

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

基于碳减排目标与排放标准约束情景的火电大气污染物减排潜力

李辉, 孙雪丽, 庞博, 朱法华, 王圣, 晏培



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年12月

第42卷 第12期
Vol.42 No.12

目次(卷终)

基于碳减排目标与排放标准约束情景的火电大气污染物减排潜力	李辉, 孙雪丽, 庞博, 朱法华, 王圣, 晏培 (5563)
汽修行业挥发性有机物排放与控制现状及对策	王海林, 杨涛, 聂磊, 方莉, 张中申, 郝郑平 (5574)
西宁市生物质燃烧源大气污染物排放清单	高玉宗, 姬亚芹, 林孜, 林宇, 杨益 (5585)
新冠疫情期间四川盆地空气质量及影响因素分析	陈军辉, 冯小琼, 李媛, 王书肖 (5594)
基于 iLME + Geoi-RF 模型的四川省 PM _{2.5} 浓度估算	吴宇宏, 杜宁, 王莉, 蔡宏, 周彬, 吴磊, 敖逍 (5602)
《大气污染防治行动计划》后期成都大气 PM _{2.5} 中水溶性无机离子特征	李佳琪, 张军科, 董贵明, 邓嘉琳, 刘子锐, 王跃思 (5616)
洛阳市大气细颗粒物化学组分特征及溯源分析	孙佳侯, 董喆, 李利萍, 刘洋, 陈红阳, 张瑞芹 (5624)
北京市黑碳气溶胶浓度特征及其主要影响因素	曹阳, 安欣欣, 刘保献, 景宽, 王琴, 罗霄旭 (5633)
天津市郊夏季 VOCs 化学特征及其时间精细化的来源解析	王艺璇, 刘保双, 吴建会, 张裕芬, 冯银厂 (5644)
沈阳市挥发性有机物污染特征及反应活性	杜寒冰, 王男, 任万辉, 苏枞枞, 胡建林, 于兴娜 (5656)
典型化工集中区环境空气 SVOCs 污染特征及来源解析	葛祥, 吴健, 高松, 冯加良, 陈俊伟, 张舒惟, 焦正 (5663)
南京毒性挥发性有机化合物夏冬季源解析及健康风险评估	张子金, 林煜棋, 张煜烟, 曹梦瑶, 章炎麟 (5673)
基于排放清单和实地测试的工业 VOCs 排放特征: 以郑州市高新区为例	任何, 卢轩, 刘洋, 尹沙沙, 胡鹤霄 (5687)
我国水性建筑涂料 VOCs 排放特征及其环境影响	高美平, 王海林, 刘文文, 聂磊, 李国昊, 安小栓 (5698)
VOCs 源强不确定性对臭氧生成及污染防治影响的模拟分析	王峰, 汪健伟, 杨宁, 翟菁, 侯灿 (5713)
山东省 O ₃ 时空分布及影响因素分析	张森, 丁椿, 李彦, 王桂霞, 林晶晶, 孟赫, 许杨 (5723)
2020 年成都市典型臭氧污染过程特征及敏感性	钱骏, 徐晨曦, 陈军辉, 姜涛, 韩丽, 王成辉, 李英杰, 王波, 刘政 (5736)
基于高分辨率在线测量的轻型汽油车含氧挥发性有机物排放模型构建	郝钰琦, 袁自冰, 王梦雷, 沙青娥, 杜新悦, 刘元向, 刘学辉, 段乐君, 袁斌, 郑君瑜, 邵敏, 闫宇 (5747)
三重属性的承载力约束下中国水资源利用效率动态演进特征分析	张凯, 吴凤平, 成长春 (5757)
长江流域总氮排放量预测	丁肇慰, 郑华 (5768)
1980~2015 年长江流域净人为氮输入与河流氮输出动态特征	姚梦雅, 胡敏鹏, 陈丁江 (5777)
黄河水环境特征与氮磷负荷时空分布	韩谔, 潘保柱, 陈越, 刘亚平, 侯易明 (5786)
基于氮氧同位素解析不同降雨条件下硝酸盐污染源	邢子康, 余钟波, 衣鹏, 钱睿智, 王嘉毅 (5796)
水源水库真核微生物种群结构季相演替特征	张海涵, 黄鑫, 黄廷林, 刘凯文, 马曼丽, 刘祥, 苗雨甜, 宗容容 (5804)
达里湖表层水体浮游细菌群落结构的夏-冬季节差异	李文宝, 郭鑫, 张博尧, 杜蕾, 田雅楠 (5814)
尾水排放对受纳水体底栖生物膜细菌群落和水溶性有机质的影响机制	王钰涛, 范晨阳, 朱金鑫, 李轶, 王龙飞 (5826)
武汉典型饮用水水源中典型 POPs 污染特征与健康风险评估	张坤峰, 付青, 涂响, 昌盛, 樊月婷, 孙兴滨, 王山军 (5836)
上海沙田湖养殖区及周边水体中氟喹诺酮类抗性基因的分布特征及其与环境因子关系	徐慕, 李世豪, 马巾, 王丽卿, 张玮 (5848)
曝气人工湿地脱除低污染水中氮的影响因素	李琳琳, 李荣涛, 孔维静, 杨苹果, 杜志超, 毕斌, 卢少勇 (5857)
水平潜流人工湿地对畜禽养殖废水中特征污染物的去除	赵伟, 范增增, 杨新萍 (5865)
木屑生物炭对填料土的氮磷吸附及雨水滞留改良影响	孟依柯, 王媛, 汪传跃, 王报 (5876)
黑臭河道中聚乙烯醇/海藻酸钠固定微米沸石粉去除氨氮	魏超, 陈涛, 江桥, 王姝, 邱伟建, 成小英 (5884)
玉米秸秆生物炭对灰钙土吸附金霉素的影响	南志江, 蒋煜峰, 毛欢欢, 梁新茹, 邓雪儒 (5896)
饮用水砂滤池中微生物对微量污染物的降解潜力与途径	周洁, 王东麟, 林慧, 柏耀辉 (5905)
污水分析方法监测城市毒品滥用长期趋势	曹禹, 董小棠, 邵雪婷, 刘琳, 王德高 (5912)
阿奇霉素和铜对活性污泥古菌群落和 ARGs 的胁迫影响及后效应	高玉玺, 李星, 赵君如, 张忠兴, 樊晓燕 (5921)
典型冶炼行业场地土壤重金属空间分布特征及来源解析	李强, 曹莹, 何连生, 王耀峰, 龚成, 何书涵 (5930)
我国焦化场地多环芳烃和重金属分布情况及生态风险评价	王耀峰, 何连生, 姜登岭, 曹莹, 李强, 官健 (5938)
浙江省香榧主产区土壤重金属空间异质性及其生态风险	王敏, 董佳琦, 白龙龙, 张勇, 蒋仲龙, 姜雯雯, 吴家森, 张璐瑶, 方嘉, 傅伟军 (5949)
北方农田镉污染土壤玉米生产阈值及产区划分初探	管伟豆, 郭堤, 王萍, 张增强, 李荣华 (5958)
典型铅锌矿区耕地土壤团聚体重金属含量与农作物含量相关性及其风险评价	强瑞, 李英菊, 罗谦, 陈美凤, 李海燕, 黄先飞, 秦樊鑫 (5967)
雄安新区企业周边农田土壤-作物系统重金属污染风险及累积效应	周亚龙, 王乔林, 王成文, 刘飞, 宋云涛, 郭志娟, 杨志斌 (5977)
铜仁土壤-水稻重金属累积效应与安全种植区划	朱亮亮, 吴勇, 周浪, 唐乐斌, 宋波 (5988)
干湿交替对铈锰改性生物炭固定红壤 As 的影响	黄晓雅, 李莲芳, 朱昌雄, 黄金丽, 吴翠霞, 叶婧 (5997)
铵态氮肥和腐殖酸协同促进孔雀草对土壤中 Cd 的去除	王冰清, 阳琴, 李虹颖, 熊启中, 徐刚, 孙瑞波, 田达, 李军利, 郅红建, 叶新新 (6006)
稻田灌溉河流 CH ₄ 和 N ₂ O 排放特征及影响因素	吴双, 杨蔚桐, 盛扬悦, 方贤滔, 张天睿, 胡靖, 刘树伟, 邹建文 (6014)
节水灌溉和控释肥施用耦合措施对单季稻田 CH ₄ 和 N ₂ O 排放的影响	王永明, 徐永记, 纪洋, 冯彦房 (6025)
有机无机配施下西北旱区麦田土壤 N ₂ O 的排放特征及微生物特性	王楷, 史雷, 马龙, 王书婷, 张然, 郑伟, 李紫燕, 翟丙年 (6038)
不同秸秆还田方式对旱地红壤细菌群落、有机碳矿化及玉米产量的影响	孔培君, 郑洁, 栾璐, 陈紫云, 薛敬荣, 孙波, 蒋瑞霖 (6047)
氮磷添加对盐渍化草地土壤微生物特征的影响	杨建强, 刁华杰, 胡姝姝, 陈晓鹏, 王常慧 (6058)
化肥和有机肥配施生物炭对紫色土壤养分及磷赋存形态的影响	向书江, 余砾, 熊子怡, 罗东海, 王莹燕, 邓正昕, 王子芳, 高明 (6067)
浒苔生物炭与木醋液复配改良碱化土壤效果及提高油菜产量	王正, 孙兆军, Sameh El-Sawy, 王珍, 何俊, 韩磊, 邹本涛 (6078)
《环境科学》第42卷(2021年)总目录	(6091)
《环境科学》征订启事(5593) 《环境科学》征稿简则(5623) 信息(5643, 5835, 5883)	

洛阳市大气细颗粒物化学组分特征及溯源分析

孙佳宾^{1,2}, 董喆^{1,2}, 李利萍^{1,2}, 刘洋², 陈红阳², 张瑞芹^{2,3*}

(1. 郑州大学化学学院, 郑州 450001; 2. 郑州大学环境科学研究院, 郑州 450001; 3. 郑州大学生态与环境学院, 郑州 450001)

摘要: 为研究洛阳市大气细颗粒物($PM_{2.5}$)的化学组分及来源的时空分布特征,对汾渭平原地区较为欠缺的 $PM_{2.5}$ 相关研究进行补充,在2018年4月至2019年1月在洛阳市高新和林校2个点位进行了样品采集,对 $\rho(PM_{2.5})$ 、化学组分(水溶性离子、碳质组分、元素)和来源进行分析。2个点位的年均 $\rho(PM_{2.5})$ 分别为 $(76.6 \pm 37.9) \mu g \cdot m^{-3}$ 和 $(83.2 \pm 38.9) \mu g \cdot m^{-3}$,季节变化由高到低均为:冬季、春季、秋季和夏季。高新和林校的9种水溶性离子浓度分别占 $PM_{2.5}$ 的55.1%和54.2%,林校的二次离子(NO_3^- 、 SO_4^{2-} 和 NH_4^+)年均浓度之和高于高新。高新和林校的 ρ [有机碳(OC)]、 ρ [元素碳(EC)]分别为 $(12.4 \pm 7.7) \mu g \cdot m^{-3}$ 、 $(1.2 \pm 0.5) \mu g \cdot m^{-3}$ 和 $(13.4 \pm 7.7) \mu g \cdot m^{-3}$ 、 $(1.3 \pm 0.5) \mu g \cdot m^{-3}$,林校的含碳组分在各季节均高于高新;高新和林校冬季的二次有机碳(SOC)在OC中质量分数分别为67.8%和77.3%,远高于其他季节。化学质量平衡结果表明,高新和林校的主要贡献源均为二次硝酸盐(26.9%和27.1%)、二次硫酸盐(14.5%和14.8%)、燃煤(12.6%和11.6%)、SOA(10.8%和12.2%),高新的生物质源贡献较高,而林校的扬尘源和机动车源贡献较高。后向轨迹和潜在源贡献因子分析表明,洛阳市春季不仅受到来自西北方向的传输,来自西南地区的污染传输也不能忽略;夏季既受到正东方向的季风影响,又有来自正南方向的潜在污染;秋季污染物主要来自东南方向,同时也存在西北方向的潜在来源;冬季受到的传输影响则主要来自周边区域,污染来源较为集中。

关键词: $PM_{2.5}$; 来源解析; 化学质量平衡(CMB)模型; 后向轨迹(HYSPLIT)模型; 聚类分析; 汾渭平原

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)12-5624-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202104256

Characteristics of Chemical Composition and Source Apportionment of Atmospheric Fine Particulate Matter in Luoyang

SUN Jia-bin^{1,2}, DONG Zhe^{1,2}, LI Li-ping^{1,2}, LIU Yang², CHEN Hong-yang², ZHANG Rui-qin^{2,3*}

(1. College of Chemistry, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Research Institute of Environmental Science, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 3. College of Ecology and Environment, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: To study the temporal and spatial distribution characteristics of the chemical components and sources of atmospheric fine particulate matter ($PM_{2.5}$) in Luoyang and to supplement the relative lack of $PM_{2.5}$ -related research in the Fen-Wei Plain, samples were collected at two sites (Gaoxin and Linxiao) in Luoyang from April 2018 to January 2019, and the mass concentration, chemical composition (water-soluble ions, carbonaceous components, and elements), and sources of $PM_{2.5}$ were analyzed. The annual average $\rho(PM_{2.5})$ at the two sites were $(76.6 \pm 37.9) \mu g \cdot m^{-3}$ and $(83.2 \pm 38.9) \mu g \cdot m^{-3}$, respectively. $PM_{2.5}$ showed the highest average concentration in winter, followed by spring and autumn, and the lowest in summer. The concentrations of nine water-soluble ions of Gaoxin and Linxiao accounted for 55.1% and 54.2% of $PM_{2.5}$, of which secondary ions (NO_3^- , SO_4^{2-} , and NH_4^+) in Linxiao were higher than those in Gaoxin. The annual average concentrations of organic carbon (OC) and elemental carbon (EC) were $(12.4 \pm 7.7) \mu g \cdot m^{-3}$ and $(1.2 \pm 0.5) \mu g \cdot m^{-3}$ in Gaoxin and $(13.4 \pm 7.7) \mu g \cdot m^{-3}$ and $(1.3 \pm 0.5) \mu g \cdot m^{-3}$ in Linxiao, respectively, and the average concentrations of carbonaceous constituents during the four seasons in Linxiao were higher than those in Gaoxin. The secondary organic carbon (SOC) of Gaoxin and Linxiao in winter accounted for 67.8% and 77.3% of OC, respectively, which was much higher than that in the other seasons. The results of the chemical mass balance model suggested that the main contribution of $PM_{2.5}$ in the two sites were secondary nitrate (26.9% and 27.1%), secondary sulfate (14.5% and 14.8%), coal combustion (12.6% and 11.6%), and secondary organic aerosol (10.8% and 12.2%). The contribution of biomass burning was higher in Gaoxin than that in Linxiao, whereas fugitive dust and vehicle emissions contributed more to the $PM_{2.5}$ in Linxiao. The analysis of backward trajectory and potential source contribution function showed that Luoyang was not only affected by pollutant transport from the northwest direction but also from the southwest region in spring. In summer, it was affected by the monsoon in the due east direction and some potential pollution from due south. In autumn, pollutants mainly came from the southeast, but there were also potential sources in the northwest. The pollutant transport in winter was mainly from the surrounding areas, and the pollution sources were more concentrated.

Key words: $PM_{2.5}$; source apportionment; chemical mass balance (CMB) model; hybrid single-particle Lagrangian integrated trajectory (HYSPLIT) model; cluster analysis; Fen-Wei Plain

近年来,随着社会高速发展,我国频繁发生空气污染现象,大气颗粒物中的细颗粒物($PM_{2.5}$,即环境空气中空气动力学当量直径小于或等于 $2.5 \mu m$ 的悬浮颗粒物^[1])已经成为我国大多数城市的首要污染物^[2]。有研究发现, $PM_{2.5}$ 主要来源于人为及机动车排放、煤炭燃烧、工业生产、建筑及道路扬尘和生

物质燃烧等直接排放源^[3],以及与 SO_2 、 NO_x 、VOCs和 NH_3 等气态污染物发生复杂化学反应形成的二

收稿日期: 2021-04-24; 修订日期: 2021-06-02

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0212400)

作者简介: 孙佳宾(1996~),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: sunjiabin0371@163.com

* 通信作者, E-mail: rqzhang@zzu.edu.cn

次排放源^[4]. $\text{PM}_{2.5}$ 不仅会造成能见度降低^[5]和引起雾-霾等复合型污染天气的发生,还会对人体健康造成不利影响,国内外学者发现呼吸道疾病^[6]、心血管疾病^[7]和大脑健康^[8]等均与人体直接暴露于颗粒物环境有直接关系. $\text{PM}_{2.5}$ 的主要成分包括水溶性离子、有机碳(organic carbon, OC)、元素碳(elemental carbon, EC)和无机元素^[9]. 其中,水溶性离子具有明显的吸湿性,可以直接影响降水的酸度^[10],在 $\text{PM}_{2.5}$ 中占有很大的比重,李欢等^[11]的研究证实水溶性离子组分约占 $\text{PM}_{2.5}$ 的30%~80%;碳质组分对 $\text{PM}_{2.5}$ 的贡献通常可以达到10%~50%^[12],并且OC和EC的来源存在异同^[13],史芳天等^[14]和张俊峰等^[15]的研究根据这一特征,利用其比值定性分析了成都、北京和石家庄市含碳组分的来源特征. $\text{PM}_{2.5}$ 的来源分析可以通过受体模型来实现,Anu等^[16]的研究为探究大气细颗粒物的源头,利用化学质量平衡模型(chemical mass balance model, CMB)实现了不同环境受体点的 $\text{PM}_{2.5}$ 源解析;另外后向轨迹模型(hybrid single-particle Lagrangian integrated trajectory model, HYSPLIT)可以实现气团输送的轨迹模拟,从而判断 $\text{PM}_{2.5}$ 的传输来源,段时光等^[17]的研究为探究郑州市的污染物传输来源,利用HYSPLIT模拟了郑州市的气流贡献轨迹,并结合潜在源贡献因子(potential source analysis function, PSCF)方法得到了 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的潜在来源. 随着珠三角和长三角地区空气质量的整体好转,2017年汾渭平原 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度已成为我国仅次于京津冀地区的第二高区域^[18],2018年汾渭平原首次被列为大气污染重点区域^[19],污染防治要求非常紧迫.

目前对于汾渭平原的研究主要集中在西安^[20]、太原^[21]和平顶山^[22]等城市,本文选取洛阳市进行研究,为汾渭平原东部地区的研究补充数据. 洛阳市位于河南省西部,整体地势西高东低,境内山川丘陵交错,地形复杂,加上盆地地形不利于污染物的扩散, $\text{PM}_{2.5}$ 污染严重^[19]. 目前已有少数对洛阳市的大气污染特征的研究,张攀等^[23]研究了洛阳市2014年冬季大风天气下 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的变化情况;王群^[24]、周兵利等^[25]和靳朝喜^[26]研究了2015年洛阳市细颗粒物的变化趋势及含碳组分、重金属等,并进行来源解析和风险评估;齐静文等^[27]研究了2018年秋冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 中多环芳烃的污染特征和来源. 然而,以上研究主要针对细颗粒物中的某一组分或单一季节中的变化,缺乏长期、全面和系统地研究分析.

为深入研究洛阳市大气细颗粒物的化学组分和

污染特征,本文综合探究大气 $\text{PM}_{2.5}$ 的季节变化,以及水溶性离子和碳质组分的污染特征;使用CMB模型分析各季节 $\text{PM}_{2.5}$ 的主要来源,为 $\text{PM}_{2.5}$ 源解析提供现实依据;并利用HYSPLIT模型和PSCF方法分析各季节的污染传输途径和潜在来源. 本研究得到的结果有利于科学认知洛阳市大气颗粒物的组分分布特征和来源,以期为洛阳市大气污染防控决策提供参考.

1 材料与方法

1.1 样品采集

本研究选用了河南省洛阳市华夏路社区服务站(高新, 112°04'E, 34°06'N, 市区)和河南林业职业学院(林校, 112°05'E, 34°07'N, 市区, 国控点). 高新地处居民生活区,周围有周山森林公园、河南科技大学附属中学和居民小区;林校位于洛阳市中心地带,人口密集,车流量较大,集居住、商业、交通和餐饮于一体,属于城区居住区. 2个采样地点相距约12.5 km,均为典型的城市站点,且周围无工厂排放,能较好反映城市整体环境空气水平. 采样仪器为武汉天虹大气颗粒物智能采样仪(TH-16A, 流量为 $16.7 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$),4个通道平行采集2张直径47 mm的石英滤膜(Whatman 1851-865)和2张直径47 mm的Teflon滤膜(Whatman 7592-104). 采样时间分别为2018年3月31日至2018年5月2日(春季)、2018年7月1日至2018年8月6日(夏季)、2018年10月5日至2018年11月30日(秋季)和2018年12月1日至2019年1月29日(冬季),每次采样连续采集23 h. 其中高新共得163组有效数据,林校共得161组有效数据.

1.2 分析方法

实验通过美国戴安公司的ICS-900型(阴离子)离子色谱仪和ICS-90型(阳离子)离子色谱仪分析膜样品中的水溶性无机离子(Na^+ 、 NH_4^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 F^- 、 Cl^- 、 NO_3^- 和 SO_4^{2-}),测定方法参考文献[28]. 采用碳分析仪(Sunset Lab Inc Model, 美国)和热光法测定膜样品中OC和EC组分和含量,并辅助激光透射法校正OC和EC的切割点^[29].

根据洛阳市的实际情况,采用USEPA CMB 8.2模型在源类、受体成分谱确定的前提下,通过建立线性方程计算出不同源类贡献值浓度大小^[16],对洛阳市城区各个季节的细颗粒物污染来源进行分析.

使用TrajStat进行轨迹聚类,将林校设置为起始点,起始高度为500 m,起始时间为00:00、06:00、12:00和18:00,计算48 h后向轨迹. 将轨迹覆盖区域进行 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 网格化,结合日均 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度进行

分析. 潜在源贡献函数(PSCF)是网格内轨迹超过阈值的个数与总轨迹个数的比值, 本研究使用的阈值为环境空气质量标准(GB 3095-2012)中的二级日均标准限值 $75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 为减少 PSCF 的不确定性, 引入权重因子得到 WPSCF 值, PSCF 和 WPSCF 的计算参考段时光等^[17]的研究.

1.3 质量控制

本实验所用滤膜无毛刺无破损, 采样前后称重均需在平衡室(温度在 $20 \sim 25^\circ\text{C}$ 之间, 相对湿度为 $50\% \pm 5\%$)内平衡 24 h, 同一张滤膜的两次称重质量之差小于 0.04 mg . 采样时每 15 d 一个全过程空白滤膜, 每 7 d 一个过程空白滤膜, 仪器的质量控制参考孙有昌等^[28]的研究.

2 结果与讨论

2.1 $\text{PM}_{2.5}$ 及组分特征

洛阳市气象要素和 2 个点位 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度时空分布如图 1 所示, 气象数据来自全球气象网站(www.wunderground.com). 洛阳市高新年均 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 为 $(76.6 \pm 37.9) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 林校年均 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 为 $(83.2 \pm 38.9) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 超过环境空气质量标准(GB 3095-2012)二级标准年均限值($35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)的 1.2 倍和 1.4 倍. 高新日均 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 第 95 百分位数为

$140.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 林校日均 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 第 95 百分位数为 $154.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 分别超出环境空气质量标准(GB 3095-2012)二级标准日均限值($75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)的 0.9 倍和 1.1 倍. 采样期内, 高新和林校的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 变化趋势基本一致, 超标天数分别占总采样天数的 44.2% 和 52.2%, 较 2015 年细颗粒物超标率(占比 60.0% 以上)^[24]相对减少, 但该区域大气污染仍较为严重.

2 个站点间的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 差异较小, 可能由于人口密度相当, 所受人类活动的影响相似. 高新和林校的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 季节均值变化特征为: 冬季 (88.1 ± 43.1 和 91.5 ± 41.7) > 春季 (81.4 ± 34.8 和 91.3 ± 40.6) > 秋季 (75.5 ± 36.2 和 83.1 ± 36.8) > 夏季 (53.2 ± 20.1 和 57.2 ± 21.8), 洛阳市 $\text{PM}_{2.5}$ 的季节变化趋势与深圳^[30]和郑州^[31]等相似. 春季受沙尘天气影响, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 较高, 同时该季节为旅游热季, 大量游客涌入洛阳市观赏牡丹, 导致机动车尾气排放升高, 污染加剧. 夏季高温多雨, 空气质量较好. 秋冬季因采暖期燃煤量增加, 导致污染加重, 风速低, 降水减少, 逆温现象频繁, 不利于颗粒物扩散.

洛阳市高新和林校的 9 种水溶性离子浓度变化范围分别为 $6.9 \sim 121.8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $8.2 \sim 117.5$

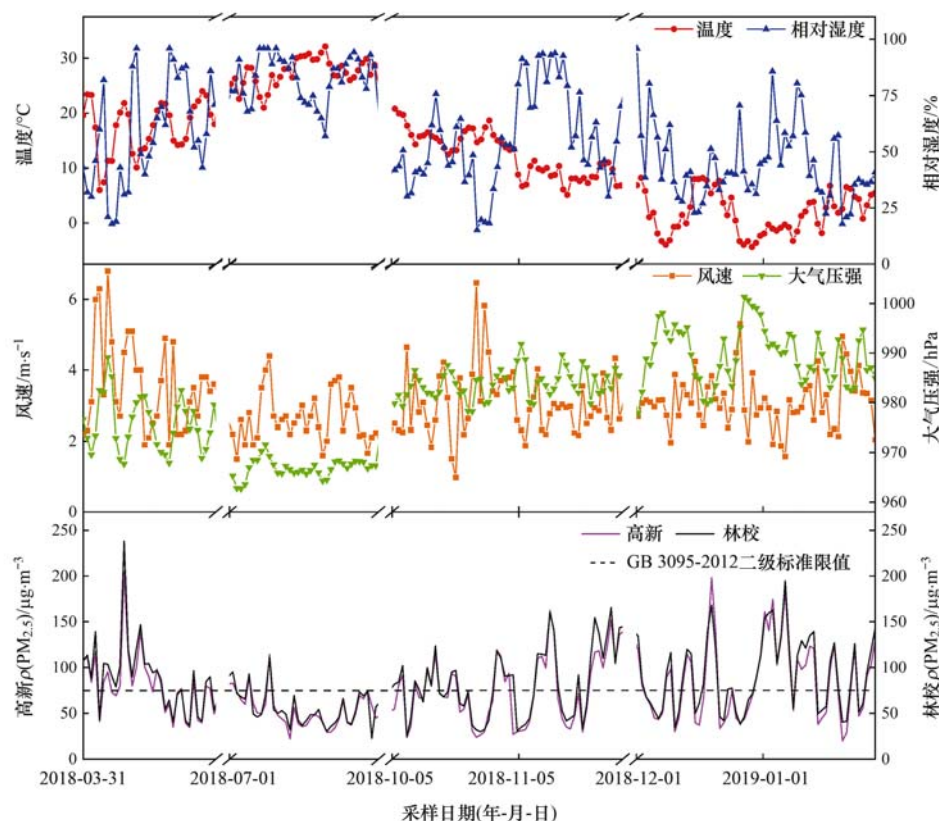


图 1 采样期间洛阳市气象条件和 2 点位 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 变化

Fig. 1 Variation in meteorological conditions and $\rho(\text{PM}_{2.5})$ at Gaixin and Linxiao during the sampling period

$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,各占 $\text{PM}_{2.5}$ 的质量分数为 55.1% 和 54.2%,该比值高于郑州 (52.2%)^[31] 和武汉 (42.0%)^[32],低于石家庄 (60.7%)^[33]. 从表 1 可知,高新和林校的 9 种水溶性离子组分浓度由大到小均为: $\text{NO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NH}_4^+ > \text{Cl}^- > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Na}^+ > \text{F}^- > \text{Mg}^{2+}$.

二次离子 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 和 NH_4^+ 是水溶性离子中的主要成分. 秋季 $\rho(\text{NO}_3^-)$ 明显提高且林校高于高新,表明林校受到交通排放的影响较大^[34]. 夏季 $\rho(\text{SO}_4^{2-})$ 最高且林校高于高新,可能由于温度高促进光化学反应生成二次硫酸盐^[35]; 冬季由于采暖期燃煤和工业燃煤排放大量气态 SO_2 , 导致 $\rho(\text{SO}_4^{2-})$ 升高,仅次于夏季. NH_4^+ 是 $\text{PM}_{2.5}$ 中重要的碱性离子,在高温条件下颗粒态 NH_4NO_3 易分解成

气态的硝酸和氨^[36],导致 $\rho(\text{NH}_4^+)$ 和 $\rho(\text{NO}_3^-)$ 在夏季低; 冬季气温低、大气层结构稳定和 NO_x 的排放增多均有利于 NH_4NO_3 的稳定存在,增加了 $\rho(\text{NH}_4^+)$ 和 $\rho(\text{NO}_3^-)$ 的季节差异. 此外, $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ 在春夏均小于 1,说明春夏季大气氨和硫主要贡献源以固定源^[37] 为主,秋冬季比值大于 1,则以移动源^[37] 为主. 洛阳市的 $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ 总比值为 1.67,表明本地交通源对大气污染的贡献更加突出. 春季地面尘土易被卷至空中产生沙尘天气导致 $\rho(\text{Ca}^{2+})$ 在该季节最高. K^+ 和 Cl^- 通常作为生物质燃烧和燃煤的示踪物^[11],浓度季节变化相似,秋季浓度升高可能来自生物质燃烧,冬季则可能与采暖期燃烧排放增多有关.

表 1 高新和林校 $\text{PM}_{2.5}$ 中水溶性离子浓度/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

Table 1 Water-soluble ions characteristics of PM _{2.5} at the sites of Gaoxin and Linxiao/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$										
点位	季节	$\rho(\text{Na}^+)$	$\rho(\text{NH}_4^+)$	$\rho(\text{K}^+)$	$\rho(\text{Mg}^{2+})$	$\rho(\text{Ca}^{2+})$	$\rho(\text{F}^-)$	$\rho(\text{Cl}^-)$	$\rho(\text{NO}_3^-)$	$\rho(\text{SO}_4^{2-})$
高新	春季	0.5±0.5	5.4±3.1	0.5±0.2	0.2±0.2	2.4±2.1	0.4±0.3	1.0±0.6	8.8±5.6	9.6±3.2
	夏季	0.3±0.1	8.7±3.6	0.4±0.2	0.0±0.0	0.2±0.1	0.0±0.0	0.4±0.4	8.7±7.6	15.7±5.7
	秋季	0.4±0.1	10.3±6.2	0.8±0.3	0.1±0.0	0.6±0.6	0.2±0.1	1.3±1.0	21.9±14.3	8.3±4.9
	冬季	0.5±0.1	11.7±6.1	1.4±0.9	0.1±0.0	0.8±0.4	0.2±0.2	3.4±1.8	23.1±14.2	10.5±5.9
	全年	0.4±0.2	9.6±5.7	0.9±0.7	0.1±0.1	0.9±1.2	0.2±0.2	1.8±1.7	17.7±13.8	10.6±5.7
林校	春季	0.5±0.5	6.3±3.6	0.5±0.2	0.2±0.2	2.5±1.9	0.3±0.3	0.9±0.4	10.2±6.8	10.5±3.9
	夏季	0.3±0.1	9.0±3.6	0.4±0.1	0.0±0.0	0.3±0.1	0.0±0.0	0.5±0.3	9.0±6.6	17.2±5.8
	秋季	0.4±0.2	11.1±5.9	0.9±0.3	0.1±0.1	0.8±0.6	0.2±0.1	1.8±1.2	23.6±13.9	9.0±5.0
	冬季	0.5±0.4	11.6±6.3	1.4±0.9	0.1±0.1	0.9±0.6	0.2±0.1	3.9±1.9	22.9±13.9	10.8±5.9
	全年	0.4±0.3	10.1±5.7	0.9±0.7	0.1±0.1	1.0±1.1	0.2±0.2	2.1±1.9	18.7±13.5	11.2±5.9

OC 和 EC 是碳在大气 $\text{PM}_{2.5}$ 中的主要存在形式, EC 主要来自含碳燃料的一次燃烧排放, OC 则包括直接排放的一次有机碳 (primary organic carbon, POC) 和二次反应等途径形成二次有机碳 (secondary organic carbon, SOC)^[12]. 洛阳市 $\text{PM}_{2.5}$ 中的年均 $\rho(\text{OC})$ 和 $\rho(\text{EC})$ 分别为 $(12.9 \pm 7.7) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $(1.3 \pm 0.5) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 占 $\text{PM}_{2.5}$ 的 16.2% 和 1.6%. 高新和林校的 $\rho(\text{OC})$ ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 季节变化较为明显, 呈现: 冬季 (18.7 ± 8.4 和 18.9 ± 8.0) > 秋季 (11.8 ± 5.6 和 13.4 ± 6.8) > 春季 (7.8 ± 2.6 和 8.8 ± 3.2) > 夏季 (6.1 ± 1.3 和 6.9 ± 2.1) 的变化趋势. 林校的含碳组分在各季节均高于高新, 表明该点位受到机动车尾气排放影响以及污染程度较重有关.

OC/EC 比值是局地碳质气溶胶排放和区域 SOC 转化的综合结果, 常被用来识别碳质气溶胶的来源^[14]. 有研究认为 OC/EC 比值为 2.5 ~ 5.0 表示来自汽车尾气排放^[34], 5.0 ~ 10.5 表示来自燃煤排放^[34], 16.8 ~ 40.0 表示来自生物质燃烧排放^[38]. 根据 OC/EC 比值范围得到洛阳市春夏季 $\text{PM}_{2.5}$ 中的碳质组分主要来自汽车尾气排放, 而秋冬季的 OC

和 EC 主要来自煤炭燃烧和生物质燃烧. 同时, OC/EC 比值也可以鉴别颗粒物的二次来源^[15], OC/EC 比值大于 2 时, 说明有 SOC 的生成, 比值越大, 二次污染越严重. 高新和林校的 OC/EC 年均值分别为 11.3 和 10.7 (图 2), 说明洛阳市的二次污染严重, 高新冬季 OC/EC 比值高于林校, 表明高新还受到生物质燃烧的影响.

由于 SOC 形成机制比较复杂, 常用 OC/EC 最

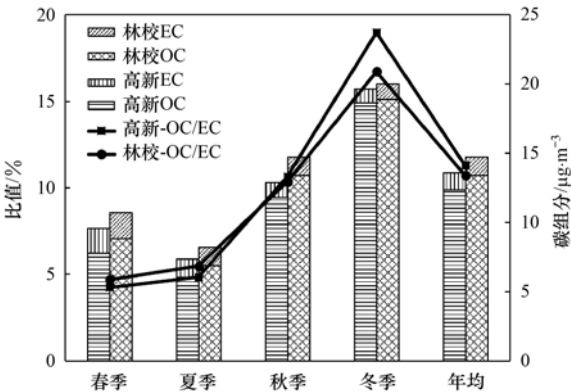


图 2 高新和林校 $\text{PM}_{2.5}$ 中碳质组分浓度比较

Fig. 2 Carbon component concentrations of $\text{PM}_{2.5}$ at Gaoxin and Linxiao

小比值法对 SOC 进行估算,计算公式如下^[15]:

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

式中, $(\text{OC}/\text{EC})_{\min}$ 为样品中 OC/EC 的最小值, SOC、OC 和 EC 的单位均为 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 计算结果显示, 高新和林校年均 $\rho(\text{SOC})$ 为 $7.4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $8.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 高于郑州 ($6.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)^[38] 和舟山 ($3.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)^[39]; 且 2 点位年均 $\rho(\text{SOC})$ 分别占 $\rho(\text{OC})$ 的 50.0% 和 55.1%, 高于德阳、成都和眉山 (47.0%、46.0% 和 38.0%)^[14]; 冬季高新和林校的 $\rho(\text{SOC})/\rho(\text{OC})$ 高达 67.8% 和 77.3%, 高于同季节北京 (49.3%)^[12] 和石家庄 (45.0%)^[15]. 以上数据表明 2 个点位的 SOC 污染严重, 其中林校的二次污染更加严重.

2.2 $\text{PM}_{2.5}$ 质量重构及来源解析

化学质量浓度重构可以得到大气颗粒物中的组分污染特征和贡献度, 通常用来和 $\text{PM}_{2.5}$ 实测值进行比较^[40]. 本研究将 $\text{PM}_{2.5}$ 的化学组分分为: 硫酸盐 (SO_4^{2-})、硝酸盐 (NO_3^-)、氯盐 (Cl^-)、铵盐 (NH_4^+)、钾盐 (K^+)、元素碳 (EC)、有机物 (OM = $1.4 \times$

$[\text{OC}]$)、地壳物质 ($1.89 \times [\text{Al}] + 2.14 \times [\text{Si}] + 1.4 \times [\text{Ca}] + 1.43 \times [\text{Fe}]$)、微量元素和其他.

图 3 为高新和林校四季的化学组分重构结果, 可以看出 2 点位化学组分变化趋势相似. 春季地壳物质重构质量浓度和质量分数 ($29.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 29.6%) 远高于其他季节, 说明扬尘源是洛阳市春季大气污染的主要来源; 夏季硫酸盐的重构质量浓度和质量分数 ($16.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 30.3%) 明显增大, 可能是由于高温条件促进了硫酸盐的转化; 秋冬季有机物和硝酸盐的重构质量浓度和质量分数 ($48.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 56.3%) 高于春夏季 ($21.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 31.8%), 供暖期燃烧大量的煤炭导致大气颗粒物排放升高, 并且由于大气结构层稳定、气温低, 进而二次转化增多, 加剧了大气污染, 增加了有机物和硝酸盐的浓度. 综上所述, 二次无机盐 (高新 36.5%, 林校 36.0%) 和有机物 (高新 26.7%, 林校 26.7%) 是洛阳市大气颗粒物中主要污染物. 因此, 洛阳市需要加强控制硫酸盐和硝酸盐前体物的排放, 加快新能源转型, 减少空气污染.

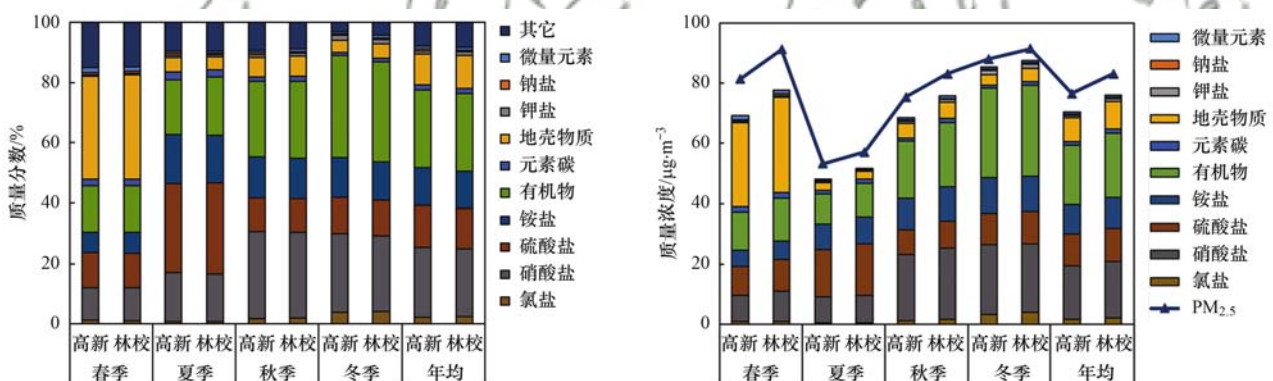


图 3 高新和林校四季的平均重构特征

Fig. 3 Average reconstruction characteristics of four seasons at the sites of Gaoxin and Linxiao

由于 SOC 的源成分谱难以获得, 无法通过模型直接解析. 为降低不确定性, 采用 OC/EC 最小比值法估算 SOC 浓度, 二次有机气溶胶 (SOA) 以 $1.4 \times [\text{SOC}]$ 计算^[38], 将 SOC 和 SOA 从受体成分谱中去除, 重新构建受体成分谱. 将采样期间 $\text{PM}_{2.5}$ 各组分平均浓度作为 CMB 模型的受体输入数据, 将减去 SOA 的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度作为 CMB 模型的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度输入, 得到洛阳市 2018 年采样期间各污染源对环境 $\text{PM}_{2.5}$ 的贡献率, 结果如图 4, 可以看出 2 点位源贡献的季节变化趋势相似. 春季由于沙尘天气导致扬尘源贡献最高, 其中林校受到扬尘影响 (23.8%) 高于高新 (22.9%); 夏季高新 (34.2%) 和林校 (37.1%) 均为二次硫酸盐的贡献最高, 这可能是由于 NH_4NO_3 在高温天气影响下易受热分解, 因此二次硝酸盐贡献在夏季最低; 秋季主要贡献源相似, 均为二次硝

酸盐、SOA 和燃煤 (高新 61.5%, 林校 63.0%); 冬季受供暖影响, 高新和林校的燃煤贡献最高, 分别为 14.4% 和 13.3%. 从不同点位结果来看, 林校的二次盐类和 SOA 污染 (54.1%) 较高新 (52.2%) 更为严重, 高新的燃煤和工艺过程污染 (12.6% 和 7.2%) 则高于林校 (11.6% 和 6.9%), 且各季节机动车源在林校贡献均高于高新, 该结果与组分特征得出的结论一致. 从全年结果来看, 洛阳市的二次污染较重, 二次硝酸盐和二次硫酸盐的总和在各季节的贡献率均居于首位, SOA 在秋冬季的贡献率较高; 燃煤、机动车和扬尘的贡献率相当, 均在 10.0% 以上; 工艺过程和生物源的贡献相对较低. 综合全年污染源占比来看, 洛阳市 $\text{PM}_{2.5}$ 污染主要为二次污染.

2.3 气团输送路径及潜在源区

以林校 ($112^{\circ}05'E$, $34^{\circ}07'N$) 为起始点, 分析洛

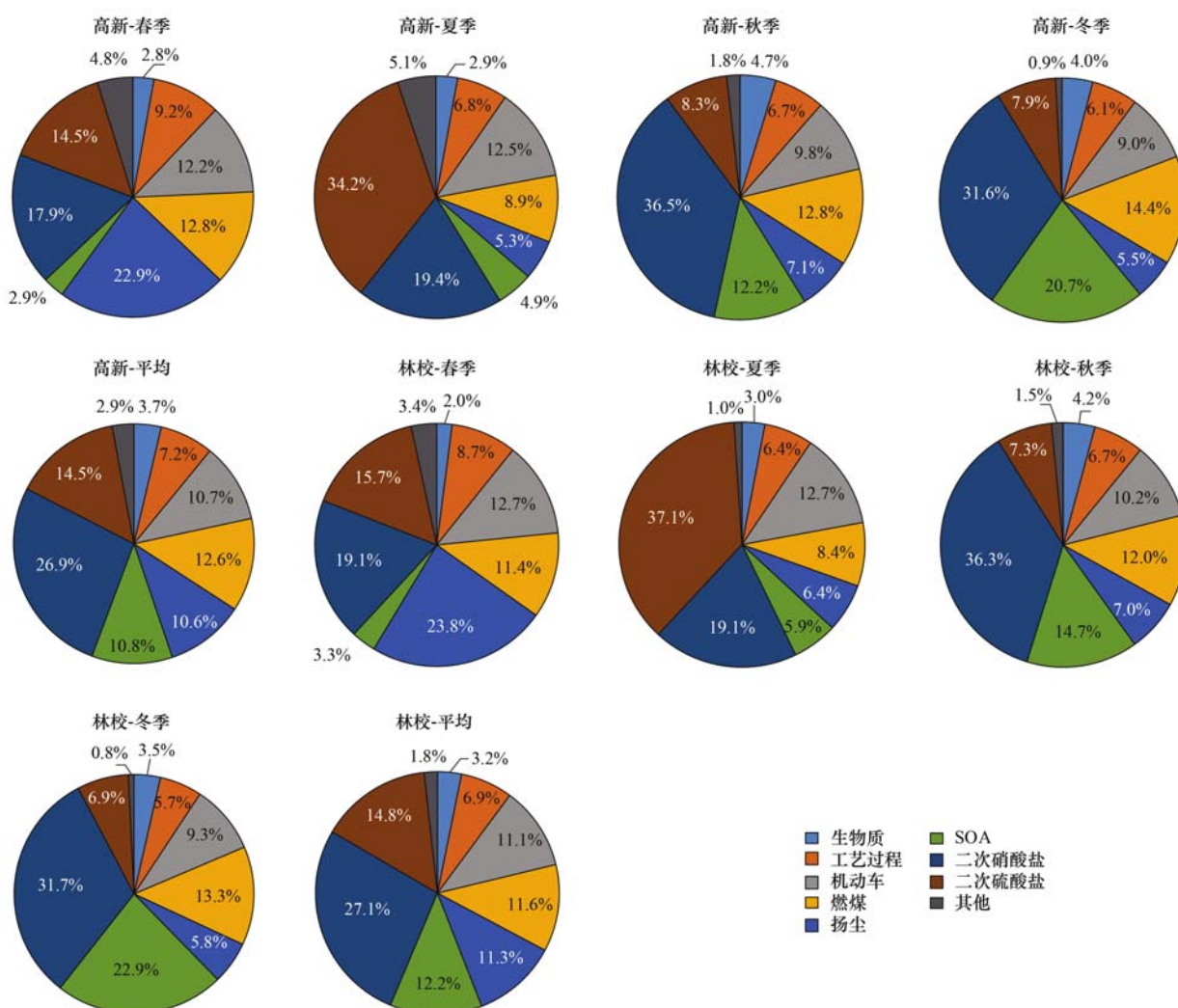
图4 洛阳林校和高新不同季节 PM_{2.5} 的 CMB 来解析源贡献

Fig. 4 Results of source apportionment for four seasons at the sites of Gaoxin and Linxiao

阳市 2018 年 4 月至 2019 年 1 月不同气团的污染轨迹,聚类结果如图 5。春季有 4 条主要传输途径:轨迹 1(28.3%)和轨迹 3(22.5%)均来自西北方向,轨迹 1 起源于陕西省东部,途经山西省西南部到达洛阳,气团轨迹短、移动速度慢;轨迹 3 起源于蒙古国南部,途经内蒙古自治区、陕西省和山西省,传输距离长且气团移动速度较快。轨迹 2(27.5%)来自西南方向;轨迹 4(21.7%)来自渤海西南部。夏季有 3 条主要传输途径且均为短距离传输,气团移动缓慢:轨迹 1(37.1%)来自山东南部;轨迹 2(32.3%)来自湖南省北部;轨迹 3(30.7%)来自安徽省西北部。秋季有 4 条主要传输途径:轨迹 1(48.4%)来自东南方向安徽省和河南省交界处,主要为省内短距离传输。轨迹 2(25.0%)和轨迹 3(17.7%)均来自西北方向,轨迹 2 为长距离传输,气团移动速度最快;轨迹 3 为短距离传输,由内蒙古南部经山西省和陕西省到达河南省。轨迹 4(8.9%)来自山东省北部,由河南省东部进入洛阳。

冬季仍主要受到西北方向气团的影响,轨迹 1(41.9%)和轨迹 3(22.6%)分别为短距离和长距离传输;轨迹 2(26.6%)来自河南南部南阳盆地,气团移动缓慢且途中颗粒物持续积累;轨迹 4(8.9%)来自北京东南方向,气团移动较快,说明洛阳地区也受到京津冀地区污染物的传输扩散影响。

为了确定各季节污染物的潜在来源,使用 PSCF 计算得到 WPSCF 值。春季 WPSCF 高值区主要为河南省西部、山西省南部、陕西省东部、湖北省西北部和重庆市北部,即洛阳市周边省市地区,其 WPSCF 值为 0.4~0.6 之间(图 6),污染物主要来自周边地域及本地源排放。夏季来源较为分散,主要受到山东省南部和安徽省北部的区域传输影响,其 WPSCF 值 >0.4,显示出夏季主要受季风气候影响,此外湘鄂交界区域也有一定程度的贡献。秋季主要为河南省中部区域各城市之间的相互影响,以及安徽省西南部和河南省东南部的传输影响,其 WPSCF 值为 0.5~0.6 之间,这些地区对洛阳市的大气污染

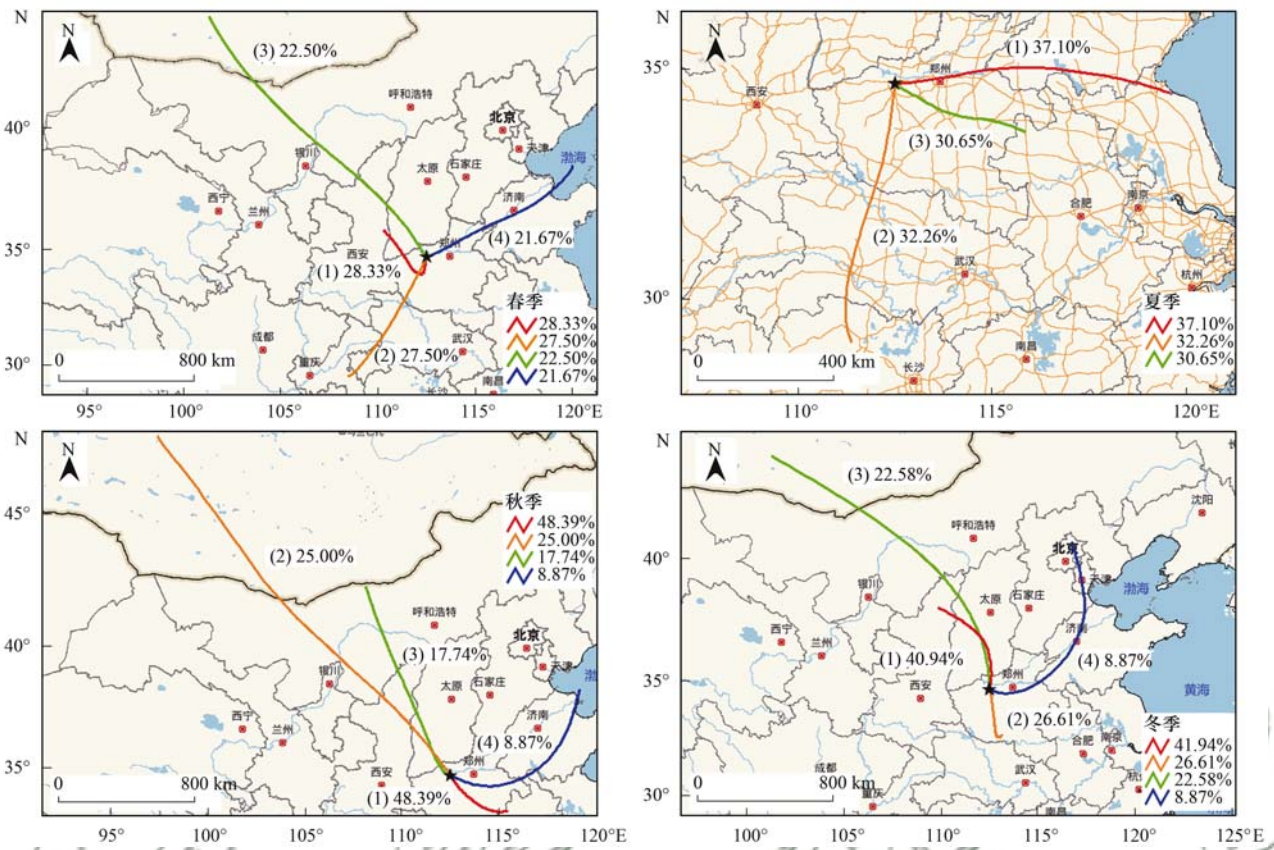


图 5 洛阳市四季后向轨迹聚类分析结果

Fig. 5 Results for back-trajectory clusters in the four seasons in Luoyang

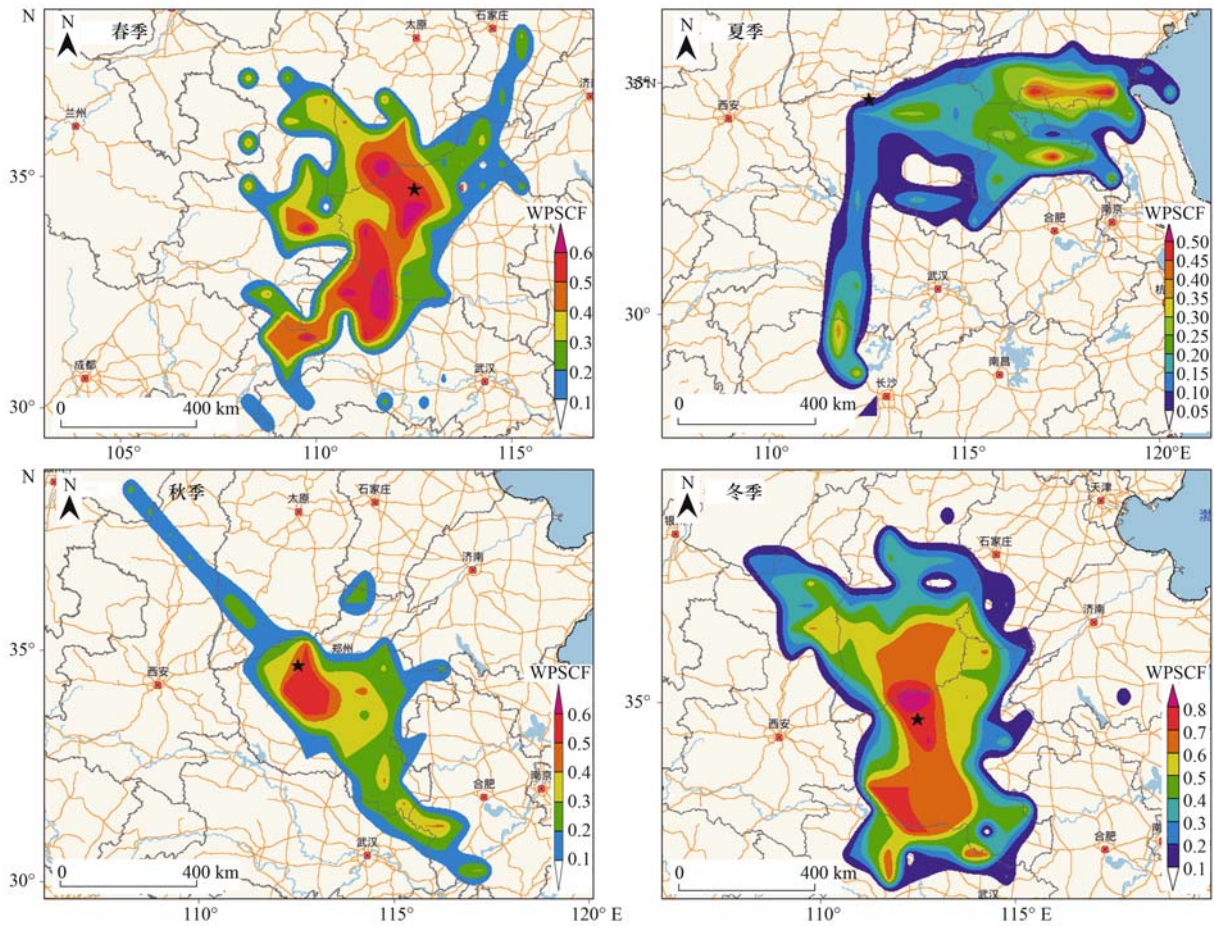


图 6 洛阳市四季 $PM_{2.5}$ 潜在源结果 (WPSCF)

Fig. 6 Results of potential sources (WPSCF) of $PM_{2.5}$ in the four seasons in Luoyang

有较大影响. 冬季 WPSCF 高值区明显增大, 主要为洛阳市周边城市, 其 WPSCF 值为 0.6 ~ 0.8, 污染源集中, 冬季不利地形和气象条件使污染物更加不易扩散.

3 结论

(1) 高新和林校年均 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 分别为 $(76.6 \pm 37.9) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $(83.2 \pm 38.9) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 是环境空气质量标准 (GB 3095-2012) 二级标准年均限值 ($35 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) 的 2.2 倍和 2.4 倍. 2 点位季节平均浓度变化一致, 由高到低为: 冬季、春季、秋季和夏季.

(2) 高新和林校 9 种水溶性离子浓度变化范围分别为 $6.9 \sim 121.8 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $8.2 \sim 117.5 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 各占 $\text{PM}_{2.5}$ 的 55.1% 和 54.2%. 林校的含碳组分在各季节均高于高新, 且 2 个点位 OC/EC 比值全年均远大于 2, SOC 污染严重.

(3) 基于 CMB 源解析结果, 全年林校的机动车源贡献较高, 高新的生物质源贡献较高, 而秋冬季林校的燃煤源贡献明显高于高新. 高新和林校全年主要来源均为二次硫酸盐、二次硝酸盐、燃煤和 SOA.

(4) 根据后向轨迹分析, 洛阳市大气 $\text{PM}_{2.5}$ 污染在夏季受到正东方向的季风影响显著, 其他 3 个季节更多表现为受到周边省市的短距离传输影响. WPSCF 结果表明, 除了周围地区的相互影响, $\text{PM}_{2.5}$ 的主要潜在来源还有陕豫交界、晋豫交界、豫鄂交界、鲁苏交界、皖鄂交界和湘鄂交界.

参考文献:

- [1] Zhang Q, Zheng Y X, Tong D, *et al.* Drivers of improved $\text{PM}_{2.5}$ air quality in China from 2013 to 2017 [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, **116**(49): 24463-24469.
- [2] Wang S J, Zhou C S, Wang Z B, *et al.* The characteristics and drivers of fine particulate matter ($\text{PM}_{2.5}$) distribution in China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, **142**: 1800-1809.
- [3] Klimont Z, Kupiainen K, Heyes C, *et al.* Global anthropogenic emissions of particulate matter including black carbon [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, **17**(14): 8681-8723.
- [4] Ming L L, Jin L, Li J, *et al.* $\text{PM}_{2.5}$ in the Yangtze River Delta, China: Chemical compositions, seasonal variations, and regional pollution events [J]. *Environmental Pollution*, 2017, **223**: 200-212.
- [5] Luan T, Guo X L, Guo L J, *et al.* Quantifying the relationship between $\text{PM}_{2.5}$ concentration, visibility and planetary boundary layer height for long-lasting haze and fog-haze mixed events in Beijing [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, **18**(1): 203-225.
- [6] Liu C, Chen R J, Sera F, *et al.* Ambient particulate air pollution and daily mortality in 652 cities [J]. *New England Journal of Medicine*, 2019, **381**(8): 705-715.
- [7] Yin P, Guo J P, Wang L J, *et al.* Higher risk of cardiovascular disease associated with smaller size-fractioned particulate matter [J]. *Environmental Science & Technology Letters*, 2020, **7**(2): 95-101.
- [8] Fu P F, Guo X B, Cheung F M H, *et al.* The association between $\text{PM}_{2.5}$ exposure and neurological disorders: a systematic review and meta-analysis [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **655**: 1240-1248.
- [9] Zhang R, Jing J, Tao J, *et al.* Chemical characterization and source apportionment of $\text{PM}_{2.5}$ in Beijing: seasonal perspective [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, **13**(14): 7053-7074.
- [10] Ding J, Zhao P S, Su J, *et al.* Aerosol pH and its driving factors in Beijing [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, **19**(12): 7939-7954.
- [11] 李欢, 唐贵谦, 张军科, 等. 2017 ~ 2018 年北京大气 $\text{PM}_{2.5}$ 中水溶性无机离子特征 [J]. *环境科学*, 2020, **41**(10): 4364-4373.
- [12] Li H, Tang G Q, Zhang J K, *et al.* Characteristics of water-soluble inorganic ions in $\text{PM}_{2.5}$ in Beijing during 2017-2018 [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(10): 4364-4373.
- [12] 董贵明, 唐贵谦, 张军科, 等. 北京南部城区 $\text{PM}_{2.5}$ 中碳质组分特征 [J]. *环境科学*, 2020, **41**(10): 4374-4381.
- [12] Dong G M, Tang G Q, Zhang J K, *et al.* Characteristics of carbonaceous species in $\text{PM}_{2.5}$ in southern Beijing [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(10): 4374-4381.
- [13] He K B, Yang F M, Ma Y L, *et al.* The characteristics of $\text{PM}_{2.5}$ in Beijing, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2001, **35**(29): 4959-4970.
- [14] 史芳天, 罗彬, 张巍, 等. 成都平原 $\text{PM}_{2.5}$ 中碳质组分时空分布特征与来源 [J]. *环境科学*, 2020, **41**(2): 520-528.
- [14] Shi F T, Luo B, Zhang W, *et al.* Spatio-temporal variations and source apportionment of carbonaceous species in $\text{PM}_{2.5}$ across multiple sampling locations in the Chengdu plain [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(2): 520-528.
- [15] 张俊峰, 韩力慧, 程水源, 等. 京津冀地区典型城市大气细颗粒物碳质组分污染特征及来源 [J]. *环境科学研究*, 2020, **33**(8): 1729-1739.
- [15] Zhang J F, Han L H, Cheng S Y, *et al.* Characteristics and sources of carbon pollution of fine particulate matter in typical cities in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, **33**(8): 1729-1739.
- [16] Anu N, Rangabhashiyam S, Rahul A, *et al.* Evaluation of optimization methods for solving the receptor model for chemical mass balance [J]. *Journal of the Serbian Chemical Society*, 2015, **80**(2): 253-264.
- [17] 段时光, 姜楠, 杨留明, 等. 郑州市冬季大气 $\text{PM}_{2.5}$ 传输路径和潜在源分析 [J]. *环境科学*, 2019, **40**(1): 86-93.
- [17] Duan S G, Jiang N, Yang L M, *et al.* Transport pathways and potential sources of $\text{PM}_{2.5}$ during the winter in Zhengzhou [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(1): 86-93.
- [18] 黄小刚, 邵天杰, 赵景波, 等. 汾渭平原 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的影响因素及空间溢出效应 [J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(8): 3539-3548.
- [18] Huang X G, Shao T J, Zhao J B, *et al.* Influence factors and spillover effect of $\text{PM}_{2.5}$ concentration on Fen-wei Plain [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(8): 3539-3548.
- [19] 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.
- [19] 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.
- [20] 曹宁, 黄学敏, 祝颖, 等. 西安冬季重污染过程 $\text{PM}_{2.5}$ 理化特

- 征及来源解析[J]. 中国环境科学, 2019, **39**(1): 32-39.
- Cao N, Huang X M, Zhu Y, *et al.* Pollution characteristics and source apportionment of fine particles during a heavy pollution in winter in Xi'an City[J]. China Environmental Science, 2019, **39**(1): 32-39.
- [21] 刘素, 马彤, 杨艳, 等. 太原市冬季PM_{2.5}化学组分特征与来源解析[J]. 环境科学, 2019, **40**(4): 1537-1544.
- Liu S, Ma T, Yang Y, *et al.* Chemical composition characteristics and source apportionment of PM_{2.5} during winter in Taiyuan[J]. Environmental Science, 2019, **40**(4): 1537-1544.
- [22] Wang Q Q, Li J, Yang J X, *et al.* Seasonal characterization of aerosol composition and sources in a polluted city in central China[J]. Chemosphere, 2020, **258**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.127310
- [23] 张攀, 陈建新, 孙睿, 等. 洛阳市冬季大风天气下PM₁₀和PM_{2.5}浓度变化研究[J]. 安徽农业科学, 2015, **43**(26): 196-197.
- Zhang P, Chen J X, Sun R, *et al.* Research on the concentration changes of PM_{2.5} and PM₁₀ in winter windy weather in Luoyang[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2015, **43**(26): 196-197.
- [24] 王群. 郑州、洛阳和平顶山城区PM_{2.5}中含碳组分污染特征及源解析[D]. 郑州: 郑州大学, 2017.
- [25] 周兵利, 刘献辉, 张攀, 等. 洛阳市大气颗粒物来源解析研究[J]. 环保科技, 2018, **24**(5): 23-25.
- Zhou B L, Liu X H, Zhang P, *et al.* Study on source apportionment of PM_{2.5} in ambient air of Luoyang[J]. Environmental Protection and Technology, 2018, **24**(5): 23-25.
- [26] 靳朝喜. 洛阳市大气PM_{2.5}中重金属元素特征来源及潜在生态风险评价[J]. 环保科技, 2020, **26**(6): 11-15.
- Jin C X. Heavy metal characteristic sources and ecological risk assessment of atmospheric PM_{2.5} in Luoyang City[J]. Environmental Protection and Technology, 2020, **26**(6): 11-15.
- [27] 齐静文, 张瑞芹, 姜楠, 等. 洛阳市秋冬季PM_{2.5}中多环芳烃的污染特征、来源解析及健康风险评价[J]. 环境科学, 2021, **42**(2): 595-603.
- Qi J W, Zhang R Q, Jiang N, *et al.* Characterization, sources, and health risks of PM_{2.5}-bound PAHs during autumn and winter in Luoyang city[J]. Environmental Science, 2021, **42**(2): 595-603.
- [28] 孙有昌, 姜楠, 王申博, 等. 安阳市大气PM_{2.5}中水溶性离子季节特征及来源解析[J]. 环境科学, 2020, **41**(1): 75-81.
- Sun Y C, Jiang N, Wang S B, *et al.* Seasonal characteristics and source analysis of water-soluble ions in PM_{2.5} of Anyang city[J]. Environmental Science, 2020, **41**(1): 75-81.
- [29] Wang Q, Jiang N, Yin S S, *et al.* Carbonaceous species in PM_{2.5} and PM₁₀ in urban area of Zhengzhou in China: Seasonal variations and source apportionment[J]. Atmospheric Research, 2017, **191**: 1-11.
- [30] 何志明, 王荀, 张浩玲, 等. 深圳市龙岗区PM_{2.5}颗粒物来源探析[J]. 应用预防医学, 2017, **23**(5): 363-366.
- He Z M, Wang X, Zhang H L, *et al.* Analysis of PM_{2.5} particle ambient emission source in Longgang district of Shenzhen[J]. Journal of Applied Preventive Medicine, 2017, **23**(5): 363-366.
- [31] 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.
- [32] Qin J, Mbululo Y, Yang M Y, *et al.* Chemical composition and deposition fluxes of water-soluble inorganic ions on dry and wet deposition samples in Wuhan, China[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, **16**(1), doi: 10.3390/ijerph16010132
- [33] 宿文康, 鲍晓磊, 倪爽英, 等. 2018年石家庄市秋冬季典型霾污染特征[J]. 环境科学, 2019, **40**(11): 4755-4763.
- Su W K, Bao X L, Ni S Y, *et al.* Characteristics of haze pollution episodes during autumn and winter in 2018 in Shijiazhuang[J]. Environmental Science, 2019, **40**(11): 4755-4763.
- [34] 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.
- [35] Wang H B, Tian M, Chen Y, *et al.* Seasonal characteristics, formation mechanisms and source origins of PM_{2.5} in two megacities in Sichuan Basin, China[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2018, **18**(2): 865-881.
- [36] 黄含含, 王羽琴, 李升革, 等. 西安市PM_{2.5}中水溶性离子的季节变化特征[J]. 环境科学, 2020, **41**(6): 2528-2535.
- Huang H H, Wang Y Q, Li S P, *et al.* Seasonal variation of water-soluble ions in PM_{2.5} in Xi'an[J]. Environmental Science, 2020, **41**(6): 2528-2535.
- [37] Pang N N, Gao J, Che F, *et al.* Cause of PM_{2.5} pollution during the 2016-2017 heating season in Beijing, Tianjin, and Langfang, China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2020, **95**: 201-209.
- [38] 张剑飞, 姜楠, 段时光, 等. 郑州市PM_{2.5}化学组分的季节变化特征及来源解析[J]. 环境科学, 2020, **41**(11): 4813-4824.
- Zhang J F, Jiang N, Duan S G, *et al.* Seasonal chemical composition characteristics and source apportionment of PM_{2.5} in Zhengzhou[J]. Environmental Science, 2020, **41**(11): 4813-4824.
- [39] 叶荣民, 王洪涛, 董敏丽, 等. 舟山市大气细颗粒物组分特征及其污染来源解析[J]. 环境工程, 2019, **37**(5): 122-128.
- Ye R M, Wang H T, Dong M L, *et al.* Analysis of component characteristics and pollution sources of atmospheric fine particles in Zhoushan[J]. Environmental Engineering, 2019, **37**(5): 122-128.
- [40] Tian J Y, Cai T Q, Shang J, *et al.* Effects of the emergency control measures in Beijing on air quality improvement[J]. Atmospheric Pollution Research, 2019, **10**(2): 580-586.

CONTENTS

Emission Reduction Potential of Air Pollutants of Thermal Power Industry Based on Carbon Emission Reduction Target and Emission Standard Constraint Scenarios	LI Hui, SUN Xue-li, PANG Bo, <i>et al.</i> (5563)
Volatile Organic Compounds in the Vehicle Repairing Industry of China: Emission, Management, Purification, and Policy	WANG Hai-lin, YANG Tao, NIE Lei, <i>et al.</i> (5574)
Pollutant Emission Inventory of Biomass Combustion Sources in Xining City	GAO Yu-zong, JI Ya-qin, LIN Zi, <i>et al.</i> (5585)
Analysis of Air Quality and Influencing Factors in Sichuan Basin During the COVID-19 Outbreak	CHEN Jun-hui, FENG Xiao-qiong, LI Yuan, <i>et al.</i> (5594)
Estimation of PM _{2.5} Concentration in Sichuan Province Based on Improved Linear Mixed Effect Model and Geo-intelligent Random Forest	WU Yu-hong, DU Ning, WANG Li, <i>et al.</i> (5602)
Characterization of Water-soluble Inorganic Ions in Atmospheric PM _{2.5} in Chengdu During the Later Stage of the Air Pollution Prevention and Control Action Plan	LI Jia-qi, ZHANG Jun-ke, DONG Gui-ming, <i>et al.</i> (5616)
Characteristics of Chemical Composition and Source Apportionment of Atmospheric Fine Particulate Matter in Luoyang	SUN Jia-bin, DONG Zhe, LI Li-ping, <i>et al.</i> (5624)
Characteristics and Main Influencing Factors of Black Carbon Aerosol in Beijing	CAO Yang, AN Xin-xin, LIU Bao-xian, <i>et al.</i> (5633)
Chemical Characteristics and Source Apportionment with Temporal Refinement for VOCs in Tianjin Suburb in Summer	WANG Yi-xuan, LIU Bao-shuang, WU Jian-hui, <i>et al.</i> (5644)
Pollution Characteristics and Reactivity of Volatile Organic Compounds in Shenyang	DU Han-bing, WANG Nan, REN Wan-hui, <i>et al.</i> (5656)
Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric SVOCs Around Typical Chemical Industry Zones	GE Xiang, WU Jian, GAO Song, <i>et al.</i> (5663)
Source Analysis and Health Risk Assessment of Toxic Volatile Organic Compounds in Nanjing in Summer and Winter	ZHANG Zi-jin, LIN Yu-chi, ZHANG Yu-xian, <i>et al.</i> (5673)
Emission Characteristics of Industrial VOCs Based on Emission Inventory and Field Test: A Case Zhengzhou High-tech Zone	REN He, LU Xuan, LIU Yang, <i>et al.</i> (5687)
VOCs Emission Characteristics of Water-based Architectural Coatings and the Influence on the Atmospheric Environment in China	GAO Mei-ping, WANG Hai-lin, LIU Wen-wen, <i>et al.</i> (5698)
WRF-Chem Simulations of the Impacts of Uncertainty in VOCs Emissions on Ozone Formation and Control Strategies	WANG Feng, WANG Jian-wei, YANG Ning, <i>et al.</i> (5713)
Spatial and Temporal Distribution of Ozone and Influencing Factors in Shandong Province	ZHANG Miao, DING Chun, LI Yan, <i>et al.</i> (5723)
Chemical Characteristics and Contaminant Sensitivity During the Typical Ozone Pollution Processes of Chengdu in 2020	QIAN Jun, XU Chen-xi, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i> (5736)
Development of an Emission Model for Oxygenated Volatile Organic Compounds from Gasoline Vehicles Based on the Online Measurement	HAO Yu-qi, YUAN Zi-bing, WANG Meng-lei, <i>et al.</i> (5747)
Dynamic Evolution Characteristics of Water Resources Utilization Efficiency in China Under the Constraint of Triple Attribute Carrying Capacity	ZHANG Kai, WU Feng-ping, CHENG Chang-chun (5757)
Prediction of Total Nitrogen Load in Yangtze River Basin	DING Zhao-wei, ZHENG Hua (5768)
Dynamic of Net Anthropogenic Nitrogen Inputs and Riverine Nitrogen Export in the Yangtze River Basin in 1980-2015	YAO Meng-ya, HU Min-peng, CHEN Ding-jiang (5777)
Characteristics of Water Environment and Spatial-temporal Distribution of Nitrogen and Phosphorus Load in the Yellow River	HAN Xu, PAN Bao-zhu, CHEN Yue, <i>et al.</i> (5786)
Analysis of Nitrate Pollution Sources Under Different Rainfall Conditions Based on $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{18}\text{O}$ Values	XING Zi-kang, YU Zhong-bo, YI Peng, <i>et al.</i> (5796)
Seasonal Variation Characteristics of Eukaryotic Microbial Community Composition in the Source Water Reservoir	ZHANG Hai-han, HUANG Xin, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (5804)
Characteristics of Planktonic Bacteria Community Between Summer and Winter Surface Water in Dali Lake	LI Wen-bao, GUO Xin, ZHANG Bo-yao, <i>et al.</i> (5814)
Impacts of Wastewater Effluent Discharge on Bacteria Community and Water-soluble Organic Matter in Benthic Biofilm in Receiving River	WANG Yu-tao, FAN Chen-yang, ZHU Jin-xin, <i>et al.</i> (5826)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Typical POPs in Typical Drinking Water Sources in Wuhan	ZHANG Kun-feng, FU Qing, TU Xiang, <i>et al.</i> (5836)
Investigation on Fluoroquinolone Resistance Genes in the Intensive Aquaculture Area of Shatianhu Intensive Aquaculture Farm and Surrounding Waterbodies in Shanghai, China	XU Mu, LI Shi-hao, MA Jin, <i>et al.</i> (5848)
Influencing Factors of Nitrogen Removal from Low-Pollution Water by Aerated Constructed Wetland	LI Lin-lin, LI Rong-tao, KONG Wei-jing, <i>et al.</i> (5857)
Removal of Characteristic Pollutants in Livestock Wastewater by Horizontal Subsurface Flow Constructed Wetlands	ZHAO Wei, FAN Zeng-zeng, YANG Xin-ping (5865)
Improvement of Nitrogen and Phosphorus Adsorption and Stormwater Retention Capacity by Hardwood Biochar as an Additive Material in Filler Soil	MENG Yi-ke, WANG Yuan, WANG Chuan-yue, <i>et al.</i> (5876)
Removal of Ammonia Nitrogen from Polyvinyl Alcohol/Sodium Alginate Fixed Micron Zeolite Powder in Black and Smelly Rivers	WEI Chao, CHEN Tao, JIANG Qiao, <i>et al.</i> (5884)
Effect of Corn Stalk Biochar on the Adsorption of Aureomycin from Sierozem	NAN Zhi-jiang, JIANG Yu-feng, MAO Huan-huan, <i>et al.</i> (5896)
Microbial Degradation Potential and Transformation Pathway of Micropollutants in Sand Filters of Drinking Water Treatment Plants	ZHOU Jie, WANG Dong-lin, LIN Hui, <i>et al.</i> (5905)
Long-term Trends in Illicit Drugs Abuse in the City Assessed by Wastewater Analysis	CAO Yu, DONG Xiao-tang, SHAO Xue-ting, <i>et al.</i> (5912)
Stress and Post Effects of Azithromycin and Copper on Archaeal Community and ARGs in Activated Sludge	GAO Yu-xi, LI Xing, ZHAO Jun-ru, <i>et al.</i> (5921)
Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Soil Heavy Metals at Typical Smelting Industry Sites	LI Qiang, CAO Ying, HE Lian-sheng, <i>et al.</i> (5930)
Distribution and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Heavy Metals in Coking Sites in China	WANG Yao-feng, HE Lian-sheng, JIANG Deng-ling, <i>et al.</i> (5938)
Spatial Variation and Risk Assessment of Heavy Metals in Soils of Main <i>Torreya grandis</i> Plantation Region in Zhejiang Province	WANG Min, DONG Jia-qi, BAI Long-long, <i>et al.</i> (5949)
Investigations on the Derivation of Safe Maize-Producing Threshold of Soil Cd Content and on Classification of Cd Contaminated Maize-Producing Areas in Northern China	GUAN Wei-dou, GUO Di, WANG Ping, <i>et al.</i> (5958)
Relationship Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metal Contents in Soil Aggregates and in Crops Around a Typical Pb-Zn Mining Area	QIANG Yu, LI Ying-ju, LUO Qian, <i>et al.</i> (5967)
Heavy Metal Pollution and Cumulative Effect of Soil-crop Systems Around Typical Enterprises in Xiong'an New District	ZHOU Ya-long, WANG Qiao-lin, WANG Cheng-wen, <i>et al.</i> (5977)
Heavy Metal Accumulation Effect and Safe Planting Zoning of Soil and Rice in Tongren	ZHU Liang-liang, WU Yong, ZHOU Lang, <i>et al.</i> (5988)
Effect of Dry-Wet Alternation on the Immobilization of Arsenic in Red Soil by Cerium Manganese Modified Biochar	HUANG Xiao-ya, LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, <i>et al.</i> (5997)
Ammonium Nitrogen Fertilizer and Humic Acid Synergically Promote the Removal of Cd from Soil by <i>Tagetes patula</i> L.	WANG Bing-qing, YANG Qin, LI Hong-ying, <i>et al.</i> (6006)
Characteristics and Influencing Factors of the Dissolved Methane and Nitrous Oxide Concentrations and Emissions from a Rice Paddy Drainage River in China	WU Shuang, YANG Wei-tong, SHENG Yang-yue, <i>et al.</i> (6014)
Coupling Effects of Water-saving Irrigation and Controlled-release Fertilizer (CRF) Application on CH ₄ and N ₂ O Emission in Single Cropping Paddy Field	WANG Yong-ming, XU Yong-ji, JI Yang, <i>et al.</i> (6025)
Effects of Manure Combined Chemical Fertilizers on Soil N ₂ O Emission and Microbial Characteristics of Wheat Crop System in Northwest Arid	WANG Kai, SHI Lei, MA Long, <i>et al.</i> (6038)
Effects of Different Types of Straw Returning on the Bacterial Community, Organic Carbon Mineralization and Maize Yield in Upland Red Soil	KONG Pei-jun, ZHENG Jie, LUAN Lu, <i>et al.</i> (6047)
Effects of Nitrogen and Phosphorus Additions on Soil Microorganisms in Saline-alkaline Grassland	YANG Jian-qiang, DIAO Hua-jie, HU Shu-ya, <i>et al.</i> (6058)
Effects of Combined Application of Biochar with Chemical Fertilizers and Organic Fertilizers on Nutrients and Phosphorus Forms in Purple Soils	XIANG Shu-jiang, YU Luo, XIONG Zi-yi, <i>et al.</i> (6067)
Effects of <i>Enteromorpha prolifera</i> Biochar and Wood Vinegar Co-application on Takyric Solonetz Improvement and Yield of Oil Sunflower	WANG Zheng, SUN Zhao-jun, Sameh El-Sawy, <i>et al.</i> (6078)