

目次

基于机器学习方法研究气象及排放变化对长三角地区主要城市大气污染物的影响	付文星, 黄琳, 丁嘉豪, 秦墨梅, 于兴娜, 谢放尖, 胡建林 (5879)
不同行业减排对我国东部地区空气质量及气温度的影响	龙籽谕, 朱佳, 李柯, 陈磊, 杜楠, 廖宏 (5889)
冬奥会期间京津冀及周边区域空气质量时空特征、气象影响和减排效果评估	侯露, 朱媛媛, 刘冰, 李健军 (5899)
中国印刷业 VOCs 排放趋势及未来减排潜力	梁小明, 吴彭珍, 陈来国, 刘明, 卢清, 朱李华, 孙西勃, 叶代启 (5915)
济南市典型行业 VOCs 排放特征及减排潜力分析	吴文璐, 单春艳, 赵菁林, 崔羽浓 (5924)
南京市溧水区大气挥发性有机物污染特征及来源解析	阮兆元, 燕鸥, 王体健, 王勤耕, 罗干, 文金科 (5933)
我国近 10 年城市生活垃圾处置单元温室气体排放时空变化及减排潜能分析	张昕雪, 高淑丹, 滕晓, 蒋旭彤, 陈纪宏, 高晨琦, 卞荣星, 孙英杰, 李卫华, 王亚楠, 王华伟 (5946)
中国重点城市大气污染与健康风险的时空分布特征	涂佩玥, 杨欢, 陈兰洲, 牛笑笑, 杨璐, 易嘉慧, 柯碧钦, 田雅, 叶志祥, 梅新, 洪松, 何超 (5954)
中国 PM ₁ 浓度时空特征及其与 AOD 的相关性分析(2014~2017 年)	袁丽梅, 马芳芳, 卞泽, 秦凯 (5964)
长株潭城市群 PM _{2.5} 中二次无机离子特征及生成机制	马杰利, 罗达通, 刘欣, 王蕾, 王幸, 刘湛, 沈健, 张俊丰, 李晟 (5975)
周口市 2022 年冬季重污染过程中细颗粒物污染特征及成因分析	马英歌, 杨露, 狄睿苗, 马南, 乔利平, 吴宇航, 周文鑫, 赵新华, 张越, 孙志华, 陈长虹, 陈学军, 楼晟荣, 黄成 (5986)
兰州市 PM _{2.5} 中多环芳烃的污染特征和来源解析	马可婧, 孙丽娟 (5997)
北京市门头沟区大气降尘污染特征及其化学组分特征与质量重构	王志焱, 姚琦, 吕富, 王雨薇, 王珊, 王铮, 胡月琪 (6007)
典型热带海滨城市臭氧污染特征与成因分析	韩淑艳, 张鑫, 谢荣富, 霍思思, 高利澳, 吴泓锦, 党娟, 徐文帅, 邢巧, 张庆竹, 王文兴 (6015)
珠江源块泽河流域地表水水化学特征及控制因素	陶兰初, 寸得欣, 涂春霖, 马一奇, 刘振南, 尹林虎, 和成忠, 庞龙, 张七道 (6025)
淮南煤矿区地表水和地下水水化学特征及控制因素	刘海, 康博, 管政亭, 宋阳, 柴义伦 (6038)
巴伊盆地平原区地下水水化学特征及污染源识别	姜凤, 周金龙, 周殷竹, 孙英, 韩双宝, 鲁涵 (6050)
滇池周边浅层地下水硝酸盐来源及转化过程识别	陈清飞, 陈安强, 崔荣阳, 叶远行, 闵金恒, 付斌, 闫辉, 张丹 (6062)
典型铅锌矿流域土壤重金属累积与分布的影响因素分析	潘泳兴, 陈盟, 王樯樯 (6071)
铅锌矿周边岩溶流域重金属污染及健康风险评价	廖红为, 蒋忠诚, 周宏, 覃小群, 黄奇波, 吴华英 (6085)
开封市主要河道沉积物重金属时空分布特征及生态风险评价	丁亚鹏, 卢希昊, 王晓婧, 武鲲鹏, 张浩杰, 李欢, 付贤志, 王洪涛 (6095)
霍邱县城湖泊沉积物重金属环境容量评价与预测	刘海, 魏伟, 宋阳, 潘杨 (6106)
基于宏条形码技术的白洋淀水华藻类识别及其驱动因子分析	陈婷, 杜珣, 陈义永, 郭道宇, 熊薇 (6116)
基于种群、功能群对比分析洞庭湖浮游植物群落驱动因素及水质评价	严广寒, 殷雪妍, 汪星, 黄民生, 黄代中, 王思瑞, 张韵宇 (6125)
南水北调东线山东境内调蓄湖库蓝藻种群分布特征及环境驱动因子	韦洁琳, 崔玉静, 李亦真, 张莎莎, 徐杭州, 庞一鸣, 裴海燕 (6137)
广东省药物活性化合物的污染特征及生态风险评价	罗嘉豪, 王煜凯, 原珂, 卢耀斌, 罗丽娟, 栾天罡 (6149)
紫外老化微塑料衍生 DOM 理化特性及其与磺胺嘧啶、铜的络合机制	王筱, 晏彩霞, 聂明华, 莫茜婷, 丁明军, 徐鳌雪, 邓思维 (6159)
共混塑料在海水中的光降解及海洋环境风险	张洪瑜, 高嘉蔚, 陈思宝, 林千惠, 葛安琪, 赵莎莎, 郑浩, 李锋民 (6172)
铁改型蓝藻生物炭的制备及对地表水中磷的协同吸附机制	韩杰, 黄鑫, 杨昆仑, 宋超凡, 缪恒锋 (6181)
基于改进输出系数模型的非点源污染评估及关键源区识别: 以北运河上游流域为例	李华林, 张守红, 于佩丹, 宋卓远, 谢晨新, 张建军 (6194)
农村黑臭水体沉积物细菌群落结构特征	任宏伟, 田彦芳, 路金霞, 石雅君, 王进, 岳正波, 刘晓玲 (6205)
气候变化背景下人类活动对承德坝区植被净初级生产力的影响	单振东, 刘顿, 骆汉, 刘建伟, 张丽梅, 魏宇航 (6215)
氮沉降对陆地生态系统土壤有机碳含量影响的 Meta 分析	杨灵芳, 孔东彦, 刁静文, 郭鹏 (6226)
生物炭施用 5 a 后对桂北桉树人工林土壤有机氮组分和活性氮的影响	曹杨, 沈育伊, 陈运霜, 王紫卉, 牟芝熠, 徐广平, 张德楠, 孙英杰, 毛馨月 (6235)
稻田微氧层和还原层土壤有机碳矿化对氮素添加的响应	毛婉琼, 夏银行, 马冲, 朱光旭, 王忠诚, 涂强, 陈香碧, 吴金水, 苏以荣 (6248)
保护性耕作对玉米田土壤中除草剂残留的影响	刘沅, 汪祖丞, 刘美华, 张天宇, 王健 (6257)
土壤中微塑料对陆生植物的毒性及其降解机制研究进展	刘微, 李宇欣, 荣飒爽, 汪晚晴, 王鑫鑫, 郭嘉朋, 韩冰, 王树涛 (6267)
南水北调丹江口库区土壤中微塑料分布特征及风险评估	王峰, 公玮, 刘哲, 朱重宁, 张润琴, 李志国, 刘毅 (6279)
北京市城市公园土壤铅累积特征、来源及健康风险	安江梅朵, 张瑞卿, 郭广慧, 王云涛 (6287)
锌冶炼废渣重金属在地块土壤中的垂向迁移特征及归趋	杨爱萍, 王小燕, 肖细元, 王倩如, 胡建华, 郭朝晖, 彭驰 (6297)
典型硫铁矿农区土壤-作物系统重金属生态风险及迁移富集特征	成晓梦, 赵辰, 吴超, 孙彬彬, 曾道明, 贺灵 (6309)
不同土壤-小麦体系中铅镉交互作用与转运特征	寇萌, 樊宇, 苏梦贤, 熊娟, 汪明霞, 谭文峰 (6319)
开花后小麦地上部镉、砷分布及其转运特征	王秋实, 华桂丽, 李翔宇, 冯柳旭, 唯康鑫, 耿丽平, 薛培英, 刘文菊 (6328)
黑河上游不同植被类型土壤细菌群落多样性、功能及季节动态	王竹, 刘扬, 王芳, 王义成 (6339)
典型煤炭产业园区土壤重金属污染对细菌群落结构的影响	郑丹凤, 刘娣, 苏超, 张红 (6354)
增氧模式对水稻根际微生物多样性和群落结构的影响	肖德顺, 徐春梅, 王丹英, 陈松, 褚光, 刘元辉 (6362)
紫色土硝化势和氨氧化微生物群落对化肥和有机肥配施生物炭的响应	李越, 王子芳, 贾丽娟, 谢军, 熊子怡, 高明 (6377)
连作对参根际土壤理化性质、微生物活性及群落特征的影响	杨阳, 李海亮, 马凯丽, 虞凡枫, 牛世全 (6387)
粪肥施用对抗生素在土壤上吸附的影响	罗珊, 胡锦昇, 唐翔宇, 耿春文, 程建华 (6399)
基于脱钩指数的工业园区碳排放与经济发展关系	陈四瑜, 刘晶茹, 孙光明 (6412)
近 5 年我国部分城市人群生活垃圾特性	王小波, 刘安琪, 钟慧琼, 赵增立 (6421)
《环境科学》征订启事(5963) 《环境科学》征稿简则(6193) 信息(5923, 6024, 6037)	

兰州市 PM_{2.5} 中多环芳烃的污染特征和来源解析

马可婧, 孙丽娟*

(甘肃省环境监测中心站, 兰州 730000)

摘要: 为了明确兰州市 PM_{2.5} 中 16 种多环芳烃 (PAHs) 的污染特征和来源, 采集了兰州市 4 个季节的 PM_{2.5} 样品, 运用气相色谱-质谱联用仪 (GC-MS) 对 PAHs 的浓度进行了分析, 利用正定矩因子分解法 (PMF)、聚类分析和潜在源因子分析法 (PSCF) 对 PAHs 的来源进行解析。结果表明, 兰州市 PM_{2.5} 中 ρ (PAHs) 均值为: 冬季 $[(118 \pm 16.2) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}] > \text{秋季} [(50.8 \pm 21.6) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}] > \text{春季} [(22.2 \pm 8.87) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}] > \text{夏季} [(4.65 \pm 1.32) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}]$ 。相关性分析表明, 兰州市 PM_{2.5} 和 TPAHs 均与温度呈现极显著的负相关性, 与气压呈现极显著的正相关性, 与风向、风速和相对湿度的相关性较差。各环 PAHs 在 4 个季节的占比相似, 其中 4 环和 5 环的 PAHs 占比为最大, 其次为 6 环和 2~3 环。兰州市 PM_{2.5} 中 PAHs 的主要来源在春夏季为工业排放和生物质及天然气燃烧, 秋季工业排放占主导地位, 冬季主要为燃煤排放, 交通排放在 4 个季节的贡献比较稳定。聚类分析和 PSCF 计算结果表明, 来自蒙古国、新疆东北部和青海等地的气流对兰州市环境空气质量有重要的影响。

关键词: PM_{2.5}; 多环芳烃 (PAHs); 源解析; 聚类分析; 潜在来源因子分析 (PSCF)

中图分类号: X513 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301 (2023) 11-5997-10 **DOI:** 10.13227/j.hjxx.202211331

Characterization and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in PM_{2.5} in Lanzhou

MA Ke-jing, SUN Li-juan*

(Gansu Environmental Monitoring Center, Lanzhou 730000, China)

Abstract: To study the pollution characteristics and sources of 16 PAHs in PM_{2.5} in Lanzhou, PM_{2.5} samples were collected in four seasons. GC-MS was employed to analyze the concentration of PAHs. Positive matrix factorization (PMF), trajectory cluster, and potential source contribution function (PSCF) were used to identify the sources of PAHs. The results indicated that the average concentration of PAHs in PM_{2.5} in Lanzhou decreased in the order of winter $[(118 \pm 16.2) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}] > \text{autumn} [(50.8 \pm 21.6) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}] > \text{spring} [(22.2 \pm 8.87) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}] > \text{summer} [(4.65 \pm 1.32) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}]$. The results of correlation analysis showed that PM_{2.5} and TPAHs in Lanzhou had an extremely significant negative correlation with temperature; an extremely significant positive correlation with atmospheric pressure; and a poor correlation with wind direction, wind speed, and relative humidity. The proportion of PAHs with 4-5 rings was much higher than that of those with 6 rings and 2-3 rings, with similar results across the four seasons. Source apportionment results illustrated that the contribution of industrial emissions and biomass and natural gas combustion were dominant in spring and summer seasons. Industrial emissions and coal combustion were dominant in autumn and winter, respectively. The vehicle emissions had no significant change across the four seasons. Trajectory cluster and PSCF analyses showed that the airflow coming from Mongolia, northeast Xinjiang, and Qinghai had important effects on the ambient air quality in Lanzhou.

Key words: PM_{2.5}; polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs); source apportionment; cluster analysis; potential source contribution function (PSCF)

PM_{2.5} 中的多环芳烃 (polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) 主要来源于化石燃料和生物燃料的不完全燃烧、汽车尾气、垃圾焚烧、炼油、焦炭和钢铁工业的不稳定排放^[1]。PM_{2.5} 中 PAHs 的含量虽然较低, 但是其具有致癌、致畸和致突变效应, 是威胁人体健康的强有机致癌物^[2,3], 有研究表明即使是低剂量的 PAHs 暴露也可能对人体造成不良的健康影响^[4,5], 美国环保署也将 16 种多环芳烃列为优先控制污染物^[6]。因此, 对 PM_{2.5} 中 PAHs 的污染特征及来源进行研究, 具有十分重要的意义。

国内外学者对 PM_{2.5} 中 PAHs 开展了广泛的研究。Liu 等^[7] 对上海市 PM_{2.5} 中 PAHs 的季节变化和来源研究结果表明 ρ (PAHs) 为 2.58 ~ 123.62 ng·m⁻³, 交通排放是 PAHs 污染的主要来源。Shin 等^[8] 对韩国首尔 PM_{2.5} 中 PAHs 和 OPAHs (多环芳烃衍生物) 的季节变化及来源进行了研究, 结果表明

PAHs 和 OPAHs 的浓度均为冬季最高、夏季最低, 主要来源为机动车排放、煤炭燃烧、生物质燃烧和衍生物相关排放。Sulong 等^[9] 的研究报道了不同季风影响下马来西亚吉隆坡 PM_{2.5} 中 PAHs 的来源, 结果表明汽油占 29.1%、天然气和煤燃烧占 28.3%, 生物质燃烧占 22.3%、柴油和重油燃烧占 20.3%。但是目前相关研究主要针对发达城市和省会城市, 而且大多只是对 PAHs 的本地污染源进行了解析, 而对于一些典型的中小型工业城市的相关系统研究及远距离传输研究较少。兰州是黄河上游最大的典型石油化工城市, 丝绸之路中线段的中心城市, 并且具有河谷地形, 大气分层非常稳定, 导致环境空气中

收稿日期: 2022-11-30; 修订日期: 2023-01-06

基金项目: 甘肃省重点研发计划-社会发展类项目 (18YF1FA033)

作者简介: 马可婧 (1987~), 女, 硕士研究生, 高级工程师, 主要研究方向为环境有机污染物监测与评价, E-mail: kejing_ma@126.com

* 通信作者, E-mail: sunlijuan19871010@126.com

污染物不容易扩散^[10,11],有研究表明兰州市环境中 PAHs 的污染处于较高的水平^[12~15].因此,对兰州市 PM_{2.5}中 PAHs 的污染特征和来源进行研究,明确其环境污染行为,可为有效控制 PAHs 污染,改善环境空气质量提供科学依据.

本研究于 2021 年 3 月 1 日至 2022 年 2 月 28 日采集了兰州市 4 个季节的 PM_{2.5}样品,分析了 PM_{2.5}中 PAHs 的污染特征,运用 PMF 和 PSCF 对 PAHs 的本地污染来源和远距离输送潜在污染源进行了解析.

1 材料与方法

1.1 采样点位及时间

采样点布设于兰州市铁路设计院楼顶(103.831°E, 36.046°N),周围主要为医院、居民区、商业区和交通干道,100 m 内没有明显的污染排放源.样品采集时间为:春季(2021 年 3 月 19 日至 5 月 26 日)、夏季(2021 年 6 月 19 日至 8 月 29 日)、秋季(2021 年 9 月 20 日至 11 月 25 日)和冬季(2021 年 12 月 19 日至 2022 年 2 月 25 日).每月连续采集 7 d,因雨雪和沙尘等天气原因无法采样的顺延,每天采集 23 h,记录采样日期和采样体积,气象数据来自甘肃省环境监测中心站空气质量实时发布平台(<http://www.gsemc.cn/index.html>).

采样用石英滤膜在 400℃焙烧 5 h,恒温恒湿 24 h 后称重,用中流量采样器以 100 L·min⁻¹的流量采集 PM_{2.5}样品,样品采集后用铝箔纸封装,恒温恒湿 24 h 后称重,于 -18℃下保存,30 d 内提取分析.

1.2 PM_{2.5}中 PAHs 分析

用全自动索氏提取器(FOSS, SoxtecTM 8000, Denmark)对滤膜进行提取,提取前加入 100 μL 40 μg·mL⁻¹的 2-氟联苯和对三联苯-d₁₄替代物混合标准溶液,再用乙醚:正己烷(1:9,体积比)混合溶液以每小时回流不少于 4 次的速度提取 16 h,提取液经弗罗里硅土固相萃取柱净化,浓缩至 1.0 mL 以下,加入 10 μL 400 μg·mL⁻¹的内标混合标准溶液(蔡-d₈、苊-d₁₀、菲-d₁₀、蒽-d₁₂和芘-d₁₂),用正己烷定容至 1.0 mL.

用气相色谱-质谱联用仪(Agilent 7890A-5975C, USA)对蔡(Nap)、苊(Acy)、苊烯(Ace)、芴(Flu)、菲(Phe)、蒽(Ant)、荧蒽(Fla)、芘(Pyrene)、苯并(a)蒽(BaA)、蒽(Chry)、苯并(b)荧蒽(BbF)、苯并(k)荧蒽(BkF)、苯并(a)芘(BaP)、茚并(1,2,3-cd)芘(InP)、二苯并(a,h)蒽(DahA)和苯并(g,h,i)芘(BghiP)共 16 种 PAHs 进行了测定.色谱柱为 DB-5(30 m×0.25 mm×0.25 mm),进

样体积为 1.0 μL,色谱柱梯度升温程序:起始 60℃保持 2 min,以 10℃·min⁻¹升温至 150℃保持 6 min 后继续以 20℃·min⁻¹升温至 290℃,在 290℃下保持 9 min,进样口温度为 260℃,EI 离子源温度为 230℃.

1.3 PMF

本研究中运用 PMF 5.0 对 PM_{2.5}中 PAHs 进行来源解析.其基本原理为:假设 X 为某受体样品污染物的浓度数据矩阵, $X = n \times m$, n 为样品数, m 为化学成分数,那么可以将 X 分解为贡献比率矩阵 G 、因子成分谱载荷矩阵 F 和残差矩阵 E ^[16],基本方程^[17]如下:

$$X_{ij} = \sum_{k=1}^n g_{ik} f_{kj} + e_{ij} \quad (1)$$

式中, X_{ij} 为第 i 个样品中 j 物种的浓度, g_{ik} 为第 k 个源对第 i 个样品的贡献率, f_{kj} 为 j 物种在第 k 个源的分布率, e_{ij} 为残差.

在 PMF 的运算过程中,当污染物的浓度低于检出限时,不确定度为检出限的 5/6,当污染物的浓度高于检出限时,不确定度为:

$$S_{ij} = \sqrt{(RSD \times X_{ij})^2 + MDL_j^2} \quad (2)$$

式中, S_{ij} 为第 i 个样品中 j 物种的不确定度, X_{ij} 为第 i 个样品中 j 物种的浓度, RSD 为误差分数, MDL_{*j*} 为 j 物种的方法检出限.

1.4 后向轨迹聚类和 PSCF 分析

轨迹聚类分析是利用轨迹空间的相似度对模拟的大量有效轨迹进行聚类分组^[18],从而确定主要污染源的轨迹. PSCF 是一种基于气流轨迹分析来确定影响空气质量污染源区的分析方法^[19,20],其计算公式^[21]为:

$$PSCF_{ij} = m_{ij}/n_{ij} \quad (3)$$

式中, m_{ij} 为 PM_{2.5} 浓度超过《环境空气质量标准》(GB 3095-2012)中一级标准限值 35 μg·m⁻³的所有轨迹在网格 ij 中的停留时间, n_{ij} 为所有轨迹在网格 ij 中的总停留时间.

PSCF 的值越高,网格颜色越深, PSCF 高值所在的网格区即为影响兰州市 PM_{2.5} 的潜在污染源区.

本研究中运用 TrajStat 软件进行兰州市后向轨迹聚类和 PSCF 分析.选取监测点位为后向轨迹受体点,起始高度为 500 m,计算采样期间 00:00、06:00、12:00 和 18:00 时到达受体点的 48 h 后向气流轨迹,研究区域划分为 0.5°×0.5°的网格,计算 PSCF.运算中 PM_{2.5} 的浓度来自于甘肃省环境监测中心站空气质量实时发布平台(<http://www.gsemc.cn/index.html>),气象数据来自全球数据同期同化系统(GDAS)(<http://ready.arl.noaa.gov/>

HYSPLIT. php).

1.5 质量控制与质量保证

采样期间每天检查大气采样器并校准流量以确保其正常运行. 依据我国 HJ 646-2013 方法的要求开展实验分析, 16 种 PAHs 的标准曲线的相关系数均大于 99.9%, 实验室空白样品和全程序空白样品中 16 种 PAHs 的测定值均低于方法检出限, 替代物 2-氟联苯和对三联苯-d₁₄ 的回收率为 70.0% ~ 120%, 空白加标回收率为 75.0% ~ 100%, 所有实验测定结果均在方法要求的范围内.

2 结果与讨论

2.1 PM_{2.5} 和 PAHs 的污染特征

采样期间 PM_{2.5} 和 16 种 PAHs 的浓度分布如图 1 所示. 采样期间兰州市 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 平均值为: 冬季 $[(48.9 \pm 17.1) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}] > \text{秋季} [(37.7 \pm 14.8) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}] > \text{春季} [(35.7 \pm 17.0) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}] > \text{夏季} [(18.6 \pm 4.62) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$, 除夏季外, 其他 3 个季节的 PM_{2.5} 平均浓度均超过了我国《环境空气质量标准》(GB 3095-2012) 中一级标准限值 $35 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$. PM_{2.5} 在春季、秋季和冬季的超标天数比率为 38.1%、52.4% 和 71.4%, 表明兰州市 PM_{2.5} 污染比

较严重, 尤其是冬季.

采样期间兰州市 $\rho(\text{PAHs})$ 年平均值为 $49.0 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$, 在春季、夏季、秋季和冬季依次为 $11.2 \sim 41.8$ 、 $2.37 \sim 6.41$ 、 $24.6 \sim 85.7$ 和 $90.3 \sim 158 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$, $\rho(\text{PAHs})$ 平均值为: 冬季 $[(118 \pm 16.2) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}] > \text{秋季} [(50.8 \pm 21.6) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}] > \text{春季} [(22.2 \pm 8.87) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}] > \text{夏季} [(4.65 \pm 1.32) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}]$, PAHs 的浓度在 4 个季节呈现显著性差异 (单边 ANOVA 检验, $P < 0.05$), 这主要与季节性大气动力的改变和人类活动有关.

有研究表明, PM_{2.5} 和 PAHs 的污染水平和温度、相对湿度、风速、风向和大气压等气象因素有密切的关系^[22,23]. 本研究对 PM_{2.5} 和 PAHs 污染水平与气象因素的关系进行了分析, 结果如表 1 所示.

从表 1 可以看出, PM_{2.5} 和 PAHs 的浓度与风速、风向和相对湿度的相关性不显著, 这主要是因为兰州深居内陆, 为河谷盆地, 又是典型的温带半干旱气候, 干燥少雨, 因此在采样期间的风速、风向和相对湿度均比较稳定, 对 PM_{2.5} 和 PAHs 浓度的影响不明显.

PM_{2.5} 和 TPAHs 均与温度呈现极显著的负相关性 ($r_{\text{PM}_{2.5}} = -0.743$, $r_{\text{TPAHs}} = -0.774$, $P < 0.01$), 16

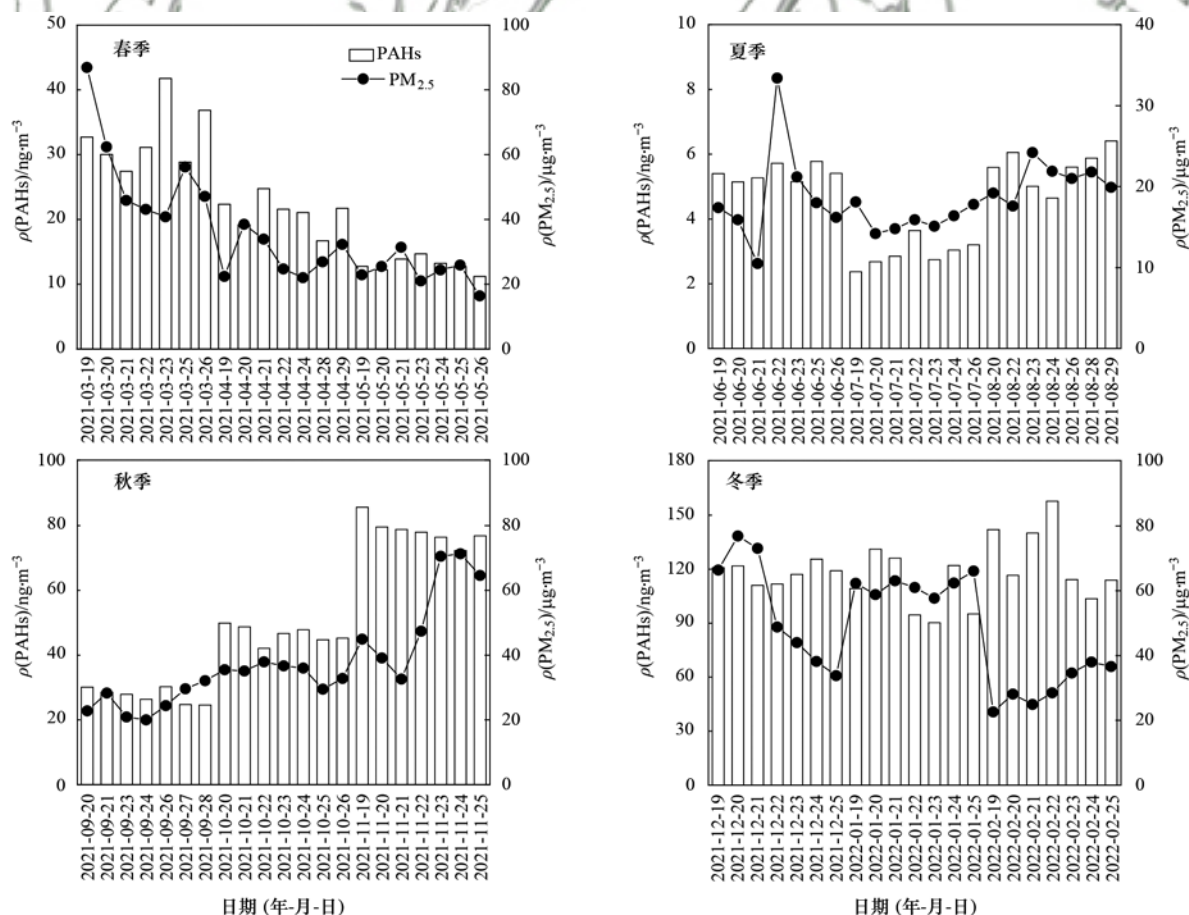


图 1 兰州市 PM_{2.5} 和 PAHs 的四季浓度分布

Fig. 1 Seasonal variation in PM_{2.5} and 16 PAHs in Lanzhou

表 1 PAHs 和气象参数的 Pearson 相关系数
Table 1 Pearson correlation coefficient between PAHs
and meteorological parameters

物种	风速	风向	温度	相对湿度	气压
PM _{2.5}	0.124	-0.167	-0.743	-0.225	0.603
Nap	0.122	-0.167	-0.746	-0.372	0.502
Ace	0.006	-0.040	-0.817	-0.250	0.546
Acy	0.048	-0.087	-0.880	-0.232	0.606
Flu	0.089	-0.121	-0.668	-0.448	0.439
Phe	-0.126	-0.021	-0.875	0.099	0.705
Ant	-0.011	-0.080	-0.913	-0.064	0.657
Fla	-0.127	0.018	-0.899	0.042	0.691
Pyr	-0.051	-0.033	-0.856	-0.018	0.624
Chry	-0.088	-0.049	-0.836	0.017	0.709
BaA	-0.074	-0.001	-0.913	-0.010	0.573
BbF	-0.122	-0.032	-0.867	0.047	0.666
BkF	-0.077	0.032	-0.827	-0.034	0.569
BaP	-0.078	0.034	-0.843	-0.057	0.598
DahA	-0.095	-0.030	-0.818	0.054	0.572
BghiP	-0.083	-0.061	-0.836	0.083	0.655
InP	-0.084	0.017	-0.802	0.051	0.541
TPAHs	-0.122	0.013	-0.774	0.015	0.626

种 PAHs 与温度也是呈现极显著的负相关性(r 为 $-0.668 \sim -0.913$, $P < 0.01$). $PM_{2.5}$ 和 PAHs 的污染在冬季最为严重,这是由于冬季低温条件下,大气边界层高度降低,污染物扩散条件变差.此外煤和天然气燃烧取暖以及机动车排放产生的污染物浓度较高,而且 PAHs 在日照短、光照弱的条件下二次光化学反应减弱.在以上因素的综合作用下,更有利于 PAHs 在细颗粒物上的吸附和积累^[24,25].而夏季正好相反,同时夏季降雨量增加,对大气污染物具有冲刷和稀释作用,因此夏季 $PM_{2.5}$ 和 PAHs 的浓度明显低于其他季节.

冬季低温下,大气边界层高度较低,中心气压高,逆温层下污染物的对流扩散作用弱,导致

$PM_{2.5}$ 和 PAHs 更易富集和积累,而夏季正好相反^[26].表 1 的研究结果也证明了这一点, $PM_{2.5}$ 和 TPAHs 均与大气压呈现极显著的正相关性($r_{PM_{2.5}} = 0.603$, $r_{TPAHs} = 0.626$, $P < 0.01$),16 种 PAHs 与大气压也是呈现极显著的正相关性(r 为 $0.439 \sim 0.709$, $P < 0.01$).

兰州市 $PM_{2.5}$ 中 PAHs 浓度水平与 Tan 等^[27] 2017 年的相关研究结果[夏季 (8.94 ± 4.34) $ng \cdot m^{-3}$ 、冬季 (191.79 ± 88.29) $ng \cdot m^{-3}$]相比有所下降,这说明兰州市近年采取的一系列大气污染控制措施是可行有效的.虽然 ρ (PAHs)年均值较北京 [$(94.33 \pm 65.25) ng \cdot m^{-3}$]、天津 [$(98.00 \pm 36.80) ng \cdot m^{-3}$]、石家庄 [$(211.07 \pm 107.79) ng \cdot m^{-3}$]和衡水 [$(168.77 \pm 98.67) ng \cdot m^{-3}$]等^[28]北方城市低,但仍然远远高于上海 ($33.13 ng \cdot m^{-3}$)^[7]、广州 ($17.1 ng \cdot m^{-3}$)^[29]和武汉 [$(25.1 \pm 19.4) ng \cdot m^{-3}$]^[30]等南方城市的污染水平.因此,兰州市应继续采取相关有力措施,以进一步改善环境空气质量.

由图 2 可以看出,各环 PAHs 在 TPAHs 中的占比在全年 4 个季节基本相似,全年 4 环和 5 环 PAHs 的占比最大,其次为 6 环和 2~3 环 PAHs. Nap、Phe 和 Ant 等 2~3 环的 PAHs 属于半挥发性有机物,主要与生物质的低温燃烧、汽油和柴油的挥发有强相关性^[31,32],温度升高时,由颗粒相向气相转移,因此在夏季颗粒相中富集浓度较低^[33]. Fla、Pyr、Chry、BaA、BbF、BkF 和 BaP 等 4 环和 5 环 PAHs 主要来源于煤、生物质以及天然气燃烧和石油化工,6 环 PAHs 主要来源于柴油、汽油燃烧等机动车排放^[31,32,34].这表明燃煤、天然气、石油化工工业和机动车尾气排放是兰州市 PAHs 的主要污染源.

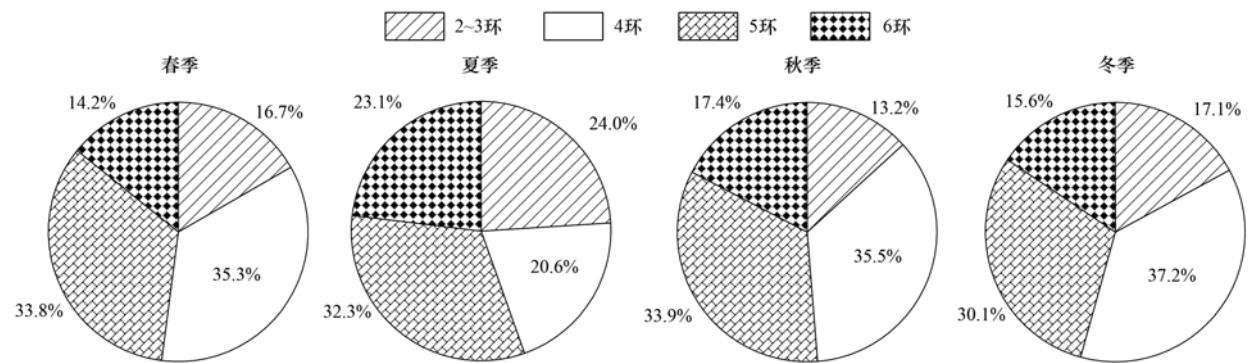


图 2 兰州市 $PM_{2.5}$ 中不同环数 PAHs 的分布

Fig. 2 Distribution of PAHs with different rings in $PM_{2.5}$ in Lanzhou

2.2 $PM_{2.5}$ 中 PAHs 源解析

本文运用 PMF5.0 对兰州市四季 $PM_{2.5}$ 中 PAHs 的来源进行了识别解析,结果如图 3 所示.从中可以

看出,兰州市 $PM_{2.5}$ 中 PAHs 主要来源于工业排放、煤炭燃烧、交通排放、生物质和天然气燃烧.

Fla、Pyr、Chry 和 BbF 被认为是煤炭燃烧的标

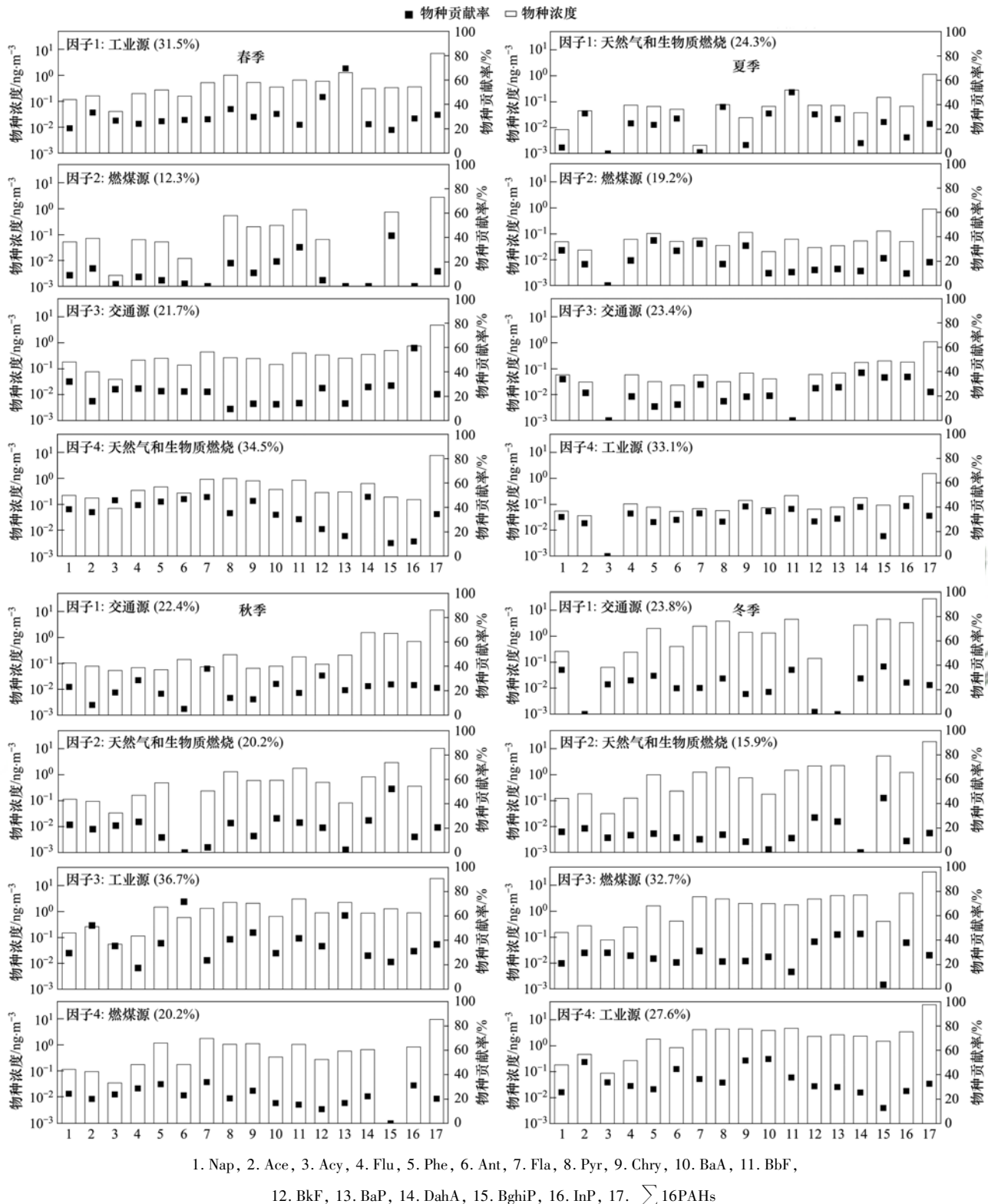


图3 兰州市 PM_{2.5} 中 PAHs 的源解析结果

Fig. 3 Source apportionment of PAHs in PM_{2.5} in Lanzhou

志性污染物^[35],因此,春季的因子2、夏季的因子2、秋季的因子4和冬季的因子3都被认定为煤炭燃烧源,其在4个季节的贡献率为:冬季(32.7%)>秋季(20.2%)>夏季(19.2%)>春季(12.3%),冬季和秋季燃煤排放源的贡献较春夏季高,这主要是由于兰州秋冬季气温低,集中供暖期长(11月至次年

3月),同时城市周边郊区家庭取暖以化石燃料燃烧为主,燃煤消耗量大,在低大气边界层条件下,污染物扩散气象条件差所致,因此兰州市应继续推进“煤改气”和洁净煤技术,调整产业结构和工业布局,以期控制燃煤大气污染。

BaA、BbF、BkF、DahA、BghiP和InP被认为是

汽油和柴油燃烧的标志性污染物^[36,37],因此,春季的因子3、夏季的因子3、秋季的因子1和冬季的因子1被认定为交通排放源,其在4个季节的贡献率分别为春季(21.7%)、夏季(23.4%)、秋季(22.4%)和冬季(23.8%),占比基本相似,但在冬季略高.这主要是由于采样点位毗邻交通干道、医院和商业区,车流量大但不会随季节发生明显的变化,而在冬季低温条件下,汽车发动机的排气操控系统性能降低,会导致汽车尾气污染物的排放贡献增大^[38].

Ace、Acy、Flu和Phe被认为是石油产品和原油泄漏挥发的标志性污染物,Ace、Ant和BaP是焦化工业的主要污染物,同时Flu还是热电厂和工业锅炉排放的主要污染物^[39,40],因此,春季的因子1、夏季的因子4、秋季的因子3和冬季的因子4被认定为工业排放源,其在4个季节的贡献率为春季(31.5%)、夏季(33.1%)、秋季(36.7%)和冬季(27.6%),该排放源在全年均占据主导地位,但是在春季、夏季和秋季没有明显的变化,这与兰州市为典型的石油化工城市,热电厂、铝厂和焦化等工业活动频繁有关,但随着冬季进入工业生产的低迷期,其在冬季的贡献又有了明显的下降.同时该源的

标志性污染物Ace、Ant、Flu和Phe挥发性强,在夏季高温条件下会由颗粒相转移至气相中,而冬季低温条件下PAHs主要赋存在粗颗粒物和细颗粒物中,因此该源在4个季节的贡献率应较实际偏低^[41,42].

Nap、Flu、BbF和BkF被认为是生物质燃烧的特征污染物,Chry和BaA是天然气燃烧排放的标志物^[36],因此春季的因子4、夏季的因子1、秋季的因子2和冬季的因子2被认定为天然气和生物质燃烧源,在4个季节的贡献率为春季(34.5%)>夏季(24.3%)>秋季(20.6%)>冬季(15.9%).春季进入春耕期,城市周边农村地区通常对农作残渣和秸秆等进行焚烧作为肥料,同时日常的灶火烹饪也会产生大量的PAHs,而在夏季由于气温升高,以天然气为原料的新能源汽车尾气排放挥发污染更严重,因此该排放源在春季的贡献率最高,其次为夏季.

2.3 轨迹聚类分析

2.3.1 后向轨迹聚类分析

对于赋存在PM_{2.5}中的PAHs,可以通过研究PM_{2.5}的远距离传输来确定其中PAHs的远距离污染特征^[7,43].利用TrajStat软件对4个季节到达兰州市的后向气流轨迹进行了聚类分析,结果如图4所示.

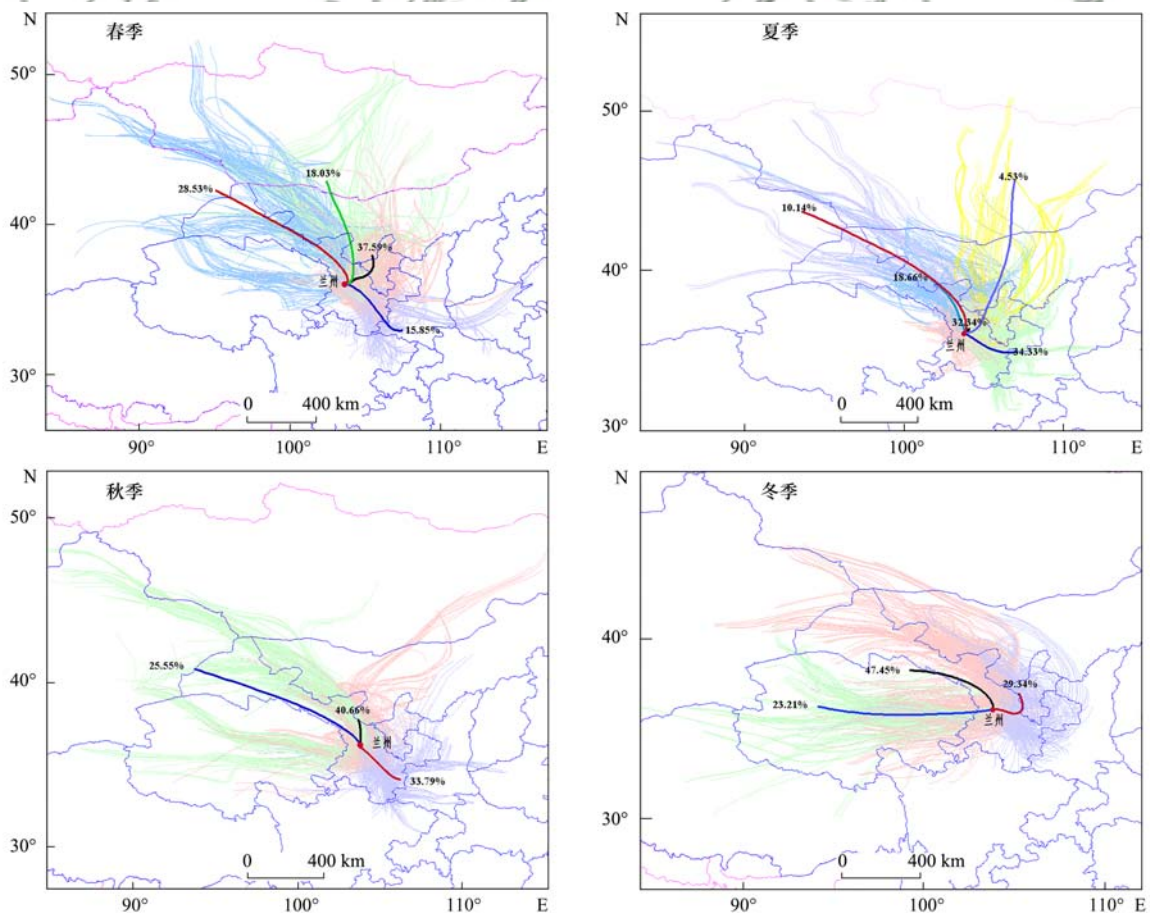


图4 兰州市四季的后向轨迹聚类分析

Fig. 4 Backward trajectory cluster analysis of Lanzhou in four seasons

兰州市春、夏、秋和冬季的轨迹聚类分别为 4、5、3 和 3 类。春季来自内蒙古西部、宁夏和陕西西北部的气流占比最高 (37.59%), 其次为来自蒙古国西南部经巴丹吉林沙漠与甘肃河西走廊和青海中东部的汇合气流 (28.53%), 来自于蒙古国北部经内蒙古西部、腾格里沙漠进入兰州的气流 (18.03%) PM_{2.5} 超标平均浓度最大 ($90 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)。夏季来自陕甘交界经宁夏南部到达兰州的气流占比最高 (34.33%), 其次为来自甘肃临夏、甘南和定西的气流 (32.34%), 来自于蒙古国西北部与新疆东北部经甘肃河西走廊到达兰州的气流 (10.14%) PM_{2.5} 超标平均浓度最大 ($54.67 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)。秋季来自蒙古国东部经内蒙古西部进入的气流与来自宁夏和青海东部的气流占比为最高 (40.66%), 其次为来自关中平原和汾渭平原的轨迹 (33.79%), PM_{2.5} 超标平均浓度最大 ($50.58 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 的气流为来自新疆东北部经巴丹吉林沙漠和河西走廊、库姆塔格沙漠以及青海中部的汇合气流。冬季来自蒙古国西南部和新疆东部经巴丹吉林沙漠和河西走廊到达兰州的气流占比最大 (47.45%), 这类轨迹的 PM_{2.5} 超标平均浓度亦为最大 ($67.79 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), 来自青海的气

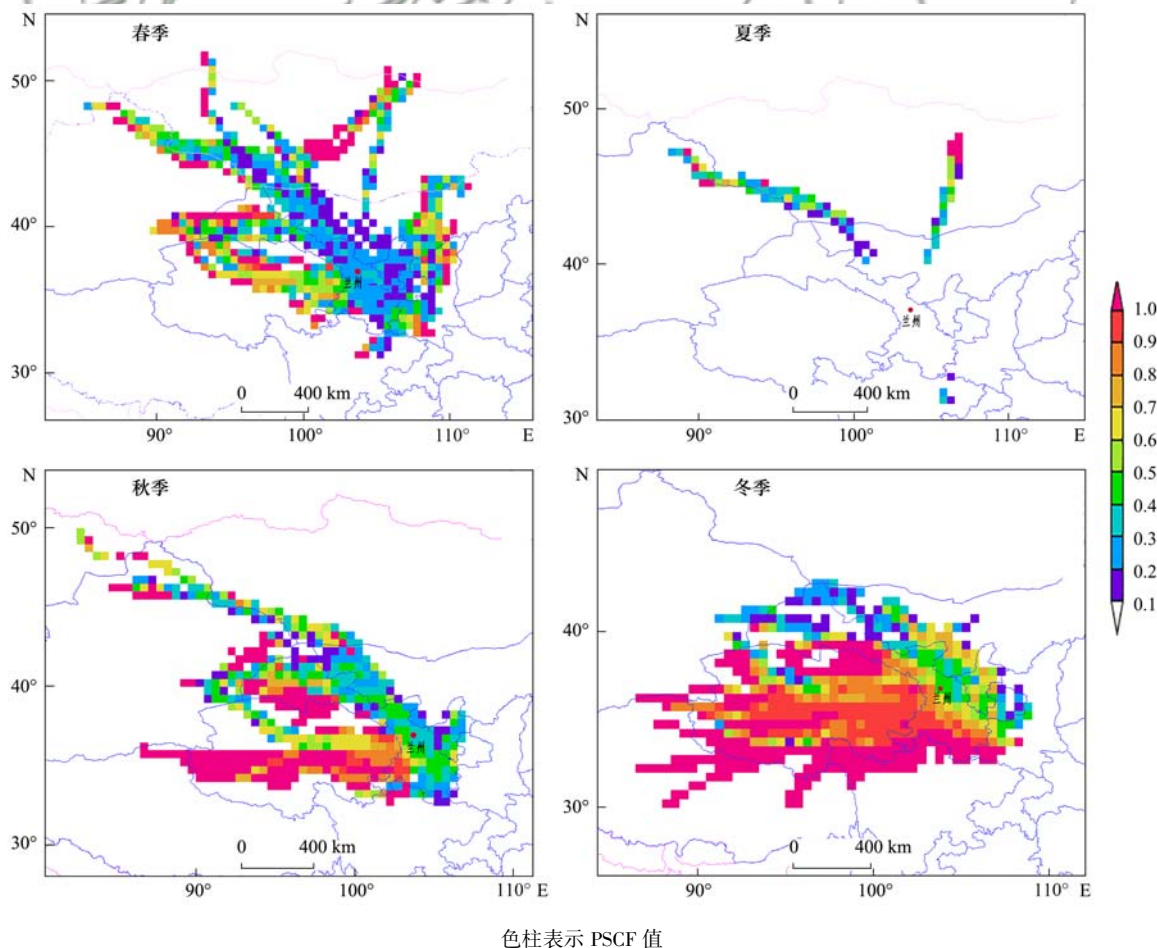
流 PM_{2.5} 超标平均浓度也较高 ($64.18 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)。

聚类分析结果表明, 影响兰州市环境空气质量的气流主要来自蒙古国西南部、内蒙古西部、新疆东北部、河西走廊、汾渭平原、关中平原以及青海, 其中来自青海的气流对兰州市夏季的空气质量影响甚微, 这与 Guan 等^[44] 和刘慧等^[45] 研究的结果基本一致。

2.3.2 PSCF 分析

PSCF 的计算结果如图 5 所示。可以看出兰州市春季 PM_{2.5} 的潜在污染源区主要分布在蒙古国西南部、新疆东北部、库姆塔格沙漠、青海和陕西北部, 夏季 PM_{2.5} 的潜在污染源区明显减少, 只有蒙古国。秋季 PM_{2.5} 的潜在污染源区主要分布在青海、柴达木盆地和新疆东北部, 而冬季基本全部分布在青海和关中平原。

兰州市 PM_{2.5} 的潜在污染源区在秋冬季节分布范围比较广, 这主要是由于冬季气温低, 逆温现象严重, 在地形因素的综合作用下, 污染物扩散条件差, 因此主要贡献源区带为短距离的青海和柴达木盆地, 而春夏季就主要变为新疆东北部和蒙古国等远距离输送污染源区。



色柱表示 PSCF 值

图 5 兰州市四季的 PSCF 分布特征

Fig. 5 Seasonal distribution of PSCF in Lanzhou

3 结论

(1) 采样期间兰州市 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 平均值为: 冬季 $[(48.9 \pm 17.1) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}] > \text{秋季} [(37.7 \pm 14.8) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}] > \text{春季} [(35.7 \pm 17.0) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}] > \text{夏季} [(18.6 \pm 4.62) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$. $\text{PM}_{2.5}$ 中 $\rho(\text{PAHs})$ 年平均值为 $49.0 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$, 四季分布为: 冬季 $(118 \pm 16.2) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3} > \text{秋季} (50.8 \pm 21.6) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3} > \text{春季} (22.2 \pm 8.87) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3} > \text{夏季} (4.65 \pm 1.32) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$.

(2) 采样期间兰州市 $\text{PM}_{2.5}$ 和 TPAHs 均与温度呈现极显著的负相关性, 与气压呈现极显著的正相关性, 与风向、风速和相对湿度的相关性较差.

(3) 兰州市 $\text{PM}_{2.5}$ 中 4 环和 5 环的 PAHs 占比最大, 其次为 6 环和 2~3 环的 PAHs, 各环 PAHs 在 TPAHs 中的占比全年 4 个季节基本相似.

(4) 兰州市 $\text{PM}_{2.5}$ 中 PAHs 主要来源于工业排放、交通排放、生物质和天然气燃烧、煤炭燃烧. 其中工业排放源在冬季明显低于春、夏和秋季; 交通排放源的贡献在冬季略高于其他 3 个季节, 全年基本保持稳定; 生物质和天然气燃烧的贡献在春季最高, 夏季次之; 煤炭燃烧源的贡献在冬季为最高, 其次为秋季、夏季和春季.

(5) 影响兰州市环境空气质量的气流主要来自蒙古国西南部、内蒙古西部、新疆东北部、河西走廊、汾渭平原、关中平原以及青海, 其中来自青海的气流对兰州市夏季的空气质量影响甚微, PSCF 分析显示秋冬季兰州市主要贡献源区带为青海和柴达木盆地等短距离输送源区, 而春夏季为新疆东北部和蒙古国等远距离输送污染源区.

参考文献:

- [1] 董喆, 姜楠, 王佳, 等. 郑州市大气 $\text{PM}_{2.5}$ 中多环芳烃的污染特征及健康风险评价[J]. 郑州大学学报(理学版), 2020, 52(2): 108-113.
Dong Z, Jiang N, Wang J, et al. Pollution characterization and health risk assessment of $\text{PM}_{2.5}$ -bound PAHs in ambient air in Zhengzhou[J]. Journal of Zhengzhou University(Natural Science Edition), 2020, 52(2): 108-113.
- [2] 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.
- [3] 韩英子, 李欣玥, 庞骅, 等. 多环芳烃分子印迹柱-高效液相色谱法快速测定大气细颗粒物中 16 种多环芳烃[J]. 卫生研究, 2022, 51(5): 808-814.
Han Y Z, Li X Y, Pang H, et al. Rapid determination of 16 polycyclic aromatic hydrocarbons in atmospheric fine particles by molecularly imprinted column-high performance liquid chromatography[J]. Journal of Hygiene Research, 2022, 51(5): 808-814.
- [4] Kim K H, Jahan S A, Kabir E, et al. A review of airborne polycyclic aromatic hydrocarbons(PAHs) and their human health effects[J]. Environment International, 2013, 60: 71-80.
- [5] Abdel-Shafy H I, Mansour M S M. A review on polycyclic aromatic hydrocarbons: source, environmental impact, effect on human health and remediation [J]. Egyptian Journal of Petroleum, 2016, 25(1): 107-123.
- [6] Li J, Zhang G, Li X D, et al. Source seasonality of polycyclic aromatic hydrocarbons(PAHs) in a subtropical city, Guangzhou, South China[J]. Science of the Total Environment, 2006, 355(1-3): 145-155.
- [7] Liu Y K, Yu Y P, Liu M, et al. Characterization and source identification of $\text{PM}_{2.5}$ -bound polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in different seasons from Shanghai, China[J]. Science of the Total Environment, 2018, 644: 725-735.
- [8] Shin S M, Lee J Y, Shin H J, et al. Seasonal variation and source apportionment of oxygenated polycyclic aromatic hydrocarbons (OPAHs) and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in $\text{PM}_{2.5}$ in Seoul, Korea [J]. Atmospheric Environment, 2022, 272, doi: 10.1016/j.atmosenv.2022.118937.
- [9] Sulong N A, Latif M T, Sahani M, et al. Distribution, sources and potential health risks of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in $\text{PM}_{2.5}$ collected during different monsoon seasons and haze episode in Kuala Lumpur[J]. Chemosphere, 2019, 219: 1-14.
- [10] Wang L, Zhao Y, Liu X Y, et al. Cancer risk of petrochemical workers exposed to airborne PAHs in industrial Lanzhou City, China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, 22(24): 19793-19803.
- [11] 王莉. 中国西部兰州盆地多环芳烃大气污染特征及其健康风险[D]. 兰州: 兰州大学, 2017.
Wang L. The atmospheric pollution characteristics and health risks of polycyclic aromatic hydrocarbons in Lanzhou Valley, Western China[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2017.
- [12] 丁中原, 方利江, 吴有方, 等. 兰州地区 16 种多环芳烃的长距离迁移潜力和总持久性模拟研究[J]. 环境科学学报, 2012, 32(4): 916-924.
Ding Z Y, Fang L J, Wu Y F, et al. Simulation study on the long-range transport potential and overall persistence of 16 PAHs in Lanzhou[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, 32(4): 916-924.
- [13] Gao H, Zhou L, Ma M Q, et al. Composition and source of unknown organic pollutants in atmospheric particulates of the Xigu District, Lanzhou, people's republic of China[J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2004, 72(5): 923-930.
- [14] 董继元. 兰州地区多环芳烃环境归趋模拟和风险评价[D]. 兰州: 兰州大学, 2010.
Dong J Y. Modelling environmental fate and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in the Lanzhou area [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2010.
- [15] 李盛, 王金玉, 李普, 等. 兰州市某工业区大气 $\text{PM}_{2.5}$ 中多环芳烃污染特征及健康风险评估[J]. 环境与职业医学, 2021, 38(2): 137-141.
Li S, Wang J Y, Li P, et al. Pollution characterization and health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in $\text{PM}_{2.5}$ in an industrial area of Lanzhou [J]. Journal of Environmental and Occupational Medicine, 2021, 38(2): 137-141.
- [16] 李欣红. 浙江省土壤 OPFRs 及 PAHs 污染特征与风险研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2019.
Li X H. OPFRs and PAHs in soils of Zhejiang province, China: levels, distribution, sources, and risks assessment [D].

- Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2019.
- [17] 王帅, 崔建升, 冯亚平, 等. 石家庄市挥发性有机物和臭氧的污染特征及源解析[J]. 环境科学, 2020, **41**(12): 5325-5335.
- Wang S, Cui J S, Feng Y P, *et al.* Characteristics and source apportionment of VOCs and O₃ in Shijiazhuang [J]. Environmental Science, 2020, **41**(12): 5325-5335.
- [18] 李颜君, 安兴琴, 范广洲. 北京地区大气颗粒物输送路径及潜在源分析[J]. 中国环境科学, 2019, **39**(3): 915-927.
- Li Y J, An X Q, Fan G Z. Transport pathway and potential source area of atmospheric particulates in Beijing [J]. China Environmental Science, 2019, **39**(3): 915-927.
- [19] 谢放尖, 陆晓波, 杨峰, 等. 2017 年春夏期间南京地区臭氧污染输送影响及潜在源区[J]. 环境科学, 2021, **42**(1): 88-96.
- Xie F J, Lu X B, Yang F, *et al.* Transport influence and potential sources of ozone pollution for Nanjing during spring and summer in 2017 [J]. Environmental Science, 2021, **42**(1): 88-96.
- [20] 曾鹏, 辛存林, 于爽, 等. 典型西南工业城市春冬季 PM_{2.5} 来源与潜在源区分析——以柳州市为例[J]. 中国环境科学, 2020, **40**(9): 3781-3790.
- Zeng P, Xin C L, Yu S, *et al.* Analysis of PM_{2.5} sources and potential source areas of typical industrial city in spring and winter: a case study in Liuzhou [J]. China Environmental Science, 2020, **40**(9): 3781-3790.
- [21] 徐丹妮, 王瑾婷, 袁自冰, 等. 汾渭平原复杂地形影响下冬季 PM_{2.5} 污染分布特征、来源及成因分析[J]. 环境科学学报, 2021, **41**(4): 1184-1198.
- Xu D N, Wang J T, Yuan Z B, *et al.* Temporal-spatial variations, source apportionment, and formation mechanisms of PM_{2.5} pollution over Fenwei Plain, China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, **41**(4): 1184-1198.
- [22] 王鹏程, 杨凌霄, 别淑君, 等. 港口地区大气 PM_{2.5} 中多环芳烃污染特征及来源分析[J]. 环境科学, 2022, **43**(9): 4458-4466.
- Wang P C, Yang L X, Bie S J, *et al.* Pollution characteristics and source analysis of atmospheric PM_{2.5}-bound polycyclic aromatic hydrocarbons in a Port Area [J]. Environmental Science, 2022, **43**(9): 4458-4466.
- [23] 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.
- [24] 原安妮, 王琨, 齐虹. 哈尔滨市道路机动车尾气排放清单及特征分析研究[J]. 环境科学与管理, 2018, **43**(7): 53-58.
- Yuan A N, Wang K, Qi H. Analysis of vehicle exhaust emission inventory and road characteristics of Harbin city [J]. Environmental Science and Management, 2018, **43**(7): 53-58.
- [25] 马丽新. 哈尔滨大气细颗粒物中 PAHs 及其衍生物污染特性与风险研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- Ma L X. Pollution characteristics and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbon and its derivatives in atmospheric fine particulate matter from Harbin [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [26] 杨珊珊, 陈静, 王瑞洁, 等. 石家庄市城区和郊区细颗粒物碳组分污染特征及来源对比分析[J]. 环境污染与防治, 2022, **44**(11): 1479-1483.
- Yang S S, Chen J, Wang R J, *et al.* Comparative analysis of pollution characteristic and source of carbon components in fine particulate matter in urban areas and suburbs of Shijiazhuang [J]. Environmental Pollution & Control, 2022, **44**(11): 1479-1483.
- [27] Tan J H, Zhang L M, Zhou X M, *et al.* Chemical characteristics and source apportionment of PM_{2.5} in Lanzhou, China [J]. Science of the Total Environment, 2017, **601-602**: 1743-1752.
- [28] Niu X Y, Ho S S H, Ho K F, *et al.* Atmospheric levels and cytotoxicity of polycyclic aromatic hydrocarbons and oxygenated-PAHs in PM_{2.5} in the Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Environmental Pollution, 2017, **231**: 1075-1084.
- [29] Gao B, Guo H, Wang X M, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in PM_{2.5} in Guangzhou, southern China: spatiotemporal patterns and emission sources [J]. Journal of Hazardous Materials, 2012, **239-240**: 78-87.
- [30] Zhang Y, Zheng H, Zhang L, *et al.* Fine particle-bound polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) at an urban site of Wuhan, central China: characteristics, potential sources and cancer risks apportionment [J]. Environmental Pollution, 2019, **246**: 319-327.
- [31] 尉媛丽, 刘攀亮, 于周锁, 等. 兰州河谷盆地大气多环芳烃干沉降通量及来源[J]. 环境科学, 2017, **38**(8): 3120-3129.
- Ju Y L, Liu P L, Yu Z S, *et al.* Atmospheric dry deposition fluxes and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in Lanzhou valley, northwest China [J]. Environmental Science, 2017, **38**(8): 3120-3129.
- [32] 李大雁, 齐晓宝, 吴健, 等. 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[J]. 环境科学, 2021, **42**(1): 106-113.
- Li D Y, Qi X B, Wu J, *et al.* Distribution characteristics and source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons in atmospheric deposition in areas adjacent to a large petrochemical enterprise [J]. Environmental Science, 2021, **42**(1): 106-113.
- [33] 姬莹莹, 邵超, 宋党育, 等. PM_{2.5} 中多环芳烃的污染特征及源解析: 以河南省焦作市为例[J]. 环境科学与技术, 2017, **40**(4): 92-99.
- Ji W W, Tai C, Song D Y, *et al.* Pollution characteristics and source apportionment of atmospheric PAHs in PM_{2.5}: a case study in Jiaozuo city [J]. Environmental Science & Technology, 2017, **40**(4): 92-99.
- [34] 邢佳莉, 曹芳, 王谦, 等. 广西十万大山背景点 PM_{2.5} 中非极性有机气溶胶组成及来源解析[J]. 环境科学, 2022, **43**(6): 2895-2905.
- Xing J L, Cao F, Wang Q, *et al.* Organic aerosols and source analysis of fine particles in the background of shiwanda mountain, Guangxi [J]. Environmental Science, 2022, **43**(6): 2895-2905.
- [35] 王欣丽, 杨敏敏, 李海燕, 等. 济南大气 PM_{2.5} 中 PAHs 的毒性及来源解析[J]. 山东大学学报(理学版), 2022, **57**(3): 1-9.
- Wang X L, Yang M M, Li H Y, *et al.* Cytotoxicity and emission source analysis of PAHs in PM_{2.5} in the atmosphere of Jinan [J]. Journal of Shandong University (Natural Science), 2022, **57**(3): 1-9.
- [36] Wang L J, Dong S Z, Liu M M, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in atmospheric PM_{2.5} and PM₁₀ in the semi-arid city of Xi'an, Northwest China: seasonal variations, sources, health risks, and relationships with meteorological factors [J]. Atmospheric Research, 2019, **229**: 60-73.

- [37] Xu A, Mao Y, Su Y W, *et al.* Characterization, sources and risk assessment of PM_{2.5}-bound polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in Huanggang city, central China [J]. *Atmospheric Environment*, 2021, **252**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2021.118296.
- [38] Yang H H, Hsieh L T, Liu H C, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbon emissions from motorcycles [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(1): 17-25.
- [39] 贺博文, 聂赛赛, 李仪琳, 等. 承德市 PM_{2.5} 中多环芳烃的季节分布特征、来源解析及健康风险评价 [J]. *环境科学*, 2022, **43**(5): 2343-2354.
He B W, Nie S S, Li Y L, *et al.* Seasonal distribution characteristics, source analysis, and health risk evaluation of PAHs in PM_{2.5} in Chengde [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(5): 2343-2354.
- [40] Wang D G, Tian F L, Yang M, *et al.* Application of positive matrix factorization to identify potential sources of PAHs in soil of Dalian, China [J]. *Environmental Pollution*, 2009, **157**(5): 1559-1564.
- [41] 李宏宇, 李沛祺, 黄娟, 等. 兰州市大气 OPAHs 污染特征及潜在来源分析 [J]. *中国环境科学*, 2022, **42**(8): 3561-3571.
Li H Y, Li P Q, Huang J, *et al.* Pollution characteristics and potential pollution source regions of atmospheric OPAHs in Lanzhou [J]. *China Environmental Science*, 2022, **42**(8): 3561-3571.
- [42] 张玉凤, 宋永刚, 田金, 等. 辽东湾大气中多环芳烃的含量组成及气粒分配 [J]. *环境科学*, 2018, **39**(4): 1527-1536.
Zhang Y F, Song Y G, Tian J, *et al.* Occurrence and gas-particle partitioning of polycyclic aromatic hydrocarbons in the air of Liaodong Bay [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(4): 1527-1536.
- [43] 张煜娴, 曹芳, 贾小芳, 等. 中国主要背景区域冬季大气 PM_{2.5} 中非极性有机化合物组成及来源解析 [J]. *地球与环境*, 2022, **50**(1): 45-57.
Zhang Y X, Cao F, Jia X F, *et al.* Composition and source apportionment of non-polar organic compounds in PM_{2.5} in winter in major background regions of China [J]. *Earth and Environment*, 2022, **50**(1): 45-57.
- [44] Guan Q Y, Yang Y Y, Luo H P, *et al.* Transport pathways of PM₁₀ during the spring in northwest China and its characteristics of potential dust sources [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, **237**, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.117746.
- [45] 刘慧, 夏敦胜, 陈红, 等. 2017 年兰州市大气污染物输送来源及传输特征模拟分析 [J]. *环境科学研究*, 2019, **32**(6): 993-1000.
Liu H, Xia D S, Chen H, *et al.* Simulation analysis of sources and transmission characteristics of air pollutants in Lanzhou City in 2017 [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, **32**(6): 993-1000.

CONTENTS

Elucidating the Impacts of Meteorology and Emission Changes on Concentrations of Major Air Pollutants in Major Cities in the Yangtze River Delta Region Using a Machine Learning De-weather Method	FU Wen-xing, HUANG Lin, DING Jia-hao, <i>et al.</i> (5879)
Impact of Emission Reduction in Different Sectors on Air Quality and Atmospheric Temperature in Eastern China	LONG Zi-yu, ZHU Jia, LI Ke, <i>et al.</i> (5889)
Analysis of Spatio-temporal Characteristics of Air Quality, Meteorological Impact, and Emission Reduction Effect During the Winter Olympics in Beijing-Tianjin-Hebei and Its Surrounding Areas	HOU Lu, ZHU Yuan-yuan, LIU Bing, <i>et al.</i> (5899)
Emission Trends and Reduction Potential of VOCs from Printing Industry in China	LIANG Xiao-ming, WU Peng-zhen, CHEN Lai-guo, <i>et al.</i> (5915)
Analysis of VOCs Emission Characteristics and Emission Reduction Potential of Typical Industries in Jinan, China	WU Wen-lu, SHAN Chun-yan, ZHAO Jing-lin, <i>et al.</i> (5924)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in Lishui Area of Nanjing	RUAN Zhao-yuan, YAN Ou, WANG Ti-jian, <i>et al.</i> (5933)
Spatio-temporal Change in City-level Greenhouse Gas Emissions from Municipal Solid Waste Sector in China During the Last Decade and Its Potential Mitigation	ZHANG Ting-xue, GAO Shu-dan, TENG Xiao, <i>et al.</i> (5946)
Spatiotemporal Distribution Characteristics of Air Pollution and Health Risks in Key Cities of China	TU Pei-yue, YANG Huan, CHEN Lan-zhou, <i>et al.</i> (5954)
Spatial and Temporal Variations in PM ₁ Concentration and its Correlation with AOD in China from 2014 to 2017	YUAN Li-mei, MA Fang-fang, BIAN Ze, <i>et al.</i> (5964)
Characteristics and Generation Mechanism of Secondary Inorganic Ions in PM _{2.5} in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan City Group	MA Jie-li, LUO Da-tong, LIU Xin, <i>et al.</i> (5975)
Characteristics and Cause of PM _{2.5} During Haze Pollution in Winter 2022 in Zhoukou, China	MA Ying-ge, YANG Lu, DI Rui-miao, <i>et al.</i> (5986)
Characterization and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in PM _{2.5} in Lanzhou	MA Ke-jing, SUN Li-juan (5997)
Characteristics of Atmospheric Dust Fall Pollution and Its Chemical Composition and Mass Reconstruction in Mentougou District of Beijing	WANG Zhi-yao, YAO Qi, LÜ Fu, <i>et al.</i> (6007)
Ozone Pollution Characteristics and Formation Mechanism in a Typical Tropical Seaside City	HAN Shu-yan, ZHANG Xin, XIE Rong-fu, <i>et al.</i> (6015)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Surface Water in Kuaize River Basin at the Upper Pearl River	TAO Lan-chu, CUN De-xin, TU Chun-lin, <i>et al.</i> (6025)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Surface Water and Groundwater in Huainan Coal Mine Area	LIU Hai, KANG Bo, GUAN Zheng-ting, <i>et al.</i> (6038)
Hydrochemical Characteristics and Pollution Source Identification of Groundwater in Plain Area of Barkol-Yiwu Basin	JIANG Feng, ZHOU Jin-long, ZHOU Yin-zhu, <i>et al.</i> (6050)
Identification of Nitrate Source and Transformation Process in Shallow Groundwater Around Dianchi Lake	CHEN Qing-fei, CHEN An-qiang, CUI Rong-yang, <i>et al.</i> (6062)
Analysis of Influencing Factors on the Accumulation and Distribution of Heavy Metals in Soil of a Typical Lead-zinc Mine Watershed	PAN Yong-xing, CHEN Meng, WANG Xiao-tong (6071)
Heavy Metal Pollution and Health Risk Assessment in Karst Basin Around a Lead-Zinc Mine	LIAO Hong-wei, JIANG Zhong-cheng, ZHOU Hong, <i>et al.</i> (6085)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Heavy Metals in Main Rivers Sediments and Ecological Risk Assessment in Kaifeng City	DING Ya-peng, LU Xi-hao, WANG Xiao-jing, <i>et al.</i> (6095)
Evaluation and Prediction of Environmental Capacities of Heavy Metals in the Surface Sediments of Lakes in Huoqiu County	LIU Hai, WEI Wei, SONG Yang, <i>et al.</i> (6106)
Metabarcoding Profiling of Phytoplankton Communities Associated with Algal Blooms and Determining Related Drivers in Baiyangdian Lake ...	CHEN Ting, DU Xun, CHEN Yi-yong, <i>et al.</i> (6116)
Driving Factors Analyze of Phytoplankton Community by Comparison of Population and Functional Groups and Water Quality Evaluation in Dongting Lake	YAN Guang-han, YIN Xue-yan, WANG Xing, <i>et al.</i> (6125)
Distribution Characteristics and Environmental Driving Factors of Cyanobacteria Community in Impounded Lakes and Reservoirs in Shandong on the East Route of South-to-North Water Diversion Project	WEI Jie-lin, CUI Yu-jing, LI Yi-zhen, <i>et al.</i> (6137)
Characteristics and Ecological Risk Assessment of Pharmaceutical Active Compounds in Guangdong Province	LUO Jia-hao, WANG Yu-kai, YUAN Ke, <i>et al.</i> (6149)
Characteristics of Microplastic-derived Dissolved Organic Matter(MPDOM) and the Complexation Between MPDOM and Sulfadiazine/Cu ²⁺	WANG Xiao, YAN Cai-xia, NIE Ming-hua, <i>et al.</i> (6159)
Photodegradation of Plastic Blends in Seawater and Its Risk to the Marine Environment	ZHANG Hong-yu, GAO Jia-wei, CHEN Si-bao, <i>et al.</i> (6172)
Preparation of Iron-improved Blue Algae Biochar and Its Co-adsorption Mechanism for Phosphorus in Surface Water	HAN Jie, HUANG Xin, YANG Kun-lun, <i>et al.</i> (6181)
Estimation and Critical Source Area Identification of Non-point Source Pollution Based on Improved Export Coefficient Models; A Case Study of the Upper Beiyun River Basin	LI Hua-lin, ZHANG Shou-hong, YU Pei-dan, <i>et al.</i> (6194)
Characteristics of Bacterial Community Structure in the Sediment of Rural Black and Odorous Water Bodies	REN Hong-wei, TIAN Yan-fang, LU Jin-xia, <i>et al.</i> (6205)
Impacts of Human Activities on the Net Primary Productivity of Vegetation in Chengde's Transitional Region from Plateau to Plain in the Context of Climate Change	SHAN Zhen-dong, LIU Dun, LUO Han, <i>et al.</i> (6215)
Meta-analysis on the Effects of Nitrogen Addition on Soil Organic Carbon Content in Terrestrial Ecosystems	YANG Ling-fang, KONG Dong-yan, DIAO Jing-wen, <i>et al.</i> (6226)
Effects of Biochar Application on Soil Organic Nitrogen Component and Active Nitrogen in <i>Eucalyptus</i> Plantations After Five Years in Northern Guangxi	CAO Yang, SHEN Yu-yi, CHEN Yun-shuang, <i>et al.</i> (6235)
Response of Organic Carbon Mineralization to Nitrogen Addition in Micro-aerobic and Anaerobic Layers of Paddy Soil	MAO Wan-qiong, XIA Yin-hang, MA Chong, <i>et al.</i> (6248)
Effects of Conservation Tillage on Herbicide Residues in Maize Field Soil	LIU Yuan, WANG Zu-cheng, LIU Mei-hua, <i>et al.</i> (6257)
Research Progress on Toxicity of Microplastics in Soil to Terrestrial Plants and Their Degradation Mechanism	LIU Wei, LI Yu-xin, RONG Sa-shuang, <i>et al.</i> (6267)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Microplastics in Soil in Danjiangkou Reservoir Area of South-to-North Water Diversion Project	WANG Feng, GONG Wei, LIU Zhe, <i>et al.</i> (6279)
Accumulation Characteristics, Sources, and Health Risks of Soil Lead of Urban Parks in Beijing	AN Jiang-mei-duo, ZHANG Rui-qing, GUO Guang-hui, <i>et al.</i> (6287)
Vertical Migration Characteristics and Fate of Heavy Metals from Zinc Smelting Slag in Soil Profile	YANG Ai-ping, WANG Xiao-yan, XIAO Xi-yuan, <i>et al.</i> (6297)
Ecological Risk Assessment and Migration and Accumulation Characteristics of Heavy Metals in Farmland Soil-crop System from Typical Pyrite Mining Area	CHENG Xiao-meng, ZHAO Chen, WU Chao, <i>et al.</i> (6309)
Interaction and Transport Characteristics of Lead and Cadmium in Different Soil-wheat Systems	KOU Meng, FAN Yu, SU Meng-xian, <i>et al.</i> (6319)
Distribution and Transport of Cadmium and Arsenic in Different Aboveground Parts of Wheat After Flowering	WANG Qiu-shi, HUA Gui-li, LI Xiang-yu, <i>et al.</i> (6328)
Effects of Vegetation Types and Seasonal Dynamics on the Diversity and Function of Soil Bacterial Communities in the Upper Reaches of the Heihe River	WANG Zhu, LIU Yang, WANG Fang, <i>et al.</i> (6339)
Ecological Responses of Soil Bacterial Communities to Heavy Metal Contamination Surrounding a Typical Coal-based Industrial Region	ZHENG Dan-feng, LIU Di, SU Chao, <i>et al.</i> (6354)
Effects of Aeration Methods on Microbial Diversity and Community Structure in Rice Rhizosphere	XIAO De-shun, XU Chun-mei, WANG Dan-ying, <i>et al.</i> (6362)
Response of Nitrification Potential and Ammonia Oxidation Microbial Community in Purple Soils to the Application of Biochar Combined with Chemical Fertilizer and Manure	LI Yue, WANG Zi-fang, JIA Li-juan, <i>et al.</i> (6377)
Effect of Continuous Cropping on the Physicochemical Properties, Microbial Activity, and Community Characteristics of the Rhizosphere Soil of <i>Codonopsis pilosula</i>	YANG Yang, LI Hai-liang, MA Kai-li, <i>et al.</i> (6387)
Effect of Manure Application on the Adsorption of Antibiotics to Soil	LUO Shan, HU Jin-sheng, TANG Xiang-yu, <i>et al.</i> (6399)
Relationship Between Carbon Emissions and Economic Development of Industrial Parks Based on Decoupling Index	CHEN Si-yu, LIU Jing-ru, SUN Guang-ming (6412)
Characteristics of Municipal Solid Waste in Some Urban Agglomeration in the Past Five Years	WANG Xiao-bo, LIU An-qi, ZHONG Hui-qiong, <i>et al.</i> (6421)