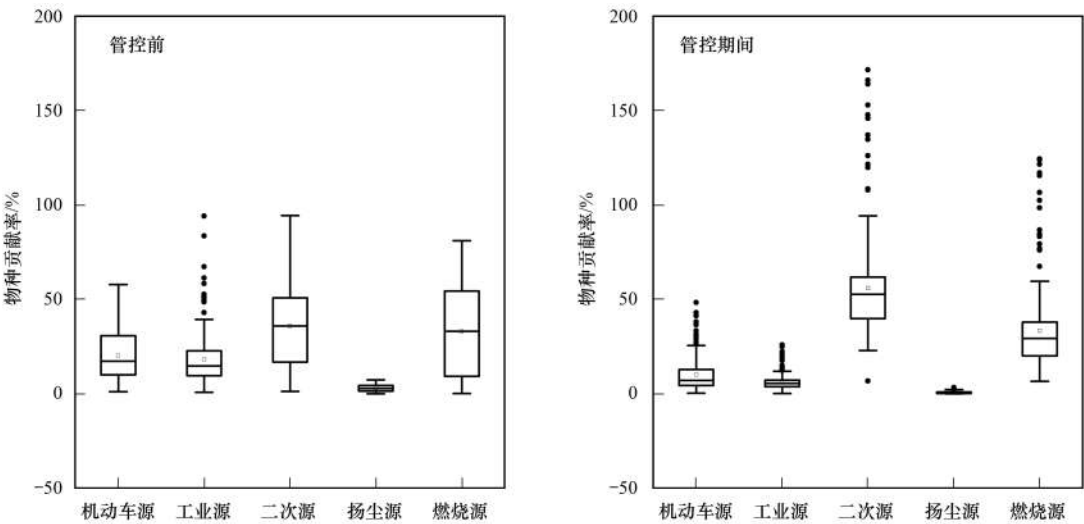


图 6 PMF 源解析各因子贡献率箱线图分布

Fig. 6 Box-plot distribution of the contribution of each factor by PMF model

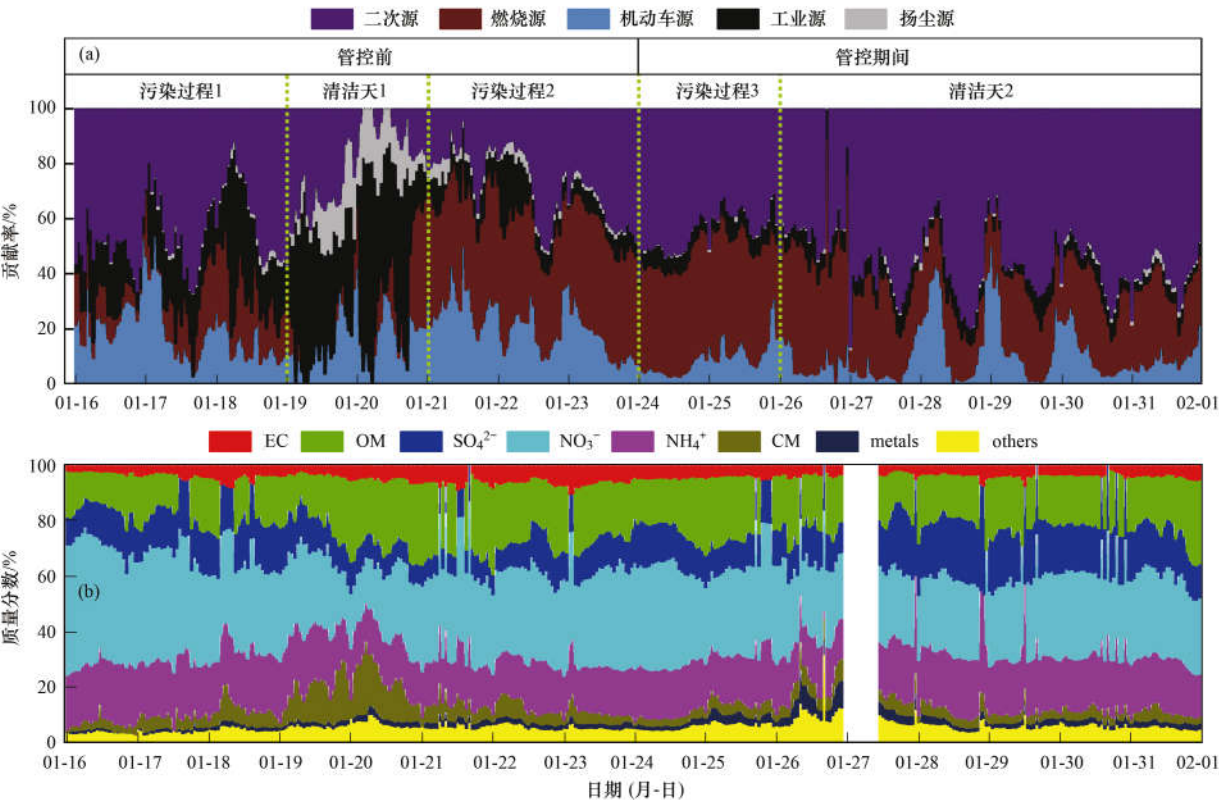


图 7 PMF 源解析各因子和 $\text{PM}_{2.5}$ 组分贡献率的时间序列

Fig. 7 Time series of source contribution of each factor by PMF model and chemical composition of $\text{PM}_{2.5}$

NO_x 指示机动车源^[47,48]；因子 2 中载荷较高的为 Mn、Fe、Zn 和 Pb,其中 Mn 和 Fe 通常与金属冶炼过程有关,轧钢厂的生产工艺会排放 Zn 和 Pb,因此指示工业源^[49,50]；因子 3 中元素载荷较高的为 SO₄²⁻、NO₃⁻ 和 NH₄⁺ 指示二次源^[51]；因子 4 中 Ca²⁺ 和 Si 被认为是地壳物质的主要组成元素,用来定义

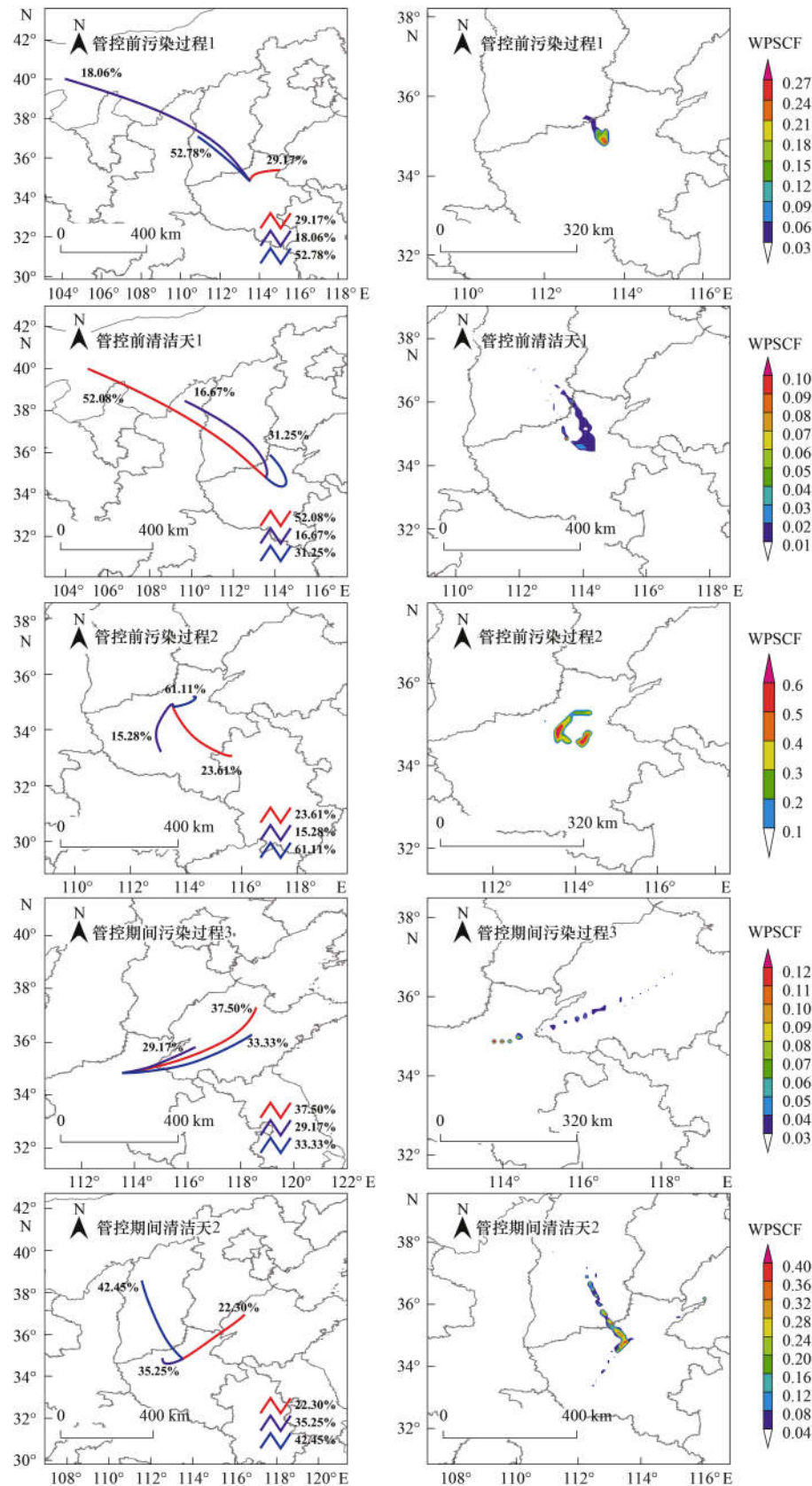


图 8 观测期间不同时间段郑州市 PM_{2.5} 轨迹聚类分析和潜在来源 (WPSCF)

Fig. 8 Back-trajectory clusters and WPSCF of PM_{2.5} in Zhengzhou in different periods

扬尘源^[52,53]; 因子 5 中 OC、EC、Cl⁻ 和 K⁺ 用来指示燃煤、燃油以及生物质燃烧的燃烧源^[54,55]。

PMF 源解析各因子贡献率箱线图分布见图 6, 各污染源贡献率依次为二次源、燃烧源、机动车源、工业源和扬尘源。管控期间燃烧源和二次源贡献率上升, 结合上述 SO₄²⁻ 浓度上升情况, 这可能是管控措施对机动车源、工业源和扬尘源削减有显著成效, 但高污染产业如燃煤电厂和民用散煤以及供暖锅炉等生活源排放持续生产, 并促进了 SO₄²⁻ 的生成。管控期间工业源贡献率下降最大(11.8%), 机动车源贡献率下降次之(9.7%)。综上, 管控期间郑州市工业源和机动车源等源排放的下降对 PM_{2.5} 的下降影响显著^[56]。

PMF 源解析各因子贡献率时间变化序列见图 7 (a), 管控前, 与清洁天相比, 污染过程中二次源、燃烧源和机动车源贡献率上升, 工业源和扬尘源贡献率下降; 与污染过程 1 相比, 污染过程 2 机动车源和燃烧源贡献率上升; 管控期间, 与清洁天相比, 污染过程中燃烧源和工业源贡献率上升, 但清洁天中燃烧源贡献率仅次于二次源贡献率; 与管控前的污染过程 2 相比, 管控期间的污染过程 3 中燃烧源、机动车源、工业源和扬尘源贡献率下降, 机动车源贡献率下降最大(13.3%), 二次源贡献率上升 19.1%; 与管控前的清洁天相比, 管控期间的清洁天中燃烧源和二次源贡献率上升, 机动车源、工业源和扬尘源贡献率均下降。综上, 管控前机动车源和燃烧源等源排放的增加对污染过程影响显著; 管控期间二次源贡献率上升, 这可能是管控期间燃煤电厂和民用散煤以及供暖锅炉等生活源促进了二次气溶胶的生成^[57]。

2.5 后向轨迹和潜在源分析

为分析管控前后区域传输的影响, 使用 HYSPLIT 模型对 PM_{2.5} 质量浓度进行轨迹分析。观测期间不同时间段郑州市 PM_{2.5} 轨迹聚类分析和潜在来源结果见图 8, 管控前, 污染过程 1 主要受到西北(山西和宁夏)、东北(新乡)方向的传输影响; 清洁天 1 主要受到西北(山西和宁夏)和东(开封)方向的传输影响; 污染过程 2 主要受到来自东北(新乡)、东南(周口)和西南(登封)方向的传输影响; 潜在来源结果表明, 污染过程 1 中焦作地区对郑州市的传输影响较大; 清洁天 1 中荥阳地区对郑州市的传输影响较大; 污染过程 2 中开封、新乡和荥阳地区对郑州市的传输影响较大。管控期间, 污染过程 3 主要受到东北(山东)方向的传输影响; 清洁天 2 主要受到西(洛阳)、西北(山西)和东北(山东)方向的传输影响。潜在来源结果表明, 污染过程 3 中开

封地区对郑州市的传输影响较大; 清洁天 2 中山西晋城、焦作和荥阳地区对郑州市的传输影响较大。综上, 郑州市 PM_{2.5} 主要受郑州市本地和临近周边地区的区域影响。污染过程中 PM_{2.5} 受远距离传输影响较小, 清洁天中 PM_{2.5} 受远距离传输影响较大。管控期间郑州市东北和西北方向的远距离传输影响增大, 但受管控措施影响, 郑州市和周边地区对 PM_{2.5} 传输影响下降, 没有出现污染过程。

3 结论

(1) 管控期间郑州市 PM_{2.5} 质量浓度下降显著。粒径分布特征表明, 0.4 ~ 1.6 μm 粒径段的颗粒物质量浓度下降对 PM_{2.5} 质量浓度下降贡献显著。PM_{2.5} 组分分析表明郑州市管控前后 PM_{2.5} 的主要组分是 SO₄²⁻、NO₃⁻ 和 NH₄⁺ 等二次气溶胶, 管控期间 NO₃⁻ 浓度的下降对 PM_{2.5} 的下降有显著贡献。

(2) PMF 源解析结果表明, 郑州市 PM_{2.5} 来源为二次源、燃烧源、机动车源、工业源和扬尘源, 二次源是郑州市 PM_{2.5} 的主要来源。管控期间机动车源、工业源和扬尘源等源排放下降显著。机动车和工业源贡献的下降可能是疫情管控期间郑州市大气中 NO_x 和颗粒物中 NO₃⁻ 浓度下降的重要因素, 二次源和燃烧源贡献的上升可能是大气中 SO₂ 和颗粒物中 SO₄²⁻ 浓度上升的重要因素。因此, 未来郑州市应持续加强对燃烧源、机动车源和工业源的管控, 可有效降低 PM_{2.5} 浓度。同时, 重视冬季大气氧化性的研究, 降低二次气溶胶的贡献。

(3) 轨迹聚类 and 潜在来源结果表明, 郑州市 PM_{2.5} 主要受郑州市本地和周边地区的影响。尽管管控期间郑州市受东北部气团的传输影响显著, 但没有发生污染过程。可见区域联防联控可有效降低传输对郑州市大气污染的影响。

参考文献:

- [1] 汪安璞. 大气气溶胶研究新动向[J]. 环境化学, 1999, 18(1): 10-15.
Wang A P. Recent trends on study of atmospheric aerosols[J]. Environmental Chemistry, 1999, 18(1): 10-15.
- [2] Feng S L, Gao D, Liao F, et al. The health effects of ambient PM_{2.5} and potential mechanisms[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2016, 128: 67-74.
- [3] Penner J E, Dong X Q, Chen Y. Observational evidence of a change in radiative forcing due to the indirect aerosol effect[J]. Nature, 2004, 427(6971): 231-234.
- [4] Zhao L, Wang L T, Tan J H, et al. Changes of chemical composition and source apportionment of PM_{2.5} during 2013-2017 in urban Handan, China[J]. Atmospheric Environment, 2019, 206: 119-131.
- [5] Sloane C S, Watson J, Chow J, et al. Size-segregated fine particle measurements by chemical species and their impact on visibility impairment in Denver[J]. Atmospheric Environment.

- Part A. General Topics, 1991, **25**(5-6): 1013-1024.
- [6] Zhang R Y, Wang G H, Guo S, *et al.* Formation of urban fine particulate matter [J]. *Chemical Reviews*, 2015, **115** (10): 3803-3855.
- [7] Yu F, Wang Q, Yan Q S, *et al.* Particle size distribution, chemical composition and meteorological factor analysis: A case study during wintertime snow cover in Zhengzhou, China [J]. *Atmospheric Research*, 2018, **202**: 140-147.
- [8] Cheng M T, Tang G Q, Lv B, *et al.* Source apportionment of PM_{2.5} and visibility in Jinan, China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2021, **102**: 207-215.
- [9] Shen L J, Wang H L, Lv S, *et al.* Observation of aerosol size distribution and new particle formation at a coastal city in the Yangtze River Delta, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **565**: 1175-1184.
- [10] Qi X M, Ding A J, Nie W, *et al.* Aerosol size distribution and new particle formation in the western Yangtze River Delta of China: 2 years of measurements at the SORPES station [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, **15** (21): 12445-12464.
- [11] 尚倩, 李子华, 杨军, 等. 南京冬季大气气溶胶粒子谱分布及其对能见度的影响[J]. *环境科学*, 2011, **32**(9): 2750-2760.
- Shang Q, Li Z H, Yang J, *et al.* Size distributions of aerosol particles and the impact on visibility in winter of Nanjing [J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(9): 2750-2760.
- [12] 韩冰雪, 张国华, 毕新慧, 等. 广州城区夏季大气颗粒物数浓度谱分布特征[J]. *环境科学研究*, 2015, **28**(2): 198-204.
- Han B X, Zhang G H, Bi X H, *et al.* Pollution characteristics of atmospheric particle size and number concentrations during summer in urban area of Guangzhou [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2015, **28**(2): 198-204.
- [13] Tian Y Z, Liu X, Huo R Q, *et al.* Organic compound source profiles of PM_{2.5} from traffic emissions, coal combustion, industrial processes and dust [J]. *Chemosphere*, 2021, **278**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.130429.
- [14] Streets D G, Waldhoff S T. Present and future emissions of air pollutants in China: SO₂, NO_x, and CO [J]. *Atmospheric Environment*, 2000, **34**(3): 363-374.
- [15] Xu J Z, Ge X L, Zhang X H, *et al.* COVID-19 Impact on the concentration and composition of submicron particulate matter in a Typical City of northwest China [J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, **47**(19), doi: 10.1029/2020GL089035.
- [16] Liu L, Zhang J, Du R G, *et al.* Chemistry of atmospheric fine particles during the COVID-19 pandemic in a megacity of eastern China [J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, **48**(2), doi: 10.1029/2020GL091611.
- [17] 朱媛媛, 汪巍, 高愈霄, 等. 疫情期间“2+26”城市污染减排成效评估[J]. *中国环境科学*, 2021, **41**(2): 505-516.
- Zhu Y Y, Wang W, Gao Y X, *et al.* Assessment of emission reduction effect in Beijing, Tianjin and surrounding 26 cities from January to March in 2020 during the epidemic of COVID-19 [J]. *China Environmental Science*, 2021, **41**(2): 505-516.
- [18] 杨留明, 王申博, 郝祺, 等. 郑州市 PM_{2.5} 中水溶性离子特征及来源分析[J]. *环境科学*, 2019, **40**(7): 2977-2984.
- Yang L M, Wang S B, Hao Q, *et al.* Characteristics and source analysis of water-soluble ions in PM_{2.5} in Zhengzhou [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(7): 2977-2984.
- [19] 徐虹, 殷磊. 在线气体组分及气溶胶监测系统对灰霾天气的分析[J]. *绿色科技*, 2014, (10): 182-183.
- Xu H, Yin L. An analysis of dust-haze weather by online gas components and aerosol monitoring system [J]. *Journal of Green Science and Technology*, 2014, (10): 182-183.
- [20] 王申博, 余雪, 赵庆炎, 等. 郑州市两次典型大气重污染过程成因分析[J]. *中国环境科学*, 2018, **38**(7): 2425-2431.
- Wang S B, Yu X, Zhao Q Y, *et al.* Analysis of the formation of two typical atmospheric heavy pollution episodes in Zhengzhou, China [J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(7): 2425-2431.
- [21] 安欣欣. 有机碳元素碳半连续分析仪的使用与维护[J]. *分析仪器*, 2015, (2): 90-93.
- An X X. Use and maintenance of semi-continuous OCEC carbon aerosol analyzer [J]. *Analytical Instrument*, 2015, (2): 90-93.
- [22] 李国申, 李惠彬, 高鸿恩. 基于 ELPI 测量系统的撞击器分离特性曲线刻度[J]. *中国粉体技术*, 2012, **18**(3): 10-13.
- Li G S, Li H B, Gao H E. Calibration of impactor separate performance curve based on ELPI measurement system [J]. *China Powder Science and Technology*, 2012, **18**(3): 10-13.
- [23] Price H D, Stahlmecke B, Arthur R, *et al.* Comparison of instruments for particle number size distribution measurements in air quality monitoring [J]. *Journal of Aerosol Science*, 2014, **76**: 48-55.
- [24] Rosenberger T, Münzer A, Kiesler D, *et al.* Ejector-based sampling from low-pressure aerosol reactors [J]. *Journal of Aerosol Science*, 2018, **123**: 105-115.
- [25] Li T K, Dai Q L, Bi X H, *et al.* Size distribution and chemical characteristics of particles from crop residue open burning in North China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2021, **109**: 66-76.
- [26] Held A, Zerrath A, McKeon U, *et al.* Aerosol size distributions measured in urban, rural and high-alpine air with an electrical low pressure impactor (ELPI) [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(36): 8502-8512.
- [27] Lamminen E. Accurate measurement of nanoparticle charge, number and size with the ELPI + TM instrument [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2011, **304**, doi: 10.1088/1742-6596/304/1/012064.
- [28] 杨书申, 邵龙义, 龚铁强, 等. 大气颗粒物浓度检测技术及其发展[J]. *北京工业职业技术学院学报*, 2005, **4**(1): 36-39.
- Yang S S, Shao L Y, Gong T Q, *et al.* An overview of the monitoring technology for airborne particulate concentrations [J]. *Journal of Beijing Vocational & Technical Institute of Industry*, 2005, **4**(1): 36-39.
- [29] 张程, 于兴娜, 安俊琳, 等. 南京北郊不同大气污染程度下气溶胶化学组分特征[J]. *环境科学*, 2017, **38**(12): 4932-4942.
- Zhang C, Yu X N, An J L, *et al.* Aerosol chemical characteristics for different air pollution levels in north suburban Nanjing [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(12): 4932-4942.
- [30] Song L L, Dai Q L, Feng Y C, *et al.* Estimating uncertainties of source contributions to PM_{2.5} using moving window evolving dispersion normalized PMF [J]. *Environmental Pollution*, 2021, **286**, doi: 10.1016/j.envpol.2021.117576.
- [31] Wang Y Q, Zhang X Y, Arimoto R. The contribution from distant dust sources to the atmospheric particulate matter loadings at XiAn, China during spring [J]. *Science of the Total Environment*, 2006, **368**(2-3): 875-883.
- [32] 王申博, 范相阁, 和兵, 等. 河南省春节和疫情影响情景下 PM_{2.5} 组分特征[J]. *中国环境科学*, 2020, **40**(12): 5115-

5123.
Wang S B, Fan X G, He B, *et al.* Chemical composition characteristics of PM_{2.5} in Henan province during the Spring Festival and COVID-19 outbreak [J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(12): 5115-5123.
- [33] Wang S B, Yin S S, Zhang R Q, *et al.* Insight into the formation of secondary inorganic aerosol based on high-time-resolution data during haze episodes and snowfall periods in Zhengzhou, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **660**: 47-56.
- [34] Septiani R, Huboyo H S, Sumiyati S. Evaluation of cofiring application in power plant's coal combustion[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, **802**, doi: 10.1088/1755-1315/802/1/012057.
- [35] 谢丹丹, 祁建华, 张瑞峰. 青岛不同强度霾天气溶胶中二次无机离子的生成及粒径分布[J]. *环境科学*, 2017, **38**(7): 2667-2678.
Xie D D, Qi J H, Zhang R F. Formation and size distribution of the secondary aerosol inorganic ions in different intensity of haze in Qingdao, China[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(7): 2667-2678.
- [36] 余飞. 郑州市大气典型污染过程研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2017.
Yu F. Analysis of typical air pollution process in Zhengzhou [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2017.
- [37] 田云, 邹宇, 殷长秦, 等. 大气光化学反应高发季节 NO_x、NO₂ 和 O₃ 污染特征[J]. *环境科学与技术*, 2019, **42**(2): 74-80.
Tian Y, Zou Y, Yin C Q, *et al.* Pollution characteristics of NO_x, NO₂ and O₃ during high incidence season of atmospheric photochemical reaction [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, **42**(2): 74-80.
- [38] Wehner B, Birmili W, Gnauk T, *et al.* Particle number size distributions in a street canyon and their transformation into the urban-air background: measurements and a simple model study [J]. *Atmospheric Environment*, 2002, **36**(13): 2215-2223.
- [39] Guo S, Hu M, Zamora M L, *et al.* Elucidating severe urban haze formation in China[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, **111**(49): 17373-17378.
- [40] Kittelson D B. Engines and nanoparticles: a review[J]. *Journal of Aerosol Science*, 1998, **29**(5-6): 575-588.
- [41] 苗青青, 姜楠, 张瑞芹, 等. 中原城市群典型城市秋冬季大气 PM_{2.5} 污染特征及溯源[J]. *环境科学*, 2021, **42**(1): 19-29.
Miao Q Q, Jiang N, Zhang R Q, *et al.* Characteristics and sources of PM_{2.5} pollution in typical cities of the central plains urban agglomeration in autumn and winter[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(1): 19-29.
- [42] Watson J G, Chow J C, Houck J E. PM_{2.5} chemical source profiles for vehicle exhaust, vegetative burning, geological material, and coal burning in Northwestern Colorado during 1995 [J]. *Chemosphere*, 2001, **43**(8): 1141-1151.
- [43] Zhang G, Li J, Li X D, *et al.* Impact of anthropogenic emissions and open biomass burning on regional carbonaceous aerosols in South China[J]. *Environmental Pollution*, 2010, **158**(11): 3392-3400.
- [44] Chen Y J, Zhi G R, Feng Y L, *et al.* Measurements of emission factors for primary carbonaceous particles from residential raw - coal combustion in China[J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, **33**(20), doi: 10.1029/2006GL026966.
- [45] Chan C K, Yao X H. Air pollution in mega cities in China[J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(1): 1-42.
- [46] Harrison R M, Beddows D, Dall'Osto M, *et al.* PMF analysis of wide-range particle size spectra collected on a major highway[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **45**(13): 5522-5528.
- [47] Lanz V A, Alfara M R, Baltensperger U, *et al.* Source apportionment of submicron organic aerosols at an urban site by factor analytical modelling of aerosol mass spectra [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2007, **7**(6): 1503-1522.
- [48] Rivas I, Beddows D C S, Amato F, *et al.* Source apportionment of particle number size distribution in urban background and traffic stations in four European cities [J]. *Environment International*, 2020, **135**, doi: 10.1016/j.envint.2019.105345.
- [49] 于扬, 岑况, Norra S, 等. 北京市 PM_{2.5} 中主要重金属元素污染特征及季节变化分析[J]. *现代地质*, 2012, **26**(5): 975-982.
Yu Y, Cen K, Norra S, *et al.* Concentration characteristics and seasonal trend of main heavy metal elements of PM_{2.5} in Beijing [J]. *Geoscience*, 2012, **26**(5): 975-982.
- [50] Yu L D, Wang G F, Zhang R J, *et al.* Characterization and source apportionment of PM_{2.5} in an urban environment in Beijing [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2013, **13**(2): 574-583.
- [51] 魏哲, 侯立泉, 魏巍, 等. 结合 WRF/Chem 和 PMF 方法的邯郸市 PM_{2.5} 源解析[J]. *环境科学与技术*, 2017, **40**(11): 67-74.
Wei Z, Hou L Q, Wei W, *et al.* Source apportionment of PM_{2.5} in Handan City using a combined method of WRF/Chem and PMF model[J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **40**(11): 67-74.
- [52] Callén M S, De La Cruz M T, López J M, *et al.* Comparison of receptor models for source apportionment of the PM₁₀ in Zaragoza (Spain)[J]. *Chemosphere*, 2009, **76**(8): 1120-1129.
- [53] Mazzei F, D'Alessandro A, Lucarelli F, *et al.* Characterization of particulate matter sources in an urban environment[J]. *Science of the Total Environment*, 2008, **401**(1-3): 81-89.
- [54] Yamasoe M A, Artaxo P, Miguel A H, *et al.* Chemical composition of aerosol particles from direct emissions of vegetation fires in the Amazon Basin: water-soluble species and trace elements[J]. *Atmospheric Environment*, 2000, **34**(10): 1641-1653.
- [55] Yudovich Y E, Ketris M P. Chlorine in coal: A review[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2005, **67**(1-2): 127-144.
- [56] Wen L Y, Yang C, Liao X L, *et al.* Investigation of PM_{2.5} pollution during COVID-19 pandemic in Guangzhou, China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2022, **115**: 443-452.
- [57] Shi X Q, Brasseur G P. The response in air quality to the reduction of Chinese economic activities during the COVID-19 outbreak[J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, **47**(11), doi: 10.1029/2020GL088070.

CONTENTS

Impacts of Changes in Meteorological Conditions During COVID-19 Lockdown on PM _{2.5} Concentrations over the Jing-Jin-Ji Region	QIU Yu-lu, CHEN Lei, ZHU Jia, <i>et al.</i> (2831)
Influence of COVID-19 Prevention and Control Measures on PM _{2.5} Concentration, Particle Size Distribution, Chemical Composition, and Source in Zhengzhou, China	 HUANG Bing-yi, WANG Shen-bo, HE Bing, <i>et al.</i> (2840)
Concentration Variation and Source Analysis of Metal Elements in PM _{2.5} During COVID-19 Control in Suzhou	MIAO Qing, YANG Qian, WU Ye-zheng, <i>et al.</i> (2851)
Changes in Carbonaceous Aerosol in the Northern Suburbs of Nanjing from 2015 to 2019	XIE Tian, CAO Fang, ZHANG Yan-lin, <i>et al.</i> (2858)
Source Apportionment of PM _{2.5} Based on Hybrid Chemical Transport and Receptor Model in Chongqing	PENG Chao, LI Zhen-liang, CAO Yun-qing, <i>et al.</i> (2867)
Analysis on the Characteristics of Oxidation Potential and Influence Sources of PM _{2.5} in Baoding City in Winter	WU Ji-yan, YANG Chi, ZAHNG Chun-yan, <i>et al.</i> (2878)
Pollution Characteristics and Sources of Water-soluble Organic Nitrogen in PM _{2.5} in Jiangbei New Area, Nanjing	GUAN Lu, DING Cheng, ZHANG Yu-xiu, <i>et al.</i> (2888)
Organic Aerosols and Source Analysis of Fine Particles in the Background of Shiwanda Mountain, Guangxi	XING Jia-li, CAO Fang, WANG Qian, <i>et al.</i> (2895)
Comparison of Regional Transportation and Transformation Models of Atmospheric Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Research on Key Influencing Factors: Take the Beijing-Tianjin-Hebei Region as Example	ZHANG Xin-lu, LIU Shi-jie, HAN Mei-li, <i>et al.</i> (2906)
Exploring Formation of Ozone in Typical Cities in Beijing-Tianjin-Hebei Region Using Process Analysis	TANG Ying-xiao, YAO Qing, CAI Zi-ying, <i>et al.</i> (2917)
Characteristics and Meteorological Factors of PM _{2.5} -O ₃ Compound Pollution in Tianjin	XIAO Zhi-mei, LI Yuan, KONG Jun, <i>et al.</i> (2928)
Spatio-temporal Characteristics of Air Quality and Influencing Factors in Shandong Province from 2016 to 2020	ZHOU Meng-ge, YANG Yi, SUN Yuan, <i>et al.</i> (2937)
Trend Changes in Ozone Pollution and Sensitivity Analysis of Ozone in Henan Province	YAN Yang-yang, YIN Sha-sha, HE Qin, <i>et al.</i> (2947)
Effects of Tropical Cyclones on Ozone Pollution in the Pearl River Delta in Autumn	ZHAO Wei, LÜ Meng-yao, LU Qing, <i>et al.</i> (2957)
Real-time Composition and Sources of VOCs in Summer in Wuhan	SU Wei-feng, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i> (2966)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Summer in Yuncheng City	WEN Xiao-yu, ZHAO Wen-ting, LUO Shu-zhen, <i>et al.</i> (2979)
Neonicotinoid Insecticides Threaten Surface Waters at the National Scale in China	FAN Dan-dan, LIU Hong-ling, YANG Liu-yan (2987)
Spatiotemporal Distribution and Risk Assessment of Pharmaceuticals in Typical Drinking Water Sources in the Middle Reaches of the Yangtze River	 WU Jun-mei, WEI Lin, PENG Jing-qian, <i>et al.</i> (2996)
Pollution Characteristics and Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Underground and Surface Drinking Water Sources in Northeast Inner Mongolia	 ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, FU Qing, <i>et al.</i> (3005)
Impact of Land Use Types at Different Scales on Surface Water Environment Quality and Its Driving Mechanism	SONG Jing-wen, ZHANG Xue-xia, JIANG Dong-yang, <i>et al.</i> (3016)
Shallow Groundwater Around Plateau Lakes: Spatiotemporal Distribution of Nitrogen and Its Driving Factors	LI Gui-fang, YANG Heng, YE Yuan-hang, <i>et al.</i> (3027)
Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Lake Qinghai	ZHANG Ya-ran, CHE Fei-fei, FU Zheng-hui, <i>et al.</i> (3037)
Analysis of Heavy Metal Pollution Characteristics and Potential Ecological Risks of Surface Sediments in Dongjiang Lake	ZHAO Xiao-liang, LI Xiang, LU Hong-bin, <i>et al.</i> (3048)
Kinetic Release Characteristics of Organic Phosphorus of Sediment-water and Water Quality Risks	LIU Zhe-zhe, NI Zhao-kui, LIU Si-ru, <i>et al.</i> (3058)
Distribution Characteristics, Source Analysis, and Pollution Evaluation of Organic Matter in Surface Sediments of Qingpu District, Yangtze River Delta Integration Demonstration Area	 ZHANG Zhi-bo, DUAN Yan-ping, TU Yao-jen, <i>et al.</i> (3066)
Distribution Characteristics of Microplastics and Their Migration Patterns in Xiangxi River Basin	CHEN Sheng-sheng, LI Wei-ming, ZHANG Kun, <i>et al.</i> (3077)
Community Structure and Microbial Function Responses of Biofilms Colonizing on Microplastics with Vertical Distribution in Urban Water	 CHEN Yu-fang, YAN Zhen-hua, ZHANG Yan, <i>et al.</i> (3088)
Community Structure of Phytoplankton and Environmental Impact Factors in Lake Hongze from 2015 to 2020	QU Ning, DENG Jian-ming, ZHANG Zhen, <i>et al.</i> (3097)
Structural Characteristics of Zooplankton and Phytoplankton Communities and Its Relationship with Environmental Factors in Different Regions of Nanhu Lake in Jiaxing City	 WANG Ya-wen, LI Ying-he, ZHANG Bo, <i>et al.</i> (3106)
Temporal and Spatial Variation Characteristics and Source Analysis of Agricultural Non-point Source Pollution Load in Guangdong During the Past 20 Years	 GE Xiao-jun, HUANG Bin, YUAN Zai-jian, <i>et al.</i> (3118)
Output Characteristics and Driving Mechanism of Agricultural Non-point Source (AGNPS) Pollutant in Plain and Valley Region of Upper Yangtze River, China	 TAN Shao-jun, LIU Yang, ZHU Xiao-jie, <i>et al.</i> (3128)
Risk Assessment Method of Non-point Source Pollution Output for Watershed Using High Resolution Data	GU Jing-jing, YE Yun-tao, DONG Jia-ping, <i>et al.</i> (3140)
Spectral Characteristics Change in Dissolved Organic Matter in Urban River Under the Influences of Different Intensities of Non-point Source Pollution	CHEN Xu-dong, GAO Liang-min (3149)
Combination of Ecological Ditch and Bioretention Pond to Control Rural Runoff Pollution	SHI Lei, YANG Xiao-li, WU Qing-yu, <i>et al.</i> (3160)
Influence of Different Hydraulic Disturbance Intensities on the Migration of Aged PSMPs Between Sediment and Water	WU Xiang-xiang, AI Ping, LI Da-peng (3168)
Analysis of Pollution Characteristics and Sources of Rainfall Runoff from Roofs in the Central District of Beijing	XI Yue, GUO Jing, TAO Lei, TIAN Ying, <i>et al.</i> (3177)
Inter-annual Changes in Runoff Quality from Green Roofs with Different Vegetation	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, GE De, <i>et al.</i> (3187)
Effectivity of Multiphase Fenton-like System of Iron Reduction Induced by Bisphenol A Authigenic Photoelectron	CAO Si-yu, XU Lu, FU Quan-chao, <i>et al.</i> (3195)
Removal Characteristics of Four Typical Antibiotics in Denitrification System	TANG Jia, CHEN Xi, QIN Mu-chuan, <i>et al.</i> (3204)
Adsorption Capacity and Mechanism of Biochar Derived from Typical Agricultural Wastes for Cadmium in Aqueous Solutions	GONG Pei-yun, SUN Li-juan, SONG Ke, <i>et al.</i> (3211)
Effect of Humic Acid-Heavy Metals on the Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX Bacteria and Its Kinetic Analysis	LI Yun, CUI Nan, XIONG Xing-xing, <i>et al.</i> (3221)
Responding Mechanism of Vegetation Cover to Climate Change and Human Activities in Southwest China from 2000 to 2020	XU Yong, HUANG Wen-ting, DOU Shi-qing, <i>et al.</i> (3230)
Spatial Distribution and Eco-stoichiometric Characteristics of Soil Nutrient Elements Under Different Vegetation Types in the Yellow River Delta Wetland	 SUN De-bin, LI Yun-zhao, YU Jun-bao, <i>et al.</i> (3241)
Distribution Characteristics and Source Apportionment of Perfluoroalkyl Substances in Surface Soils of the Northeast Tibetan Plateau	 WEN Xiang-jie, CHEN Zhao-hui, XU Wei-xin, <i>et al.</i> (3253)
Effect of Land Use/Land Cover Change on the Concentration of Se and Heavy Metals in Soils from a "Return Cropland to Forest" Area, Southwest China	 LIU Yong-lin, LIU Shu-ling, WU Mei, <i>et al.</i> (3262)
Speciation Characteristics and Risk Assessment of Soil Heavy Metals from Puding Karst Critical Zone, Guizhou Province	 ZHANG Qian, HAH Gui-lin (3269)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Germanium in Soil in the Eastern Mountainous Area of the Nanyang Basin	DONG Qiu-yao, LAI Shu-ya, SONG Chao, <i>et al.</i> (3278)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Risk Assessment of Golden Snub-nosed Monkey (<i>Rhinopithecus roxellana</i>) Habitat in Shennongjia Mountains	 YAN Jia-li, YU Zi-ling, YU Hui-liang, <i>et al.</i> (3288)
Utilization and Remediation of Heavily Cadmium-Contaminated Agricultural Soils by Two Crop Rotation Patterns After Lime and Sepiolite Passivation	 XU Lu, ZHOU Chun-hai, LIU Mei, <i>et al.</i> (3299)
Effects of Phosphorus Sufficiency and Deficiency on Cadmium Uptake and Transportation by Rice	TAN Wen-tao, HUO Yang, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (3308)
Responses of Cd Accumulation in Rice and Spectral Characteristics of Soil Dissolved Organic Matter Regulated by Soil Amendments	LUO Hui-long, CHEN Juan, ZHANG Yun-hui, <i>et al.</i> (3315)
Responses of Soil Fungal Communities to Subalpine Meadow Degradation in Mount Wutai	LUO Zheng-ming, HE Lei, LIU Jin-xian, <i>et al.</i> (3328)
Response of Soil Fungal Communities in Diversified Rotations of Wheat and Different Crops	JIN Hai-yang, YUE Jun-qin, YAN Ya-qian, <i>et al.</i> (3338)
Spatial Characterization of Stable Isotope Composition of Organic Carbon from Farmland Soils in Chongqing	LIAO Yu-qin, LONG Juan, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (3348)
Characteristics of Soil NO Emissions in the Yangtze River Delta Region for Year 2018	LIAO Jia-qiang, XUE Jin, WANG Wen-jin, <i>et al.</i> (3357)
Thermal Environment Evolution and Response Mechanism of Urban Sprawl Based on Multi-source Data	LIANG Jian-she, BAI Yong-ping, YANG Xue-di, <i>et al.</i> (3365)