

目次

“大气十条”实施期间南京市 PM _{2.5} 化学组成与来源的演变特征	陈培林, 郭蓉, 王勤耕 (1)
河南省北部区域霾污染过程中城市和农村点位 PM _{2.5} 组分差异	王申博, 王玲玲, 范相阁, 王楠, 马双良, 张瑞芹 (11)
廊坊市秋冬季大气细颗粒物污染特征及来源解析	朱淑贞, 佟洁, 鲍丰, 孙浩 (20)
天津市采暖季不同气团来向 PM _{2.5} 中重金属污染特征及健康风险评价	李立伟, 邓小文, 肖致美, 元洁, 杨宁, 郭小龙, 白宇 (30)
基于多属性决策方法的太原市冬季街道尘土中潜在有害元素关键来源解析	邓文博, 刘文娟 (38)
北京市 PM _{2.5} -O ₃ 复合污染数值响应解析	刘添强 (48)
长三角区域人为源活性挥发性有机物高分辨率排放清单	田俊杰, 丁祥, 安静宇, 李曼, 王鑫, 黄成 (58)
南京北郊工业乡村混合区秋季边界层 VOCs 垂直分布特征	王泰, 朱彬, 施双双, 安俊琳, 唐贵谦, 徐家平 (66)
广西柳城县 VOCs 组分特征、来源及其对臭氧生成的敏感性	吴影, 莫招育, 吴琴琴, 陆嘉晖, 毛敬英, 陈雪梅, 栗少丽, 覃纹, 刘慧琳, 韦敏 (75)
城市臭氧污染特征与高影响气象因子:以苏州为例	何琰, 林惠娟, 曹舒娅, 宋璟璐, 孙伟, 熊宇 (85)
华北平原周县人为源氨排放清单及分布特征	康嘉慧, 孟凡磊, 刘学军, 许稳 (94)
WRF 模式最优参数化方案在不同空气质量模式的应用	杨景朝, 蒋兴文, 伯鑫, 王刚, 冯勇 (104)
西安市春季生物气溶胶的分布特征和健康影响	魏军强, 杨柳, 沈振兴, 王秀茹 (118)
青岛近海不同天气下生物气溶胶中细菌浓度及存活率分布特征	魏文淑, 祁建华, 常成 (127)
中国沉积物多环芳烃的时空分布及驱动因子	黄柱良, 蔡家伟, 王儒威 (138)
长江口近岸地区抗生素抗性基因与微生物群落分布特征	徐秋鸿, 刘曙光, 娄厦, Larisa Dorzhieva Radnaeva, Elena Nikitina, Makhinov Aleksei Nikolavich, Araruna José Tavares, 金字辰, 李鑫 (158)
人类活动影响下的高原湿地四环素类抗生素抗性基因赋存与微生物群落共现性	秦荣, 喻庆国, 刘振亚, 王行 (169)
我国东南地区饮用水源地多种农药的赋存特征及健康风险评估	何姝, 董慧岭, 任南琪 (180)
珠海市中部主要供水水库沉积物重金属时空分布与风险评价	王思瑞, 张坤峰, 昌盛, 张茉莉, 付青 (189)
苏州水网地区河道底泥的重金属分布特征与污染风险	郑敏慧, 白冬锐, 张涛, 陈坦, 王洪涛, 杨婷, 张冰, 金军 (198)
长三角典型城郊流域生物可降解性有机质的分布及影响因素	吴文雨, 马菁晨, 杨磊, 李敏, 唐剑锋 (210)
过水性湖泊水质长期演变趋势及驱动因素:以骆马湖为例	黄雪滢, 高鸣远, 王金东, 王明明, 陈思恩, 龚志军, 王腊春, 蔡永久 (219)
渭河微塑料污染现状与风险评价	山泽萱, 张妍, 张成前, 时鹏, 张鑫 (231)
不同颜色聚碳酸酯塑料对附着藻类生长和群落结构的影响	王梦雪, 尹思成, 王振方, 陈锦贤, 张玮, 王丽卿 (243)
苦草叶表附和和水体浮游细菌群落多样性格局及其影响因素	张梅婷, 刘晋仙, 苏嘉贺, 柴宝峰 (252)
基于 16S rRNA 测序技术的青藏高原河流细菌群落多样性	璩伟卿, 张博美, 黄雪, 任泽, 高红凯 (262)
基于 eDNA 的硅藻群落时空异质性及生态健康评价	姜山, 张颜, 李飞龙, 张效伟 (272)
三峡库区澎溪河河段间水华程度差异及其机制	罗晓佼, 张钊, 黄伟, 胡鹏飞, 谭炳圆, 张磊 (282)
自然降雨下蔬菜地土壤侵蚀及氮素流失特征	宁嘉丽, 黄艳芬, 李桂芳, 陈钊柱, 王坚桦 (293)
绿色、蓝色和蓝-绿屋顶径流水质特征	章孙逊, 张守红, 闫婧, 王恺, 杨航, 王任重远, 张文龙, 李华林 (303)
基于地理探测器的山西省 2000 ~ 2020 年 NPP 时空变化特征及驱动力分析	邵嘉豪, 李晶, 闫星光, 马天跃, 张瑞 (312)
2000 ~ 2020 年西南地区植被 NDVI 时空变化及驱动机制探究	徐勇, 戴强玉, 黄雯婷, 盘钰春, 郑志威, 郭振东 (323)
青海湖周边地区表层土壤重金属含量和抗性基因丰度及相关性	胡石磊, 瞿剑里, 章丽, 赵美蓉 (336)
四川盆地典型农耕地土壤重金属含量、污染及其影响因素	刘属灵, 吴梅, 刘志远, 刘双燕, 刘永林, 赵家宇, 刘怡 (347)
宁夏引黄灌区农田土壤重金属生态风险评价及来源解析	陈林, 马琨, 马建军, 王金保, 李虹, 贾彪, 倪细炉, 马进鹏, 梁翔宇 (356)
铜冶炼场地周边土壤重金属污染特征与风险评价	彭驰, 刘旭, 周子若, 姜智超, 郭朝晖, 肖细元 (367)
西南地区典型土壤酸化特征及其与重金属形态活性的耦合关系	凌云, 刘汉燧, 张小婷, 魏世强 (376)
外源 Cd 在不同类型土壤中的稳定化特征	王港, 余海英, 黄化刚, 张路, 左洪菊 (387)
基于有效硒的富硒土壤阈值及有效硒的影响因素	王莹, 马彦斌, 王泽晶 (395)
基于成土母质分区的土壤-作物系统重金属累积特征与健康风险评价	陈子万, 许晶, 侯召雷, 彭敏, 杨帆, 陈杰, 徐永强, 杨树云, 李家云, 于林松 (405)
贵州省旱地土壤和玉米 As 含量特征及其种植安全性评估	黄凤艳, 周浪, 宋波, 虎瑞, 吴勇, 王佛鹏, 张云霞 (415)
象草与苦楝/构树间作修复矿区重金属污染土壤潜力	王小慧, 肖细元, 郭朝晖, 彭驰, 王小燕 (426)
1 株高耐性肠杆菌的筛选及对铜、砷同步钝化	尹雪斐, 刘玉玲, 伍德, 黄薪铭, 张朴心, 铁柏清 (436)
黄土丘陵区人工刺槐林土壤有机碳矿化特征及其与有机碳组分的关系	朱玉帆, 刘伟超, 李佳欣, 苏玉博, 简俊楠, 杨改河, 任成杰, 冯永忠, 任广鑫, 王晓妍, 韩新辉 (444)
设施农业土壤磷素累积迁移转化及影响因素	方兵, 陈林, 王阳, 祝亚飞, 王瑞, 宋桂芳, 刘俊, 杨斌, 张世文 (452)
优化秸秆管理提高玉米农田碳氮效率与经济效益	王良, 钱欣, 高英波, 张慧, 刘开昌, 陈国庆, 李宗新 (463)
缓控释肥深施对黏性土壤麦田氮素去向的影响	侯朋福, 薛利祥, 袁文胜, 曹帅, 刘颖多, 薛利红, 杨林章 (473)
黄河下游冲积平原轮作休耕农田土壤真菌群落结构与功能	南镇武, 刘柱, 孟维伟, 代红翠, 徐杰, 王娜, 刘灵艳, 王旭清, 刘开昌 (482)
红壤区退化林地表土真菌群落结构对土壤改良措施的响应	管鸿智, 黄荣珍, 王金平, 朱丽琴, 邹显花, 姬绍晖, 林丽靖, 房焕英, 杨梦佳, 廖迎春 (494)
半干旱-亚湿润干旱沙区樟子松根内真菌群落结构和功能时空动态特征	赵珮杉, 郭米山, 高广磊, 丁国栋, 张英, 任悦 (502)
基于 QMEC 分析的青藏高原不同类型冰川前缘地土壤微生物功能潜力	张洁洁, Anders Priemé, 陈显轲, 周汉昌, 张沁唯, 庄绪亮, 秦翔, 庄国强, 马安周 (512)
中国主粮作物生物炭产量效应的 Meta 分析	于滨杭, 姬建梅, 王丽学, 刘静, 高欢, 刘丹 (520)
生物炭影响抗生素在土壤中环境行为的 Meta 分析	李经涵, 张建强, 夏丽琼, 郑世界, 杨红薇, 何杨 (531)
不同农作物秸秆原料制备生物炭特性及重金属浸出行为	李家康, 邱春生, 赵佳奇, 王晨晨, 刘楠楠, 王栋, 王少坡, 孙力平 (540)
中国县城碳排放时空演变与异质性	宋苑震, 曾坚, 王森, 梁晨 (549)
近 20 年重庆市主城区碳排放的时空动态演进及其重心迁移	向书江, 杨春梅, 谢雨琦, 王丹, 王子芳, 高明 (560)
中国 1991 ~ 2018 年突发环境事件时空特征及影响因素	余光辉, 王非凡, 刘贤赵, 李文慧, 向云波 (572)
季铵盐抗菌剂在环境中的迁移转化行为及其毒性效应	张利兰, 覃存立, 钱瑶, 易美玲 (583)
《环境科学》征订启事(29) 《环境科学》征稿简则(57) 信息(443, 481, 530)	

廊坊市秋冬季大气细颗粒物污染特征及来源解析

朱淑贞, 佟洁, 鲍丰, 孙浩

(廊坊市生态环境局, 廊坊 065000)

摘要: 分析了2019~2020年秋冬季廊坊市北部、市区和南部这3个站点的大气细颗粒物及其化学组成。空间分布上, $PM_{2.5}$ 浓度整体为: 南部 > 市区 > 北部。 $PM_{2.5}$ 主要成分为有机物、硝酸盐、硫酸盐、铵盐、矿物组分、氯离子和元素碳, 分别占 $PM_{2.5}$ 的质量分数为 25.4%、21.5%、11.0%、11.5%、13.7%、3.5% 和 5.8%, 金属元素及其他物质的质量分数分别为 0.3% 和 7.2%; 二次无机盐浓度呈现市区 ($28.7 \mu g \cdot m^{-3}$) 高于北部 ($28.0 \mu g \cdot m^{-3}$) 和南部 ($26.8 \mu g \cdot m^{-3}$) 郊区的变化特征, 而有机物(其浓度分别为 16.6 、 13.0 和 $18.5 \mu g \cdot m^{-3}$, 由北向南, 下同)、矿物组分 (9.6 、 6.7 和 $9.7 \mu g \cdot m^{-3}$)、氯盐 (2.0 、 2.0 和 $2.8 \mu g \cdot m^{-3}$) 和元素碳 (3.6 、 3.2 和 $4.3 \mu g \cdot m^{-3}$) 浓度呈现南部和北部郊区高于市区的变化特征。随着污染加重, 二次无机盐的占比增加显著, 其质量分数从 38.7% 增加到 51.3%, 表明二次无机盐是廊坊市大气污染的主控因子; 有机物的贡献较高, 但其质量分数随着污染加重有所降低, 从 27.3% 降到了 23.0%。应用 PMF 模型解析出廊坊市大气细颗粒物的 5 个主要来源, 其中二次无机气溶胶的贡献最高, 其贡献率高达 41.9%; 交通和燃煤同样是廊坊市大气颗粒物的重要来源, 贡献率分别为 19.9% 和 12.7%; 工业和扬尘源的贡献率分别为 9.1% 和 9.3%, 其他未解析来源的贡献为 7.1%。各区域的大气颗粒物来源较为接近, 二次无机气溶胶和交通源的贡献率均为: 市区 > 北部 > 南部, 燃煤、扬尘和工业源的贡献率均为: 南部 > 北部 > 市区。清洁天和污染天廊坊市大气细颗粒物的来源贡献差异较大, 清洁天的主导来源为二次无机气溶胶、扬尘和交通源, 而污染天则以二次无机气溶胶、交通和燃煤源贡献为主; 随着污染加重, 二次无机气溶胶和交通源的增加趋势最为显著, 其贡献率分别从 34.6% 增加到 45.7% 和从 17.3% 增加到 21.5%。

关键词: 廊坊市; 大气颗粒物; 化学组成; 质量重构; 源解析

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)01-0020-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202112128

Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Fine Particles in Langfang in Autumn and Winter

ZHU Shu-zhen, TONG Jie, BAO Feng, SUN Hao

(Langfang Municipal Ecology and Environment Bureau, Langfang 065000, China)

Abstract: In this study, we report observations of various chemical species in $PM_{2.5}$ samples that were collected between November 25, 2019 and March 31, 2020 in the northern, urban, and southern areas of Langfang, among which the concentrations of $PM_{2.5}$ followed the order of southern > urban > northern. The abundance and chemical compositions of the particles in this study were temporally and spatially variable, with major contributions from organic matter (25.4%), nitrate (21.5%), sulfate (11.0%), ammonium (13.5%), and crustal matter (13.7%). The contributions of nitrate, sulfate, and ammonium were higher in the urban site compared with that in the southern and northern sites. On the contrary, organic matter and crustal matter exhibited much higher values in the southern and northern sites. In addition, the contributions of organic matter to the particle mass decreased from 27.3% to 23.0%, and the total contributions of sulfate, nitrate, and ammonium ions increased from 38.7% to 51.3% between clean and haze days, respectively. Source apportionment using positive matrix factorization showed five $PM_{2.5}$ sources: secondary inorganic aerosol (41.9%), traffic emissions (19.9%), coal combustion (12.7%), industrial pollution (9.1%), and mineral dust (9.3%). The contributions of the first two factors followed the order of urban > northern > southern, whereas the contributions of the last three factors followed the order of southern > northern > urban. Further, the contributions of secondary inorganic aerosol, traffic emissions, and coal combustion were higher on haze days, whereas the contributions of industrial pollution and mineral dust were higher on clean days.

Key words: Langfang; atmospheric particulate matter; chemical composition; mass closure; source apportionment

大气颗粒物是危害人体健康^[1,2]和影响环境质量^[3]的重要污染物,同时在全球气候变化中扮演着重要角色^[4]。京津冀地区的细颗粒物($PM_{2.5}$)污染严重^[5]。2013~2017年“大气十条”的实施使全国空气质量总体改善,但京津冀地区仍然是全国环境质量最差的地区^[6]。廊坊市位于北京天津交界,是北京市及周边传输通道“2+26”城市之一,其重要的地理位置使其空气质量状况备受关注。京津冀地区 $PM_{2.5}$ 重污染过程多发生在秋冬季^[7]。据统计,京津冀地区 2019~2020 年秋冬季集中了全年 90% 以

上的重度污染天^[8]。因此,研究廊坊市秋冬季大气颗粒物的污染特征和来源对于京津冀地区大气污染的精细化管控具有重要意义。

细颗粒物来源解析是制定环境空气质量达标规划和重污染天气应急预案的重要基础和依据,对 $PM_{2.5}$ 减排和污染控制具有重要意义^[9]。受体模型在京津冀及周边地区源解析工作中被广泛使用^[10~16]。

收稿日期: 2021-12-13; 修订日期: 2022-04-20

作者简介: 朱淑贞(1985~),女,硕士,工程师,主要研究方向为大气颗粒物环境影响及来源解析, E-mail: zhushuzhen1985@163.com

结果表明,燃煤、交通、工业、扬尘和二次气溶胶是京津冀地区 $\text{PM}_{2.5}$ 的主要来源,且各污染源的贡献具有较大的空间差异性和动态变化规律^[17~24]. 这就要求大气 $\text{PM}_{2.5}$ 源解析工作不断更新和精细化,以反映污染源的实际情况。

近年来,针对京津冀地区大气颗粒物的化学组成和来源解析,相关学者也做了大量研究. 对 2013 年 1 月北京的霾污染过程研究发现,二次无机盐和有机物是细颗粒物的主要化学组成,而二次无机盐和二次有机物的非均相化学生成是霾污染暴发和增长的主因^[25]; 北京、天津、保定和廊坊的颗粒物来源解析显示,北京的 $\text{PM}_{2.5}$ 污染以机动车排放为主,廊坊和保定的燃烧排放(包括燃煤和生物质燃烧)显著,而天津的土壤和建筑扬尘排放占主导地位^[26]. 有研究表明,二次颗粒物(36%~58%)、交通(8%~26%)、民用燃煤(8%~16%)和生物质燃烧(5%~16%)是京津冀郊区 2014~2015 年秋冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 的主要来源^[27].

针对廊坊市 $\text{PM}_{2.5}$ 的化学组分特征和来源相关学者也做了大量的研究. 2015 年秋季廊坊 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 化学组成的昼夜变化显示,夜间 EC、Cu、Zn、Cr、Pb、 Cl^- 、 NO_3^- 和 NH_4^+ 等浓度明显上升,表明采样期间廊坊夜间可能存在移动源和部分工业污染源排放^[28]; 不同污染等级下 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 及其碳质组分的研究显示,当污染最为严重时, $\text{PM}_{2.5}$ 为首要污染物,且二次有机碳的质量分数最高^[29]; 有研究表明,二次无机源、机动车源、燃煤源和二次有机气溶胶是廊坊开发区 2018 年冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 的主要来源^[30],而汽车尾气、燃烧源和道路扬尘为其中碳组分的主要来源^[31]; 但目前的研究多为单点采样,鲜见针对廊坊市不同区域颗粒物污染特征和来源差异的研究。

本研究在廊坊设置了 3 个采样点,开展秋冬季大气 $\text{PM}_{2.5}$ 的样品采集工作,分析 $\text{PM}_{2.5}$ 及其化学组成的时空变化特征,并利用受体模型进行了分站点以及分污染程度的源解析,旨在为京津冀地区大气 $\text{PM}_{2.5}$ 的精细化管控提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集

本研究在廊坊市自北向南设置了 3 个采样点,分别在三河市交通局、廊坊市生态环境局和大城县生态环境局,采样点位置如图 1 所示. 使用 TH-16A 型大气颗粒物智能采样仪进行 3 个站点 $\text{PM}_{2.5}$ 样品的同步采集,采样流速为 $16.7 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$. 采样时间为 2019 年 11 月 25 日至 2020 年 3 月 31 日,采集时长

为 23 h,每日采集 1 组样品(石英膜与特氟龙膜各一张). 3 个采样点位共完成手工采样 768 张,其中空白膜 72 张。

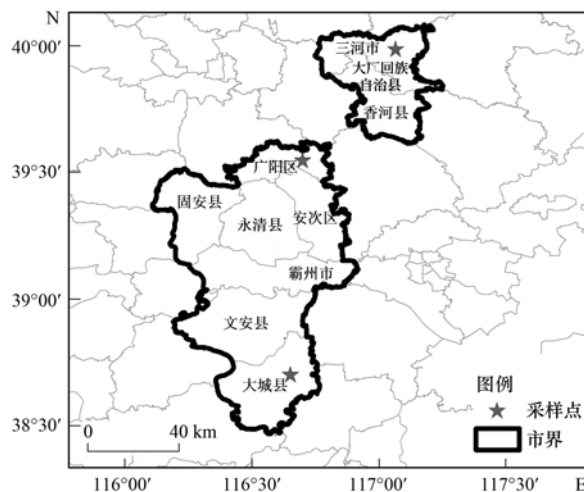


图 1 廊坊市采样点分布示意

Fig. 1 Locations of sampling sites in Langfang

为了去除有机物的影响,采样前将石英膜置于马弗炉中在 550°C 温度下灼烧 4 h. 滤膜采样前后置于恒温恒湿称重室($20^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ 和 $40\% \pm 5\%$)中平衡 24 h,用微量天平(精度十万分之一)称重获得 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度,连续两次称量相差小于 $2 \mu\text{g}$ 则认为样品达到恒重,否则重复上述步骤直至达到恒重为止。

观测期间 3 个站点的 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 、CO 和 O_3 在线监测数据来源于生态环境部网站. 同步采集了廊坊市的逐时气象数据,包括温度、风速、相对湿度、降水量和大气压力等,数据来源为美国“Weather Underground”网站 <http://www.wunderground.com>.

1.2 化学分析

石英膜中的有机碳(OC)和元素碳(EC)含量分析采用美国沙漠所 DRI 开发研制的 DRI 2015 多波长热/光学碳分析仪进行. 应用 IMPROVE(interagency monitoring of protected visual environments)热光反射的实验方法进行分析. 取 1/2 面积特氟龙滤膜,使用 10 mL 去离子水($18.2 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$)超声 30 min 浸提颗粒物中水溶性成分,利用离子色谱仪(戴安 IC 1000)测量浸提液中 Na^+ 、 NH_4^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 、 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 共 8 种离子的浓度. 取 1/2 面积的特氟龙膜放入消解罐中,加入 10 mL 混合酸消解液,使用 CEM 公司生产的 MARS 微波消解仪进行微波消解. 消解液冷却,加水定容至 100 mL 后,使用美国热电公司电感耦合等离子体原子发射光谱仪(ICP-AES, IRIS Intrepid)和电感耦合等离子体质谱分析仪(ICP-MS, Xseries 6000)进行 18 种元素分析(Na、Mg、Al、Si、K、Ca、Ti、

V、Cr、Mn、Fe、Ni、Cu、Zn、Pb、As、Hg 和 Cd). 28 种化学组成的检出限见表 1.

表 1 化学组成的检出限/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$
Table 1 Detection limit of chemical compositions/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

化学组成	检出限	化学组成	检出限	化学组成	检出限
OC	0.1	Na	0.05	Fe	0.03
EC	0.02	Mg	0.03	Ni	0.000 5
Na^+	0.076	Al	0.008	Cu	0.000 7
NH_4^+	0.080	K	0.02	Zn	0.003
K^+	0.100	Ca	0.07	As	0.000 7
Mg^{2+}	0.080	Ti	0.003	Cd	0.000 03
Ca^{2+}	0.148	V	0.000 1	Hg	0.001
Cl^-	0.048	Cr	0.001	Pb	0.000 6
NO_3^-	0.108	Mn	0.000 3	Si	0.2
SO_4^{2-}	0.120				

1.3 质量保证与质量控制

为保证观测数据的准确性和可靠性,每 10 个样品设置 1 个外场空白,将空白膜置于采样器(不开抽气泵)中放置 23h 后取下,与正常样品保持同样的前处理、保存和化学分析程序.

水溶性离子分析质控要求:每周做一次标准曲线,标准曲线的相关系数均高于 99.9%. 每 10 个样品测定一个平行样品,要求各离子偏差不超过 20%; 每 20 个样品测定两个实验室空白,要求实验室空白各离子测定值小于方法检出限; 每 20 个样品测定一个标准样品,要求偏差小于 10%.

元素碳和有机碳分析质控要求:每次实验开始和结束时采用 CH_4 标准气体对仪器进行校正,并取 10% 的样品进行重复分析,每周进行 2 次标准样品的测定. TC(OC + EC)的实验相对误差 $<5\%$, OC 和 EC 的实验相对误差均小于 10%.

元素分析质量要求:校准曲线的相关系数要达到 0.999 以上. 每组样品(38 个)测定一个平行样品,测量偏差不超过 20%; 每组样品同步测定 2 个土壤标准样品,土壤标准样品的回收率为 80% ~ 120%.

1.4 质量重构

一般而言, $\text{PM}_{2.5}$ 的质量平衡通常按如下 8 类组成进行质量重构: SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NH_4^+ 、 Cl^- 、有机物、EC、矿物组分和金属元素^[19]. 在上述 8 类物质中, SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NH_4^+ 、 Cl^- 、EC 和金属元素是直接测量的,而有机物与矿物组分则是根据对其中某些原子(如 C、Al、Si、Fe、Ca 和 Mg 等)浓度的直接测量而推测其浓度. 有机物的浓度通常以 OC 的浓度乘以 1.2 ~ 1.7 以计入未测量的 H、O、N 和 S,本研究采取了中间值 1.4 作为 OC 的转化系数. 构成大陆地壳物质最重要的 9 种化合物分别为 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 CaO 、 K_2O 、 Na_2O 、 MgO 、 TiO_2 和 MnO ,本研

究以这些元素浓度为基础折算其氧化物浓度,作为矿物组分. 金属元素组分的浓度由 Si、Al、Fe、Ca、K、Na、Mg、Ti 和 Mn 之外其它所有元素的浓度之和代表. 将 8 类化学组成的浓度加和可获得化学重构的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度. 图 2 显示,化学重构获得的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度与膜称重获得的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度呈显著线性相关($R^2 = 0.85$, $P < 0.05$),这进一步表明本研究的膜采样称重及化学组成分析方法具有可靠性.

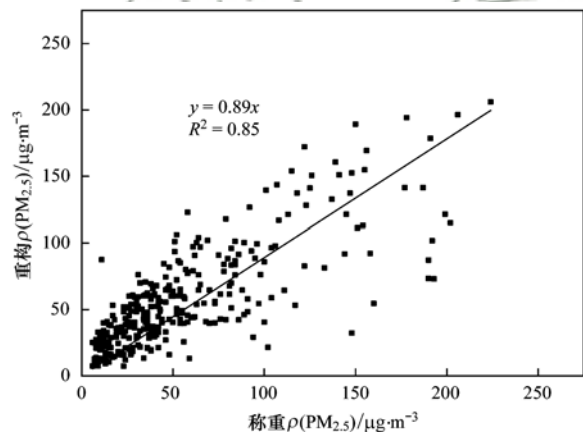


图 2 膜称重 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度与化学重构 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度相关性分析
Fig. 2 Correlation between filter weighted $\text{PM}_{2.5}$ concentration and that reconstructed from chemical constituents

1.5 PMF 源解析模型

本研究中采用 PMF 5.0 (美国 EPA) 来解析颗粒物样品的来源^[9-12]. PMF 模型的原理是将样本数量和物种信息看做一个 $n \times m$ 的矩阵 $X(i,j)$, 矩阵 $X(i,j)$ 被分解为源谱矩阵 F 和源贡献矩阵 G . PMF 解析模型的目标就是找 p 个污染源的成分谱矩阵 $F(k,j)_{p \times m}$ 和 p 个污染源在每一个样本中的贡献矩阵 $G(i,k)_{n \times p}$, k 表示污染源. 第 ij 个样本的实测浓度 X_{ij} 可以表达为:

$$X_{ij} = \sum_{k=1}^p G_{ik} F_{kj} + E_{ij}$$

式中, $i \in (1, n)$, $j \in (1, m)$, $k \in (1, p)$, n 表示样本数, m 表示物种数, E_{ij} 为实测的第 ij 个样本浓度与其解析值的残差. 具体计算方法见文献[19].

2 结果与讨论

2.1 颗粒物浓度

本研究选取的 3 个采样点三河交通局、廊坊市生态环境局和大城生态环境局分别代表了廊坊市北部、市区和南部地区. 图 3 显示了 3 个站点的颗粒物浓度及其前体物时间变化趋势. 北部、市区和南部这 3 个站点的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 依次为 48.0、58.3 和 71.5 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 均远高于国家二级标准 (GB 3095-2012). $\rho(\text{PM}_{10})$ 依次为 85.8、87.7 和 114.7 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 同样均远高于国家二级标准 (GB 3095-

2012). $\rho(\text{PM}_{2.5})/\rho(\text{PM}_{10})$ 由北向南依次为 0.56、0.66 和 0.62, 该比值在市区最高, 表明市区的细颗粒物污染更为严重. $\rho(\text{SO}_2)$ 整体较低, 3 个站点依次为 9.7、8.3 和 13.3 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; $\rho(\text{NO}_2)$ 从北向南依次为 41.1、41.5 和 37.7 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 北部地区和市区站点高于二级标准 (GB 3095-2012); $\rho(\text{O}_3)$ 依次为 59.7、62.4 和 63.3 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 和 O_3 浓度均呈现由北向南逐渐增高的趋势, 这主要由于廊坊经常受到河北中南部地区颗粒物区域传输的影响; NO_2 浓度呈现市区 > 北部 > 南部的变化特征, 这可能与市区机动车排放量高有关^[32]; SO_2 浓度呈现南部 > 北部 > 市区特征, 这主要由于 SO_2 主要受到周边工业燃煤和农村散煤燃烧的影响, 导致周边郊区浓度高于市区^[33].

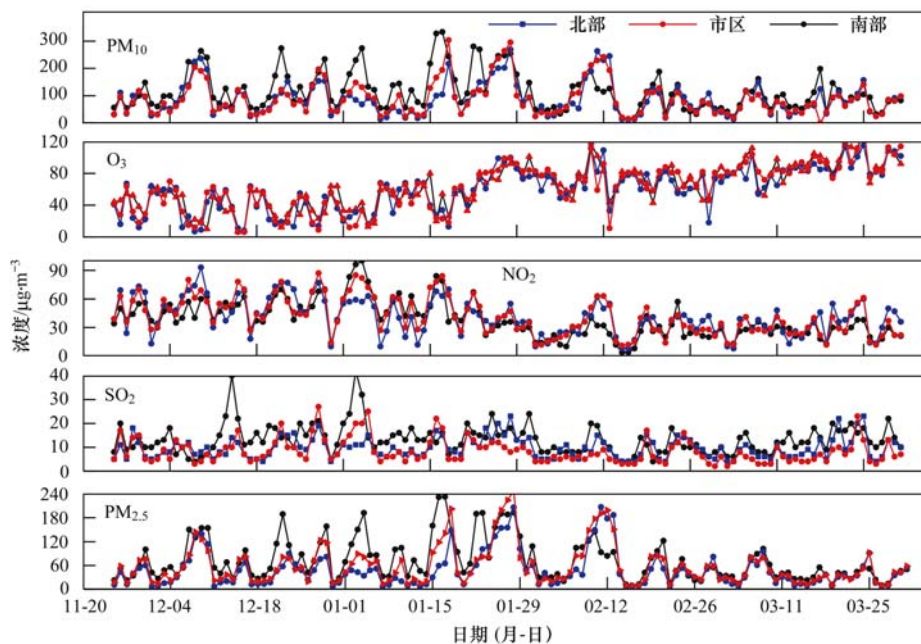


图 3 研究期内不同区域颗粒物及气态污染物浓度对比

Fig. 3 Mass concentrations of $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} , SO_2 , NO_2 , and O_3 at three sampling sites during sampling

将研究期所有采样日根据污染等级划分为清洁天 (优、良) 和污染天 (轻度污染、中度污染、重度污染). 清洁天和污染天的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 分别为 35.9 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 118.9 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 NO_2 和 SO_2 的浓度均为污染天显著高于清洁天, 其污染天与清洁天的浓度比值依次为 3.3、2.5、1.5 和 1.2, 颗粒物在污染过程中的累积程度显著高于气态污染物, 表明廊坊地区秋冬季的污染过程仍以颗粒物污染为主. $\text{PM}_{2.5}$ 的该比值远高于 PM_{10} , 表明秋冬季的细颗粒物污染更为严重. 而 NO_2 的该比值高于 SO_2 , 表明污染过程中机动车排放的贡献高于燃煤源^[34]. 从空间变化上来看, $\text{PM}_{2.5}$ 和 SO_2 的污染天与清洁天比值均为: 北部 > 市区 > 南部, PM_{10} 该比值为: 市区 > 北

部 > 南部, 均为污染物浓度低的区域污染物在污染天的累积程度反而更高, 这可能与污染天廊坊地区受到外来污染气团的传输影响^[33]; 而 NO_2 的该比值为市区高于北部和南部, 这主要与污染天静稳天气条件下市区的局地机动车排放贡献相对较高有关^[32].

2.2 化学组成浓度和质量重构

从廊坊市全市 (3 个采样点平均) 的 $\text{PM}_{2.5}$ 化学组成整体情况来看, 二次无机盐 (SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 NH_4^+) 的浓度为 27.8 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 质量分数为 44%, 其中 $\rho(\text{NO}_3^-)$ 最高, 为 13.6 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 质量分数为 21.5%. 有机物浓度为 16.1 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 质量分数为 25.4%. 矿物组分浓度为 8.7 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 质量分数为

13.7%. $\rho(\text{EC})$ 为 $3.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 质量分数为 5.8%. 其他未知成分占到 7.2%, 其来源主要包括 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度与各种化学成分的测量误差、矿物组分与有机物的估算中引入的偏差、水溶性成分所吸收的水分和其他未能测量的成分等^[25].

从廊坊北部、市区和南部的化学组成浓度来看, 二次无机盐浓度呈现市区高于南部和北部郊区的变化特征, $\rho(\text{SO}_4^{2-})$ 依次为 6.9、7.4 和 $6.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (由北向南, 下同), 与其前体物 SO_2 的空间变化趋势不一致, 表明相对于前体物浓度, $\rho(\text{SO}_4^{2-})$ 生成受相对湿度和大气氧化性等二次转化条件的影响更强^[35]; $\rho(\text{NO}_3^-)$ 依次为 13.8、13.9 和 $13.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 与 NO_2 浓度的空间变化趋势一致, NO_2 和 NO_3^- 主要指征机动车污染, 市区的高值表明市区的机动车污染更为严重^[36], 而北部的高值可能与北部多条过境高速路的机动车排放贡献有关; 根据 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 的浓度之比可以判断大气中固定源和移动源的相对重要程度, 3 个采样点的 $\rho(\text{SO}_4^{2-})/\rho(\text{NO}_3^-)$ 基本保持在 0.5 左右, 说明廊坊市的大气污染虽然呈现燃煤与机动车污染共存的复合污染类型, 但以机动车污染为主, 该比值市区 (0.53) 高于南部 (0.51) 和北部 (0.50) 郊区, 进一步表明市区机动车污染严重. 相反地, 有机物、EC、矿

物组分和 Cl^- 浓度呈现南部和北部郊区高于市区的变化特征, 有机物浓度依次为 16.6、13.0 和 $18.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, $\rho(\text{EC})$ 依次为 3.6、4.2 和 $4.3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 最小比值法^[37] 计算得到二次有机物浓度同样为周边郊区高于市区, 浓度依次为 9.1、6.4 和 $8.8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 可能与周边燃煤和工业的高 VOCs 排放量有关^[38]; 矿物组分浓度依次为 9.6、6.7 和 $9.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 周边郊区的高值可能由于其扬尘污染更严重. 金属元素浓度由北向南逐渐升高, 依次为 0.14、0.14 和 $0.20 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 表明南部地区的重金属污染相对严重.

从质量平衡构成来看 (图 4), 廊坊市 $\text{PM}_{2.5}$ 化学组成的空间差异较小, 有机物的质量分数变化范围为 22.6% ~ 27.4%, SO_4^{2-} 质量分数为 9.9% ~ 12.8%, NO_3^- 质量分数为 19.3% ~ 24.1%, NH_4^+ 质量分数为 10.5% ~ 12.8%, 矿物组分质量分数为 11.6% ~ 15.0%, Cl^- 质量分数为 3.1% ~ 4.1%, EC 质量分数为 5.5% ~ 6.4%, 金属元素质量分数为 0.20% ~ 0.30%, 二次无机盐的质量分数为市区高于北部和南部郊区, 而有机物、矿物组分和 EC 的质量分数为南部和北部郊区高于市区, Cl^- 和金属元素的质量分数为由北向南逐渐增高.

图 5 比较了污染天和清洁天 $\text{PM}_{2.5}$ 的化学组成浓度. 从中可知, 随着污染加重颗粒物所有化学组成

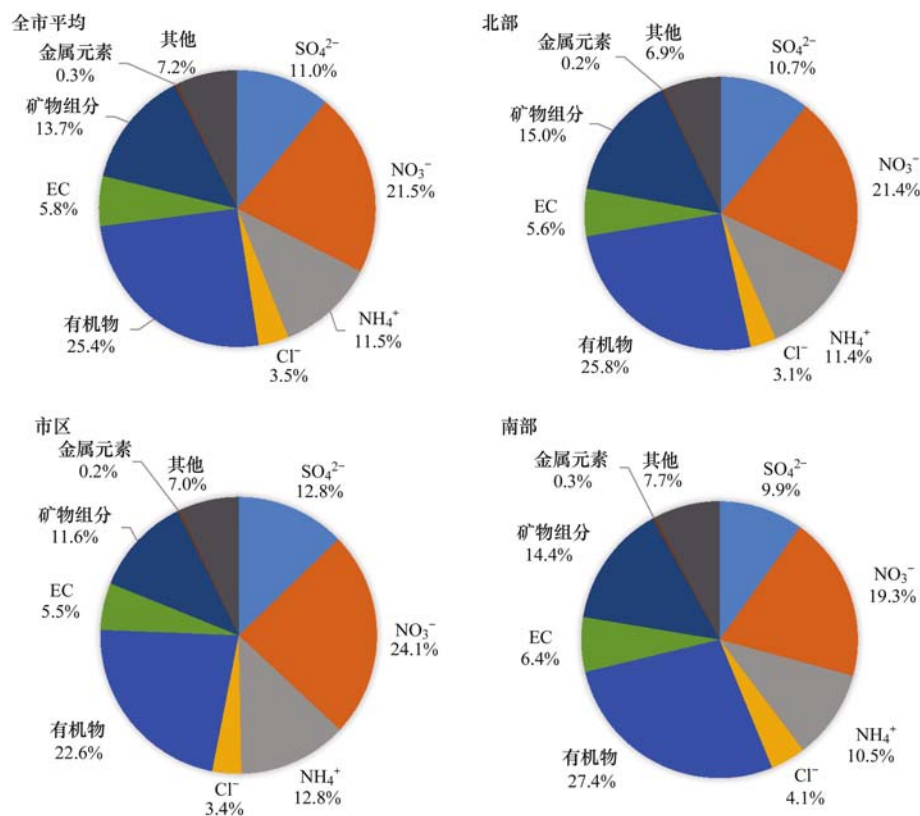
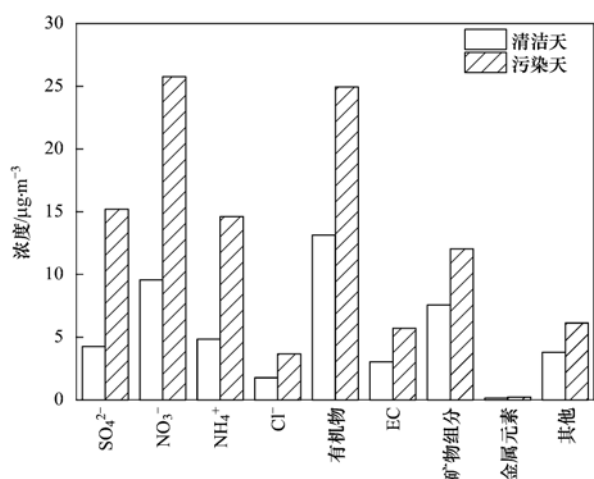
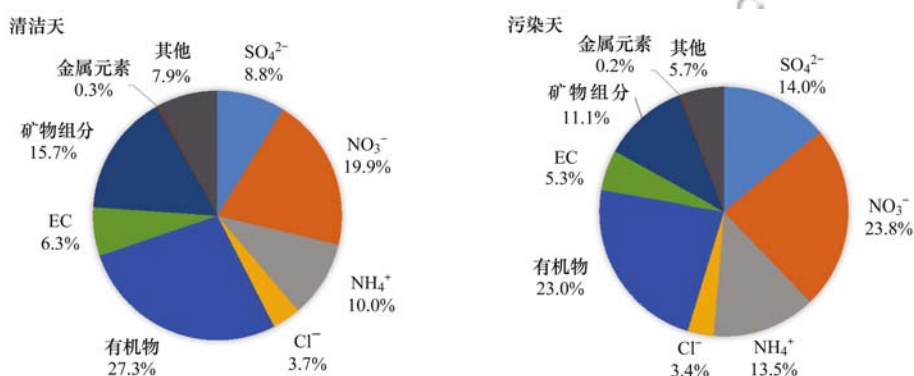


图 4 廊坊市不同区域 $\text{PM}_{2.5}$ 化学组成的质量分数

Fig. 4 Average percentages of chemical species to $\text{PM}_{2.5}$ at different sites

图5 污染天和清洁天 PM_{2.5}的化学组成浓度Fig. 5 Concentrations of PM_{2.5} chemical species in clean and haze days图6 污染天和清洁天 PM_{2.5}化学组成的质量分数Fig. 6 Average percentages of chemical species to PM_{2.5} on clean and haze days

11.1%。而从空间上来看,二次无机盐和有机物的污染天与清洁天浓度比值均为:市区>北部>南部,表明霾污染过程中市区的污染累积更为严重,尤其应当在污染预警和管控中引起重视。

2.3 来源解析

根据 PMF 分析,廊坊市大气颗粒物主要来自于 5 个因子:扬尘、工业、交通、二次无机气溶胶和燃煤,解析源谱如图 7 所示。其中,因子 1 对 Ti、Al、Ca 和 Mg 等元素的负载较高,这些元素在地壳中含量较高,会随扬尘等物质进入空气中沉积于颗粒物上,均为地壳元素的标志元素^[39],故因子 1 是土壤风沙尘、建筑尘的混合源,在这里可以定义为扬尘源。因子 2 中有相对较高的 V、Cr、Fe、Mn、Ni、Cu、Zn 和 Cd, Mn、Fe 和 Ni 被认为是钢铁生产过程排放的标志元素,V、Cr、Ni、Cu、Zn 和 Cd 是金属加工工业的标志元素^[40],因此因子 2 代表工业源。因子 3 中负载较高的是 SO₄²⁻、NH₄⁺ 和 NO₃⁻,因子 3 是由大气中的一次污染物存在过程中经过一定的转化形成的^[41],为二次污染源,因此因子 3 代表二次无机

气溶胶。因子 4 的主要负载元素为 OC、EC、Cd、Pb 和 Zn,机动车排放颗粒物中往往含有较高的 OC 和 EC^[19],而 Cd、Pb 和 Zn 多由于道路上机动车刹车磨损、轮胎磨损或者燃油中少量存在而存在于道路尘中^[42],因此因子 4 代表了交通源。因子 5 对 OC、As 和 Pb 负载较高,As 为燃煤排放的标志元素^[43],而燃煤排放的颗粒物中 OC 浓度较高^[44],因子 5 被认为是燃煤源。

的浓度均显著增加,SO₄²⁻、NH₄⁺、NO₃⁻、Cl⁻、有机物、EC、金属元素和矿物组分的污染天与清洁天浓度比值依次为 3.6、3.0、2.7、2.1、1.9、1.9、1.7 和 1.6。其中二次无机盐的增加程度最为显著,表明其在霾污染暴发和增长过程中起到重要作用^[19]。 $\rho(\text{SO}_4^{2-})/\rho(\text{NO}_3^-)$ 由清洁天的 0.44 增加到污染天的 0.59,进一步表明机动车排在污染过程中的贡献较高。而从化学组成的贡献比例上来看(图 6),随着污染加重,二次无机盐的贡献增加显著,其中 NO₃⁻ 的质量分数从 19.9% 增加到 23.8%,SO₄²⁻ 的质量分数从 8.8% 增加到 14.0%,NH₄⁺ 的质量分数从 10.0% 增加到 13.5%,表明二次无机盐是廊坊市大气污染的主控因子;有机物的贡献较高,但其质量分数随着污染加重有所降低,从 27.3% 降到了 23.0%;矿物组分质量分数同样从 15.7% 降低到

气溶胶。因子 4 的主要负载元素为 OC、EC、Cd、Pb 和 Zn,机动车排放颗粒物中往往含有较高的 OC 和 EC^[19],而 Cd、Pb 和 Zn 多由于道路上机动车刹车磨损、轮胎磨损或者燃油中少量存在而存在于道路尘中^[42],因此因子 4 代表了交通源。因子 5 对 OC、As 和 Pb 负载较高,As 为燃煤排放的标志元素^[43],而燃煤排放的颗粒物中 OC 浓度较高^[44],因子 5 被认为是燃煤源。

2019~2020 年秋冬季廊坊市全市的源解析结果显示(图 8),廊坊市 PM_{2.5} 主要有 5 个来源,其中二次无机气溶胶的贡献最高,其贡献率高达 41.9%;交通和燃煤同样是廊坊市大气颗粒物的重要来源,贡献率分别为 19.9% 和 12.7%;工业和扬尘的贡献率分别为 9.1% 和 9.3%,其他未解析来源的贡献为 7.1%。廊坊市各区域大气颗粒物的来源较为接近。从各个来源的贡献比例来看,二次无机气溶胶和交通源的贡献率均为:市区>北部>南部。燃煤、扬尘、工业源的贡献率均为:南部>北部>市区。表明廊坊市区由于人口密度大等原因交通污染严重,且

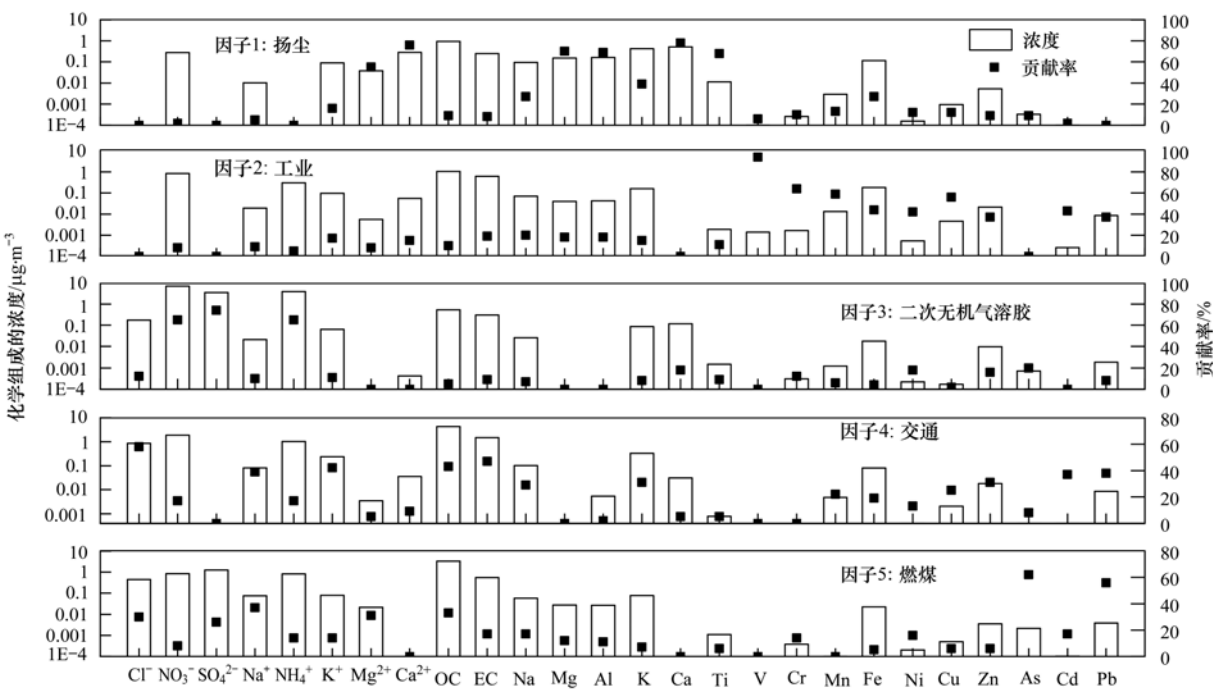


图 7 廊坊市大气颗粒物 PMF 源解析源谱

Fig. 7 PMF source profiles based on the measurement data of three sites

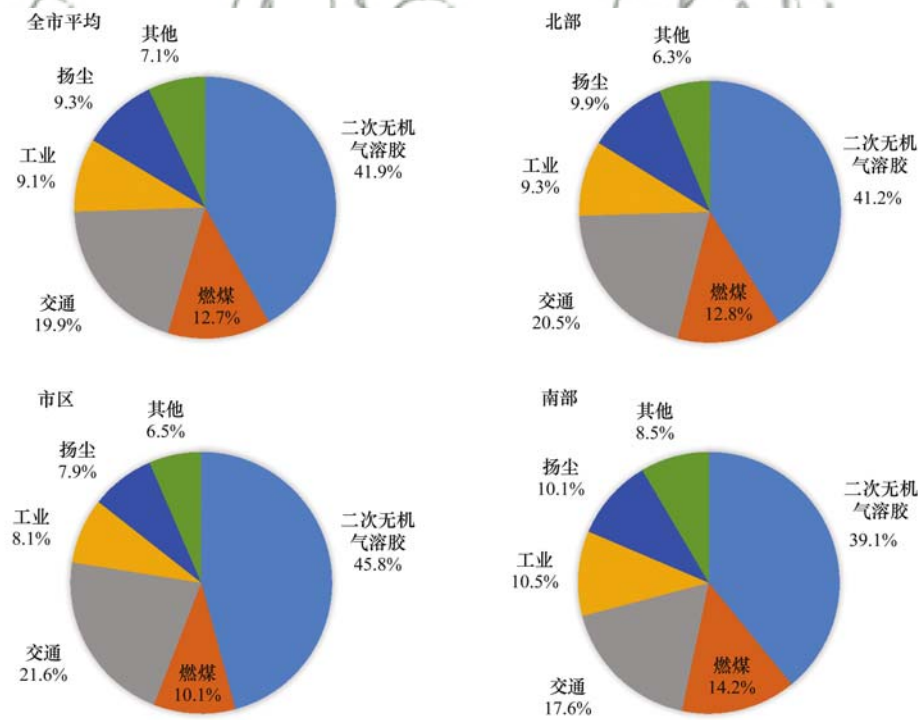


图 8 各来源对不同区域 $\text{PM}_{2.5}$ 的贡献率

Fig. 8 Average contributions of identified sources to $\text{PM}_{2.5}$ at different sites

有利于二次无机气溶胶的生成,而南部和北部郊区由于工业密集及受到周边传输的影响,扬尘、燃煤和工业污染较为严重。

廊坊市清洁天和污染天的大气颗粒物源解析结果表明,清洁天和污染天廊坊市大气细颗粒物的来源贡献差异较大(图9)。随着污染加重,二次无机气溶胶和交通源的增加趋势最为显著,二次无机气溶

胶浓度从清洁天的 $16.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 增加到污染天的 $49.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (污染天与清洁天浓度比值为 3.0),交通源的浓度从 $8.3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 增加到 $23.3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (污染天与清洁天浓度比值为 2.8)。表明二次无机气溶胶是霾污染暴发和增长的主控因子,而污染过程中的静稳天气条件有利于交通等局地源的贡献增加^[15,16]。其他来源浓度存在一定程度的增加,燃煤、

工业和扬尘源的污染天与清洁天的浓度比值依次为 2.6、1.7、1.0。而从各来源的贡献比例上来看,随着污染加重,二次无机气溶胶、交通和燃煤源的贡献率显著增加,分别从 34.6% 增加到 45.7%、从 17.3% 增加到 21.5% 和从 11.5% 增加到 13.4%。工业源的贡献从 11.4% 降低到 8.6%。而扬尘源的贡献率降低最为显著,从 16.4% 降低到 7.3%,主要由于污染天的静稳天气条件不利于地面尘再次扬起进入大气^[45]。

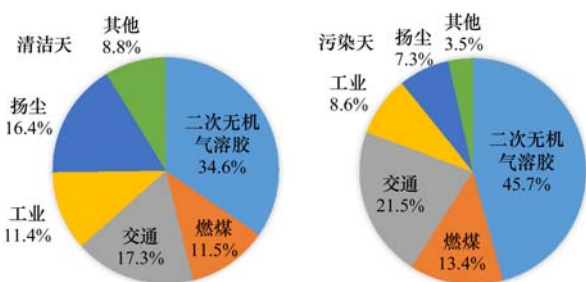


图9 各来源对清洁天和污染天 PM_{2.5} 的贡献率

Fig. 9 Average contributions of identified sources to PM_{2.5} on clean and haze days

3 结论

(1) 本研究将廊坊市划分为北部、市区和南部这 3 个区域。空间分布上, PM_{2.5}、PM₁₀ 和 SO₂ 整体呈现南部高于市区和北部的特征; NO₂ 的变化趋势为: 市区 > 北部 > 南部。PM_{2.5}、PM₁₀、NO₂ 和 SO₂ 的污染天与清洁天的浓度比值依次为 3.3、2.5、1.5 和 1.2, 廊坊秋冬季的细颗粒物污染严重。

(2) PM_{2.5} 主要成分为有机物、NO₃⁻、SO₄²⁻、矿物组分、NH₄⁺、Cl⁻ 和 EC, 分别占 PM_{2.5} 的质量分数为 25.4%、21.5%、11.0%、13.7%、11.5%、3.5%、5.8%, 金属元素及其他物质的质量分数分别为 0.3% 和 7.2%; 二次无机盐浓度呈现市区高于南部和北部郊区的变化特征, 而有机物、矿物组分、Cl⁻ 和 EC 浓度呈现南部和北部郊区高于市区的变化特征; 随着污染加重, 二次无机盐的质量分数增加显著, 有机物的贡献较高, 但其质量分数随着污染加重有所降低, 从 27.3% 降到了 23.0%。

(3) 廊坊市大气颗粒物共有 5 个主要来源: 二次无机气溶胶、交通、燃煤、工业和扬尘的贡献率分别为 41.9%、19.9%、12.7%、9.1% 和 9.3%, 其他未解析来源的贡献为 7.1%。二次无机气溶胶和交通源的贡献率均为: 市区 > 北部 > 南部, 燃煤、扬尘和工业源的贡献率均为: 南部 > 北部 > 市区。随着污染加重, 二次无机气溶胶和交通源的增加趋势最为显著, 其贡献率分别从 34.6% 增加到 45.7% 和从 17.3% 增加到 21.5%。

参考文献:

- [1] Zhang Y H, Song Y Y, Chen Y J, *et al.* Discovery of emerging sulfur-containing PAHs in PM_{2.5}: contamination profiles and potential health risks[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, **416**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.125795.
- [2] Zhang Y Q. All-cause mortality risk and attributable deaths associated with long-term exposure to ambient PM_{2.5} in Chinese adults[J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, **55** (9): 6116-6127.
- [3] Huang R J, Zhang Y L, Bozzetti C, *et al.* High secondary aerosol contribution to particulate pollution during haze events in China[J]. *Nature*, 2014, **514**(7521): 218-222.
- [4] Cao Y, Wang M H, Rosenfeld D, *et al.* Strong aerosol effects on cloud amount based on long-term satellite observations over the east coast of the United States [J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, **48**(6), doi: 10.1029/2020GL091275.
- [5] Wang Y H, Gao W K, Wang S, *et al.* Contrasting trends of PM_{2.5} and surface-ozone concentrations in China from 2013 to 2017[J]. *National Science Review*, 2020, **7**(8): 1331-1339.
- [6] 王跃思, 李文杰, 高文康, 等. 2013~2017 年中国重点区域颗粒物质量浓度和化学成分变化趋势[J]. *中国科学: 地球科学*, 2020, **50**(4): 453-468.
- [7] Wang Y S, Li W J, Gao W K, *et al.* Trends in particulate matter and its chemical compositions in China from 2013-2017 [J]. *Science China Earth Sciences*, 2019, **62**(12): 1857-1871.
- [8] Lei L, Zhou W, Chen C, *et al.* Long-term characterization of aerosol chemistry in cold season from 2013 to 2020 in Beijing, China[J]. *Environmental Pollution*, 2020, **268**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.115952.
- [9] 石耀鹏, 褚晓晰, 段青春, 等. 区域大气重污染过程识别指标及算法研究[J]. *中国环境监测*, 2021, **37**(4): 32-39.
- [10] Shi Y P, Chu Y X, Duan J C, *et al.* Identification rule and algorithm for regional heavy air pollution processes [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2021, **37**(4): 32-39.
- [11] Zheng M, Salmon L G, Schauer J J, *et al.* Seasonal trends in PM_{2.5} source contributions in Beijing, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(22): 3967-3976.
- [12] Qiao T, Zhao M F, Xiu G L, *et al.* Simultaneous monitoring and compositions analysis of PM₁ and PM_{2.5} in Shanghai: implications for characterization of haze pollution and source apportionment [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **557-558**: 386-394.
- [13] 任秀龙, 胡伟, 吴春苗, 等. 华北南部重污染城市周边区域二次气溶胶的化学特征及来源解析[J]. *环境科学*, 2022, **43**(3): 1159-1169.
- [14] Ren X L, Hu W, Wu C M, *et al.* Chemical characteristics and sources of atmospheric aerosols in the surrounding district of a heavily polluted city in the southern part of North China [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(3): 1159-1169.
- [15] 乔宝文, 刘子锐, 胡波, 等. 北京冬季 PM_{2.5} 中金属元素浓度特征和来源分析[J]. *环境科学*, 2017, **38**(3): 876-883.
- [16] Qiao B W, Liu Z R, Hu B, *et al.* Concentration characteristics and sources of trace metals in PM_{2.5} during wintertime in Beijing [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(3): 876-883.
- [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] 孙佳宾, 董喆, 李利萍, 等. 洛阳市大气细颗粒物化学组分特征及溯源分析[J]. *环境科学*, 2021, **42**(12): 5624-5632.
- [19] Sun J B, Dong Z, Li L P, *et al.* Characteristics of chemical

- composition and source apportionment of atmospheric fine particulate matter in Luoyang[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(12): 5624-5632.
- [15] 毛曳, 张恒德, 朱彬. 2016 冬季京津冀一次持续重度霾天气过程分析[J]. *环境科学*, 2021, **42**(8): 3615-3621.
Mao Y, Zhang H D, Zhu B. Analysis of the continuous heavy pollution process in the winter of 2016 in Beijing, Tianjin, and Hebei[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(8): 3615-3621.
- [16] 闫广轩, 张靖雯, 雷豪杰, 等. 郑州市大气细颗粒物中水溶性离子季节性变化特征及其源解析[J]. *环境科学*, 2019, **40**(4): 1545-1552.
Yan G X, Zhang J W, Lei H J, *et al.* Seasonal variation and source analysis of water-soluble inorganic ions in fine particulate matter in Zhengzhou[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(4): 1545-1552.
- [17] Zhang R, Jing J, Tao J, *et al.* Chemical characterization and source apportionment of PM_{2.5} in Beijing: seasonal perspective[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, **13**(14): 7053-7074.
- [18] Pan Y P, Liu J, Zhang L, *et al.* Bulk deposition and source apportionment of atmospheric heavy metals and metalloids in agricultural areas of rural Beijing during 2016-2020[J]. *Atmosphere*, 2021, **12**(2), doi: 10.3390/atmos12020283.
- [19] Tian S L, Pan Y P, Wang Y S. Size-resolved source apportionment of particulate matter in urban Beijing during haze and non-haze episodes[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, **16**(1): 1-19.
- [20] Si R R, Xin J Y, Zhang W Y, *et al.* Environmental and health benefits of establishing a coal banning area in the Beijing-Tianjin-Hebei region of China[J]. *Atmospheric Environment*, 2021, **247**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2021.118191.
- [21] Yang X, Zheng M, Liu Y, *et al.* Exploring sources and health risks of metals in Beijing PM_{2.5}: insights from long-term online measurements[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **814**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.151954.
- [22] Luo L L, Bai X X, Liu S H, *et al.* Fine particulate matter (PM_{2.5}/PM_{1.0}) in Beijing, China: variations and chemical compositions as well as sources[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2022, **121**: 187-198.
- [23] Dao X, Di S Y, Zhang X, *et al.* Composition and sources of particulate matter in the Beijing-Tianjin-Hebei region and its surrounding areas during the heating season[J]. *Chemosphere*, 2022, **291**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.132779.
- [24] Zhang W H, Peng X, Bi X H, *et al.* Source apportionment of PM_{2.5} using online and offline measurements of chemical components in Tianjin, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2021, **244**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.117942.
- [25] Tian S, Pan Y, Liu Z, *et al.* Size-resolved aerosol chemical analysis of extreme haze pollution events during early 2013 in urban Beijing, China[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2014, **279**: 452-460.
- [26] 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.
- [27] 王彤, 华阳, 许庆成, 等. 京津冀郊区站点秋冬季大气 PM_{2.5} 来源解析[J]. *环境科学*, 2019, **40**(3): 1035-1042.
Wang T, Hua Y, Xu Q C, *et al.* Source apportionment of PM_{2.5} in suburban area of Beijing-Tianjin-Hebei region in autumn and winter[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(3): 1035-1042.
- [28] 方小珍, 吴琳, 刘明月, 等. 廊坊市秋季环境空气中颗粒物组分昼夜变化特征研究[J]. *环境科学学报*, 2017, **37**(4): 1243-1250.
Fang X Z, Wu L, Liu M Y, *et al.* Diurnal variation of ambient PM_{2.5} and PM₁₀ compositions in autumn in Langfang city[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, **37**(4): 1243-1250.
- [29] 方小珍, 吴琳, 张静, 等. 不同空气质量等级下环境空气颗粒物及其碳组分变化特征[J]. *环境科学*, 2017, **38**(9): 3569-3574.
Fang X Z, Wu L, Zhang J, *et al.* Characteristics of particulate matter and carbonaceous species in ambient air at different air quality levels[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(9): 3569-3574.
- [30] 张敬巧, 罗达通, 方小云, 等. 廊坊经济技术开发区冬季 PM_{2.5} 化学组成特征及来源分析[J]. *环境污染与防治*, 2021, **43**(10): 1297-1303.
Zhang J Q, Luo D T, Fang X Y, *et al.* Chemical composition and source analysis of PM_{2.5} in winter in Langfang economic and technological development zone[J]. *Environmental Pollution and Control*, 2021, **43**(10): 1297-1303.
- [31] 张敬巧, 罗达通, 王涵, 等. 廊坊市开发区冬季颗粒物碳组分污染特征及来源分析[J]. *环境科学研究*, 2019, **32**(11): 1818-1825.
Zhang J Q, Luo D T, Wang H, *et al.* Characteristics and source of carbonaceous species in particulate matter during winter in Langfang city development zones[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, **32**(11): 1818-1825.
- [32] 郝吉明, 吴焯, 傅立新, 等. 北京市机动车污染分担率的研究[J]. *环境科学*, 2001, **22**(5): 1-6.
Hao J M, Wu Y, Fu L X, *et al.* Motor vehicle source contributions to air pollutants in Beijing[J]. *Environmental Science*, 2001, **22**(5): 1-6.
- [33] 刀谓, 张霖琳, 王超, 等. 京津冀冬季与夏季 PM_{2.5}/PM₁₀ 及其水溶性离子组分区域性污染特征分析[J]. *环境化学*, 2015, **34**(1): 60-69.
Dao X, Zhang L L, Wang C, *et al.* Characteristics of mass and ionic compounds of atmospheric particles in winter and summer of Beijing-Tianjin-Hebei area, China[J]. *Environmental Chemistry*, 2015, **34**(1): 60-69.
- [34] Yao X H, Chan C K, Fang M, *et al.* The water-soluble ionic composition of PM_{2.5} in Shanghai and Beijing, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2002, **36**(26): 4223-4234.
- [35] Tan J H, Duan J C, Ma Y L, *et al.* Long-term trends of chemical characteristics and sources of fine particle in Foshan city, Pearl River Delta; 2008-2014[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **565**: 519-528.
- [36] Zhang G H, Bi X H, Chan L Y, *et al.* Size-segregated chemical characteristics of aerosol during haze in an urban area of the Pearl River Delta region, China[J]. *Urban Climate*, 2013, **4**: 74-84.
- [37] Ni X, Pan Y P, Shao P, *et al.* Size distribution and formation processes of aerosol water-soluble organic carbon during winter and summer in urban Beijing[J]. *Atmospheric Environment*, 2021, **244**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.117983.
- [38] Shen R R, Liu Z R, Liu Y S, *et al.* Typical polar organic aerosol tracers in PM_{2.5} over the North China Plain: spatial distribution, seasonal variations, contribution and sources[J]. *Chemosphere*, 2018, **209**: 758-766.
- [39] Mantas E, Remoundaki E, Halari I, *et al.* Mass closure and source apportionment of PM_{2.5} by Positive Matrix Factorization analysis in urban Mediterranean environment[J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **94**: 154-163.

- [40] Yang L X, Cheng S H, Wang X F, *et al.* Source identification and health impact of $PM_{2.5}$ in a heavily polluted urban atmosphere in China[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **75**: 265-269.
- [41] Zhang Y Y, Lang J L, Cheng S Y, *et al.* Chemical composition and sources of PM_1 and $PM_{2.5}$ in Beijing in autumn[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **630**: 72-82.
- [42] Chen Y, Schleicher N, Cen K, *et al.* Evaluation of impact factors on $PM_{2.5}$ based on long-term chemical components analyses in the megacity Beijing, China [J]. *Chemosphere*, 2016, **155**: 234-242.
- [43] Clements N, Eav J, Xie M J, *et al.* Concentrations and source insights for trace elements in fine and coarse particulate matter [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **89**: 373-381.
- [44] Titos G, Lyamani H, Pandolfi M, *et al.* Identification of fine (PM_1) and coarse (PM_{10-1}) sources of particulate matter in an urban environment [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **89**: 593-602.
- [45] Wang Y, Zhuang G S, Sun Y L, *et al.* The variation of characteristics and formation mechanisms of aerosols in dust, haze, and clear days in Beijing[J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(34): 6579-6591.

欢迎订阅 2023 年《环境科学》

《环境科学》创刊于 1976 年,由中国科学院主管,中国科学院生态环境研究中心主办,是我国环境科学学科中最早创刊的学术性期刊。

《环境科学》自创刊以来,始终坚持“防治污染,改善生态,促进发展,造福人民”的宗旨,报道我国环境科学领域内具有创新性高水平,有重要意义的基础研究和应用研究成果,以及反映控制污染,清洁生产和生态环境建设等可持续发展的战略思想、理论和实用技术等。

《环境科学》在国内外公开发行,并在国内外科技界有较大影响,被国内外一些重要检索系统收录,如工程索引 Ei Compendex;医学索引 MEDLINE; Scopus; 化学文摘 CA;俄罗斯文摘杂志 AJ;美国生物学文摘预评 BP;美国医学索引 IM;日本科学技术情报中心数据库 JICST;英国动物学记录 ZR;剑桥科学文摘(CSA); Environmental Sciences;剑桥科学文摘(CSA); Pollution Abstracts;剑桥科学文摘(CAS); Life Sciences Abstracts 等;国内的检索系统有中国科技论文统计与引文数据库(CSTPCD);中文科技期刊数据库(维普);中国期刊全文数据库(CNKI);数字化期刊全文数据库(万方);中国科学引文数据库(CSCD);中国生物学文摘等。

全国各地邮局均可订阅,如有漏订的读者可直接与编辑部联系,办理补订手续。

国内统一连续出版物号:CN 11-1895/X

国际标准连续出版物号:ISSN 0250-3301

国外发行代号:M 205

国内邮发代号:2-821

编辑部地址:北京市海淀区双清路 18 号(2871 信箱) 邮编:100085

电话:010-62941102;E-mail:hjlx@rcees.ac.cn;网址:www.hjlx.ac.cn

CONTENTS

Evolution of PM _{2.5} Chemical Composition and Sources in Nanjing During the Implementation of the APPCAP	CHEN Pei-lin, GUO Rong, WANG Qin-geng (1)
Differences in PM _{2.5} Components Between Urban and Rural Sites During Heavy Haze Event in Northern Henan Province	WANG Shen-bo, WANG Ling-ling, FAN Xiang-ge, <i>et al.</i> (11)
Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Fine Particles in Langfang in Autumn and Winter	ZHU Shu-zhen, TONG Jie, BAO Feng, <i>et al.</i> (20)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} of Different Air Masses During Heating Season in Tianjin	LI Li-wei, DENG Xiao-wen, XIAO Zhi-mei, <i>et al.</i> (30)
Analysis of Critical Source of Potentially Harmful Elements in Urban Road Dust During Winter in Taiyuan Based on Multiple Attribute Decision Making Method	DENG Wen-bo, LIU Wen-juan (38)
Numerical Response Analysis of PM _{2.5} -O ₃ Compound Pollution in Beijing	LIU Tian-qiang (48)
High-resolution Emission Inventory of Reactive Volatile Organic Compounds from Anthropogenic Sources in the Yangtze River Delta Region	TIAN Jun-jie, DING Xiang, AN Jing-yu, <i>et al.</i> (58)
Vertical Distribution Characteristics of Boundary Layer Volatile Organic Compounds in Autumn in the Mixed Industrial and Rural Areas over the Northern Suburb of Nanjing	WANG Tai, ZHU Bin, SHI Shuang-shuang, <i>et al.</i> (66)
Characterization of Ambient Volatile Organic Compounds, Source Apportionment, and the Ozone-NO _x -VOC Sensitivities in Liucheng County, Guangxi	WU Ying, MO Zhao-yu, WU Qin-qin, <i>et al.</i> (75)
Characteristics of Ozone Pollution and High-impact Meteorological Factors in Urban Cities: A Case of Suzhou	HE Yan, LIN Hui-juan, CAO Shu-ya, <i>et al.</i> (85)
Emission Inventory and Distribution Characteristics of Anthropogenic Ammonia in Quzhou County, North China Plain	KANG Jia-hui, MENG Fan-lei, LIU Xue-jun, <i>et al.</i> (94)
Application of WRF Optimal Parameterization Scheme for Different Air Quality Models	YANG Jing-chao, JIANG Xing-wen, BO Xin, <i>et al.</i> (104)
Distribution Characteristics and Health Effects of Bioaerosols in Spring over Xi'an City	WEI Jun-qiang, YANG Liu, SHEN Zhen-xing, <i>et al.</i> (118)
Distribution of Bacterial Concentration and Viability in Atmospheric Bioaerosols Under Different Weather Conditions in the Coastal Region of Qingdao	WEI Wen-shu, QI Jian-hua, CHANG Cheng (127)
Spatiotemporal Distribution and Driving Factors of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Inland Sediments of China	HUANG Zhu-liang, CAI Jia-wei, WANG Ru-wei (138)
Distributions of Antibiotic Resistance Genes and Microbial Communities in the Nearshore Area of the Yangtze River Estuary	XU Qiu-hong, LIU Shu-guang, LOU Sha, <i>et al.</i> (158)
Co-occurrence of Tetracycline Antibiotic Resistance Genes and Microbial Communities in Plateau Wetlands Under the Influence of Human Activities	QIN Rong, YU Qing-guo, LIU Zhen-ya, <i>et al.</i> (169)
Occurrence and Health Risk Assessment of Multiple Pesticides in Drinking Water Sources of Southeast China	HE Shu, DONG Hui-yu, REN Nan-qi (180)
Spatiotemporal Distribution and Pollution Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Main Water Supply Reservoirs in Central Zhuhai City	WANG En-rui, ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, <i>et al.</i> (189)
Distribution Characteristics and Pollution Risk of Heavy Metals in River Sediment of Suzhou Water Network Area, China	ZHENG Min-hui, BAI Dong-rui, ZHANG Tao, <i>et al.</i> (198)
Distribution of Biodegradable Dissolved Organic Matter and Its Affecting Factors in a Typical Peri-urban Watershed in Yangtze River Delta	WU Wen-yu, MA Jing-sheng, YANG Lei, <i>et al.</i> (210)
Long-term Succession Patterns and Driving Factors of Water Quality in a Flood-pulse System Lake: A Case Study of Lake Luoma, Jiangsu Province	HUANG Xue-ying, GAO Ming-yuan, WANG Jin-dong, <i>et al.</i> (219)
Microplastic Pollution Status and Ecological Risk Evaluation in Weihe River	SHAN Ze-xuan, ZHANG Yan, ZHANG Cheng-qian, <i>et al.</i> (231)
Effects of Different Colored Polycarbonate Plastics on Growth and Community Structure of Periphytic Algae	WANG Meng-xue, YIN Si-cheng, WANG Zhen-fang, <i>et al.</i> (243)
Diversity Patterns and Influencing Factors of Epibiotic in <i>Vallisneria natans</i> and Planktonic Bacteria Communities	ZHANG Mei-ting, LIU Jin-xian, SU Jia-he, <i>et al.</i> (252)
Bacterial Community and Diversity of River Ecosystems on the Qinghai-Tibet Plateau Based on 16S rRNA Gene Sequencing	QU Wei-qing, ZHANG Bo-mei, HUANG Xue, <i>et al.</i> (262)
Spatial and Temporal Heterogeneity and Ecological Health Evaluation of Diatom Community Based on eDNA	JIANG Shan, ZHANG Yan, LI Fei-long, <i>et al.</i> (272)
Severity Differences and Mechanisms of Algal Blooms Among Sections in Pengxi River of the Three Gorges Reservoir	LUO Xiao-jiao, ZHANG Xing, HUANG Wei, <i>et al.</i> (282)
Characteristics of Soil Erosion and Nitrogen Loss in Vegetable Field Under Natural Rainfall	NING Jia-li, HUANG Yan-hui, LI Gui-fang, <i>et al.</i> (293)
Effects of Green, Blue, and Blue-green Roofs on Runoff Quality	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, YAN Jing, <i>et al.</i> (303)
Analysis of Spatiotemporal Variation Characteristics and Driving Forces of NPP in Shanxi Province from 2000 to 2020 Based on Geodetector	SHAO Jia-hao, LI Jing, YAN Xing-guang, <i>et al.</i> (312)
Spatio-temporal Variation in Vegetation Cover and Its Driving Mechanism Exploration in Southwest China from 2000 to 2020	XU Yong, DAI Qiang-yu, HUANG Wen-ting, <i>et al.</i> (323)
Heavy Metal Content and Resistance Gene Abundance and Related Properties in the Surface Soil around Qinghai Lake	HU Shi-lei, QU Jian-li, ZHANG Li, <i>et al.</i> (336)
Soil Heavy Metal Content, Pollution, and Influencing Factors in Typical Farming Area of Sichuan Basin	LIU Shu-ling, WU Mei, LIU Zhi-yuan, <i>et al.</i> (347)
Risk Assessment and Sources of Heavy Metals in Farmland Soils of Yellow River Irrigation Area of Ningxia	CHEN Lin, MA Kun, MA Jian-jun, <i>et al.</i> (356)
Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in the Soil Around Copper Smelting Sites	PENG Chi, LIU Xu, ZHOU Zi-ruo, <i>et al.</i> (367)
Characteristics of Typical Soil Acidification and Effects of Heavy Metal Speciation and Availability in Southwest China	LING Yun, LIU Han-yi, ZHANG Xiao-ting, <i>et al.</i> (376)
Stabilization Characteristics of Exogenous Cd in Different Types of Soil	WANG Gang, YU Hai-ying, HUANG Hua-gang, <i>et al.</i> (387)
Threshold of Se-rich Soil Based on Available-Se and Influencing Factors of Available-Se	WANG Ying, MA Yan-bin, WANG Ze-jing (395)
Accumulation Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Soil-Crop System Based on Soil Parent Material Zoning	CHEN Zi-wan, XU Jing, HOU Zhao-lei, <i>et al.</i> (405)
Characteristics and Planting Safety Assessment of As Content in Dryland Soil and Maize in Guizhou Province	HUANG Feng-yan, ZHOU Lang, SONG Bo, <i>et al.</i> (415)
Potential of Intercropping <i>Pennisetum purpureum</i> Schum with <i>Melia azedarach</i> L. and <i>Broussonetia papyrifera</i> for Phytoremediation of Heavy-metal Contaminated Soil around Mining Areas	WANG Xiao-hui, XIAO Xi-yuan, GUO Zhao-hui, <i>et al.</i> (426)
Inactivation of Cd and As by an <i>Enterobacter</i> Isolated from Cd and As Contaminated Farmland Soil	YIN Xue-fei, LIU Yu-ling, WU De, <i>et al.</i> (436)
Mineralization Characteristics of Soil Organic Carbon and Its Relationship with Organic Carbon Components in Artificial <i>Robinia pseudoacacia</i> Forest in Loess Hilly Region	ZHU Yu-fan, LIU Wei-chao, LI Jia-xin, <i>et al.</i> (444)
Accumulation, Migration, and Transformation of Soil Phosphorus in Facility Agriculture and Its Influencing Factors	FANG Bing, CHEN Lin, WANG Yang, <i>et al.</i> (452)
Optimizing Straw Management to Enhance Carbon and Nitrogen Efficiency and Economic Benefit of Wheat-Maize Double Cropping System	WANG Liang, QIAN Xin, GAO Ying-bo, <i>et al.</i> (463)
Effect of Deep Fertilization with Slow/Controlled Release Fertilizer on N Fate in Clayey Soil Wheat Field	HOU Peng-fu, XUE Li-xiang, YUAN Wen-sheng, <i>et al.</i> (473)
Structure and Function of Soil Fungal Community in Rotation Fallow Farmland in Alluvial Plain of Lower Yellow River	NAN Zhen-wu, LIU Zhu, MENG Wei-wei, <i>et al.</i> (482)
Response of Topsoil Fungal Community Structure to Soil Improvement Measures in Degraded Forest of Red Soil Region	GUAN Hong-zhi, HUANG Rong-zhen, WANG Jin-ping, <i>et al.</i> (494)
Temporal and Spatial Variations in Root-associated Fungi Associated with <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i> in the Semi-arid and Dry Sub-humid Desertified Regions of Northern China	ZHAO Pei-shan, GUO Mi-shan, GAO Guang-lei, <i>et al.</i> (502)
QMEC-based Analysis of the Soil Microbial Functional Potentials across Different Tibetan Plateau Glacier Forelands	ZHANG Jie-jie, Anders Priemé, CHEN Xian-ke, <i>et al.</i> (512)
Meta Analysis on Yield Effect of Biochar for Staple Crops in China	YU Bin-hang, JI Jian-mei, WANG Li-xue, <i>et al.</i> (520)
Effects of Biochar on Antibiotic Environmental Behaviors in Soil: A Meta-analysis	LI Jing-han, ZHANG Jian-qiang, XIA Li-qiong, <i>et al.</i> (531)
Properties of Biochars Prepared from Different Crop Straws and Leaching Behavior of Heavy Metals	LI Jia-kang, QIU Chun-sheng, ZHAO Jia-qi, <i>et al.</i> (540)
Spatial-temporal Evolution and Heterogeneity of Carbon Emissions at County-level in China	SONG Yuan-zhen, ZENG Jian, WANG Sen, <i>et al.</i> (549)
Spatiotemporal Dynamic Evolution and Gravity Center Migration of Carbon Emissions in the Main Urban Area of Chongqing over the Past 20 Years	XIANG Shu-jiang, YANG Chun-mei, XIE Yu-qi, <i>et al.</i> (560)
Spatiotemporal Characteristics and Influencing Factors of Environment Emergency Incident in China from 1991 to 2018	YU Guang-hui, WANG Fei-fan, LIU Xian-zhao, <i>et al.</i> (572)
Migration, Transformation, and Toxicity of Quaternary Ammonium Antimicrobial Agents in the Environment	ZHANG Li-lan, QIN Cun-li, QIAN Yao, <i>et al.</i> (583)