

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

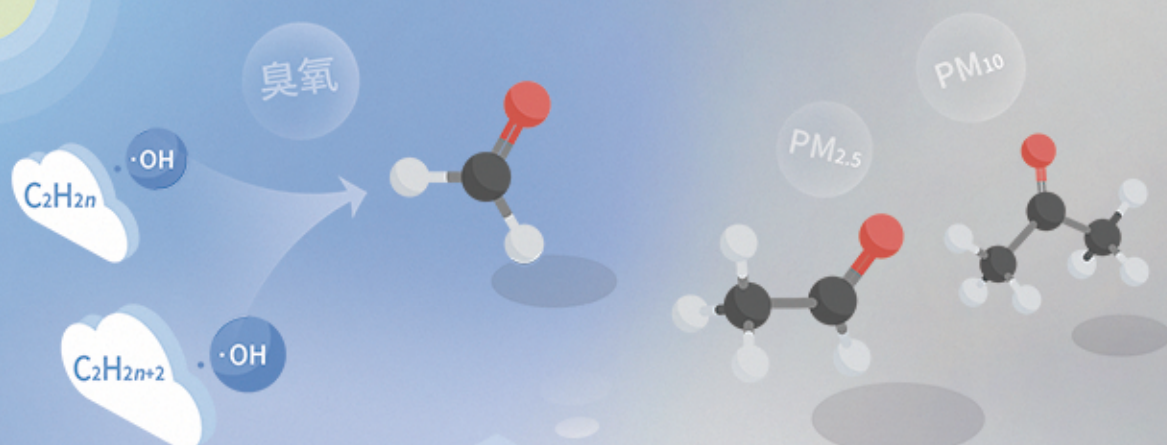
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

基于PMF和源示踪物比例法的大气羰基化合物来源解析：以南京市观测为例
胡崑，王鸣，王红丽，景盛翱，陈文泰，卢兴东



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年1月

第42卷 第1期
Vol.42 No.1

目次

2019年国庆节前后北京气态氨和气溶胶铵盐浓度的同步观测	顾梦娜, 潘月鹏, 宋琳琳, 李萍, 田世丽, 武岳洋, 杨婷婷, 李浩洋, 石生伟, 吐莉尼沙, 吕雪梅, 孙倩, 方运霆(1)
基于无人机探空和数值模拟天津一次重污染过程分析	杨旭, 蔡子颖, 韩素芹, 史静, 唐颖潇, 姜明, 邱晓滨(9)
中原城市群典型城市秋冬季大气 PM _{2.5} 污染特征及溯源	苗青青, 姜楠, 张瑞芹, 赵孝因, 齐静文(19)
沈阳市冬季大气 PM _{2.5} 中水溶性离子污染特征及来源解析	王国祯, 任万辉, 于兴娜, 侯思宇, 张毓秀(30)
保定地区 PM _{2.5} 中重金属元素的污染特征及健康风险评价	雷文凯, 李杏茹, 张兰, 徐静, 赵文吉, 刘子锐(38)
基于 PMF 和源示踪物比例法的大气羰基化合物来源解析:以南京市观测为例	胡崑, 王鸣, 王红丽, 景盛翔, 陈文泰, 卢兴东(45)
2019年天津市挥发性有机物污染特征及来源	高璟贇, 肖致美, 徐虹, 李立伟, 李鹏, 唐邈, 杨宁, 李源, 毕温凯, 陈魁(55)
柳州市春季大气挥发性有机物污染特征及源解析	刘齐, 卢星林, 曾鹏, 于爽(65)
天津市郊夏季的臭氧变化特征及其前体物 VOCs 的来源解析	罗瑞雪, 刘保双, 梁丹妮, 毕晓辉, 张裕芬, 冯银厂(75)
2017年春夏期间南京地区臭氧污染输送影响及潜在源区	谢放尖, 陆晓波, 杨峰, 李文青, 李洁, 谢轶嵩, 王艳, 刘益和, 王庆九, 胡建林(88)
2006~2019年珠三角地区臭氧污染趋势	赵伟, 高博, 卢清, 钟志强, 梁小明, 刘明, 马社霞, 孙家仁, 陈来国, 范绍佳(97)
大型石化企业邻近区域大气沉降中多环芳烃赋存特征及源解析	李大雁, 齐晓宝, 吴健, 黄沈发, 王敏, 沙晨燕, 沈城(106)
叶片大气颗粒物滞纳能力评估方法的定量对比	岳晨, 李广德, 席本野, 曹治国(114)
东江流域敌敌畏的排放量估算及归趋模拟	张冰, 张芊芊, 应光国(127)
松花江哈尔滨段及阿什河抗生素的分布规律与生态风险评估	杨尚乐, 王旭明, 王伟华, 胡雪莹, 高立伟, 孙兴滨(136)
东北小兴凯湖沉积物 POPs 污染特征及生态风险评估	李慧, 李捷, 宋鹏, 程云轩, 焦立新, 杨亚铮(147)
河南省地表水源中 PPCPs 分布及生态风险评估	周颖, 吴东海, 陆光华, 姚晶晶, 魏磊, 韩枫(159)
无锡-常州地下水中内分泌干扰物的赋存特征和健康风险评估	王淑婷, 饶竹, 郭峰, 刘成海, 战楠, 王娅南, 彭洁, 杨鸿波(166)
清江流域地表水重金属季节性分布特征及健康风险评估	刘昭, 周宏, 曹文佳, 刘伟, 兰圣涛(175)
会仙岩溶湿地丰平枯时期地下水金属元素污染与健康风险	李军, 赵一, 邹胜章, 蓝美宁, 樊连杰, 谢浩, 秦月, 朱丹尼(184)
三峡库区城镇化影响下河流 DOM 光谱特征季节变化	陈昭宇, 李思悦(195)
不同植物覆盖下黄河三角洲湿地土壤中微塑料的分布	岳俊杰, 赵爽, 程昊东, 段鑫越, 石洪华, 汪磊, 端正花(204)
基于宏基因组学探讨东平湖水库的菌群结构、耐药基因谱及其公共健康风险	张红娜, 崔娜, 申红妙(211)
分层型水库藻类季相演替的细菌种群驱动机制	闫苗苗, 张海涵, 黄廷林, 宗容容, 刘凯文, 苗雨甜, 杨尚业, 黄鑫, 王娜(221)
丹江口库区浮游真菌组成与功能及其影响因素	郑保海, 王晓宇, 李英军, 陈彦, 李百炼, 李玉英, 陈兆进(234)
太湖出流河道藻颗粒变化及其水质效应	郭宇龙, 许海, 陈旭清, 郑建中, 詹旭, 朱广伟, 朱梦圆(242)
石盘丘小流域不同土地利用方式下土壤氮磷流失形态及通量	邓华, 高明, 龙翼, 黎嘉成, 王莹燕, 王子芳(251)
前期干旱天数对生物滞留系统除氮性能的影响	陈焱, 李欣芮, 郑爽, 刘臻, 余雪花, 程启洪(263)
浒苔生物炭对雨水径流中氨氮的吸附特性及吸附机制	陈友媛, 李培强, 李闲驰, 孙萍, 赵新月, 李洁, 李晋, 辛至然(274)
填料对潮汐流人工湿地中 CANON 作用强化的影响	刘冰, 郑煜铭, 秦会安, 古励(283)
FeMnNi-LDHs 对水中 As(Ⅲ) 的吸附性能与机制	廖玉梅, 余杰, 魏世强, 蒋珍茂(293)
硝酸钙添加和铅改性膨润土覆盖联用控制底泥中磷释放的效果及机制	张宏华, 林建伟, 詹艳慧, 俞阳, 张志斌(305)
某市污水厂抗生素和抗生素抗性基因的分布特征	颜亚玮, 於驰晟, 李菲菲, 姚鹏城, 刘宏远(315)
不同污泥在微波预处理-厌氧消化过程中抗性基因分布及菌群结构演替	李慧莉, 武彩云, 唐安平, 佟娟, 魏源送(323)
天然富硒土地划定的富硒阈值	王惠艳, 曾道明, 郭志娟, 成晓梦, 彭敏, 孙跃(333)
融合自然-人为因子改进回归克里格对土壤镉空间分布预测	高中原, 肖荣波, 王鹏, 邓一荣, 戴伟杰, 刘楚藩(343)
南方典型水稻土镉(Cd)累积规律模拟	戴雅婷, 傅开道, 杨阳, 王美娥, 陈卫平(353)
闽西南土壤-水稻系统重金属生物可给性及健康风险	林承奇, 蔡宇豪, 胡恭任, 于瑞莲, 郝春莉, 黄华斌(359)
干湿交替灌溉制度下纳米修复材料对杂交水稻籽粒 Cd 累积及产量的影响	杨茹, 陈馨睿, 张颖, 崔俊义, 武立权, 马友华, 廖江, 何海兵(368)
三元复合调理剂对土壤镉赋存形态和糙米镉累积的调控效应	蒋毅, 刘雅, 辜娇峰, 杨世童, 曾雄, 王轩宁, 周航, 廖柏寒(378)
风化煤组配改良剂结合水分管理对水稻根际土壤与稻米甲基汞含量的影响	郑顺安, 吴泽赢, 杜兆林, 倪润祥, 姚启星(386)
不同施肥措施对水稻土壤微生物拮抗性的影响	郑开凯, 马志远, 孙波, 梁玉婷(394)
氮添加影响下新疆天山雪岭云杉林土壤酶活性及其与环境因子的相关性	张涵, 贡璐, 刘旭, 邵康, 李昕竹, 李蕊希(403)
黄土丘陵区撂荒农田土壤酶活性及酶化学计量变化特征	钟泽坤, 杨改河, 任成杰, 韩新辉(411)
生物炭对土壤酶活性和细菌群落的影响及其作用机制	冯慧琳, 徐辰生, 何欢辉, 曾强, 陈楠, 李小龙, 任天宝, 姬小明, 刘国顺(422)
植被恢复对刺萼龙葵根际土壤细菌群落结构与功能的影响	张瑞海, 宋振, 付卫东, 郭玲玲, 高金会, 王然, 王忠辉, 张国良(433)
黄壤稻田土壤微生物量碳氮及水稻品质对生物炭配施氮肥的响应	史登林, 王小利, 刘安凯, 侯再芬, 梁国太(443)
等碳量添加秸秆和生物炭对土壤呼吸及微生物量碳氮的影响	何甜甜, 王静, 符云鹏, 符新妍, 刘天, 李亚坤, 李建华(450)
秸秆与氮肥配比对农田土壤内外源碳释放的影响	孙昭安, 张轩, 胡正江, 王开永, 陈清, 孟凡乔(459)
生物炭与化肥混合对氨挥发和磷固定的影响	杨文娜, 邓正昕, 李娇, 郑杰炳, 王子芳, 高明(467)
氮肥减投条件下膜材料使用对稻田氨挥发排放的影响	俞映惊, 王梦凡, 杨根, 何世颖, 段婧婧, 杨林章, 薛利红(477)
微塑料对斑马鱼胚胎孵化影响及其在幼鱼肠道中的积累	赵佳, 饶本强, 郭秀梅, 高进勇(485)
无人机热红外支持下的城市微尺度热环境模拟	阳少奇, 冯莉, 田慧慧, 刘艳霞(492)
基于人居尺度的中国城市热岛强度时空变化及其驱动因子解析	孙艳伟, 王润, 郭青海, 高超(501)

中原城市群典型城市秋冬季大气 PM_{2.5} 污染特征及溯源

苗青青^{1,2}, 姜楠^{2*}, 张瑞芹², 赵孝囡^{1,2}, 齐静文²

(1. 郑州大学化学学院, 郑州 450001; 2. 郑州大学生态与环境学院, 郑州 450001)

摘要: 为了研究中原城市群区域城市秋冬季大气 PM_{2.5} 的污染特征和其主要成分的潜在来源, 于 2018 年 10 月到 2019 年 1 月在郑州、洛阳、安阳和新乡这 4 个典型城市展开秋冬季连续 4 个月 PM_{2.5} 膜样本采集, 采用 X 射线荧光光谱法, 碳分析法和离子色谱法分别对 18 种无机元素, 有机碳(OC)/元素碳(EC), 和 9 种水溶性无机离子进行了测定. 根据 PM_{2.5} 日均值浓度水平分为 3 个污染等级, 并分别通过对氮氧化率(NOR)和二次有机碳(SOC)及富集因子的计算结果对 PM_{2.5} 主要成分 NO₃⁻ 和 SOC 及 18 种无机元素的时空变化进行了对比分析. 通过化学质量平衡(CMB)模型计算了 4 个城市的排放源及贡献率, 并通过后向轨迹(HYSPLIT)模型和潜在源贡献因子法(PSCF)分析了 4 个城市 PM_{2.5} 和主要成分 NO₃⁻ 及 OC 的潜在污染来源. 结果表明, 采样期间郑州、洛阳、安阳和新乡 PM_{2.5} 均值分别为 (82.1 ± 45.5)、(84.7 ± 39.8)、(96.8 ± 46.1) 和 (81.1 ± 36.6) μg·m⁻³, 日均值的最高浓度值分别是国家二级标准的 3.3、2.6、3.0 和 2.3 倍; 4 个城市 PM_{2.5} 的主要组分都为 NO₃⁻ 和 SOC, NO₃⁻ 的浓度, NO₃⁻/EC 和 NOR 都随着污染等级的升高而显著升高, NO₃⁻/EC 和 NOR 的均值随着污染等级的升高总体上表现出郑州和洛阳略高于安阳和新乡; SOC 的浓度和在 OC 中的占比及 SOC/EC 的比值都随着污染等级的升高而增大; 从无机元素的浓度和富集程度来看, As 在郑州最高, Mn 和 Fe 在洛阳最高, Zn、Ni 和 Cr 在安阳最高以及 Cu 和 Pb 在新乡最高; 4 个城市 PM_{2.5} 污染源为二次硝酸盐、二次硫酸盐、有机物、燃煤源、机动车源、扬尘源、生物质源和工艺过程源, 二次硝酸盐的分担率在郑州(37.7%)最高, 新乡(14.1%)机动车分担率最高, 洛阳(7.0%)和安阳(6.8%)的工业过程源的分担率相对较高; 郑州、洛阳、安阳和新乡分别有 51.6%、49.2%、49.6% 和 46.3% 的气流来自西北方向; 郑州潜在污染区域主要集中在河南省, 洛阳主要在河南省南部和汾渭平原, 安阳和新乡则是在河南省和京津冀传输带上, 另外安徽西北部、山东西南部、山西东南部 and 陕西北部也对安阳和新乡 OC 的污染造成了影响.

关键词: PM_{2.5}; 无机元素; 二次生成; 化学质量平衡(CMB); 潜在源

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)01-0019-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202005333

Characteristics and Sources of PM_{2.5} Pollution in Typical Cities of the Central Plains Urban Agglomeration in Autumn and Winter

MIAO Qing-qing^{1,2}, JIANG Nan^{2*}, ZHANG Rui-qin², ZHAO Xiao-nan^{1,2}, QI Jing-wen²

(1. College of Chemistry, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. School of Ecology and Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: To study the characteristics of PM_{2.5} pollution and the potential sources of its main components in the central plain urban agglomeration in autumn and winter, PM_{2.5} samples were collected continually in the four typical cities of Zhengzhou, Luoyang, Anyang, and Xinxiang from October 2018 to January 2019. X-ray fluorescence spectrometry, carbon analysis methods, and ion chromatography were used to determine 18 kinds of inorganic elements, organic carbon (OC)/elemental carbon (EC), and 9 kinds of water-soluble inorganic ions. According to the daily PM_{2.5} concentration, three pollution levels were divided, and the comparative analysis for the spatial and temporal variation of PM_{2.5} and its main components, i. e., NO₃⁻, OC, and 18 kinds of inorganic elements, were studied via the calculation of the nitrogen oxidation rate (NOR), secondary organic carbon (SOC), and enrichment factor. The emission sources and their contribution rates of PM_{2.5} pollution level in the four cities were calculated by a chemical mass balance (CMB) model; the potential pollution sources of PM_{2.5} and its main components, NO₃⁻ and OC, in the four cities were analyzed by a backward trajectory model (HYSPLIT) and potential source contribution factor method (PSCF). The results showed that the means of PM_{2.5} in Zhengzhou, Luoyang, Anyang, and Xinxiang were (82.1 ± 45.5), (84.7 ± 39.8), (96.8 ± 46.1), and (81.1 ± 36.6) μg·m⁻³, respectively, during the sampling period, and the maximum daily mean values were 3.3, 2.6, 3.0, and 2.3 times, respectively, of the Chinese national secondary standard; the main components of PM_{2.5} in the four cities were NO₃⁻ and SOC, and the concentration of NO₃⁻, the ratio of NO₃⁻/EC, and NOR all increased significantly with the rising of pollution levels, generally showing that the mean values of NO₃⁻/EC and NOR of Zhengzhou and Luoyang were a little higher than those of Anyang and Xinxiang; the concentration of SOC, the proportion of SOC in OC, and the ratio of SOC/EC all increased with the rising of pollution levels. From the concentration and enrichment degree of inorganic elements, As was the highest in Zhengzhou; Mn and Fe were the highest in Luoyang; Zn, Ni, and Cr were the highest in Anyang; and Cu and Pb were the highest in Xinxiang. Secondary nitrate, secondary sulfate,

收稿日期: 2020-05-31; 修订日期: 2020-07-04

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0212400); 国家自然科学基金项目(51808510); 京津冀及周边“2+26”城市来源解析研究项目(DQGG0107-26)

作者简介: 苗青青(1995~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大气颗粒物污染与溯源, E-mail: 1040121317@qq.com

* 通信作者, E-mail: jiangn@zzu.edu.cn

organic matter, coal combustion, motor vehicle, dust, biomass burning, and industrial processes were the main $\text{PM}_{2.5}$ pollution sources in the four cities, with the highest contribution rate of secondary nitrate in Zhengzhou (37.7%), the highest contribution rate of vehicle sources in Xinxiang (14.1%), and a relatively high contribution rate of industrial process source in Luoyang (7.0%) and Anyang (6.8%). The northwest direction of airflow contributed 51.6%, 49.2%, 49.6%, and 46.3% of the total airflow in Zhengzhou, Luoyang, Anyang, and Xinxiang, respectively. From the potential pollution area of each city, the Zhengzhou area was mainly concentrated in Henan province, the Luoyang area was mainly concentrated in the south of Henan province and Fen-wei plain, and the Anyang and Xinxiang areas were mainly concentrated in Henan province and the Beijing-Tianjin-Hebei transport belt. The pollution levels of OC in Anyang and Xinxiang were also affected by the northwest Anhui, southwest Shandong, southeast Shanxi, and north Shaanxi.

Key words: $\text{PM}_{2.5}$; inorganic elements; secondary generation; chemical mass balance (CMB); potential source

近年来,随着我国经济的快速发展和社会的不断进步,环境恶化问题日益凸显,霾天气频发,引起人们广泛关注^[1]. 大气颗粒物特别是空气动力学直径 $\leq 2.5 \mu\text{m}$ 的细颗粒物($\text{PM}_{2.5}$)有着粒径小,存在久,传输远和危害大的特征^[2],对国民经济发展和居民健康存在严重影响. $\text{PM}_{2.5}$ 中的重金属元素容易在生物体内积累并通过食物链富集,对人类和动植物的危害很大^[3]. 穆泉等采用直接损失评估法对2013年1月的霾事件造成的全国交通和健康的直接经济损失保守估计约230亿元^[4]. 全球人类疾病负担研究显示,2015年因暴露于 $\text{PM}_{2.5}$ 导致世界范围内约有420万人死亡^[5].

因此对 $\text{PM}_{2.5}$ 的研究有着重大的意义,特别在中国的北方,秋冬季燃煤供暖致使污染物排放增加,此外秋冬季易出现静稳天气不利于污染物的扩散导致霾天气频发^[6],许多研究者对该阶段的 $\text{PM}_{2.5}$ 的污染特征和来源解析展开了详细地分析. 如吴兴贺等^[7]的研究发现二次有机碳(SOC)是2018年秋冬季山东德州 $\text{PM}_{2.5}$ 的主要化学组成成分;张婷婷等^[8]对2016年北京冬季大气 $\text{PM}_{2.5}$ 的碳质气溶胶来源研究显示,燃煤和汽油车排放为主要贡献源;缪育聪等^[9]在对京津冀地区霾生成机制研究结果中发现,区域传输等对京津冀地区霾事件的形成和发展的影响不可忽视;朱书慧等^[10]基于全球资料同化系统的气相数据和2015年12月长三角15个城市的 $\text{PM}_{2.5}$ 数据,利用后向轨迹模式分析了冬季重污染时期的气流轨迹,结果显示长三角冬季主要受到西北方向气流的影响.

目前我国关于大气 $\text{PM}_{2.5}$ 污染特征和来源解析的相关研究大多集中在京津冀、长三角和珠三角等主要区域. 中原城市群地处全国“两横三纵”城市化战略格局陆桥通道与京广通道交汇区域^[11],紧邻京津冀经济发展圈,其作为京津冀大气污染的传输通道,必将受到京津冀大气污染的影响^[12]. 并且中原城市群人口稠密,资源压力大,发展不平衡,城市产业结构基本上都以第二产业为主^[13],这些都使得该区域大气污染在污染不易扩散的秋冬季比较严重.

但是该地区对 $\text{PM}_{2.5}$ 的研究主要集中在郑州^[14~16],其它城市研究较少,城市之间对比分析严重缺乏. 本研究选取了我国大气污染防治重点区域——京津冀及周边地区和汾渭平原的4个城市,即郑州、安阳、新乡和洛阳. 其中郑州作为河南省的省会近些年来发展迅速,根据综合服务、科技创新和开放交流等33个成长性指标对武汉、西安和成都等国家9个中心城市进行评价,结果显示郑州的成长性居9个城市首位^[17]. 郑州迅速发展的同时也带来了严重的环境问题,根据国家生态环境部发布的2018年全国空气质量状况的通报,郑州市空气质量在169个重点城市中排名倒数第18位^[18],空气质量情况令人堪忧;安阳地处河南省最北部,与河北和山西接壤,秋冬时期盛行南北风,从北京到安阳沿着太行山脉和京广线形成一条高污染带^[19],同时安阳产业结构偏向重工业,工业企业布局却不够合理,污染物单位排放量大^[20],导致安阳大气污染形势严峻;新乡地处豫北,南临黄河,是豫北经济和交通中心城市,典型的轻工业城市^[21],也是环境保护部重点治理的“2+26”城市群中最南部的城市之一^[22],新乡对中原经济区的发展起着重要的推动作用;洛阳地处汾渭平原东部,紧邻郑州市,汾渭平原以煤炭为主要能源,生产结构偏工业,耗能高且污染排放大,再加上汾渭平原北依吕梁山南抵秦岭的地理形势很不利于污染物的扩散^[23],加重了洛阳的污染情况.

基于以上,本研究从2018年10月至2019年1月展开4个月的连续大气 $\text{PM}_{2.5}$ 膜采样工作,对比了采样期间 $\text{PM}_{2.5}$ 及其主要成分的浓度水平的时空差异;分析了 $\text{PM}_{2.5}$ 其主要成分 NO_3^- 和二次有机碳SOC的二次生成机制;通过各城市重金属元素浓度差异水平定性了污染物的来源;利用化学质量平衡模型(chemical mass balance, CMB)对4个城市污染物进行了进一步来源解析,同时结合后向轨迹(HYSPLIT)和潜在源贡献因子法(PSCF)对4个城市的 $\text{PM}_{2.5}$ 其主要成分受到的气流方向和污染物的潜在贡献源进行了分析,通过对该区域大气污染成因及来源进行系统而全面地研究,可以支持区域经

济可持续发展和大气污染联防联控工作, 以期为秋冬季大气 PM_{2.5} 减排方案制定提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 样品采集

选取京津冀大气污染传输通道城市中的郑州市、安阳市和新乡市, 同时选取汾渭平原的工业化城市洛阳市作为研究区域。每个城市的采样点位情况

详见表 1。采样仪器均采用武汉市天虹仪表有限责任公司的 4 通道采样器 (TH-16A) 采集 PM_{2.5} 膜样品 (每组样品包含两个直径为 47 mm 的石英膜和两个直径为 47 mm 的特氟龙膜), 4 个通道的流量均为 16.7 L·min⁻¹。采样时间为每日 10:00 至次日 9:00, 采样时长 23 h。2018 年 10 月至 2019 年 1 月 4 个城市连续采集大气 PM_{2.5} 有效样品 563 组 (共 2 252 张样品膜)。

表 1 4 个城市采样点位的详细信息

Table 1 Detailed information of sampling sites in four cities

城市	采样点位置	经度	纬度	有效样品/组	周边情况
郑州	航空港滨河办事处	113°51'	34°34'	82	位于航空港区东北方向, 非市中心, 与机场高速距离 3.6 km, 周围有学校
郑州	新密市惠德大酒店	113°19'	34°32'	89	紧邻西大街, 为新密市的一条主干道, 周围主要为学校, 无工业
洛阳	华夏路社区服务站	112°24'	34°36'	106	位于市中心, 车流量大, 无工厂
洛阳	河南林业职业学院	112°30'	34°42'	107	位于市中心, 人口密集, 周围学校较多
安阳	文峰区环境保护局	114°24'	36°50'	94	位于居民生活区, 交通发达, 无工厂
新乡	环境保护监测站	113°31'	35°10'	85	周围交通发达, 附近为学校

1.2 样品膜前处理与组分测试分析

采样前空白石英滤膜用铝箔包裹并在 450℃ 温度下灼烧 4 h, 然后将滤膜放置在恒温恒湿 [温度: (20 ± 5)℃; 相对湿度: (50 ± 5)%] 的超净室内平衡 48 h 至恒重, 之后使用精度为 0.01 mg 的瑞士梅特勒-托利多公司高精度天平 (Mettler Toledo XS205) 称重, 同一滤膜至少称重两次, 质量差值在 0.03 mg 内则称重结果可接受。完成后放入滤膜袋中保存待用。待样品采集完成后, 将滤膜再次置于恒温恒湿超净室内平衡至恒重称重, 称重要求同上。特氟龙滤膜不需要灼烧, 其他操作方法同石英滤膜。称重后的滤膜都放置于 -18℃ 的冰箱保存至分析。

PM_{2.5} 中 18 种无机元素, 有机碳 (OC) 和元素碳 (EC), 9 种水溶性无机离子 (NH₄⁺、NO₃⁻、SO₄²⁻、K⁺、Mg²⁺、Ca²⁺、Na⁺、F⁻ 和 Cl⁻) 分别采用 X 射线荧光光谱法, 美国 Sunset Lab Inc Model 的碳分析仪和美国戴安公司的离子色谱仪 (ICS-90 型和 ICS-900 型) 进行测试, 详细测试方法及质量控制与质量保证见文献 [24 ~ 26]。

1.3 数据分析

利用富集因子法定性人为源和自然源对 PM_{2.5} 中无机元素的贡献, 其计算和分析方法详见文献 [27]; 利用 CMB 计算 4 个城市不同的排放源及其贡献率, 模型使用、输入数据要求和判定参数等详见 CMB8.2 使用手册 (<https://www.epa.gov/scram/chemical-mass-balance-cmb-model>) 和文献 [28]; 利用 HYSPLIT 计算 4 个城市污染的来源和远距离传输的路径, 分别以郑州航空港滨河办事处、洛阳华夏路社区服务站、安阳市环境保护局和新乡市环境保护监测站为起点, 轨迹起始计算高度为 500 m, 每天

分别以 00:00、06:00、12:00 和 18:00 为起始时间计算 48 h 后向轨迹, 使用 TrajStat 软件的角距离算法对各城市的后向轨迹的传输方向进行分类得到聚类结果, 并使用 PSCF 计算分析得出 4 个典型城市大气 PM_{2.5} 及其主要成分 OC 和 NO₃⁻ 的潜在来源 [29, 30]。

2 结果与讨论

2.1 PM_{2.5} 浓度及城市差异对比

郑州、洛阳、安阳和新乡在 2018 年采样期间 PM_{2.5} 浓度变化情况如图 1 所示, 采样期间 PM_{2.5} 均值分别为 (82.1 ± 45.5)、(84.7 ± 39.8)、(96.8 ± 46.1) 和 (81.1 ± 36.6) μg·m⁻³, 日均值的最高值分别是 250.1、198.1、227.4 和 175.8 μg·m⁻³, 分别是国家《环境空气质量标准》(GB 3095-2012) 日均二级标限值 (75 μg·m⁻³) 的 3.3、2.6、3.0 和 2.3 倍, 采样期间日均值超标率分别为 47.4%、53.1%、58.5% 和 48.2%, 说明 4 个城市秋冬季的污染形势都很严峻, 但从城市之间对比来看, 安阳市的 PM_{2.5} 采样时期的均值和日超标率略高于其它 3 个城市, 安阳的大气污染情况更值得重视。郑州、洛阳、安阳和新乡冬季的 PM_{2.5} 均值 [分别为 (94.6 ± 49.7)、(89.8 ± 42.3)、(104.8 ± 49.8) 和 (81.4 ± 40.4) μg·m⁻³] 明显高于秋季 [分别为 (66.0 ± 33.4)、(79.3 ± 36.5)、(90.5 ± 42.3) 和 (80.8 ± 32.4) μg·m⁻³], 说明冬季相比秋季大气污染情况更为严重。另外 4 个城市冬季 PM_{2.5} 浓度均值与国内一些城市相比, 低于北京 [(141 ± 103) μg·m⁻³, 2017 年] [31] 和武汉 [(137.6 ± 56.4) μg·m⁻³, 2018

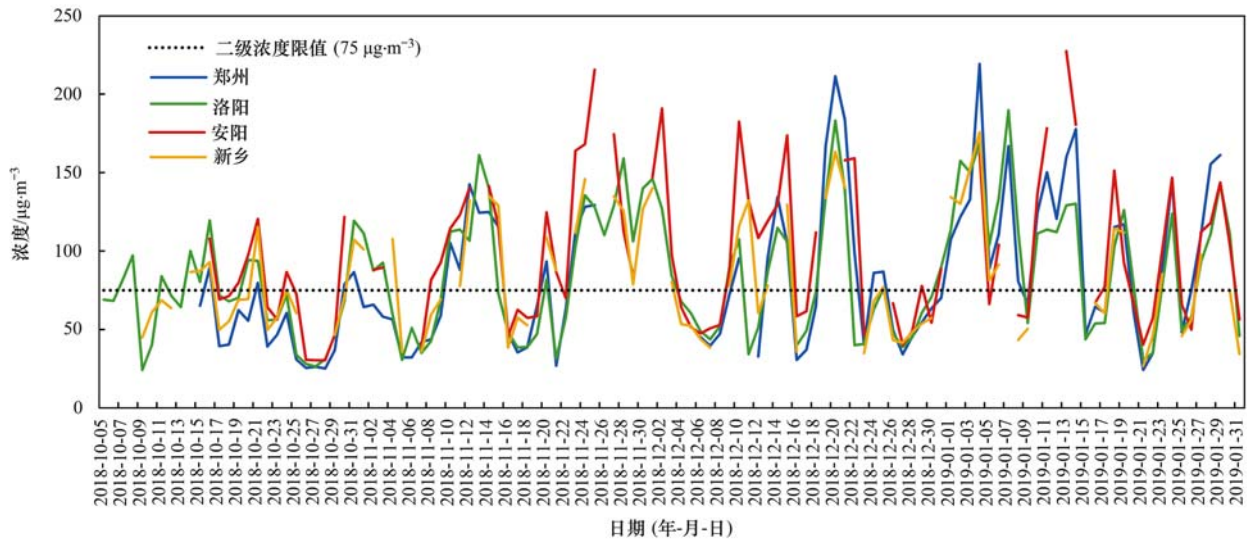


图 1 4 个城市采样期间 $PM_{2.5}$ 日均值变化情况

Fig. 1 Variation of daily mean of $PM_{2.5}$ in four cities during sampling period

年]^[32], 高于南通 [58 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (2016 年) 和 54 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (2017 年)]^[33]、成都 [53 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (2019 年)]^[34]. 在冬季,煤和生物质的燃烧供暖导致了大量的含碳污染物的排放,同时冬季低气温和低风速有利于半挥发性化合物形成二次气溶胶以及逆温现象和静稳现象频发,这些都导致了冬季大气颗粒物污染加重^[35].

2.2 $PM_{2.5}$ 中主要成分

由化学成分分析得到,4 个城市 $PM_{2.5}$ 的主要组分是二次无机盐 (NO_3^- 、 SO_4^{2-} 和 NH_4^+) 和有机物 OC. 采样期间 4 个城市二次无机盐的浓度为 41.5 ~ 47.9 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,在 $PM_{2.5}$ 中的占比为 49.5% ~ 54.7%,其中 NO_3^- 在二次无机盐中的占比最高,达到了

51.2% ~ 56.1%. 4 个城市 OC 的浓度为 15.7 ~ 20.0 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,在 $PM_{2.5}$ 中的占比为 19.4% ~ 22.6%. OC 可分为由污染源直接排放的一次有机碳 POC 和气态有机物发生光化学反应生成的二次有机碳 SOC^[36],其中 4 个城市 SOC 在 OC 中的占比为 53.8% ~ 82.1%. 由此可见,秋冬季 SOC 和 NO_3^- 对 $PM_{2.5}$ 的贡献率较大,二次污染为 4 个城市的主要污染源. 4 个城市 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 NH_4^+ 、OC、SOC 和 POC 的浓度对比如图 2 所示,由于 NH_4^+ 、 SO_4^{2-} 和 POC 的浓度和在 $PM_{2.5}$ 中的占比相对于 NO_3^- 和 SOC 较低,本研究则针对 NO_3^- 和 OC 的二次生成机制展开分析.

为了更加直观清楚地对比分析 4 个城市的 $PM_{2.5}$ 以及其主要成分 OC 和 NO_3^- 在秋冬季不同污

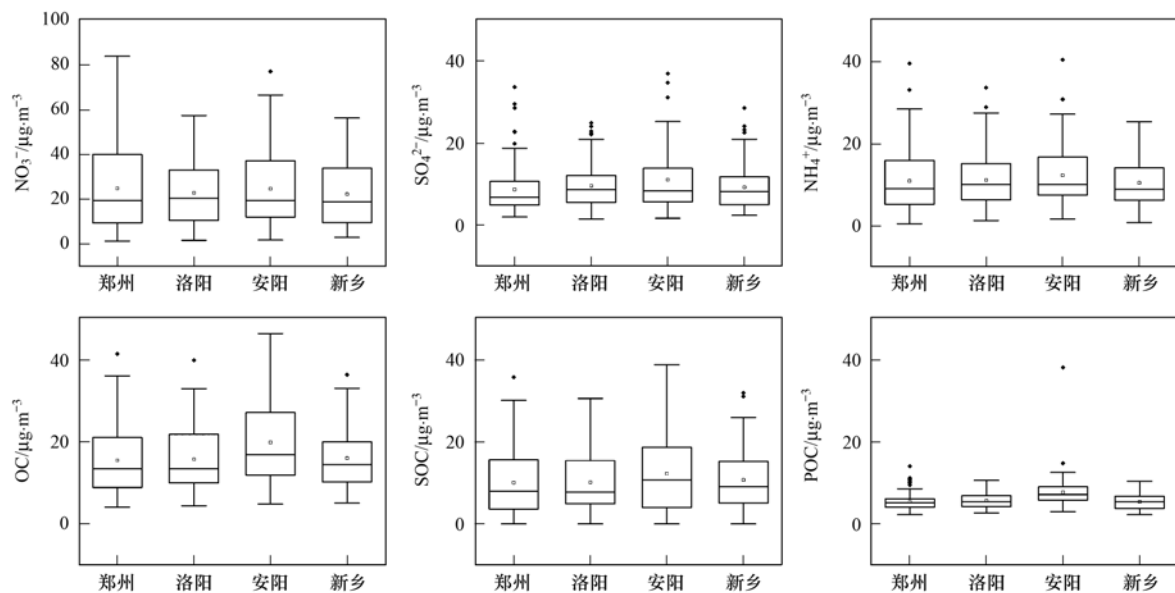


图 2 4 个城市 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 NH_4^+ 、OC、SOC 和 POC 的浓度对比箱式图

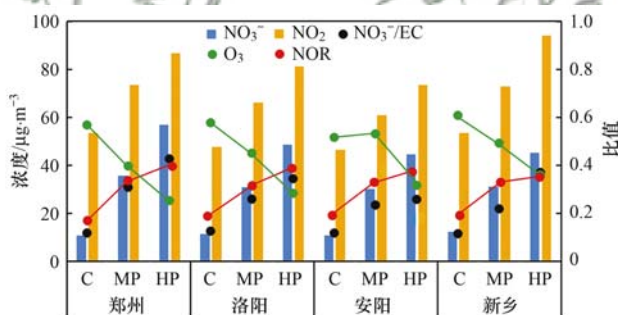
Fig. 2 Box plots for the concentration comparisons between NO_3^- , SO_4^{2-} , NH_4^+ , OC, SOC, and POC in four cities

染等级下的浓度和占比以及二次生成情况,这里根据国家《环境空气质量标准》(GB 3095-2012)日均二级标限值($75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)将采样期间 PM_{2.5} 的日均值分为 3 个等级:清洁天 C($\text{PM}_{2.5} \leq 75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)、中度污染天 MP($75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3} \leq \text{PM}_{2.5} \leq 150 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)和重度污染天 HP($\text{PM}_{2.5} \geq 150 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)。

2.2.1 NO₃⁻ 的二次生成

有研究表明, NO₃⁻ 的生成与其气态前体物 NO₂ 和 O₃ 的浓度密切相关。在白天, NO₂ 与 OH 自由基反应生成 HNO₃ 进而与 NH₃ 反应形成硝酸盐气溶胶。在夜间, NO₂ 先与 O₃ 产生的自由基发生反应,然后与 N₂O₅ 发生反应,接着 N₂O₅ 在湿气溶胶表面的水解释放出的 HNO₃ 与 NH₃ 反应形成硝酸盐气溶胶^[37]。大气中的气态污染物 NO₂ 向 NO₃⁻ 的转化程度可以用氮氧化率 {NOR, $\text{NOR} = n(\text{NO}_3^-) / [n(\text{NO}_3^-) + n(\text{NO}_2)]$ } 来衡量^[38]。由于 EC 来源于一次源,对化学反应惰性,其浓度仅受边界层高度和排放速率的控制,因此 NO₃⁻/EC 的比值既可以用来表示化学反应的贡献率同时也排除了边界层高度引起的混合和稀释效应的影响^[39]。

图 3 展示了 4 个城市郑州、洛阳、安阳和新乡二



C、HP 和 MP 分别为清洁天、中度污染天和重度污染天

图 3 4 个城市 NO₃⁻ 和 SOC 随着污染等级的变化趋势

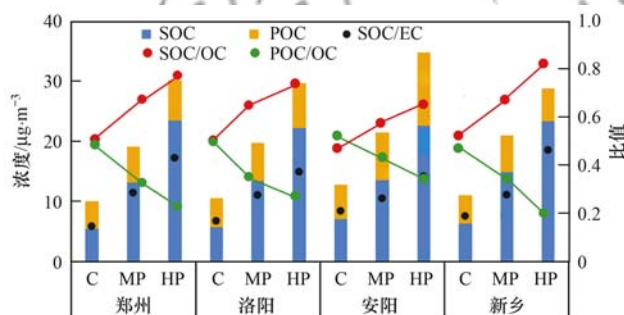


Fig. 3 NO₃⁻ and SOC changed with the pollution levels in four cities

2.2.2 OC 的二次生成

与分析 NO₃⁻ 的二次生成机制分析方法相同,这里用 SOC/EC 来探究 SOC 的生成对 OC 的贡献,其中 SOC 和 POC 的计算方法见文献[42]。图 3 展示了 4 个城市的 SOC 和 POC 的浓度以及各自在 OC 中的占比随污染等级的变化情况,从中可以看出 4 个城市 SOC 和 POC 的浓度都随着污染等级的升高而显著升高,表明秋冬季随着大气污染的加重有更多的 SOC 和 POC 生成。郑州、洛阳、安阳和新乡的 SOC 的浓度分别从清洁天的 5.4、5.7、7.0 和 6.4 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 增加到重度污染天的 24.1、22.2、22.6 和 23.3 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, SOC 在 OC 中的占比从清洁天的 47.2%~52.5% 增加到重度污染天的 64.5%~

次生成过程中 NO₃⁻、NO₂、O₃、NO₃⁻/EC 和 NOR 随着污染等级的变化情况。从中可知,4 个城市的 NO₃⁻ 和 NO₂ 的浓度都随着污染等级的升高而显著升高,并且 NO₃⁻/EC 和 NOR 也随着污染等级的升高而增大,说明秋冬季随着污染的加重有更多的 NO₂ 转化成了硝酸盐。从具体数值上来看,郑州、洛阳、安阳和新乡 PM_{2.5} 中 NO₃⁻ 的平均浓度分别从清洁天的 11.0、11.4、10.9 和 12.4 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 增加到重度污染天的 56.9、48.7、44.8 和 45.1 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,分别增加了 4.2、3.3、3.1 和 2.6 倍。另外,4 个城市的 NOR 和 NO₃⁻/EC 的均值随着污染等级的升高总体上表现出郑州和洛阳略高于安阳和新乡,这说明随着 PM_{2.5} 污染的加重,郑州和洛阳大气中的 NO₃⁻ 更多地来自于 NO₂ 二次转化增强,而安阳和新乡的 NO₃⁻ 则可能更多是由于冬季边界层高度降低而造成的初级排放的积累^[40]。4 个城市的 O₃ 浓度除了安阳从清洁天到中度污染天有略微升高之外其它都随着污染等级的升高而显著降低,有研究表明随着污染的加重,到达地面的太阳辐射强度变弱,光化学反应速率降低^[41],因此 O₃ 的生成速率降低导致 NO₂ 的氧化速率减慢进而 NO₃⁻ 的生成速率也下降。

81.1%,说明 4 个城市的 SOC 浓度不仅高并且随着污染的加重其增长速度也逐级递增,但 4 个城市 POC 在 OC 中的占比却从清洁天的 47.5%~52.8% 降到了重度污染天的 18.9%~35.6%,表明虽然随着污染等级的升高 SOC 和 POC 的浓度都在增加,但 OC 的主要构成是 SOC, SOC 对 PM_{2.5} 的贡献远大于 POC,且 4 个城市 SOC/EC 的比值也随着污染等级的升高而增大,同时证明了随着污染的加重 SOC 的转化在增强。

2.3 PM_{2.5} 溯源研究

2.3.1 无机元素污染水平

采样期间 4 个城市的 18 种无机元素的浓度水平和富集因子值如图 4 和表 2 所示。郑州、洛阳、安

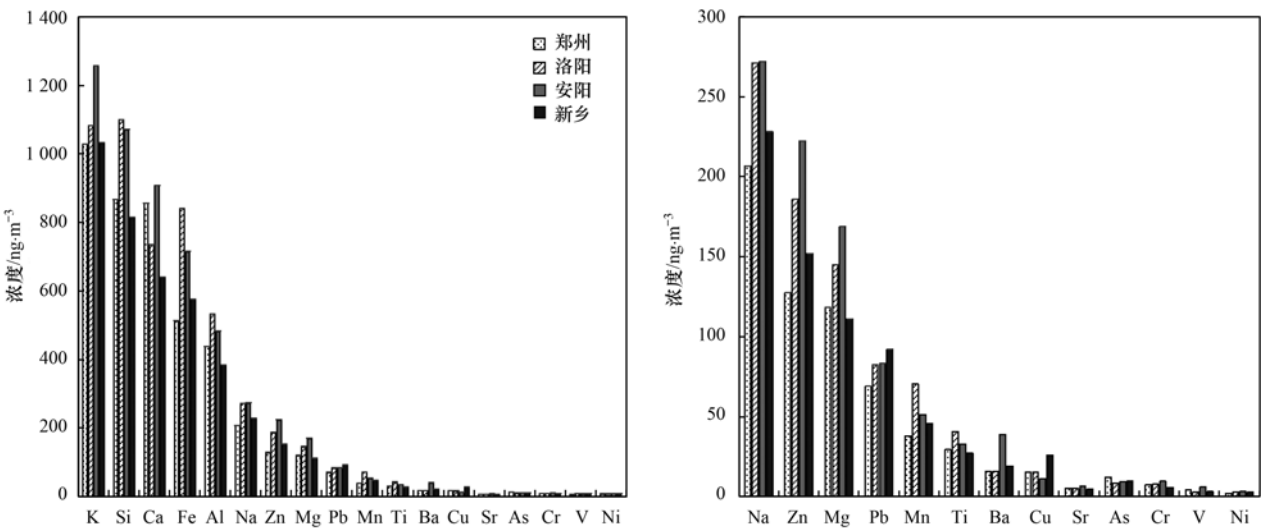


图 4 4 个城市采样期间 18 种无机元素的浓度水平

Fig. 4 Concentrations of 18 inorganic elements in four cities during the sampling period

阳和新乡的无机元素总浓度分别为 4 365.3、5 151.3、5 361.6和4 176.9 $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$,在 $\text{PM}_{2.5}$ 中占比分别为 5.3%、6.1%、5.5%和 5.2%。虽然无机元素在 $\text{PM}_{2.5}$ 中占比普遍不高,但由于其中的一些重金属元素其很容易富集在细颗粒物上,因此其对 $\text{PM}_{2.5}$ 的来源解析有着重要的意义。

元素 Ca、Si、Fe、K、Al、Na、Mg 和 Zn 是 4 个城市主要组成元素,其在总无机元素中的占比为 93.9%~94.8%。其中元素 Ca、Si、Fe、Al 和 Mg 属于地壳元素,主要来源于扬尘和土壤,K 主要由生物质燃烧释放^[43],它在 4 个城市的无机元素中含量最高,说明生物质燃烧源是 4 个城市秋冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 的一个重要来源。在人为污染元素中,As 是一种高毒性的元素也是煤燃烧的标识物^[44],4 个城市 As 的质量浓度在郑州明显高于其它 3 个城市,As 的富集因子值 EF 都大于 10 且也在郑州最高,这可能是冬季燃煤集中供暖增加了 As 的释放且郑州市可能存在散煤燃烧使得 As 对郑州大气污染的贡献率增大。研究发现 Mn 和 Fe 是钢铁和冶金工业的代表性元素,Fe 还与柴油燃烧排放密切相关^[45, 46],洛阳市的 Mn 和 Fe 元素质量浓度和 EF 值最高,说明冶金、柴油燃烧和燃煤等加重了洛阳秋冬季的大气污染,这与其偏工业的生产结构相一致。重金属元素 Cr 与炼铁炼钢等排放污染物密切相关^[47],Zn 与橡胶材料的磨损以及镀锌材料的释放有关^[48],Ni 象征着石油燃烧和工业排放^[49],Cr、Zn 和 Ni 的浓度和 EF 值都在安阳最高,表明冶炼钢铁和镀锌工业以及石油燃烧对安阳大气污染有较大的贡献。Cu 与机动车刹车时刹车片的磨损和尾气排放相关^[50],Pb 是电池工业和机动车尾气的特征元素^[51],新乡作为典型的轻工业城市其电池制造业很发达,全市大约有两百多

家电池制造企业,新乡市的 Cu 和 Pb 的质量浓度和 EF 值都远远高于另外 3 个城市,说明电池制造和机动车排放对新乡秋冬季大气污染的贡献很大。

表 2 4 个城市 18 种无机元素的富集因子值

Table 2 Enrichment factor values of 18 inorganic elements in four cities

元素	郑州	洛阳	安阳	新乡
Si	0.42	0.44	0.47	0.45
Al	1.00	1.00	1.00	1.00
Ti	1.01	1.15	1.03	1.08
Mg	1.55	1.56	2.01	1.67
Fe	2.69	3.63	3.40	3.45
V	6.81	4.03	8.97	5.93
Ba	5.04	4.14	11.30	7.00
Ca	7.57	5.34	7.30	6.44
K	8.62	7.46	9.59	9.87
Mn	9.87	15.12	12.20	13.59
Ni	12.43	13.35	17.12	18.93
Cr	17.56	14.94	20.41	15.57
Cu	117.24	96.18	77.70	224.74
As	161.07	93.21	115.36	150.97
Zn	315.72	377.35	499.36	427.73
Pb	521.86	512.84	573.50	795.29
Sb	1 739.22	1 057.11	1 868.04	1 149.98
Na	28 117.83	30 350.57	33 672.09	35 465.32

2.3.2 CMB 源解析结果分析

CMB 是通过化学元素平衡法对大气颗粒物来源进行识别的一种多元统计分析的数学模型^[52],通过将受体(化学组分和含量)和各类源之间线性组合,用最小二乘法对相关矩阵进行求解得到不同的排放源以及其贡献率^[53]。采用 OC/EC 最小比值法估算出 SOC 浓度^[54],将各采样点的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度输入 CMB 模型经计算得到 4 个城市秋冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 的源解析结果如图 5 所示。

从图 5 可以看出,4 个城市污染源由二次硝酸

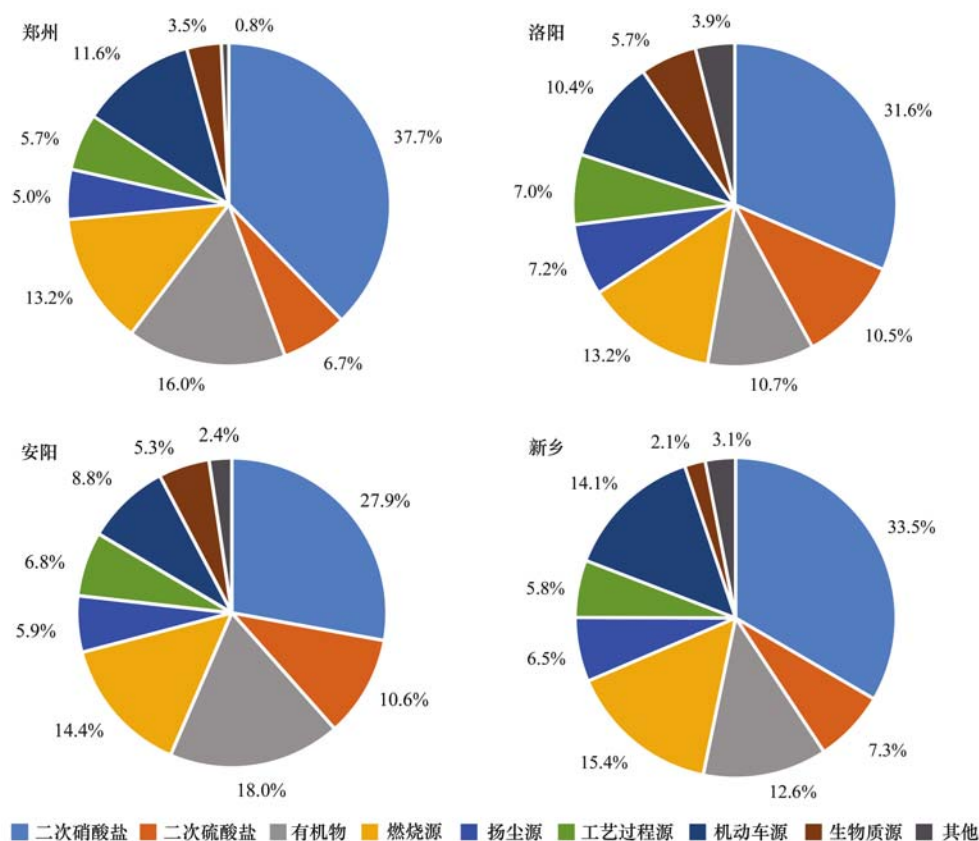


图5 4个城市秋冬季CMB源解析结果

Fig. 5 Results of CMB source apportionment in autumn and winter in four cities

盐、二次硫酸盐、有机物、燃煤源、机动车源、扬尘源、生物质源和工艺过程源构成,其中二次硝酸盐(27.9%~37.7%)和有机物(10.7%~18.0%)的分担率较高,这与化学组分分析结果中 NO_3^- 和SOC在PM_{2.5}中占比较高的结果相一致,证实了二次污染是4个城市秋冬季污染的主要污染源.4个城市燃煤源的分担率仅次于二次硝酸盐和有机物,达到了13.2%~15.4%,这可能是受到冬季燃煤供暖的影响.此外,4个城市机动车源的分担率也相对较高为8.8%~14.1%,从2016~2018年,郑州、洛阳、安阳和新乡的各市私人车辆拥有量分别从243.1、76.7、54.3和69.3万辆增加到311.4、100.1、71.1和88.4万辆^[55~57],增速达到了28.1%、30.5%、31.1%和27.6%,另外冬天温度较低使得机动车尾气排放量增加^[58],这些可能与机动车源分担率较高有关.从城市间对比来看,二次硝酸盐的分担率在郑州(37.7%)最高,说明郑州的二次硝酸盐污染较其它3个城市严重.工业过程源在洛阳(7.0%)和安阳(6.8%)的分担率相对较高,这与二者的工业城市的性质一致.新乡市机动车(14.1%)贡献最高,这可能是新乡的采样点位于十字路口,周围交通发达的缘故.因此,重视二次污染物的主要前体物氮氧化物和VOCs的管控,减少燃煤的消耗,加强对机动

车的管理,监督工业的细颗粒物的排放,将是防治4个城市大气污染的有效途径.

2.3.3 聚类和潜在源分析

为了研究区域传输对4个城市郑州、洛阳、安阳和新乡秋冬季大气PM_{2.5}的影响,利用HYSPLIT模式对4个城市采样期间的污染轨迹进行了后向轨迹和聚类分析,结果见图6.从中可以看出,起源于蒙古,伴随西北方向冷空气南下途经甘肃、陕西和山西的轨迹线中,郑州(轨迹线1及3)、洛阳(轨迹线1及4)、安阳(轨迹线1及5)和新乡(轨迹线1及2)的贡献之和在总轨迹线中的占比较大,分别为51.6%、49.2%、49.6%和46.3%,可见4个城市秋冬季大气污染更多地受西北方向气流的影响.另外,郑州的轨迹线2(16.9%)、洛阳的轨迹线2(20.5%)、安阳的轨迹线4(20.7%)和新乡的轨迹线5(10.8%)大多起源于河北省,说明河北省大气污染物的远距离传输对4个城市秋冬大气PM_{2.5}的影响不容忽视.值得注意的是洛阳的轨迹线5(11.6%)起源于汾渭平原,说明洛阳同时受到汾渭平原大气污染物的远距离传输的影响.

通过PSCF计算得到大气PM_{2.5}及其主要物质OC和 NO_3^- 的潜在源的分布特征,计算结果如图6所示,WPSCF值越大,表示该网格区域污染轨迹占

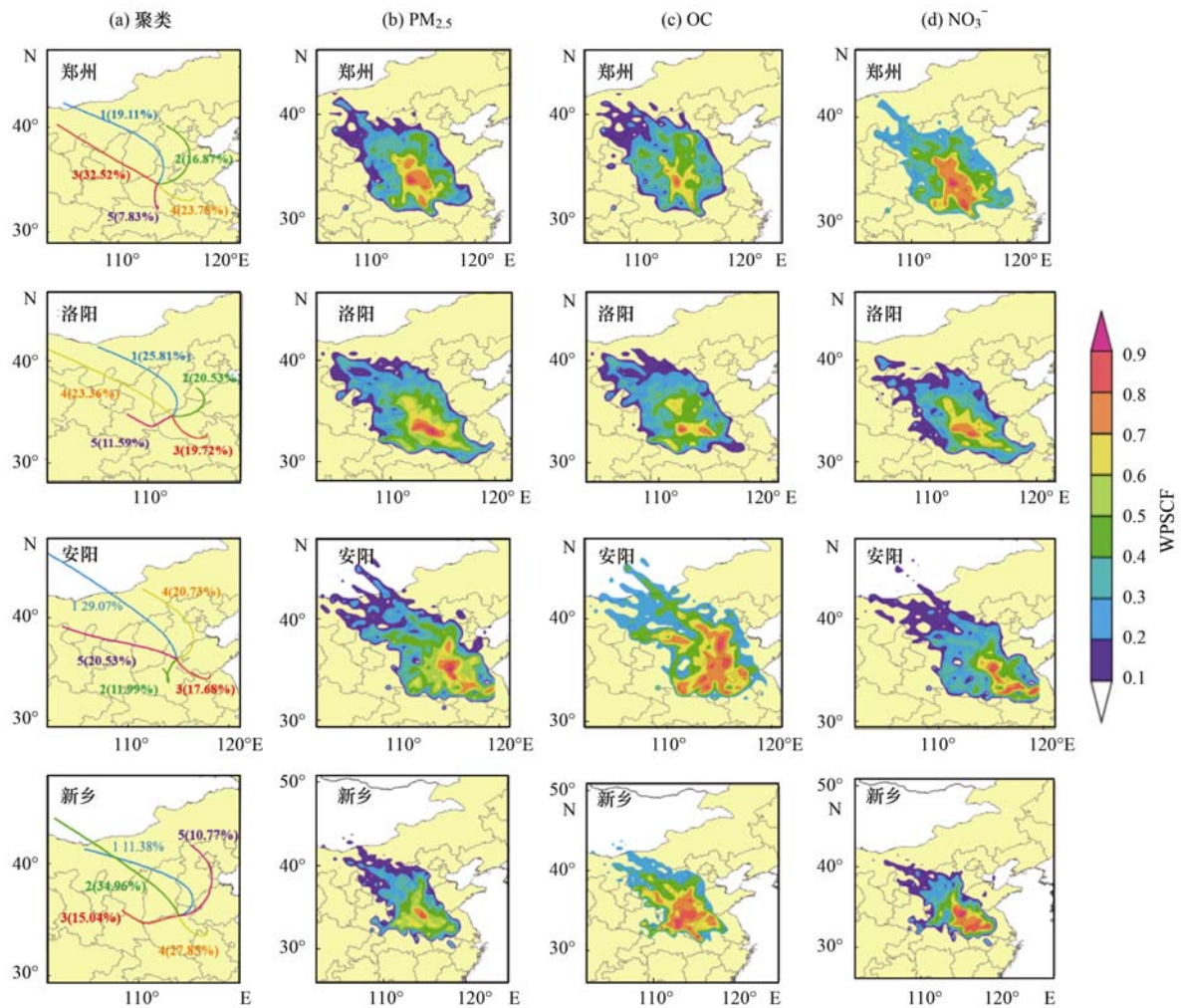


图 6 4 个城市秋冬季聚类及 $\text{PM}_{2.5}$ 、OC 和 NO_3^- 的潜在来源

Fig. 6 Results of back-trajectory clusters and WPSCF of $\text{PM}_{2.5}$, OC, and NO_3^-

比越高,对城市污染的影响越大.从中看出,郑州的 $\text{PM}_{2.5}$ 、OC 和 NO_3^- 潜在源区主要集中在河南省中南部的许昌、漯河、驻马店和信阳以及西北部的济源和焦作,WPSCF 值都在 0.6 以上,说明郑州更多地是受河南本省的传输影响.洛阳市 $\text{PM}_{2.5}$ 、OC 和 NO_3^- 的潜在源区集中在河南省南部和西南部的驻马店、信阳和南阳以及山西省的东南部的汾渭平原,WPSCF 值在 0.6 以上,部分地区的 WPSCF 值高达 0.9,这更加证实了除了河南省省内的污染传输对洛阳的大气污染有影响之外,汾渭平原的能源和产业结构以及不利于污染物扩散的地势造成的大气污染也对洛阳的影响很大.安阳市的 $\text{PM}_{2.5}$ 和 NO_3^- 潜在源区集中在京津冀污染传输带上的河北省南部的邢台、邯郸以及河南省北部的濮阳、鹤壁和新乡,此外河南东部的周口和商丘以及安徽的北部和山东的西南部的 WPSCF 值都在 0.6 以上,对安阳的 $\text{PM}_{2.5}$ 和 NO_3^- 污染的影响也较大,安阳 OC 的 WPSCF 值在 0.6 以上的区域范围更广,涉及几乎整个河南省和河北省以及安徽西北部、山东西南部、山西东南部和

陕西北部.新乡 $\text{PM}_{2.5}$ 、OC 和 NO_3^- 潜在源区与安阳大致相同,说明同处在京津冀污染传输带上的安阳和新乡除了受到河南省省内的污染传输影响之外,京津冀地区的远距离污染传输也大大增加了安阳和新乡的大气污染程度.

3 结论

(1) 郑州、洛阳、安阳和新乡在采样期间 $\text{PM}_{2.5}$ 均值分别为 (82.1 ± 45.5) 、 (84.7 ± 39.8) 、 (96.8 ± 46.1) 和 $(81.1 \pm 36.6) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,日均值的最高值分别是 250.1、198.1、227.4 和 175.8 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,分别是国家《环境空气质量标准》(GB 3095-2012)日均二级标准限值($75 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)的 3.3、2.6、3.0 和 2.3 倍,4 个城市秋冬季的大气污染形势都很严峻.

(2) 4 个城市 $\text{PM}_{2.5}$ 的主要组分都为 NO_3^- 和 SOC. 4 个城市 NO_3^- 的浓度, NO_3^-/EC 和 NOR 都随着污染等级的升高而显著升高, NO_3^- 的平均浓度和生成速度从郑州、洛阳、安阳到新乡依次降低, NO_3^-/EC 和 NOR 的均值随着污染等级的升高总体

上表现出郑州和洛阳略高于安阳和新乡,说明郑州和洛阳的 NO₃⁻ 更多的来自 NO₂ 的二次转化,而安阳和新乡的 NO₃⁻ 则更多地是由于污染天边界层高度降低而产生的初级排放和积累过程. 4 个城市的 SOC 浓度和在 OC 中的占比都随着污染等级的升高而增大,POC 在 OC 中的占比在不断减小,且 SOC/EC 的比值也在不断增大,说明采样期间随着污染的加重 SOC 的转化在增强.

(3)煤燃烧的标识物 As 在郑州的质量浓度和富集程度最高;冶金和柴油燃烧的代表性元素 Mn 和 Fe 在洛阳最高;冶炼钢铁、镀锌材料和石油燃烧的代表性元素 Zn、Ni 和 Cr 在安阳最高;机动车刹车片磨损和电池工业的代表性元素 Cu 和 Pb 在新乡最高,这都与其各自的产业结构相一致.

(4)CMB 源解析结果显示,4 个城市 PM_{2.5} 污染源为二次硝酸盐、二次硫酸盐、有机物、燃煤源、机动车源、扬尘源、生物质源和工艺过程源,其中二次硝酸盐(27.9%~37.7%)和有机物(10.7%~18.0%)的分担率较高,其次是燃煤源(13.2%~15.4%)和机动车源(8.8%~14.1%).二次硝酸盐的分担率在郑州(37.7%)最高,洛阳(7.0%)和安阳(6.8%)的工艺过程源的分担率相对较高,新乡(14.1%)机动车分担率最高.

(5)4 个城市秋冬季分别有 51.6%、49.2%、49.6% 和 46.3% 的气流来自西北方向.郑州的 PM_{2.5}、OM 和 NO₃⁻ 的 WPSCF 值在 0.6 以上的区域主要在河南本省;洛阳 WPSCF 值在 0.6 以上的区域集中在河南省南部和汾渭平原;安阳和新乡的 PM_{2.5} 和 NO₃⁻ 的高贡献值区域主要在京津冀传输带上,OC 的高贡献值区不仅在京津冀传输带和河南省还有安徽西北部、山东西南部、山西东南部和陕西北部.

参考文献:

- [1] 陈楚,王体健,李源昊,等.濮阳市秋冬季大气细颗粒物污染特征及来源解析[J].环境科学,2019,40(8):3421-3430.
Chen C, Wang T J, Li Y H, et al. Pollution characteristics and source apportionment of fine particulate matter in autumn and winter in Puyang, China[J]. Environmental Science, 2019, 40(8): 3421-3430.
- [2] 陈锦超,董雪玲,张婉,等.北京市霾天 PM_{2.5} 污染特征及其与气象因素的关系[J].环境科学与技术,2018,41(8):87-94.
Chen J C, Dong X L, Zhang W, et al. Characteristics of PM_{2.5} in haze days in Beijing and its relationship with meteorological factors[J]. Environmental Science & Technology, 2018, 41(8): 87-94.
- [3] 杨建儿.上海市近地表大气颗粒物污染特征及来源分析研究[D].上海:华东师范大学,2011.
Yang J E. Study on pollution feature of TSP on the surface of earth and the TSP source judgement-a Case of Shanghai[D]. Shanghai: East China Normal University, 2011.
- [4] 穆泉,张世秋.2013 年 1 月中国大面积雾霾事件直接社会经济损失评估[J].中国环境科学,2013,33(11):2087-2094.
Mu Q, Zhang S Q. An evaluation of the economic loss due to the heavy haze during January 2013 in China[J]. China Environmental Science, 2013, 33(11): 2087-2094.
- [5] Cohen A J, Brauer M, Burnett R, et al. Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: an analysis of data from the global burden of diseases study 2015[J]. The Lancet, 2017, 389(10082): 1907-1918.
- [6] 蔡子颖,韩素芹,汪靖,等.基于天气背景天津地区重污染天气特征分析[J].环境科学学报,2017,37(10):3906-3917.
Cai Z Y, Han S Q, Wang J, et al. Analysis of synoptic characteristics of heavy pollution in Tianjin based on weather background[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, 37(10): 3906-3917.
- [7] 吴兴贺,殷耀兵,谭瑞,等.华北区域点冬季二次有机气溶胶特征与影响因素[J].环境科学学报,2020,40(1):58-64.
Wu X H, Yin Y B, Tan R, et al. Characteristics and influencing factors of secondary organic aerosols in winter at a regional site of North China Plain[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, 40(1): 58-64.
- [8] 张婷婷,马文林,元学奎,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 element carbon in PM_{2.5} in the urban areas of Beijing[J]. Environmental Chemistry, 2018, 37(12): 2758-2766.
- [9] 缪育聪,郑亦佳,王姝,等.京津冀地区霾成因机制研究进展与展望[J].气候与环境研究,2015,20(3):356-368.
Miao Y C, Zheng Y J, Wang S, et al. Recent advances in, and future prospects of, research on haze formation over Beijing-Tianjin-Hebei, China[J]. Climatic and Environmental Research, 2015, 20(3): 356-368.
- [10] 朱书慧,周敏,乔利平,等.2015 年 12 月气流轨迹对长三角区域细颗粒物浓度和分布的影响[J].环境科学学报,2016,36(12):4285-4294.
Zhu S H, Zhou M, Qiao L P, et al. Impact of the air mass trajectories on PM_{2.5} concentrations and distribution in the Yangtze River Delta in December 2015[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, 36(12): 4285-4294.
- [11] 中华人民共和国中央人民政府.中原城市群发展规划.
<http://www.gov.cn/xinwen/2017-01/05/5156816/files/4e3c18bb7f2d4712b7264f379e7cb416.pdf>, 2017-01-05.
- [12] 闫广轩,杨争,席冬冬,等.新乡市秋季大气细颗粒物 PM_{2.5} 中水溶性离子特征及其来源解析[J].环境科学学报,2018,38(2):640-648.
Yan G X, Yang Z, Xi D D, et al. Characterization and source analysis of the water-soluble inorganic ions in PM_{2.5} of Xinxiang during autumn[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, 38(2): 640-648.
- [13] 姜楠.中原经济区典型城市大气颗粒物污染特征、来源解析及其健康风险评估[D].郑州:郑州大学,2017.
- [14] Jiang N, Duan S G, Yu X, et al. Comparative major components and health risks of toxic elements and polycyclic aromatic hydrocarbons of PM_{2.5} in winter and summer in Zhengzhou: based on three-year data[J]. Atmospheric Research, 2018,

- 213: 173-184.
- [15] Wang J, Li X, Zhang W K, *et al.* Secondary PM_{2.5} in Zhengzhou, China: chemical species based on three years of observations[J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2016, **16** (1): 91-104.
- [16] Jiang N, Li Q, Su F C, *et al.* Chemical characteristics and source apportionment of PM_{2.5} between heavily polluted days and other days in Zhengzhou, China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2018, **66**: 188-198.
- [17] 郑州市人民政府.《国家中心城市建设报告(2019)》中英文版举办新闻发布会[EB/OL]. <http://www.zhengzhou.gov.cn/news5/102475.jhtml>, 2019-10-24.
- [18] 河南省生态环保厅. 2018 年河南省生态环境状况公报[EB/OL]. <http://sthjt.henan.gov.cn/2019/06-04/1320088.html>, 2019-06-04.
- [19] 杜小申, 燕丽, 贺晋瑜, 等. 安阳市典型工业源 PM_{2.5} 排放特征及减排潜力估算[J]. *环境科学*, 2019, **40** (5): 2043-2051.
- Du X S, Yan L, He J Y, *et al.* PM_{2.5} emission characteristics and estimation of emission reduction potential from typical industrial sources in Anyang[J]. *Environmental Science*, 2019, **40** (5): 2043-2051.
- [20] 赵海丽, 唐敏, 丁志安, 等. 2005 年-2014 年安阳市城市空气质量变化趋势分析及治理对策研究[J]. *环境科学与管理*, 2016, **41** (6): 141-145.
- Zhao H L, Tang M, Ding Z A, *et al.* Analysis on air quality variation trends and countermeasures in Anyang city from 2005 to 2014[J]. *Environmental Science and Management*, 2016, **41** (6): 141-145.
- [21] 谢国红, 王燕强, 张璐, 等. 新乡市 2014-2015 年空气环境质量现状分析[J]. *河南科技学院学报(自然科学版)*, 2016, **44** (5): 43-47.
- Xie G H, Wang Y Q, Zhang L, *et al.* Analysis of current quality of air environment in Xinxiang city in 2014-2015[J]. *Journal of Henan Institute of Science and Technology (Natural Sciences Edition)*, 2016, **44** (5): 43-47.
- [22] 闫广轩, 雷豪杰, 张靖雯, 等. 新乡冬季 PM_{2.5} 中金属元素与水溶性离子年际变化及其来源解析[J]. *环境科学*, 2019, **40** (3): 1071-1081.
- Yan G X, Lei H J, Zhang J W, *et al.* Interannual variation of metal elements and water-soluble ions in PM_{2.5} during wintertime in Xinxiang and their source apportionment[J]. *Environmental Science*, 2019, **40** (3): 1071-1081.
- [23] 李雁宇, 李杰, 曾胜兰, 等. 2017 年汾渭平原东部大气颗粒物污染特征分析[J]. *环境科学研究*, 2020, **33** (1): 63-72.
- Li Y Y, Li J, Zeng S L, *et al.* Analysis of atmospheric particulates in the eastern Fenwei plain in 2017[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, **33** (1): 63-72.
- [24] Wang S B, Yan Q S, Yu F, *et al.* Distribution and source of chemical elements in size-resolved particles in Zhengzhou, China: effects of regional transport[J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2018, **18** (2): 371-385.
- [25] Jiang N, Yin S S, Guo Y, *et al.* Characteristics of mass concentration, chemical composition, source apportionment of PM_{2.5} and PM₁₀ and health risk assessment in the emerging megacity in China[J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2018, **9** (2): 309-321.
- [26] Jiang N, Guo Y, Wang Q, *et al.* Chemical composition characteristics of PM_{2.5} in three cities in Henan, central China[J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2017, **17**: 2367-2380.
- [27] Tian H Z, Cheng K, Wang Y, *et al.* Temporal and spatial variation characteristics of atmospheric emissions of Cd, Cr, and Pb from coal in China[J]. *Atmospheric Environment*, 2012, **50**: 157-163.
- [28] Cao J J. A brief introduction and progress summary of the PM_{2.5} source profile compilation project in China[J]. *Aerosol Science and Engineering*, 2018, **2** (2): 43-50.
- [29] 王爱平, 朱彬, 银燕, 等. 黄山顶夏季气溶胶数浓度特征及其输送潜在源区[J]. *中国环境科学*, 2014, **34** (4): 852-861.
- Wang A P, Zhu B, Yin Y, *et al.* Aerosol number concentration properties and potential sources areas transporting to the top of mountain Huangshan in summer[J]. *China Environmental Science*, 2014, **34** (4): 852-861.
- [30] 段时光, 姜楠, 杨留明, 等. 郑州市冬季大气 PM_{2.5} 传输路径和潜在源分析[J]. *环境科学*, 2019, **40** (1): 86-93.
- Duan S G, Jiang N, Yang L M, *et al.* Transport pathways and potential sources of PM_{2.5} during the winter in Zhengzhou[J]. *Environmental Science*, 2019, **40** (1): 86-93.
- [31] Chi X Y, He P Z, Jiang Z, *et al.* Acidity of aerosols during winter heavy haze events in Beijing and Gucheng, China[J]. *Journal of Meteorological Research*, 2018, **32** (1): 14-25.
- [32] 蒋惠梦, 肖寒, 宋河, 等. 武汉市冬季灰霾期 PM_{2.5} 中水溶性无机离子的特征[J]. *南京信息工程大学学报*, 2018, **10** (5): 590-598.
- Jiang H M, Xiao H, Song H, *et al.* Characteristics of water-soluble inorganic ions in PM_{2.5} during a winter haze episode in Wuhan City[J]. *Journal of Nanjing University of Information Science & Technology*, 2018, **10** (5): 590-598.
- [33] 蒋荣, 严飞, 杨杰, 等. 南通市冬季 PM_{2.5} 中水溶性离子污染特征[J]. *环境监控与预警*, 2020, **12** (2): 45-48.
- Jiang R, Yan F, Yang J, *et al.* Pollution characteristics of water-soluble ions in PM_{2.5} in winter in Nantong[J]. *Environmental Monitoring and Forewarning*, 2020, **12** (2): 45-48.
- [34] 陈雅琼, 宋田, 宋冬洋, 等. 成都市冬季 PM_{2.5} 污染特征及溯源分析[J]. *河南科技*, 2020, (7): 151-153.
- Chen Y Q, Song T, Song D Y, *et al.* Characteristics and analysis of PM_{2.5} pollution in winter in Chengdu[J]. *Henan Science and Technology*, 2020, (7): 151-153.
- [35] Duan J C, Tan J H, Cheng D X, *et al.* Sources and characteristics of carbonaceous aerosol in two largest cities in Pearl River Delta region, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41** (14): 2895-2903.
- [36] Pathak R K, Wu W S, Wang T. Summertime PM_{2.5} ionic species in four major cities of China: nitrate formation in an ammonia-deficient atmosphere[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, **9** (5): 1711-1722.
- [37] Li H M, Wang Q G, Yang M, *et al.* Chemical characterization and source apportionment of PM_{2.5} aerosols in a megacity of Southeast China[J]. *Atmospheric Research*, 2016, **181**: 288-299.
- [38] Zheng G J, Duan F K, Su H, *et al.* Exploring the severe winter haze in Beijing: the impact of synoptic weather, regional transport and heterogeneous reactions[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, **15** (6): 2969-2983.
- [39] Wang X F, Wang W X, Yang L X, *et al.* The secondary formation of inorganic aerosols in the droplet mode through heterogeneous aqueous reactions under haze conditions[J]. *Atmospheric Environment*, 2012, **63**: 68-76.
- [40] Zhu X W, Tang G Q, Guo J P, *et al.* Mixing layer height on the North China Plain and meteorological evidence of serious air

- pollution in southern Hebei [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, **18**(7): 4897-4910.
- [41] Liu B S, Song N, Dai Q L, *et al.* Chemical composition and source apportionment of ambient PM_{2.5} during the non-heating period in Taian, China[J]. *Atmospheric Research*, 2016, **170**: 23-33.
- [42] Xie Y Z, Liu Z R, Wen T X, *et al.* Characteristics of chemical composition and seasonal variations of PM_{2.5} in Shijiazhuang, China: impact of primary emissions and secondary formation[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **677**: 215-229.
- [43] Duan F K, Liu X D, Yu T, *et al.* Identification and estimate of biomass burning contribution to the urban aerosol organic carbon concentrations in Beijing[J]. *Atmospheric Environment*, 2004, **38**(9): 1275-1282.
- [44] 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.
- [45] 杨麒, 傅致严, 刘湛, 等. 郴州市大气 PM_{2.5} 中无机元素污染特征及来源分析[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2019, **46**(6): 133-140.
- Yang Q, Fu Z Y, Liu Z, *et al.* Characteristics and sources of inorganic elements in atmospheric PM_{2.5} at Chenzhou City [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2019, **46**(6): 133-140.
- [46] 董烟, 邹海凤, 梁隆超, 等. 贵阳市大气 PM_{2.5} 中无机元素的组成及来源解析[J]. *环境监测管理与技术*, 2019, **31**(1): 14-18, 47.
- Dong X, Zou H F, Liang L C, *et al.* Composition and source apportionment of inorganic element in PM_{2.5} in Guiyang[J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2019, **31**(1): 14-18, 47.
- [47] 郑元铸, 葛琳琳, 郑旭军, 等. 温州市区 PM_{2.5} 无机元素污染特征及来源分析[J]. *环境化学*, 2017, **36**(1): 84-91.
- Zheng Y Z, Ge L L, Zheng X J, *et al.* Characteristics and source apportionment of inorganic elements in PM_{2.5} in Wenzhou, Zhejiang[J]. *Environmental Chemistry*, 2017, **36**(1): 84-91.
- [48] Liu G, Li J H, Wu D, *et al.* Chemical composition and source apportionment of the ambient PM_{2.5} in Hangzhou, China [J]. *Particulology*, 2015, **18**: 135-143.
- [49] 胡鸣, 张懿华, 赵倩彪. 上海市冬季 PM_{2.5} 无机元素污染特征及来源分析[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(7): 1993-1999.
- Hu M, Zhang Y H, Zhao Q B. Characteristics and sources of inorganic elements in PM_{2.5} during wintertime in Shanghai [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(7): 1993-1999.
- [50] Canha N, Freitas M C, Almeida-Silva M, *et al.* Burn wood influence on outdoor air quality in a small village: Foros de Arrão, Portugal [J]. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2012, **291**(1): 83-88.
- [51] 贾岳清, 殷惠民, 周瑞, 等. 北京初冬季 PM_{2.5} 中无机元素与二次水溶性离子浓度特征[J]. *环境化学*, 2018, **37**(12): 2767-2773.
- Jia Y Q, Yin H M, Zhou R, *et al.* Characteristics of water-soluble inorganic ions and inorganic elements of PM_{2.5} in Beijing [J]. *Environmental Chemistry*, 2018, **37**(12): 2767-2773.
- [52] 张光亮, 耿存珍. 大气颗粒物源解析 CMB 法与 PFA 法原理及比较研究[J]. *环境科学与管理*, 2019, **39**(10): 56-59, 105.
- Zhang G L, Geng C Z. Comparison of CMB and PFA on source apportionment of atmospheric particles [J]. *Environmental Science and Management*, 2019, **39**(10): 56-59, 105.
- [53] Watson J G, Cooper J A, Huntzicker J J. The effective variance weighting for least squares calculations applied to the mass balance receptor model[J]. *Atmospheric Environment (1967)*, 1984, **18**(7): 1347-1355.
- [54] 吴琳, 沈建东, 冯银厂, 等. 杭州市灰霾与非灰霾日不同粒径大气颗粒物来源解析[J]. *环境科学研究*, 2014, **27**(4): 373-381.
- Wu L, Shen J D, Feng Y C, *et al.* Source apportionment of particulate matters in different size bins during hazy and non-hazy episodes in Hangzhou City [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2014, **27**(4): 373-381.
- [55] 国家统计局. 河南统计年鉴 2017[M]. 北京: 中国统计出版社, 2017.
- [56] 国家统计局. 河南统计年鉴 2018[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018.
- [57] 国家统计局. 河南统计年鉴 2019[M]. 北京: 中国统计出版社, 2019.
- [58] Watson J G, Chow J C, Chen L W A, *et al.* Particulate emission factors for mobile fossil fuel and biomass combustion sources [J]. *Science of the Total Environment*, 2011, **409**: 2384-2396.

CONTENTS

Concurrent Collection of Ammonia Gas and Aerosol Ammonium in Urban Beijing During National Celebration Days Utilizing an Acid-Coated Honeycomb Denuder in Combination with a Filter System	GU Meng-na, PAN Yue-peng, SONG Lin-lin, <i>et al.</i> (1)
Heavy Pollution Episode in Tianjin Based on UAV Meteorological Sounding and Numerical Model	YANG Xu, CAI Zi-ying, HAN Su-qin, <i>et al.</i> (9)
Characteristics and Sources of PM _{2.5} Pollution in Typical Cities of the Central Plains Urban Agglomeration in Autumn and Winter ...	MIAO Qing-qing, JIANG Nan, ZHANG Rui-qin, <i>et al.</i> (19)
Characteristics and Sources of Water-soluble Ion Pollution in PM _{2.5} in Winter in Shenyang	WANG Guo-zhen, REN Wan-hui, YU Xing-na, <i>et al.</i> (30)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} Collected in Baoding	LEI Wen-kai, LI Xing-ru, ZHANG Lan, <i>et al.</i> (38)
Source Apportionment of Ambient Carbonyl Compounds Based on a PMF and Source Tracer Ratio Method: A Case Based on Observations in Nanjing	HU Kun, WANG Ming, WANG Hong-li, <i>et al.</i> (45)
Characterization and Source Apportionment of Atmospheric VOCs in Tianjin in 2019	GAO Jing-yun, XIAO Zhi-mei, XU Hong, <i>et al.</i> (55)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient VOCs in Spring in Liuzhou	LIU Qi, LU Xing-lin, ZENG Peng, <i>et al.</i> (65)
Characteristics of Ozone and Source Apportionment of the Precursor VOCs in Tianjin Suburbs in Summer	LUO Rui-xue, LIU Bao-shuang, LIANG Dan-ni, <i>et al.</i> (75)
Transport Influence and Potential Sources of Ozone Pollution for Nanjing During Spring and Summer in 2017	XIE Fang-jian, LU Xiao-bo, YANG Feng, <i>et al.</i> (88)
Ozone Pollution Trend in the Pearl River Delta Region During 2006-2019	ZHAO Wei, GAO Bo, LU Qing, <i>et al.</i> (97)
Distribution Characteristics and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmospheric Deposition in Areas Adjacent to a Large Petrochemical Enterprise	LI Da-yan, QI Xiao-bao, WU Jian, <i>et al.</i> (106)
Quantitative Comparison of Methods to Assess the Airborne Particulate Matter Retention Capacity of Leaves	YUE Chen, LI Guang-de, XI Ben-ye, <i>et al.</i> (114)
Emission Estimation and Fate Simulation of Dichlorvos in the Dongjiang River Watershed	ZHANG Bing, ZHANG Qian-qian, YING Guang-guo (127)
Distribution and Ecological Risk Assessment of Antibiotics in the Songhua River Basin of the Harbin Section and Ashe River	YANG Shang-le, WANG Xu-ming, WANG Wei-hua, <i>et al.</i> (136)
Characteristics and Ecological Risk Assessment of POPs Pollution in Sediments of Xiaoxingkai Lake in the Northeast China	LI Hui, LI Jie, SONG Peng, <i>et al.</i> (147)
Distribution and Ecological Risk Assessment of PPCPs in Drinking Water Sources of Henan Province	ZHOU Ying, WU Dong-hai, LU Guang-hua, <i>et al.</i> (159)
Occurrence Characteristics and Health Risk Assessment of Endocrine Disrupting Chemicals in Groundwater in Wuxi-Changzhou	WANG Shu-ting, RAO Zhu, GUO Feng, <i>et al.</i> (166)
Seasonal Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Water of Qingjiang River	LIU Zhao, ZHOU Hong, CAO Wen-jia, <i>et al.</i> (175)
Metal Pollutions and Human Health Risks in Groundwater from Wet, Normal, and Dry Periods in the Huixian Karst Wetland, China	LI Jun, ZHAO Yi, ZOU Sheng-zhang, <i>et al.</i> (184)
Seasonal Variation of DOM Spectral Characteristics of Rivers with Different Urbanization Levels in the Three Gorges Reservoir Area	CHEN Zhao-yu, LI Si-yue (195)
Distribution of Micro-plastics in the Soil Covered by Different Vegetation in Yellow River Delta Wetland	YUE Jun-jie, ZHAO Shuang, CHENG Hao-dong, <i>et al.</i> (204)
Metagenomic Analysis Provides Insights into Bacterial Communities, Antibiotic Resistomes, and Public Health Risks in the Dongping Lake Reservoir	ZHANG Hong-na, CUI Na, SHEN Hong-miao (211)
Mechanism of Algal Community Dynamics Driven by the Seasonal Water Bacterial Community in a Stratified Drinking Water Reservoir	YAN Miao-miao, ZHANG Hai-han, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (221)
Community Structure, Function, and Influencing Factors of Planktonic Fungi in the Danjiangkou Reservoir	ZHENG Bao-hai, WANG Xiao-yu, LI Ying-jun, <i>et al.</i> (234)
Changes in Algal Particles and Their Water Quality Effects in the Outflow River of Taihu Lake	GUO Yu-long, XU Hai, CHEN Xu-qing, <i>et al.</i> (242)
Characteristics of Soil Nitrogen and Phosphorus Losses Under Different Land-use Schemes in the Shipanqiu Watershed	DENG Hua, GAO Ming, LONG Yi, <i>et al.</i> (251)
Influence of Antecedent Dry Days on Nitrogen Removal in Bioretention Systems	CHEN Yao, LI Xin-rui, ZHENG Shuang, <i>et al.</i> (263)
Effect of <i>Enteromorpha prolifera</i> Biochar on the Adsorption Characteristics and Adsorption Mechanisms of Ammonia Nitrogen in Rainfall Runoff	CHEN You-yuan, LI Pei-qiang, LI Xian-chi, <i>et al.</i> (274)
Effect of Filter Medium on the Enhancement of Complete Autotrophic Nitrogen Removal over Nitrite Process in a Tidal Flow Constructed Wetland	LIU Bing, ZHENG Yu-ming, QIN Hui-an, <i>et al.</i> (283)
Adsorption Effect and Mechanism of Aqueous Arsenic on FeMnNi-LDHs	LIAO Yu-mei, YU Jie, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i> (293)
Combined Use of Zirconium-Modified Bentonite Capping and Calcium Nitrate Addition to Control the Release of Phosphorus from Sediments	ZHANG Hong-hua, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (305)
Distribution Characteristics of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Wastewater Treatment Plants	XIE Ya-wei, YU Chi-sheng, LI Fei-fei, <i>et al.</i> (315)
Occurrence of Antibiotic Resistance Genes and Bacterial Community Structure of Different Sludge Samples During Microwave Pretreatment-Anaerobic Digestion	LI Hui-li, WU Cai-yun, TANG An-ping, <i>et al.</i> (323)
Selenium Threshold for the Delimitation of Natural Selenium-Enriched Land	WANG Hui-yan, ZENG Dao-ming, GUO Zhi-juan, <i>et al.</i> (333)
Improved Regression Kriging Prediction of the Spatial Distribution of the Soil Cadmium by Integrating Natural and Human Factors ...	GAO Zhong-yuan, XIAO Rong-bo, WANG Peng, <i>et al.</i> (343)
Simulation Cadmium (Cd) Accumulation in Typical Paddy Soils in South China	DAI Ya-ting, FU Kai-dao, YANG Yang, <i>et al.</i> (353)
Bioaccessibility and Health Risks of the Heavy Metals in Soil-Rice System of Southwest Fujian Province	LIN Cheng-qi, CAI Yu-hao, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (359)
Effects of Nano Material on Cadmium Accumulation Capacity and Grain Yield of Indica Hybrid Rice Under Wetting-drying Alternation Irrigation	YANG Ru, CHEN Xin-rui, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (368)
Regulation Control of a Tribasic Amendment on the Chemical Fractions of Cd and As in Paddy Soil and Their Accumulation in Rice	JIANG Yi, LIU Ya, GU Jiao-feng, <i>et al.</i> (378)
Combined Effect of Weathered Coal Based Amendments and Soil Water Management on Methylmercury Accumulation in Paddy Soil and Rice Grains	ZHENG Shun-an, WU Ze-ying, DU Zhao-ling, <i>et al.</i> (386)
Effects of Fertilization Strategies on the Cadmium Resistance of Paddy Soil Microorganisms	ZHENG Kai-kai, MA Zhi-yuan, SUN Bo, <i>et al.</i> (394)
Soil Enzyme Activity in <i>Picea schrenkiana</i> and Its Relationship with Environmental Factors in the Tianshan Mountains, Xinjiang	ZHANG Han, GONG Lu, LIU Xu, <i>et al.</i> (403)
Effects of Farmland Abandonment on Soil Enzymatic Activity and Enzymatic Stoichiometry in the Loess Hilly Region, China	ZHONG Ze-kun, YANG Gai-he, REN Cheng-jie, <i>et al.</i> (411)
Effect of Biochar on Soil Enzyme Activity & the Bacterial Community and Its Mechanism	FENG Hui-lin, XU Chen-sheng, HE Huan-hui, <i>et al.</i> (422)
Effects of Vegetation Restoration on the Structure and Function of the Rhizosphere Soil Bacterial Community of <i>Solanum rostratum</i>	ZHANG Rui-hai, SONG Zhen, FU We-dong, <i>et al.</i> (433)
Response of Microbial Biomass Carbon and Nitrogen and Rice Quality in a Yellow Soil Paddy Field to Biochar Combined with Nitrogen Fertilizer	SHI Deng-lin, WANG Xiao-li, LIU An-kai, <i>et al.</i> (443)
Effects of Adding Straw and Biochar with Equal Carbon Content on Soil Respiration and Microbial Biomass Carbon and Nitrogen	HE Tian-tian, WANG Jing, FU Yun-peng, <i>et al.</i> (450)
How Different Ratios of Straw Incorporation to Nitrogen Fertilization Influence Endogenous and Exogenous Carbon Release from Agricultural Soils	SUN Zhao-an, ZHANG Xuan, HU Zheng-jiang, <i>et al.</i> (459)
Effect of Biochar and Chemical Fertilizer Mixture on Ammonia Volatilization and Phosphorus Fixation	YANG Wen-na, DENG Zhen-xin, LI Jiao, <i>et al.</i> (467)
Effects of Film Materials on Ammonia Volatilization Emissions from a Paddy System After Reducing Nitrogen Fertilizer Application	YU Ying-liang, WANG Meng-fan, YANG Bei, <i>et al.</i> (477)
Effects of Microplastics on Embryo Hatching and Intestinal Accumulation in Larval Zebrafish <i>Danio rerio</i>	ZHAO Jia, RAO Ben-qiang, GUO Xiu-mei, <i>et al.</i> (485)
Urban Micro-Scale Thermal Environment Simulation Supported by UAV Thermal Infrared Data	YANG Shao-qi, FENG Li, TIAN Hui-hui, <i>et al.</i> (492)
Estimation of the Urban Heat Island Intensity Change and Its Relationships with Driving Factors Across China Based on the Human Settlement Scale	SUN Yan-wei, WANG Run, GUO Qing-hai, <i>et al.</i> (501)