

目次

中国城市碳排放强度的时空演变、动态跃迁及收敛趋势	杨清可, 王磊, 朱高立, 李颖, 范业婷, 王雅竹 (1869)
交通运输业碳排放效率时空演变及趋势预测	郑琰, 蒋雪梅, 肖玉杰 (1879)
基于扩展STIRPAT模型LMDI分解的碳排放脱钩因素	张江艳 (1888)
基于LEAP模型的工业园区碳达峰路径:以南京某国家级开发区为例	李慧鹏, 李荔, 殷茵, 何文大, 宿杰, 赵秋月 (1898)
高校碳排放核算与分析:以北京A高校为例	曹睿, 封莉, 张立秋 (1907)
北京市制造业减排降碳协同效应分析和驱动因素	俞珊, 韩玉花, 牟洁, 张双, 张增杰 (1917)
碳排放权交易价格与全要素生产率:来自中国的证据	吴雪萍 (1926)
中国城市PM _{2.5} 和PM ₁₀ 时空分布特征和影响因素分析	李江苏, 段良苏, 张天娇 (1938)
2017~2021年苏皖鲁豫交界区域PM _{2.5} 和O ₃ 时空变化特征及影响因素	陈伟, 徐学哲, 刘文清 (1950)
疫情管控期西安PM _{2.5} 和O ₃ 污染特征及成因分析	原晓红, 张强, 李琦, 谢文豪, 刘跃廷, 樊亭亭, 姜旭朋 (1963)
苏南五市秋冬季PM _{2.5} 化学组成特征和空间差异	冯蔚, 丁峰, 尚玥, 谢鸣捷 (1975)
湖北咸宁细颗粒物PM _{2.5} 来源	罗怡, 朱宽广, 陈璞琰, 田军, 谢旻, 战杨志豪, 赵润琪 (1983)
邢台氨减排对京津冀PM _{2.5} 改善的溢出效益	边泽君, 闻超玉, 郎建奎, 范晓茜, 夏祥晨, 周颖 (1994)
聊城市冬季PM _{2.5} 载带金属元素污染特征、风险评价及来源分析	张敬巧, 朱瑶, 曹婷, 燕丽, 王淑兰, 刘铮 (2003)
高原城市拉萨典型VOCs排放源成分谱特征	郭淑政, 叶春翔, 林伟立, 陈熠, 曾立民, 尹晴晴, 刘雪莉 (2011)
北京市工业园区VOCs污染特征及健康风险评估案例:高新技术产业的环境影响	王洁, 姚震, 王敏燕, 陈速敏, 龙腾, 王海林, 李红, 郭秀锐, 郝江虹, 聂磊 (2019)
高温极端天气影响下的成都平原一次典型臭氧污染过程分析	雷丽娟, 张懿, 罗伊娜, 张潇, 冯森 (2028)
水环境中抗病毒药物的存在、行为与风险	葛林科, 李璇艳, 曹胜凯, 郑金帅, 张蓬, 朱超, 马宏瑞 (2039)
黄河小浪底水库地表水中重金属的时空变化与概率健康风险	王亮, 邓雪娇, 王潇磊, 李明, 刘奕尧, 姜亚敏, 涂响, 张坤峰 (2054)
藏东多曲河流域总富集水化学特征及控制因素	李敬杰, 连晟, 王明国, 张智印, 张涛 (2067)
西北内陆区降水稳定同位素时空分布特征及其水汽来源	张炎炎, 辛存林, 郭小燕, 张博, 陈宁, 史延飞 (2080)
基于水化学和氢氧同位素的泰安城区岩溶地下水补给来源及演化过程	孟令华 (2096)
丹江流域山区地表水-地下水水化学特征及其影响因素	张子燕, 伏永朋, 王宁涛, 谭建民, 刘亚磊 (2107)
金塔盆地鸳鸯池灌区地下水水化学特征及控制因素	王晓燕, 韩双宝, 张梦南, 尹德超, 吴玺, 安永会 (2118)
德阳市平原区浅层地下水水化学特征与健康风险评价	刘楠, 陈盟, 高东东, 吴勇, 王橹橹 (2129)
典型城市河网沉积物微塑料时空分布特征	许万璐, 范一凡, 钱新 (2142)
抚仙湖流域尺度氮排放清单构建及关键源解析	王延杰, 梁启斌, 王艳霞, 侯磊, 陈奇伯, 王伟, 李晓琳, 高俊淑 (2150)
过氧化钙/海泡石海藻酸钠缓释凝胶复合材料的制备及其对内源磷的控制性能	曲思彤, 单苏洁, 王崇铭, 吴玲予, 李大鹏, 黄勇 (2160)
矿物超细颗粒的形成机制、结构特征及其环境行为和效应	刘振海, 张展华, 袁语欣, 朱盼盼, 陈威, 张勇 (2171)
生物炭固定化菌复合材料在环境修复中的应用研究进展	孙淑玉, 黄梦鑫, 孔强, 张焕新, 刘继伟 (2185)
微塑料对沸石吸附水体氨氮的影响及其机制	练建军, 谢诗婷, 吴培, 孟冠华, 陈波 (2195)
紫外老化作用对纳米生物炭吸附环丙沙星的影响机制	马锋锋, 薛之一, 赵保卫 (2203)
土地利用影响下永定河流域浮游植物群落与环境因子响应	郭善嵩, 胡恩, 丁一桐, 张嘉渭, 孙长顺, 卢悦, 潘保柱 (2211)
鄱阳湖湿地细菌群落多样性和可培养细菌功能基因丰度	喻江, 王淳, 龙永, 刘贵花, 李春杰, 范国权, 于镇华 (2223)
典农河沉积物细菌群落结构特征及其与重金属的关系	刘双羽, 蒙俊杰, 邱小琮, 周瑞娟, 李霖 (2233)
污水处理厂尾水排放对受纳河流细菌和真菌微生物群落的影响	郭有顺, 余仲, 郝文彬, 孟凡刚 (2246)
宏基因组学分析深度处理阶段污水中细菌的赋存特征及其功能	胡健双, 王燕, 周政, 汪雅琴, 王秉政, 李激 (2259)
大别山区生境质量时空特征及自然-人为因素驱动机制	郑亚平, 张俊华, 田惠文, 朱航成, 刘舒, 丁亚鹏 (2268)
基于连续小波变换、SHAP和XGBoost的土壤有机质含量高光谱反演	叶森, 朱琳, 刘旭东, 黄勇, 陈蓓蓓, 李欢 (2280)
秸秆还田、覆膜和施氮对旱地麦田土壤质量的影响	叶子壮, 王松燕, 陆潇, 史多鹏, 吕慎强, 李嘉, 杨泽宇, 王林科 (2292)
长期施用有机肥对土壤微塑料赋存及迁移特征的影响	王长远, 马啸驰, 郭德杰, 刘新红, 马艳, 罗佳 (2304)
土壤盐分变化对N ₂ O排放影响:基于Meta分析	黄艺华, 余冬立, 史祺琦, 胡磊, 潘永春 (2313)
基于土地利用/覆被动态变化的粤港澳大湾区碳储量评价与预测	郑慧玲, 郑辉峰 (2321)
基于InVEST模型的伏牛山地区生态系统碳储量时空变化模拟	张哲, 时振钦, 朱文博, 孙梓欣, 赵体侠, 邓文萍, 刘志强 (2332)
防护林建设过程中土壤微生物养分限制与有机碳组分之间的关系	徐凤璟, 黄懿梅, 黄倩, 申继凯 (2342)
长期秸秆还田褐土有机碳矿化特征及其驱动力	赵宇航, 殷浩凯, 胡雪纯, 解文艳, 刘志平, 周怀平, 杨振兴 (2353)
冬绿肥覆盖对土壤团聚体及有机碳和AMF多样性的影响	鲁泽让, 陈佳钰, 李智贤, 李永梅, 罗志章, 杨锐, 田明洋, 赵吉霞, 范茂攀 (2363)
辽河流域氮素时空分布及其对土地利用和降雨的响应	周波, 李晓光, 童思陈, 吕旭波, 郭朝臣, 雷坤 (2373)
高强度农业种植区不同景观池塘氧化亚氮排放特征	张欣悦, 肖启涛, 谢晖, 刘臻婧, 邱银国, 罗菊花, 徐向华, 段洪涛 (2385)
生物炭与不同类型氮肥配施对菜地土壤反硝化细菌群落的影响	柳晓婉, 刘杏认, 高尚洁, 李贵春 (2394)
太岳山不同林龄人工油松林土壤微生物特征	马义淑, 曹亚鑫, 牛敏, 张明昱, 程曼, 文永莉 (2406)
基于稀疏样点的土壤重金属含量模拟方法	张佳琦, 潘瑜春, 高世臣, 赵亚楠, 景胜强, 周艳兵, 邹允兵 (2417)
基于特定源-风险评估模型的兰州黄河风情线绿地土壤重金属污染优先控制源分析	李军, 李旭, 李开明, 焦亮, 台喜生, 臧飞, 陈伟, 脱新颖 (2428)
西南不同类型紫色土pH变化、重金属累积与潜在生态风险评估	张海琳, 张雨, 王顶, 谢军, 张跃强, 张宇亭, 王洁, 石孝均 (2440)
重庆某铁矿区周边耕地土壤重金属污染评价及来源解析	廖泽源, 李杰芹, 沈智杰, 李彩霞, 罗程钟, 梅楠, 张成, 王定勇 (2450)
金属矿区周边农田土壤与农作物重金属健康风险评估	魏洪斌, 罗明, 向奎, 查理思 (2461)
赤泥基纳米零价铁对多金属污染土壤修复效果	刘龙宇, 杨世利, 赵黄诗雨, 常凯威, 余江 (2473)
施锌对碱性土壤-小麦幼苗体系累积镉的影响	张瑶, 王天齐, 牛硕, 杨阳, 陈卫平 (2479)

湖北咸宁细颗粒物PM_{2.5}来源

罗怡¹, 朱宽广^{1,2}, 陈璞珑³, 田军⁴, 谢旻^{*}, 战杨志豪¹, 赵润琪¹

(1. 南京大学大气科学学院, 南京 210023; 2. 湖北省环境科学研究院, 武汉 430072; 3. 净零纪元(江苏)环境科技有限公司, 南京 210023; 4. 南京大学环境规划设计研究院集团, 南京 210093)

摘要: 为了解咸宁细颗粒物(PM_{2.5})来源, 对2019年在湖北咸宁两个环境受体点位采集的不同季节大气中PM_{2.5}样品中的主要成分和化学元素进行统计研究; 通过颗粒物排放源采样建立本地特征源谱, 用化学质量平衡(CMB)受体模型解析其来源; 通过VOCs离线监测数据分析其中二次气溶胶(SOA)生成关键组分, 并对关键组分进行来源解析. 结果表明, 咸宁市PM_{2.5}超标情况主要出现在冬季, PM_{2.5}中主要化学成分以水溶性无机盐和含碳组分为主; 一次解析揭示硝酸盐、硫酸盐和铵盐等的二次转化对PM_{2.5}浓度的贡献最大, 总贡献率在45%以上; 二次解析揭示工业源、机动车源及电厂对PM_{2.5}浓度的贡献最大; VOCs对二次有机气溶胶贡献最高的组分为芳香烃, 关键组分为苯、甲苯、间/对-二甲苯和乙基苯, 对关键组分来源分析发现主要来源为溶剂使用. 控制工业排放、机动车排放及调整能源结构是目前控制咸宁PM_{2.5}的主要途径, 同时也要考虑控制溶剂排放的芳香烃.

关键词: 咸宁市; PM_{2.5}; 化学质量模型(CMB); 来源解析; 挥发性有机物(VOCs)

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)04-1983-11 DOI: 10.13227/j.hjx.202303240

Source Apportionment of Fine Particles in Xianning, Hubei

LUO Yi¹, ZHU Kuan-guang^{1,2}, CHEN Pu-long³, TIAN Jun⁴, XIE Min^{*}, ZHAN Yang-zhi-hao¹, ZHAO Run-qi¹

(1. School of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 2. Hubei Academy of Environmental Sciences, Wuhan 430072, China; 3. Net Zero Era (Jiangsu) Environmental Technology Co., Ltd., Nanjing 210023, China; 4. Academy of Environmental Planning and Design, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: To understand the sources of fine particulate matter PM_{2.5} in Xianning, a statistical study was conducted on the major components and chemical elements in atmospheric PM_{2.5} samples collected at two environmental receptor sites in Xianning, Hubei in 2019 in different seasons. Local characteristic source spectra were established through particulate matter emission source sampling, and their sources were resolved using a chemical mass balance (CMB) receptor model. Additionally, the key components of secondary aerosol (SOA) generation were analyzed using offline monitoring of VOCs, and the key components were analyzed using source analysis. The results showed that PM_{2.5} exceedances in Xianning mainly occurred in winter, and the main chemical components in PM_{2.5} were mainly water-soluble inorganic salts and carbon-containing components. Primary analysis revealed that secondary transformations of nitrate, sulphate, and ammonium salts made the largest contribution to PM_{2.5} concentrations, with a total contribution of over 45%; secondary analysis revealed that industrial sources, motor vehicle sources, and power plants made the largest contribution to PM_{2.5} concentrations. The components of VOCs that made the highest contribution to secondary organic aerosols were aromatic hydrocarbons, with the key components being benzene, toluene, m-xylene, paraxylene, and ethylbenzene. Analysis of the sources of the key components revealed that the main source was solvent use. Controlling industrial emissions and motor vehicle emissions and adjusting the energy structure are currently the primary ways to control PM_{2.5} in Xianning, although controlling aromatic hydrocarbons from solvent emissions should also be considered.

Key words: Xianning; PM_{2.5}; chemical mass model (CMB); source analysis; volatile organic compounds(VOCs)

随着我国经济快速发展, 大气污染问题日益严重. 空气污染物中的颗粒物因涉及范围广, 危害性大, 成为我国大气环境中的重要问题^[1-3]. 细颗粒物(PM_{2.5})作为大气颗粒物的代表性污染物之一, 污染危害是广泛的, 对人体健康, 能见度以及气候变化均具有重要影响^[4,5], 因此开展大气颗粒物的污染研究刻不容缓.

我国在PM_{2.5}污染和控制方面的研究起步较晚, 近年来随着监测手段的进步, 关于PM_{2.5}的观测特征以及成分和来源分析研究越来越多^[6], 对PM_{2.5}来源研究在空间和深度上也不断扩大和深入. 目前, 我国关于PM_{2.5}的研究在全国范围内均有开展, 包括京津冀地区及周边地区^[7-9]、长三角城市^[10-13]、珠三角城市^[14]和四川盆地^[15-17]等大气污染重灾区. 而随着这些地区污染得到治理, 更多研究开始关注华中

地区^[18]以及西北地区^[19,20]等. 对PM_{2.5}的化学成分的研究已有大量工作, 重点关注水溶性离子的污染特征、转化形成机制和来源等方面^[21-25], 以受体模型法为技术手段的研究居多. 受体模型是一种相当重要的源解析方法, 受体模型法通过对大气颗粒物环境样品和排放源样品中对源有指示作用的化学示踪物进行分析, 识别受体的源类并确定各类源对受体的定量贡献. 化学受体模型(CMB)是受体模型的一种, CMB受体模型通过求解由污染源和大气颗粒物化学组成构建的线性方程组来定量污染源贡献值和

收稿日期: 2023-03-28; 修订日期: 2023-07-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(42275102); 江苏省自然科学基金项目(BK20211158); 重庆市气象局开放式研究基金项目(KFJJ-201607)

作者简介: 罗怡(1998~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大气颗粒物来源解析, E-mail: 2577751167@qq.com

* 通信作者, E-mail: minxie@nju.edu.cn

贡献率^[26,27]。

二次有机气溶胶(SOA)是PM_{2.5}的重要组成部分,在污染严重的城市占PM_{2.5}有机组分质量的20%~50%^[28],在光化学烟雾条件下甚至可以达到70%以上^[29]。挥发性有机污染物(VOCs)是SOA的重要前体物,因此研究VOCs的浓度水平、组成特征及二次有机气溶胶生成潜势是控制PM_{2.5}污染的重要基础^[30,31]。

咸宁市位于湖北省东南部,作为湖北省辖地级市,总面积10 033 km²,常住人口265万。咸宁市作为武汉、长沙和南昌三大城市群的中心节点城市,近年来随着经济的快速发展,市区空气颗粒物污染问题愈加严重^[32,33]。咸宁市毗邻中国中部经济中心武汉,对于武汉的颗粒物污染成因、来源解析等研究较成熟。武汉PM_{2.5}主要来源包括钢铁燃煤工业、机动车排放和二次气溶胶^[34]。随着大气污染防治工作的持续推进,咸宁在大气污染防治方面取得了一定成效,对较大颗粒物的治理成效显著,但细颗粒物治理仍处于起步阶段。2015~2017年,PM_{2.5}作为咸宁首要污染物的天数占比逐年上升,颗粒物仍为影响咸宁市空气质量的主要污染物。咸宁市2017年 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 年均值为44 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,颗粒物浓度距离空气质量二级标准(35 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)仍有差距,大气污染防治工作压力依然较大。

目前,咸宁市对大气污染物的组成成分、污染来源和传输途径等基础研究薄弱,对污染成因底数不清和情况不明,一定程度上影响到大气污染防治工作的针对性和有效性。本文通过分析咸宁市大气环境颗粒物和VOCs采样数据,利用受体模型对PM_{2.5}和VOCs的来源进行解析,量化各类污染源的贡献,以期为我国同类型城市的颗粒物污染防治工作提供决策依据。

1 材料与方法

1.1 PM_{2.5}排放源采样

根据《环境空气颗粒物来源解析技术路线(试行)》中各类排放源的选择和采样方法进行采样。确定采集的颗粒物排放源为城市扬尘、道路扬尘、土壤风沙尘、建筑尘、电厂和工业企业等本地特征源。采样点位的选取分为固定源和开放源。对于固定源采样点位选取咸宁市典型的工业企业进行了源谱采样,包括了火力发电、钢铁行业、水泥制造、平板玻璃、化工和纺织等主要污染排放企业。使用稀释通道采样器进行滤膜采样,采样器为TH-16E(武汉天虹)颗粒物采样器,2个采样通道分别用于采集PM_{2.5}的聚丙烯纤维滤膜样品和石英滤膜样品。每个

通道的采样流量为16.67 L $\cdot\text{min}^{-1}$ 。稀释通道的采样原理是将高温烟气在稀释通道内与空气进行混合稀释,稀释并冷却后的混合烟气进入停留仓,停留数分钟内再被不同采样检测仪器捕捉。该方法能模拟烟气排放到大气环境中短时间内的稀释、冷却和凝结等过程。开放源采样包括道路扬尘、城市扬尘、施工扬尘和土壤扬尘。道路扬尘样品根据《防治城市扬尘污染技术规范》要求进行采集,采样包括快速路、主干道、次干道和支路等共计9条道路,其中快速路点位2个,主干道点位7个,次干道点位9个,支路点位10个,共计28个点位。城市扬尘是在6个居民聚集小区地面、楼梯和窗台上采集落下积累的尘土,施工扬尘是在6个砼主体施工阶段的建筑工地内采集散落在建筑工地地面的尘土,每个小区和工地至少采集尘土500 g以上,标记好带回实验室。土壤风沙尘是在城市建成区及周边的裸土上进行采集,围绕城市周边,每隔30°左右采集一个样品,共采集了12个样品。对于所有采集回来的尘土样品再次进行筛选细化,其后用鼓风机使其再悬浮,利用采样器收集粉尘,收集时间长度为3 h。

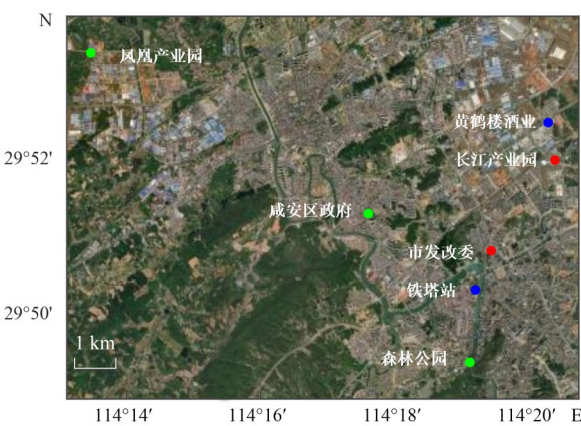
1.2 PM_{2.5}采样

在铁塔站(29°50′19″N, 114°18′59″E)和黄鹤楼酒业站(29°52′29″N, 114°20′17″E)开展大气颗粒物采样。每个采样点分别采用2台青岛崂应的2034型PM_{2.5}采样器,一台使用石英滤膜进行采样,用于离子和OC/EC分析,一台使用聚四氟乙烯滤膜(特氟龙滤膜)进行采样,用于元素分析。采样运行期间保证流量符合仪器要求100 L $\cdot\text{min}^{-1}$,流量浮动范围在 ± 1 L $\cdot\text{min}^{-1}$ 内。采样前对滤膜进行预处理,烘干冷却并称量编号,采样后将滤膜放入恒温恒湿箱平衡后称重。采样过程中,配置空白滤膜对采样过程进行质量控制;同时应根据源解析模型需要,定期进行平行采样,以评估采样的不确定性。采样时间为2018年夏、秋、冬和2019年春,每个季度至少保证有22个有效样品,每天连续采样22 h。将采样结果根据月份分为4个季节,夏季的PM_{2.5}采样时间从2018年7月18日至8月29日,秋季的PM_{2.5}采样时间从2018年10月16日至11月27日,冬季的PM_{2.5}采样时间从2019年1月5日至3月17日,春季的PM_{2.5}采样时间从2019年4月12日至6月2日。此外,还应用了采样点附近的国控点市发改委国控点(29°50′50″N, 114°19′26″E)和长江产业园国控点(29°52′00″N, 114°20′23″E)数据进行分析比较,数据来源于咸宁市环保局。各采样点具体位置如图1所示。铁塔站点周围多为生活小区、学校和政府机关驻地,可代表生活区采样点;黄鹤楼酒业站位于咸

宁市高新技术产业开发区，周围有较多高科技产业、食品、制药和现代纺织等工业企业，可代表工业区采样点。

1.3 颗粒物成分分析

对上述样品进行称重和成分分析. 根据《环境空气颗粒物(PM_{2.5})手工监测方法(重量法)技术规范》要求，对采样前后滤膜称重并计算PM_{2.5}质量浓度. 根据《大气颗粒物来源解析技术指南(试行)》的相关要求，对大气细颗粒物样品进行采样并进行化学分析，得到颗粒物样品中各元素(Na、Mg、Al、Si、P、K、Ca、Ti、Mn、Fe、S、Zn、Pb、Ni、As、Cr、V)、离子(SO₄²⁻、NO₃⁻、Cl⁻、NH₄⁺)和碳(TC、OC)的含量以及OC/EC数据. 主要分析方法见表1所示. 其中，较高浓度元素选择ICP-OES进行分析，考虑检出限原因，As和V选择ICP-MS进行分析. 对于ICP无法检测的Si、P和S，选择XRF进行分析. 过程中样品标识、保存、运输、交接，样品的采样和分析



蓝色点表示颗粒物采样点,红色点表示国控站点,绿色点表示VOCs离线采样点,其中长江产业园国控点与VOCs离线采样为同一点位

图1 颗粒物采样点、国控点和VOCs离线采样点位置示意

Fig. 1 Diagram showing the locations of particulate matter sampling sites, national control sites, and offline sampling sites for VOCs

的质量保障和质量控制均严格按照国家相关标准进行。

表1 颗粒物样品分析方法
Table 1 Methods for the analysis of particulate matter samples

分析内容	分析方法	分析仪器
元素分析(Na、Mg、Al、K、Ca、Ti、Mn、Fe、Zn、Pb、Ni和Cr)	电感耦合等离子体发射光谱法(HJ 776-2015)	电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)
元素分析(As和V)	电感耦合等离子体质谱法(HJ 657-2013)	电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)
元素分析(Si、P和S)	X射线荧光光谱分析法	能量色散型X射线荧光光谱仪(XRF仪器)
水溶性离子分析(Na ⁺ 、K ⁺ 、Mg ²⁺ 、Ca ²⁺ 、NH ₄ ⁺ 、F ⁻ 、Cl ⁻ 、NO ₃ ⁻ 和SO ₄ ²⁻)	离子色谱法(HJ 800-2016和HJ 799-2016)	瑞士万通930 professional IC型色谱仪
碳质组分OC/EC分析	热光反射法	DRI Model 2001热光碳分析仪

1.4 VOCs采样和成分分析

VOCs离线采样时间为2018年8~9月，每个月选取6 d以及2019年9月13~15日，每天09:00和15:00进行两次采样. 在考虑产业结构空间分布和监测站点位置的情况下选取咸安区政府、森林公园、长江产业园和凤凰产业园作为离线采样的4个站点，其中咸安区政府作为城区点，森林公园作为上风向点(背景点)，长江产业园和凤凰产业园作为工业园区点，具体位置如图1所示. 监测物种共107种，主要包括29种烷烃、11种烯烃、1种炔烃、18种芳香烃、35种卤代烃、12种含氧的挥发性有机物(OVOCs)以及1种有机硫(CS₂)，总共采集样品66个. VOCs分析检测参考《环境空气 挥发有机物的测定罐采样/气相色谱-质谱法》(HJ 759-2015)^[35]及美国EPA的TO-15^[36]方法，利用低温预浓缩技术对大气中的VOCs进行富集，加热解析后通过GC-FID/MS进行分析测量. 本项目执行严格的质量控制和质量保证，数据审核、日校准、设备维护等环节遵照HJ/T 193-2005^[37]执行，确保样品分析结果的准确性。

1.5 CMB源解析模型

本研究颗粒物来源解析利用化学质量平衡法(chemical mass balance model, CMB)模型进行. CMB是根据质量平衡原理建立的，通过物种丰富度和源贡献的乘积之和来表达环境化学浓度. 1972年，Miller等^[38]首次提出基于化学元素法的计算等式，其后Cooprer等^[39]将其正式命名为CMB. 通过基本假设，得到受体的总质量浓度就是每一类源贡献浓度值的线性加和：

$$c = \sum_{j=1}^J S_j \tag{1}$$

式中， c 为受体总质量浓度， S_j 为 j 排放源对受体的总质量贡献. 在该受体测得的 i 组分的浓度 c_i 应为各排放源(共 J 个)所贡献的 i 组分的和：

$$c_i = \sum_{j=1}^J F_{ij} \times S_j \quad (i = 1, 2, \dots, I) \tag{2}$$

式中， F_{ij} 为 j 排放源所排出的 i 组分的含量(即排放源成分谱). 选定拟合元素和拟合源，当拟合元素的数目(I)大于或等于拟合源的数目(J)时，根据测得的它们在大气中的浓度 c_i 及排放源成分谱 F_{ij} ，可通

过一定的数学方法解出此线性方程组, 得到各个排放源对该受体的贡献值 S_j 和相应的贡献率 β_j :

$$\beta_j = \left(\frac{S_j}{\sum_{j=1}^J S_j} \right) \times 100\% \quad (3)$$

利用 CMB 模型进行来源解析, 主要包括 6 个部分: 控制文件和输入文件设置, 迭代次数、浓度单位、输出格式和是否使用源消除方法等选项设置, 环境样本, 源谱中化学成分种类, 源谱种类以及解析结果^[40]. 对 CMB 模型的解析结果进一步处理, 得到咸宁市不同季节、不同源对不同站点 $PM_{2.5}$ 的贡献率, 以及不同源对咸宁市 $PM_{2.5}$ 的年均贡献率.

1.6 二次有机气溶胶生成潜势

通过计算 VOCs 的二次有机气溶胶生成潜势 (aerosol formation potential, AFP) 可以识别咸宁市环境空气中 VOCs 生成 SOA 的能力, 并识别出对 SOA 生成起到关键作用的活性物种. 基于 Grosjean 等^[41] 的烟雾箱实验, 采用气溶胶生成系数 (FAC) 法计算 AFP:

$$AFP_i = [VOCs]_{i0} \times FAC_i \quad (4)$$

式中, $[VOCs]_{i0}$ 为 VOCs 中物种 i 的初始浓度; FAC_i

为物种 i 生成 SOA 的生成系数, Grosjean 等^[41] 在研究中认为 VOCs 生成 SOA 的生成系数 FAC 是固定的. 对于 VOCs 初始浓度的计算, 考虑到受体点测得的 $[VOCs]_a$ 往往是经过氧化后的, 它与排放源排出的初始浓度之间的关系通过下式计算:

$$[VOCs]_{i0} = [VOCs]_{it} \times (1 - F_{VOCr_i}) \quad (5)$$

式中, $[VOCs]_{it}$ 为 VOCs 中物种 i 的实测浓度; F_{VOCr_i} 为物种 i 的参与反应分数.

2 结果与讨论

2.1 细颗粒物 $PM_{2.5}$ 来源解析

2.1.1 咸宁 $PM_{2.5}$ 源谱特征研究

通过对颗粒物排放源样品化学成分分析, 得到不同类型污染源中各元素、粒子及 OC/EC 占比, 制作相应排放源的源谱 (表 2). 其中, 餐饮油烟、汽车尾气、秸秆燃烧使用文献^[42,43] 中的数据. 咸宁本地机动车结构以汽油车居多, 车辆结构与选择文献城市相似. 不同类型源的典型化学成分分别是: 土壤尘 (Ca、Fe、 NO_3^- 、 NH_4^+ 、OC)、道路尘 (Ca、Fe、OC)、城市扬尘 (Fe、 NO_3^- 、OC)、电厂 (Cl^- 、 SO_4^{2-} 、OC)、工业 (Al、Ca、 SO_4^{2-} 、OC、EC) 餐饮油烟 (Al、OC)、汽车尾气 (SO_4^{2-} 、OC、EC、 NO_3^-) 和秸秆燃烧 (K、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、OC).

表 2 咸宁市 $PM_{2.5}$ 排放源化学成分占比 / %

Table 2 Chemical composition ratio of $PM_{2.5}$ emission sources in Xianning / %

类型	Al	Ca	Fe	K	Mg	Mn	Na	Pb	Zn	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	NH_4^+	OC	EC
电厂	1.69	1.51	0.36	0.31	0.47	0.01	1.98	—	0.03	2.32	0.79	13.95	2.00	7.91	2.00
工业	3.66	5.00	0.70	0.67	0.84	0.01	0.28	0.01	0.08	1.23	1.73	4.31	0.69	13.98	3.44
土壤尘	1.33	1.55	3.39	0.29	0.69	0.08	0.15	0.01	0.03	0.05	1.31	0.19	2.44	1.62	0.81
道路尘	1.35	3.03	3.64	0.31	0.86	0.09	0.72	0.01	0.04	0.19	2.20	1.01	1.84	6.57	0.07
城市扬尘	0.69	1.30	1.92	0.15	0.44	0.04	0.49	0.01	0.06	0.15	1.31	0.63	1.53	2.98	0.73
餐饮油烟	10.56	0.71	0.97	0.64	0.65	0.01	5.07	0.01	0.10	0.45	6.23	3.08	3.27	30.12	3.24
秸秆燃烧	0.60	2.56	1.04	4.74	0.54	0.12	1.56	0.01	0.08	1.25	6.22	3.82	1.20	15.95	3.99
柴油车尾气	7.90	1.19	1.47	1.27	0.97	0.03	2.51	0.03	0.26	0.27	7.37	1.90	5.87	45.67	20.04
汽油汽车尾气	5.39	0.58	0.79	1.56	0.47	0.01	2.00	0.01	0.17	0.34	2.58	5.12	9.89	50.76	3.87

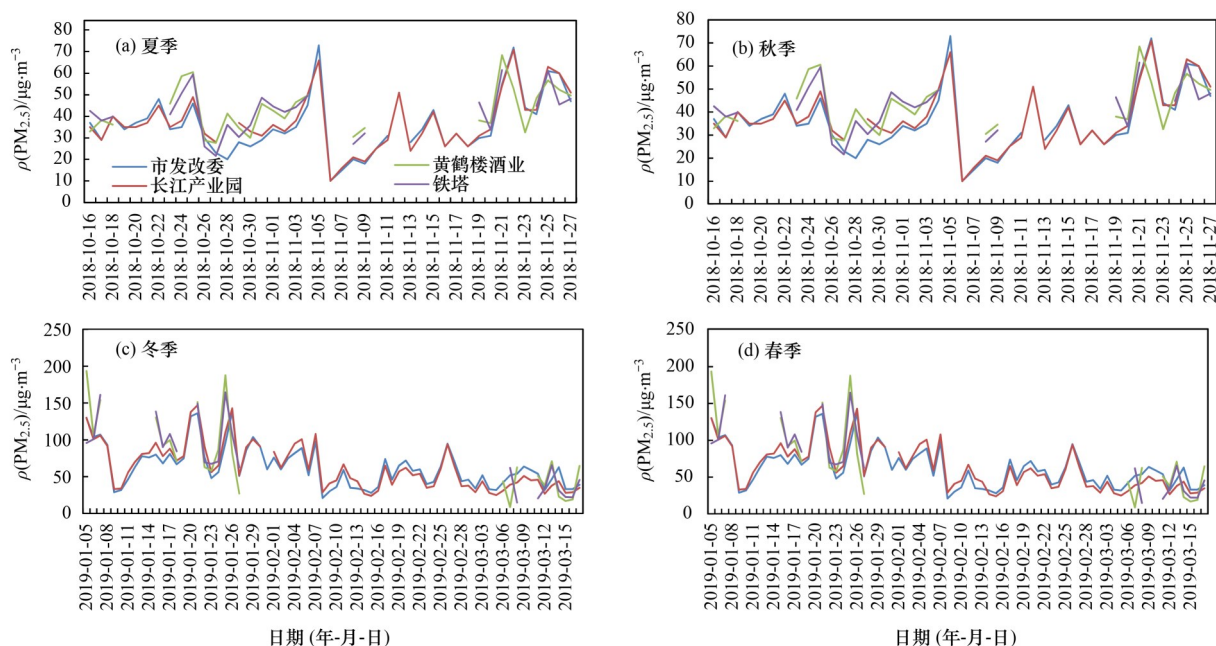
1) “—”表示该化学成分占比很小可忽略

2.1.2 $PM_{2.5}$ 化学成分分析

图 2 为 2018 ~ 2019 年咸宁市 2 个采样点位及附近国控点 $PM_{2.5}$ 浓度季节变化, 结果表明各站点不同季节 $PM_{2.5}$ 浓度变化趋势基本一致, 均表现为夏季的 $PM_{2.5}$ 平均浓度最低, 冬季的 $PM_{2.5}$ 平均浓度最高, 秋季各站点平均浓度要略高于春季. 黄鹤楼酒业站点整体平均浓度要高于铁塔站点. 考虑铁塔站点作为生活区代表站点, 同时附近有公园存在, 而黄鹤楼酒业站点作为工业区代表点, 周围多工业企业且靠近省道, 所以各季节黄鹤楼酒业站点的 $PM_{2.5}$ 污染都相对更重. 对照国家环境空气质量二级标准 75

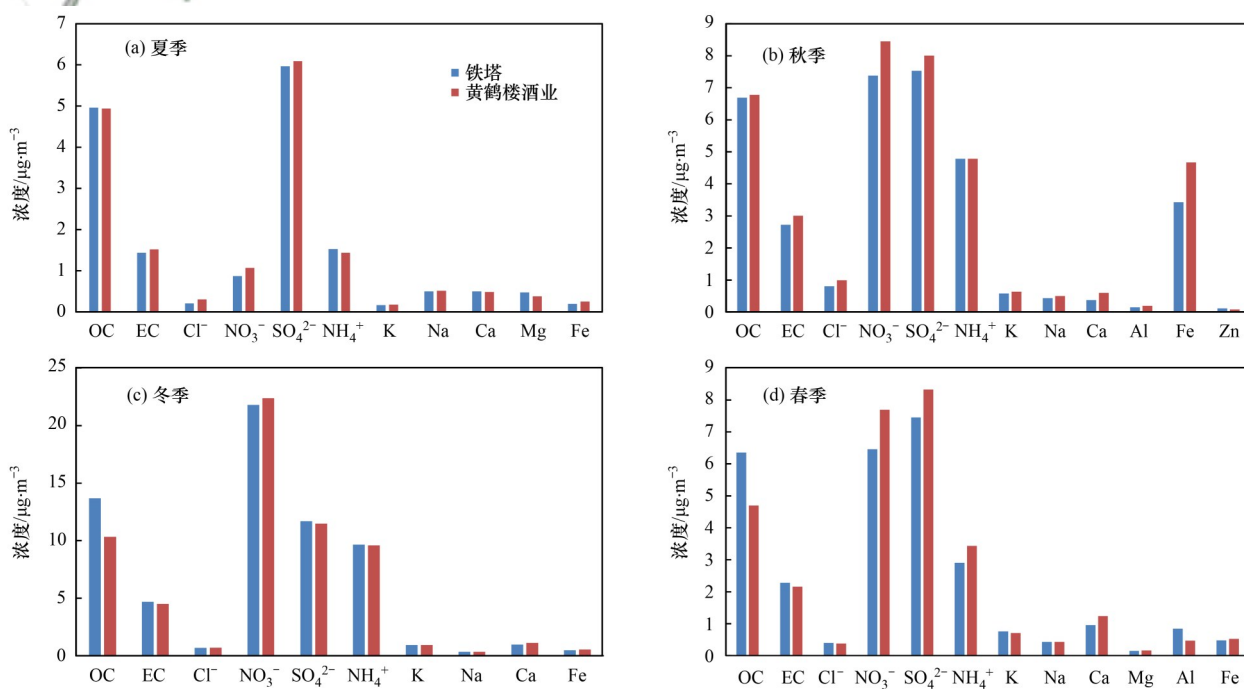
$\mu g \cdot m^{-3}$, 各站点在春夏秋三季都没有颗粒物超标情况. 在冬季, 黄鹤楼酒业站点和铁塔站点超标天数均达到 11 d.

图 3 为 2018 年 7 月至 2019 年 6 月咸宁市 $PM_{2.5}$ 主要化学成分浓度变化, 分别对应了铁塔和黄鹤楼酒业站点 4 个季节代表月份的采样结果. 图 3(a) 为夏季, 可见两个站点的主要化学成分浓度水平较为接近, 其中以 SO_4^{2-} 浓度最高, 其后依次为 OC、EC、 NH_4^+ 和 NO_3^- , 金属元素中主要是 Na、Ca、Mg 和 Fe 浓度相对较高. 其中, 在黄鹤楼酒业站点, SO_4^{2-} 和 NO_3^- 浓度略高于铁塔站点. 图 3(b) 为秋季, 可见黄鹤

图2 2018年7月至2019年6月咸宁市各站点 $PM_{2.5}$ 浓度季节变化Fig. 2 Seasonal variation in $PM_{2.5}$ concentrations by site in Xianning from July 2018 to June 2019

楼酒业站点的 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 浓度高于铁塔站点, 二次生成对 $PM_{2.5}$ 浓度的贡献更为显著. SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、OC、 NH_4^+ 和 EC 同样是主要成分, 但秋季 NO_3^- 浓度较夏季显著增加, 与 SO_4^{2-} 浓度接近, 这同夏季温度较高、 NO_3^- 成分易挥发有关. 此外, 秋季铁元素的浓度较夏季有显著提高, 可能受冶炼、扬尘的影响较大. 图3(c)为冬季, 可见 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、OC、 NH_4^+ 和 EC 浓度较夏季、秋季有显著地升高, 这与冬季颗粒物浓度较高有关. 此外, 二次生成对 $PM_{2.5}$ 浓度的贡献更

大, 同时 NO_3^- 浓度远高于 SO_4^{2-} 浓度. 图3(d)为春季, 与秋季相似, 黄鹤楼酒业站点的 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 浓度高于铁塔站点, SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、OC、 NH_4^+ 和 EC 是主要成分, NO_3^- 和 SO_4^{2-} 浓度接近. 可以看到, 各季节黄鹤楼酒业站点的 NO_3^- 浓度始终高于铁塔站点, 除冬季外, 黄鹤楼酒业站点的 SO_4^{2-} 浓度也始终高于铁塔站点. 一方面, 这是由于黄鹤楼酒业站点的颗粒物浓度本身较高; 另一方面, 是由于黄鹤楼酒业站点周围多工业企业且临近省道, 二次生成对 $PM_{2.5}$ 浓度的

图3 2018年7月至2019年6月咸宁市 $PM_{2.5}$ 中主要化学成分浓度的季节变化Fig. 3 Seasonal variation in concentrations of major chemical constituents in $PM_{2.5}$ in Xianning City from July 2018 to June 2019

贡献明显, 故 SO_4^{2-} 浓度和 NO_3^- 浓度相对更高。

2.1.3 $\text{PM}_{2.5}$ 一次来源解析

利用受体模型及黄鹤楼酒业和铁塔站点采样分析数据对咸宁市细颗粒物主要来源进行解析。根据源谱特征研究得到的咸宁本地排放源成分谱, 在模型计算中, 识别出了工业、电厂、扬尘、机动车及二次气溶胶这 5 类污染源。图 4 为咸宁市 $\text{PM}_{2.5}$ 来源一次解析 4 个季节解析结果。可以看出, 咸宁市所有季节 $\text{PM}_{2.5}$ 最主要的贡献都是来自于 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 NH_4^+ 等的二次转化过程, 次要贡献为电厂、工业和机动车, 不同季节间略有区别。工业源贡献在夏季贡献最为突出, 机动车源贡献在春季会高于工业源贡献, 电厂源贡献在冬春季贡献最为突出。

利用各季节咸宁市发改委站和长江产业园站点

$\text{PM}_{2.5}$ 监测数据, 对各季不同源项对咸宁市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的贡献进行加权平均, 计算得到各源项对全年 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的平均贡献。结果表明, 对 $\text{PM}_{2.5}$ 排放源的年均贡献从大到小分别是二次气溶胶 (47.15%)、电厂 (17.67%)、工业 (14.36%)、机动车 (11.81%)、扬尘 (6.84%) 和其他 (2.18%)。从年度贡献来说, $\text{PM}_{2.5}$ 最主要的贡献是来自于 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 和 NH_4^+ 等二次转化过程。对咸宁市周边武汉^[34]和南昌^[44]等城市的相关研究表明, 以上城市 $\text{PM}_{2.5}$ 最主要的贡献为二次气溶胶、电厂燃烧和机动车排放, 对比发现咸宁市二次气溶胶的贡献特别突出, 考虑一次污染源减排措施的实施, $\text{PM}_{2.5}$ 中的二次组分的占比逐渐变高, 二次组分形成复杂, 以往的减排思路可能收效甚微。

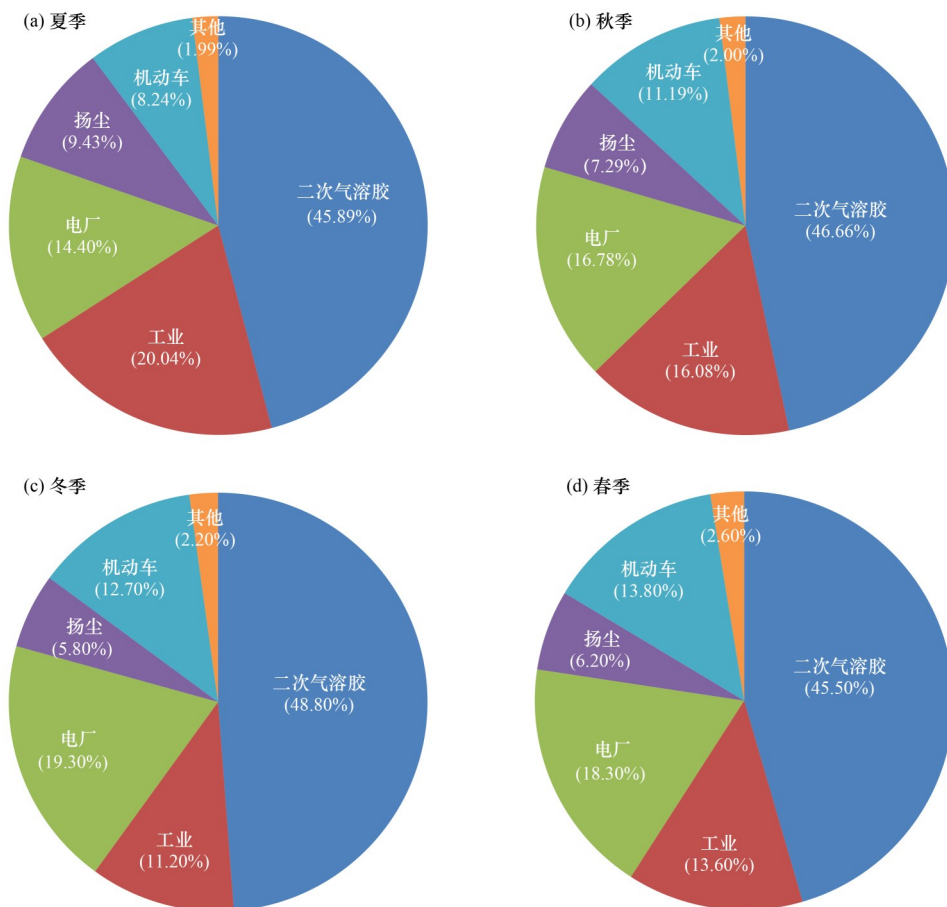


图 4 咸宁市四季 $\text{PM}_{2.5}$ 来源一次解析

Fig. 4 One-time analysis of $\text{PM}_{2.5}$ sources in Xianning in four seasons

2.1.4 $\text{PM}_{2.5}$ 二次来源解析

根据咸宁市 2019 年大气污染源排放核算结果, 分析了主要污染源的排放贡献情况, 对二次气溶胶的来源进行了二次解析, 从而得到颗粒物污染源排放贡献。表 3 为 2018 年咸宁市主城区 SO_2 、 NO_x 、 NH_3 、OC、BC 和 VOCs 的各行业排放量。其中, 排放 SO_2 、 NO_x 、OC 和 BC 的源项主要有化石燃料固定燃烧源、工艺过程源、道路移动源、非道路移动源及生物质

燃烧源, 而 NH_3 的源项主要是道路移动源、生物质燃烧源、农业源以及废弃物处理源。VOCs 的排放源项较多, 除农业源外, 其余源项均有排放。 SO_2 的主要排放源为工艺过程源, NO_x 的主要排放源为道路移动源和非道路移动源, NH_3 的主要排放源为农业源, OC 的主要排放源为化石燃料固定燃烧源和生物质燃烧源, BC 的主要排放源为化石燃料固定燃烧源, VOCs 的主要排放源为溶剂源和工业过程源。

表 3 2018 年咸宁市主城区各源项 SO₂、NO_x、NH₃、OC、BC 和 VOCs 排放量¹⁾/t
Table 3 SO₂, NO_x, NH₃, OC, BC, and VOCs emissions by source item in the main urban area of Xianning in 2018/t

源项	SO ₂	NO _x	NH ₃	OC	BC	VOCs
化石燃料固定燃烧源	357.43	243.39	—	173.67	150.95	338.90
工艺过程源	1 646.95	364.67	1.30	12.87	14.36	1 060.75
道路移动源	17.93	821.53	13.99	3.93	12.84	210.78
非道路移动源	24.52	986.48	—	17.45	56.72	147.37
生物质燃烧	88.14	286.07	61.46	196.82	73.91	579.71
农业源	—	—	684.60	—	—	—
废弃物处理源	—	—	82.97	—	—	34.07
溶剂源	—	—	—	—	—	1 471.55
储存运输源	—	—	—	—	—	399.30
其他排放源	—	—	—	9.66	0.28	70.69

1) “—”表示此类源该污染物排放量较少,不进行考虑

根据各源项的排放量比例确定了不同类型排放源对 PM_{2.5} 中二次转化部分的贡献率,对咸宁市 PM_{2.5} 来源进行二次解析(图 5).对各季节不同源项对咸宁市 PM_{2.5} 浓度的贡献进行加权平均,全年咸宁市 PM_{2.5} 排放源的贡献最大的是工业源(34.86%),其中夏季贡献最高,达到 44.78%;机动车源平均贡献率 28.94%,其中夏季贡献率特别低,仅为 20.03%;电厂源(23.63%)平均贡献与机动车源相

当,各季节贡献差别不大;扬尘源平均贡献 6.84%,另外 5.74% 的贡献来自其他排放源类.对武汉 PM_{2.5} 排放源解析结果表明^[45],近年来燃烧源的相对贡献有所增加,扬尘源的相对贡献有较大的减少,交通源总体趋于稳定,贡献量在 27% 左右.与之相比本研究也得到相似结论,工业、电厂和机动车对 PM_{2.5} 贡献突出,对于污染控制来说,需要在调整能源结构的同时全面开展机动车和工厂等的综

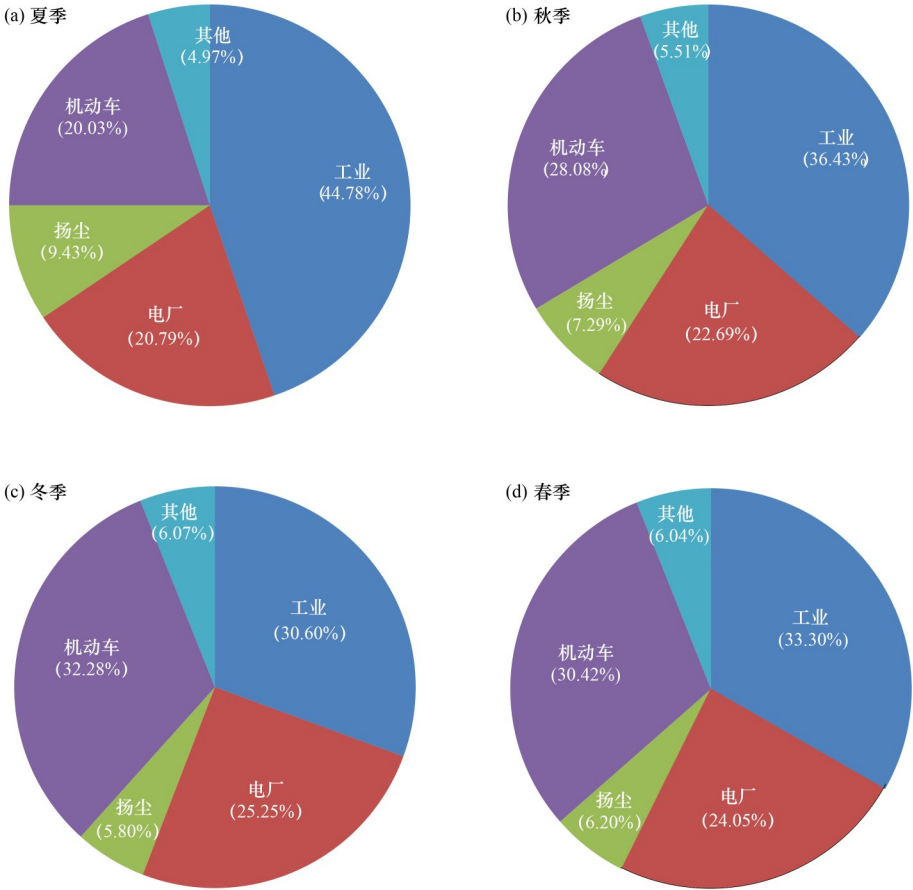


图 5 咸宁市四季 PM_{2.5} 来源二次解析
Fig. 5 Secondary analysis of PM_{2.5} sources in Xianning in four seasons

合治理。

2.2 VOCs对二次气溶胶生成贡献

2.2.1 VOCs浓度分布情况

图6展示了离线监测期间咸宁市各站点不同采样日VOCs化学组成及占比变化,可以看到含氧的挥发性有机物(OVOCs)是咸宁市VOCs化学组成中最主要的组分,变化较为显著,烯烃、炔烃和芳香烃浓度较低且变化甚微^[33]。

2.2.2 二次有机气溶胶生成潜势

图7展示了离线监测期间(2018年9月21日至10月15日)咸宁市各站点AFP值及AFP贡献率情况。4个站点AFP平均值由大到小为:长江产业园($2.01 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) > 区政府($1.67 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) > 凤凰产业

($1.38 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) > 森林公园($1.38 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)。从不同碳数芳香烃及烷烃AFP贡献率来看,烷烃AFP贡献率在1.7%~11.5%,C6和C7芳香烃AFP贡献变化区间相当,分别是10.6%~42.5%和11.1%~42.0%,C8芳香烃AFP贡献率略高,在13.4%~63.7%之间;C10芳香烃AFP贡献率在森林公园8月30日最高,达到12.1%。

图8展示了离线监测期间咸宁市各站点二次有机气溶胶生成潜势(AFP)贡献率排名前10的组分。从中可以看出,咸宁市各站点AFP值排名前10的组分均为芳香烃,排名前10的组分AFP分别占有组分AFP的88.2%、83.2%、84.2%和92.0%。4个站点AFP值排名前4的组分均为苯、甲苯、间/对-二甲苯和乙基苯,只是顺序有所不同。

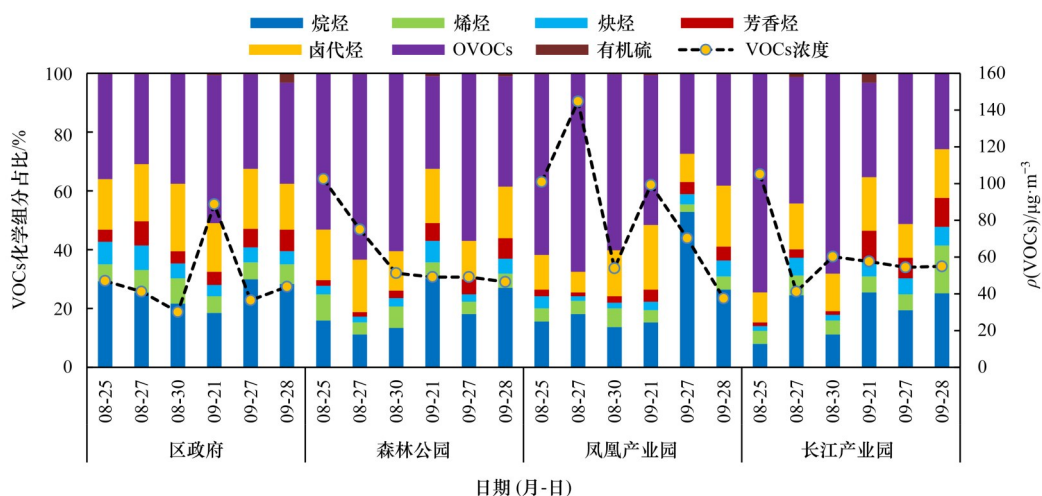


图6 咸宁市离线监测期间VOCs化学组成浓度及占比变化

Fig. 6 Changes in the concentration and percentage of chemical composition of VOCs during offline monitoring in Xianning

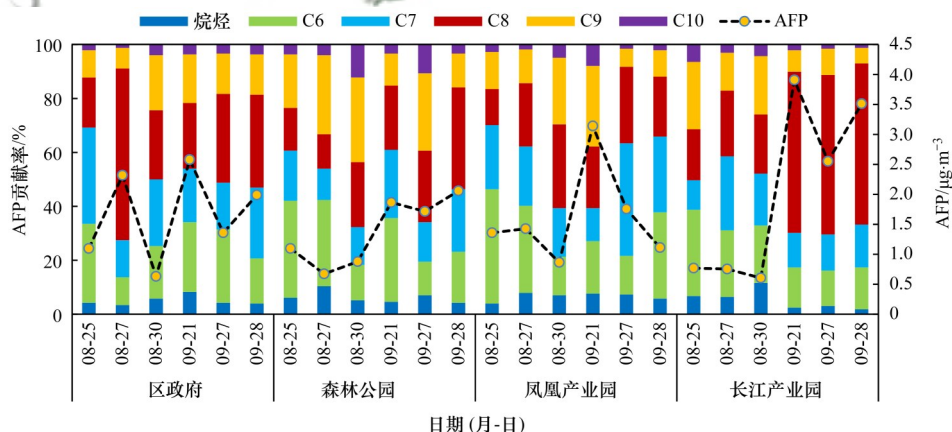


图7 咸宁市离线监测期间VOCs化学组分AFP贡献率

Fig. 7 AFP contribution of chemical fractions of VOCs during offline monitoring in Xianning

利用受体模型及VOCs离线监测数据对咸宁市细颗粒物主要来源进行解析。咸宁市VOCs共解析出5大类源,分别为:工业排放、燃烧源、机动车尾气、溶剂使用和植物源。对于咸宁VOCs的AFP分析发现芳香烃是关键影响组分。甲苯混合比与苯混合比的比例从机动车尾气源到工业来源,再到溶剂使

用,都在增加^[46]。对关键组分间/对-二甲苯的来源进行了模型计算,图9展示了来源解析结果。间/对-二甲苯等是工业上常用的原料,广泛用于涂料、树脂、染料和油墨等行业做溶剂;同时也用于医药、炸药和农药等行业做合成单体或溶剂;也可作为高辛烷值汽油组分,是有机化工的重要原料。本次解

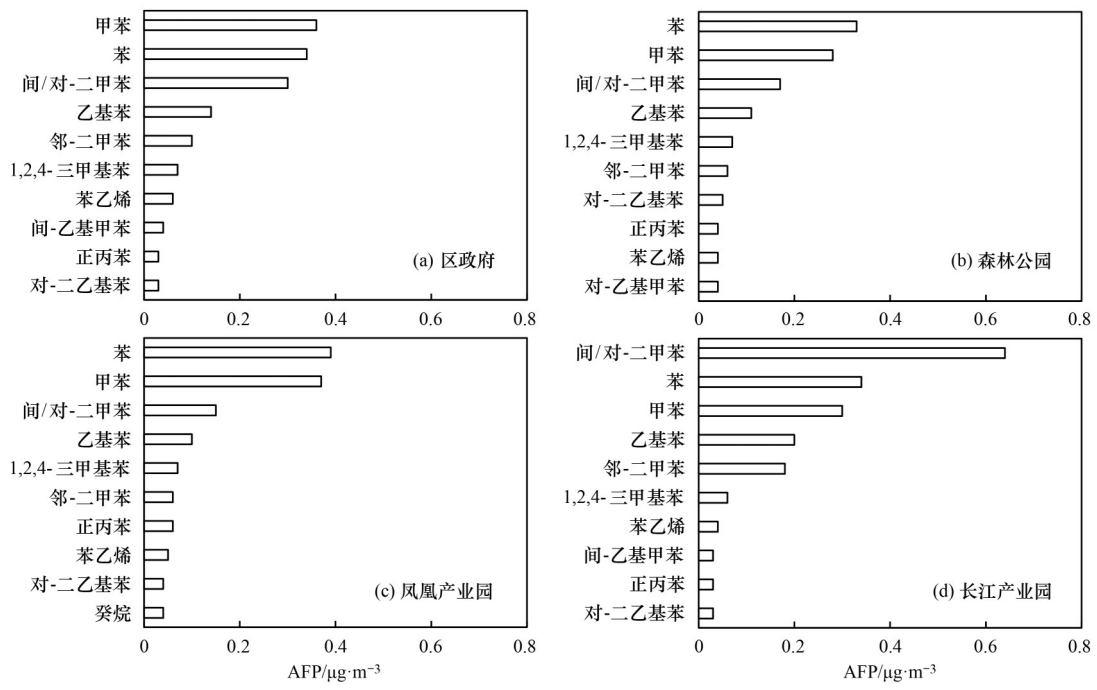


图8 咸宁市离线监测期间各站点 VOCs 二次有机气溶胶生成潜势 (AFP) 排名前 10 的组分

Fig. 8 Top ten components of VOCs secondary organic aerosol generation potential (AFP) by site during offline monitoring in Xianning

析结果与实际情况十分吻合.结果显示间/对-二甲苯主要来自溶剂使用(79.4%),部分来自机动车尾气(11.2%)和工业排放(9.1%).说明为了控制咸宁 VOCs 的 SOA 生成,应关注溶剂使用源.

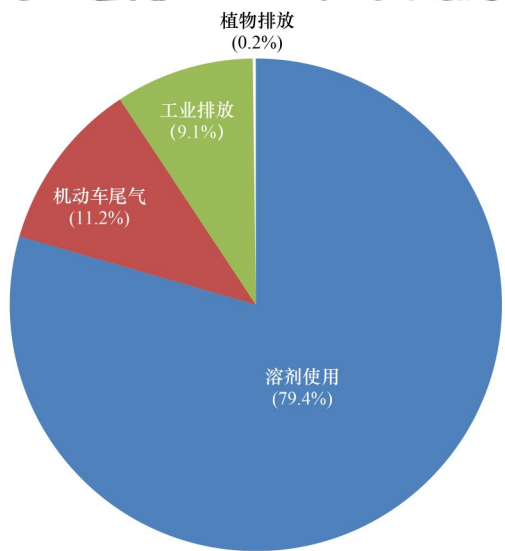


图9 间/对-二甲苯来源解析

Fig. 9 Explanation of m/p-xylene sources

3 结论

(1)咸宁市细颗粒物中主要化学成分以水溶性无机盐和含碳组分为主,在冬季 NO₃⁻ 浓度贡献较大,在夏季 SO₄²⁻ 浓度贡献较大.一次解析方面,二次气溶胶对 PM_{2.5} 浓度的贡献最大,对 PM_{2.5} 浓度的总贡献在 45% 以上.随着防控减排的实施,二次组分占比

上升,二次源解析对进一步降低 PM_{2.5} 污染具有重要意义.二次解析方面,工业源、机动车源及电厂对 PM_{2.5} 浓度的贡献最大,就治理而言,需要在调整能源结构的同时全面开展机动车和工厂等的综合治理.

(2)通过 VOCs 离线监测的分析结果,咸宁市芳香烃对于 SOA 生成潜势的贡献最为显著,其中关键组分为苯、甲苯、间/对-二甲苯和乙基苯.对关键组分的来源解析发现溶剂使用是关键来源.

参考文献:

[1] 吴国平, 胡伟, 滕恩江, 等. 我国四城市空气中 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 的污染水平[J]. 中国环境科学, 1999, 19(2): 133-137.
Wu G P, Hu W, Teng E J, et al. PM_{2.5} and PM₁₀ pollution level in the four cities in China[J]. China Environmental Science, 1999, 19(2): 133-137.

[2] 任阵海, 万本太, 苏福庆, 等. 当前我国大气环境质量的几个特征[J]. 环境科学研究, 2004, 17(1): 1-6.
Ren Z H, Wan B T, Su F Q, et al. Several characteristics of atmospheric environmental quality in china at present[J]. Research of Environmental Sciences, 2004, 17(1): 1-6.

[3] 张玉洁, 冯俊杰, 张武, 等. 青岛市大气颗粒物污染特征及潜在来源分析[J]. 高原气象, 2023, 42(1): 244-256.
Zhang Y J, Feng J J, Zhang W, et al. Analysis of pollution characteristics and potential sources of atmospheric particulate matter in Qingdao [J]. Plateau Meteorology, 2023, 42 (1) : 244-256.

[4] 盛丹睿, 温小虎, 冯起, 等. 2018年春季西北五省省会城市大气质量与健康风险评价[J]. 高原气象, 2021, 40(1): 200-208.
Sheng D R, Wen X H, Feng Q, et al. Air quality and health risk assessment of capital cities in five northwest provinces of China in the Spring of 2018 [J]. Plateau Meteorology, 2021, 40 (1) : 200-208.

[5] 周述学, 邓学良, 王传辉, 等. 华东 2018 年冬季一次典型雾霾

- 过程的气象成因分析[J]. 高原气象, 2020, **39**(5): 1110-1121.
- Zhou S X, Deng X L, Wang C H, *et al.* Analysis of meteorological conditions for a typical fog and haze event over Eastern China in Winter of 2018 [J]. Plateau Meteorology, 2020, **39**(5): 1110-1121.
- [6] 胡敏, 唐倩, 彭剑飞, 等. 我国大气颗粒物来源及特征分析[J]. 环境与可持续发展, 2011, **36**(5): 15-19.
- Hu M, Tang Q, Peng J F, *et al.* Study on characterization and source apportionment of atmospheric particulate matter in China [J]. Environment and Sustainable Development, 2011, **36**(5): 15-19.
- [7] 张娟, 王炜, 赵颖. 北京市延庆区 PM_{2.5} 中主要水溶性无机离子特征及来源解析[J]. 环境工程技术学报, 2020, **10**(2): 173-182.
- Zhang J, Wang W, Zhao Y. Characteristics and source analysis of water-soluble inorganic ions in PM_{2.5} in Yanqing District, Beijing [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2020, **10**(2): 173-182.
- [8] 王鑫龙, 李星, 杨兴川, 等. 天津市 PM_{2.5} 水溶性无机离子污染特征与来源分析[J]. 环境污染与防治, 2019, **41**(10): 1223-1226.
- Wang X L, Li X, Yang X C, *et al.* The pollution characteristics and source analysis of PM_{2.5} water-soluble inorganic ions in Tianjin [J]. Environmental Pollution and Control, 2019, **41**(10): 1223-1226.
- [9] Xie Y Z, Liu Z R, Wen T X, *et al.* Characteristics of chemical composition and seasonal variations of PM_{2.5} in Shijiazhuang, China: Impact of primary emissions and secondary formation [J]. Science of the Total Environment, 2019, **677**: 215-229.
- [10] 周敏. 上海大气 PM_{2.5} 来源解析对比: 基于在线数据运用 3 种受体模型[J]. 环境科学, 2020, **41**(5): 1997-2005.
- Zhou M. Comparison of three receptor models for source apportionment of PM_{2.5} in Shanghai: using hourly resolved PM_{2.5} chemical composition data [J]. Environmental Science, 2020, **41**(5): 1997-2005.
- [11] 邱晨晨, 宫海星, 于兴娜, 等. 南京江北新区 PM_{2.5} 中水溶性离子的季节特征和来源解析[J]. 环境科学学报, 2021, **41**(5): 1718-1726.
- Qiu C C, Gong H X, Yu X N, *et al.* Seasonal characteristics and source apportionment of water-soluble ions in PM_{2.5} of Nanjing Jiangbei New Area [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, **41**(5): 1718-1726.
- [12] 饶永才, 冯春莉, 邓国庆, 等. 2019—2021 年徐州市大气细颗粒物化学组成特征及来源解析[J]. 中国环境监测, 2023, **39**(2): 158-168.
- Rao Y C, Feng C L, Deng G Q, *et al.* Chemical composition characteristics and analysis of PM_{2.5} in Xuzhou from 2019 to 2021 [J]. Environmental Monitoring in China, 2023, **39**(2): 158-168.
- [13] 周菁清, 余磊, 陈书鑫, 等. 浙江省大气颗粒物 PM_{2.5} 化学组分污染特征分析[J]. 环境科学, 2023, **44**(3): 1297-1309.
- Zhou J Q, Yu L, Chen S X, *et al.* Pollution characteristics of PM_{2.5} chemical composition in Zhejiang province [J]. Environmental Science, 2023, **44**(3): 1297-1309.
- [14] 刘叶新, 陈伟华, 王雪梅, 等. 广州 PM_{2.5} 化学组分特征及其与气象因子的关系[J]. 环境科学学报, 2019, **39**(1): 53-63.
- Liu Y X, Chen W H, Wang X M, *et al.* Chemical composition of PM_{2.5} and its relations with meteorological factors in Guangzhou [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, **39**(1): 53-63.
- [15] 刘倬诚, 牛月圆, 吴婧, 等. 山地型城市冬季大气重污染过程特征及成因分析[J]. 环境科学, 2021, **42**(3): 1306-1314.
- Liu Z C, Niu Y Y, Wu J, *et al.* Characteristics and cause analysis of heavy air pollution in a mountainous city during winter [J]. Environmental Science, 2021, **42**(3): 1306-1314.
- [16] 吴安南, 黄小娟, 何仁江, 等. “大气十条”实施结束川南城市群秋季霾污染过程中水溶性离子特征[J]. 环境科学, 2022, **43**(3): 1170-1179.
- Wu A N, Huang X J, He R J, *et al.* Characteristics of water-soluble ions in an autumn haze process in the Southern Sichuan Urban agglomeration after the implementation of China's air pollution prevention and control action plan [J]. Environmental Science, 2022, **43**(3): 1170-1179.
- [17] 杨童, 杨显玉, 阮温馨, 等. 2021 年冬季四川盆地 PM_{2.5} 重污染事件成因及来源解析[J]. 中国环境科学, 2023, **43**(11): 5633-5644.
- Yang T, Yang X Y, Ruan W X, *et al.* Attribution and source apportionment of a severe PM_{2.5} episode in winter 2021 over the Sichuan Basin [J]. China Environmental Science, 2023, **43**(11): 5633-5644.
- [18] 陈进, 袁畅, 陈雨, 等. 武汉市城区 PM_{2.5} 碳质组分特征及来源解析[J]. 环境科学与技术, 2022, **45**(11): 28-34.
- Chen J, Yuan C, Chen Y, *et al.* Pollution characteristics and sources analysis of carbonaceous aerosols in PM_{2.5} in Wuhan [J]. Environmental Science & Technology, 2022, **45**(11): 28-34.
- [19] 谷超, 徐涛, 马超, 等. 伊犁河谷核心区春季 PM_{2.5} 组分特征及来源解析[J]. 环境科学, 2023, **44**(4): 1899-1910.
- Gu C, Xu T, Ma C, *et al.* Characteristics and source apportionment of PM_{2.5} in the core area of Ili river valley in spring [J]. Environmental Science, 2023, **44**(4): 1899-1910.
- [20] 潘成珂, 黄韬, 高宏, 等. 张掖市城区大气细颗粒物 PM_{2.5} 的化学组成及来源解析[J]. 环境科学, 2022, **43**(12): 5367-5375.
- Pan C K, Huang T, Gao H, *et al.* Chemical composition and source apportionment of PM_{2.5} in Zhangye city [J]. Environmental Science, 2022, **43**(12): 5367-5375.
- [21] Liu H J, Tian H Z, Zhang K, *et al.* Seasonal variation, formation mechanisms and potential sources of PM_{2.5} in two typical cities in the Central Plains Urban Agglomeration, China [J]. Science of the Total Environment, 2019, **657**: 657-670.
- [22] 李红亮, 陶杰, 李岚清, 等. 新乡市大气 PM_{2.5} 中水溶性离子污染特征及其来源解析[J]. 环境工程, 2023, **41**(8): 117-126.
- Li H L, Tao J, Li L Q, *et al.* Pollution characteristics and source apportionment of water-soluble ions in PM_{2.5} in Xinxiang [J]. Environmental Engineering, 2023, **41**(8): 117-126.
- [23] 张勇, 陈卓, 董娴, 等. 云贵高原城市 PM_{2.5} 中水溶性离子的污染特征[J]. 环境科学与技术, 2023, **46**(4): 100-109.
- Zhang Y, Chen Z, Dong X, *et al.* Pollution characteristic of water-soluble ions in PM_{2.5} in cities of Yunnan-Guizhou Plateau [J]. Environmental Science & Technology, 2023, **46**(4): 100-109.
- [24] 牛红亚, 高娜娜, 鲍晓磊, 等. 2016~2020 年邯郸市冬季 PM_{2.5} 污染特征与来源解析[J]. 环境科学, 2023, **44**(12): 6463-6473.
- Niu H Y, Gao N N, Bao X L, *et al.* Characteristics and sources of PM_{2.5} pollution in winter of Handan City from 2016 to 2020 [J]. Environmental Science, 2023, **44**(12): 6463-6473.
- [25] 陈巧, 谷超, 徐涛, 等. 伊犁河谷夏季 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 中水溶性无机离子浓度特征和形成机制[J]. 环境科学, 2022, **43**(11): 5009-5017.
- Chen Q, Gu C, Xu T, *et al.* Characterization and formation mechanism of water-soluble inorganic ions in PM_{2.5} and PM₁₀ in Summer in the urban agglomeration of the Ili River valley [J]. Environmental Science, 2022, **43**(11): 5009-5017.

- [26] 夏瑞, 谭健, 汪琼琼, 等. 基于 PMF 的武汉市大气细颗粒物消光来源解析[J]. 中国环境科学, 2023, **43**(1): 7-19.
Xia R, Tan J, Wang Q Q, *et al.* PMF model based atmospheric aerosol light extinction budget source apportionment study in Wuhan[J]. China Environmental Science, 2023, **43**(1): 7-19.
- [27] 刘鑫会, 朱仁成, 金博强, 等. 基于隧道测试的机动车 VOCs 排放特征及源解析[J]. 环境科学, 2022, **43**(4): 1777-1787.
Liu X H, Zhu R C, Jin B Q, *et al.* Characteristics and source apportionment of vehicular VOCs emissions in a tunnel study[J]. Environmental Science, 2022, **43**(4): 1777-1787.
- [28] Turpin B J, Huntzicker J J. Identification of secondary organic aerosol episodes and quantitation of primary and secondary organic aerosol concentrations during SCAQS [J]. Atmospheric Environment, 1995, **29**(23): 3527-3544.
- [29] Pandis S N, Harley R A, Cass G R, *et al.* Secondary organic aerosol formation and transport[J]. Atmospheric Environment. Part A. General Topics, 1992, **26**(13): 2269-2282.
- [30] 陈天增, 刘俊, 马庆鑫, 等. 复合污染条件下人为源 VOCs 的 SOA 生成研究进展[J]. 环境科学, 2023, **44**(3): 1201-1213.
Chen T Z, Liu J, Ma Q X, *et al.* Research progress of SOA formation from anthropogenic VOCs under complex pollution condition[J]. Environmental Science, 2023, **44**(3): 1201-1213.
- [31] 陈耿, 李瑞瑜, 陈春贻, 等. 典型大气细颗粒物与臭氧复合污染过程中挥发性有机物的贡献及来源[J]. 环境污染与防治, 2022, **44**(9): 1222-1227.
Chen G, Li R Y, Chen C Y, *et al.* VOCs contribution and sources of typical atmospheric PM_{2.5} and O₃ composite pollution process[J]. Environmental Pollution & Control, 2022, **44**(9): 1222-1227.
- [32] 尤能华, 袁修彬, 黄彦, 等. 咸宁市大气颗粒物污染特征及气象因子影响研究[J]. 绿色科技, 2020, (18): 88-89.
- [33] 任俊宇, 朱宽广, 谢旻, 等. 咸宁市大气臭氧敏感性和污染来源解析[J]. 中国环境科学, 2021, **41**(9): 4060-4068.
Ren J Y, Zhu K G, Xie M, *et al.* Analysis of the ozone sensitivity and source appointment in Xianning, Hubei province[J]. China Environmental Science, 2021, **41**(9): 4060-4068.
- [34] 黄凡. 武汉市季节性复合大气污染特征及来源解析[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2019.
- [35] HJ 759-2015 环境空气 挥发性有机物的测定 罐采样/气相色谱-质谱法[S].
- [36] Toxic Organics-15 (TO-15), Compendium of Methods for the Determination of Toxic Organic Compounds in Ambient Air, Second Edition: Determination of Volatile Organic Compounds (VOCs) in Air Collected in Specially-Prepared Canisters and Analyzed by Gas Chromatography/Mass Spectrometry (GC/MS) [S].
- [37] HJ/T 193-2005 环境空气质量自动监测技术规范[S].
- [38] Miller M S, Friedlander S K, Hidy G M. A chemical element balance for the Pasadena aerosol [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 1972, **39**(1): 165-176.
- [39] Cooper J A, Watson J G Jr. Receptor oriented methods of air particulate source apportionment [J]. Journal of the Air Pollution Control Association, 1980, **30**(10): 1116-1125.
- [40] 冯小琼, 彭康, 凌镇浩, 等. 香港地区 2005—2010 年 VOCs 污染来源解析及特征研究[J]. 环境科学学报, 2013, **33**(1): 173-180.
Feng X Q, Peng K, Ling Z H, *et al.* Source apportionments and characteristics of VOCs from 2005 to 2010 in Hong Kong[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, **33**(1): 173-180.
- [41] Grosjean D. *In situ* organic aerosol formation during a smog episode: estimated production and chemical functionality [J]. Atmospheric Environment. Part A. General Topics, 1992, **26**(6): 953-963.
- [42] 东梅, 黄茜, 陈璞珑, 等. 无锡市细颗粒物理化特征和来源解析研究[J]. 南京大学学报(自然科学), 2016, **52**(6): 1029-1040.
Dong M, Huang Q, Chen P L, *et al.* Chemical characteristics and source apportionment of fine particles in Wuxi [J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 2016, **52**(6): 1029-1040.
- [43] 包贞, 冯银厂, 焦荔, 等. 杭州市大气 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 污染特征及来源解析[J]. 中国环境监测, 2010, **26**(2): 44-48.
Bao Z, Feng Y C, Jiao L, *et al.* Characterization and source apportionment of PM_{2.5} and PM₁₀ in Hangzhou [J]. Environmental Monitoring in China, 2010, **26**(2): 44-48.
- [44] 周锦岫. 南昌市 PM_{2.5} 的组分特征及来源解析[D]. 南昌: 南昌大学, 2021.
- [45] 陈明, 汪琼琼, 余欢. 武汉市大气细颗粒物源解析综述[J]. 环境科学与技术, 2023, **46**(6): 197-202.
Chen M, Wang Q Q, Yu H. Analysis of atmospheric fine particulate matter sources in Wuhan: a review[J]. Environmental Science & Technology, 2023, **46**(6): 197-202.
- [46] Zheng X D, Ren J, Hao Y F, *et al.* Weekend-weekday variations, sources, and secondary transformation potential of volatile organic compounds in urban Zhengzhou, China [J]. Atmospheric Environment, 2023, **300**, doi: 10.1016/J.ATMOSENV. 2023. 119679.

CONTENTS

Spatio-temporal Evolution, Dynamic Transition, and Convergence Trend of Urban Carbon Emission Intensity in China	YANG Qing-ke, WANG Lei, ZHU Gao-li, <i>et al.</i> (1869)
Spatio-temporal Evolution and Trend Prediction of Transport Carbon Emission Efficiency	ZHENG Yan, JIANG Xue-mei, XIAO Yu-jie (1879)
Research on Carbon Emission Decoupling Factors Based on STIRPAT Model and LMDI Decomposition	ZHANG Jiang-yan (1888)
Carbon Peak Pathways of Industrial Parks Based on the LEAP Model: A Case Study of a National Development Zone in Nanjing	LI Hui-peng, LI Li, YIN Yin, <i>et al.</i> (1898)
Accounting and Analysis of Carbon Emissions in Universities: A Case Study of Beijing A University	CAO Rui, FENG Li, ZHANG Li-qiu (1907)
Synergy Effects and Driving Factors of Pollution and Carbon Emission Reduction in Manufacturing Industry in Beijing	YU Shan, HAN Yu-hua, MU Jie, <i>et al.</i> (1917)
Carbon Emissions Trading Prices and Total Factor Productivity: Evidence from China	WU Xue-ping (1926)
Analysis of Spatio-temporal Distribution Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} and PM ₁₀ in Chinese Cities	LI Jiang-su, DUAN Liang-rong, ZHANG Tian-jiao (1938)
Spatial-temporal Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} and Ozone in the Border Area of Jiangsu, Anhui, Shangdong, and Henan from 2017 to 2021	CHEN Wei, XU Xue-zhe, LIU Wen-qing (1950)
Analysis of the Characteristics and Causes of PM _{2.5} and O ₃ Pollution in Xi'an During the Epidemic Lockdown Period	YUAN Xiao-hong, ZHANG Qiang, LI Qi, <i>et al.</i> (1963)
PM _{2.5} Chemical Composition and Spatial Variability in the Five Cities of Southern Jiangsu During Fall and Winter	FENG Wei, DING Feng, SHANG Yue, <i>et al.</i> (1975)
Source Apportionment of Fine Particles in Xianning, Hubei	LUO Yi, ZHU Kuan-guang, CHEN Pu-long, <i>et al.</i> (1983)
Spillover Benefits of Ammonia Emission Reduction in Xingtai Area to the Improvement of Atmospheric PM _{2.5} Concentration in the Beijing-Tianjin-Hebei Region	BIAN Ze-jun, WEN Chao-yu, LANG Jian-lei, <i>et al.</i> (1994)
Characteristics, Risk Assessment, and Sources of the Polluted Metallic Elements in PM _{2.5} During Winter in Liaocheng City	ZHANG Jing-qiao, ZHU Yao, CAO Ting, <i>et al.</i> (2003)
Composition Characteristics of Typical VOCs Sources in the Highland City of Lhasa	GUO Shu-zheng, YE Chun-xiang, LIN Wei-li, <i>et al.</i> (2011)
VOCs Pollution Characteristics and Health Risk Assessment in Typical Industrial Parks in Beijing: Environmental Impact of High and New Technology Industries	WANG Jie, YAO Zhen, WANG Min-yan, <i>et al.</i> (2019)
Analysis of a Typical Ozone Pollution Process in the Chengdu Plain Under the Influence of High Temperature Extremes	LEI Li-juan, ZHANG Yi, LUO Yi-na, <i>et al.</i> (2028)
Presence, Behavior, and Risk of Antiviral Drugs in the Aqueous Environment	GE Lin-ke, LI Xuan-yan, CAO Sheng-kai, <i>et al.</i> (2039)
Spatio-temporal Variation and Probability Health Risk of Heavy Metals in Surface Water of Xiaolangdi Reservoir in the Yellow River	WANG Liang, DENG Xue-jiao, WANG Xiao-lei, <i>et al.</i> (2054)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Strontium Enrichment of the Duoqu River Basin in Eastern Xizang	LI Jing-jie, LIAN Sheng, WANG Ming-guo, <i>et al.</i> (2067)
Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation and Its Moisture Sources in the Inland Regions of Northwest China	ZHANG Yan-yan, XIN Cun-lin, GUO Xiao-yan, <i>et al.</i> (2080)
Recharge Source and Evolution Process of Karst Groundwater in Tai'an Urban Area Based on Hydrochemistry and Hydrogen and Oxygen Isotopes	MENG Ling-hua (2096)
Hydrochemical Characteristics and Influencing Factors of Surface Water and Groundwater in the Mountainous Area of Danjiang River Basin	ZHANG Zi-yan, FU Yong-peng, WANG Ning-tao, <i>et al.</i> (2107)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Groundwater in Yuanyangchi Irrigation Area, Jinta Basin	WANG Xiao-yan, HAN Shuang-bao, ZHANG Meng-nan, <i>et al.</i> (2118)
Hydrochemical Characteristics and Health Risk Assessment of Shallow Groundwater in the Plain Zone of Deyang City	LIU Nan, CHEN Meng, GAO Dong-dong, <i>et al.</i> (2129)
Spatial and Temporal Distribution of Microplastics in the Sediments of Typical Urban River Network	XU Wan-lu, FAN Yi-fan, QIAN Xin (2142)
Construction of Nitrogen Emission Inventory at Sub-basin Scale and Analysis of Key Sources in Fuxian Lake Watershed	WANG Yan-jie, LIANG Qi-bin, WANG Yan-xia, <i>et al.</i> (2150)
Preparation of Lanthanum Crosslinked Calcium Peroxide/Sepiolite/Sodium Alginate Composite Hydrogels and Their Elimination Performance for Endogenous Phosphorus	QU Si-tong, SHAN Su-jie, WANG Chong-ming, <i>et al.</i> (2160)
Formation Mechanism, Structural Characteristics of Ultrafine Mineral Particles, and Their Environmental Effects	LIU Zhen-hai, ZHANG Zhan-hua, YUAN Yu-xin, <i>et al.</i> (2171)
Research Progress in Application of Biochar-immobilized Bacteria Composites in Environmental Remediation	SUN Shu-yu, HUANG Meng-xin, KONG Qiang, <i>et al.</i> (2185)
Effect of Microplastics on Ammonia Nitrogen Adsorption by Zeolite in Water and Its Mechanism	LIAN Jian-jun, XIE Shi-ting, WU Pei, <i>et al.</i> (2195)
Mechanism of Ultraviolet Aging Effect on the Adsorption of Ciprofloxacin by Nano-biochar	MA Feng-feng, XUE Zhi-yi, ZHAO Bao-wei (2203)
Response of Phytoplankton Communities and Environmental Factors Under the Influence of Land Use in the Wuding River Basin	GUO Shan-song, HU En, DING Yi-tong, <i>et al.</i> (2211)
Bacterial Community Diversity and Functional Gene Abundance of Culturable Bacteria in the Wetland of Poyang Lake	YU Jiang, WANG Chun, LONG Yong, <i>et al.</i> (2223)
Bacterial Community Structure and Its Relationship with Heavy Metals in Sediments of Diannong River	LIU Shuang-yu, MENG Jun-jie, QIU Xiao-cong, <i>et al.</i> (2233)
Impacts of Treated Wastewater on Bacterial and Fungal Microbial Communities in Receiving Rivers	GUO You-shun, YU Zhong, HAO Wen-bin, <i>et al.</i> (2246)
Metagenomics Reveals the Characteristics and Functions of Bacterial Community in the Advanced Wastewater Treatment Process	HU Jian-shuang, WANG Yan, ZHOU Zheng, <i>et al.</i> (2259)
Spatio-temporal Characteristics of Habitat Quality and Natural-human Driven Mechanism in Dabie Mountain Area	ZHENG Ya-ping, ZHANG Jun-hua, TIAN Hui-wen, <i>et al.</i> (2268)
Hyperspectral Inversion of Soil Organic Matter Content Based on Continuous Wavelet Transform, SHAP, and XGBoost	YE Miao, ZHU Lin, LIU Xu-dong, <i>et al.</i> (2280)
Effects of Straw Retention, Film Mulching, and Nitrogen Input on Soil Quality in Dryland Wheat Field	YE Zi-zhuang, WANG Song-yan, LU Xiao, <i>et al.</i> (2292)
Effects of Long-term Application of Organic Fertilizer on the Occurrence and Migration Characteristics of Soil Microplastics	WANG Chang-yuan, MA Xiao-chi, GUO De-jie, <i>et al.</i> (2304)
Effect of Different Soil Salinities on N ₂ O Emission: A Meta-analysis	HUANG Yi-hua, SHE Dong-li, SHI Zhen-qi, <i>et al.</i> (2313)
Assessment and Prediction of Carbon Storage Based on Land Use/Land Cover Dynamics in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	ZHENG Hui-ling, ZHENG Hui-feng (2321)
Simulation of Temporal and Spatial Changes in Ecosystem Carbon Storage in Funiu Mountains Based on InVEST Model	ZHANG Zhe, SHI Zhen-qin, ZHU Wen-bo, <i>et al.</i> (2332)
Relationship Between Microbial Nutrient Limitation and Soil Organic Carbon Fraction During Shelterbelts Construction	XU Feng-jing, HUANG Yi-mei, HUANG Qian, <i>et al.</i> (2342)
Characteristics and Driving Forces of Organic Carbon Mineralization in Brown Soil with Long-term Straw Returning	ZHAO Yu-hang, YIN Hao-kai, HU Xue-chun, <i>et al.</i> (2353)
Effects of Winter Green Manure Mulching on Soil Aggregates, Organic Carbon, and AMF Diversity	LU Ze-rang, CHEN Jia-yu, LI Zhi-xian, <i>et al.</i> (2363)
Spatial and Temporal Distribution of Nitrogen in the Liaohe River Basin and Its Responses to Land Use and Rainfall	ZHOU Bo, LI Xiao-guang, TONG Si-chen, <i>et al.</i> (2373)
Nitrous Oxide Emissions from Ponds in Typical Agricultural Catchment with Intensive Agricultural Activity	ZHANG Xin-yue, XIAO Qi-tao, XIE Hui, <i>et al.</i> (2385)
Effects of Biochar Combined with Different Types of Nitrogen Fertilizers on Denitrification Bacteria Community in Vegetable Soil	LIU Xiao-wan, LIU Xing-ren, GAO Shang-jie, <i>et al.</i> (2394)
Investigation of Soil Microbial Characteristics During Stand Development in <i>Pinus tabulaeformis</i> Forest in Taiyue Mountain	MA Yi-shu, CAO Ya-xin, NIU Min, <i>et al.</i> (2406)
Simulation of Heavy Metal Content in Soil Based on Sparse Sample Sites	ZHANG Jia-qi, PAN Yu-chun, GAO Shi-chen, <i>et al.</i> (2417)
Identification Priority Source of Heavy Metal Pollution in Greenspace Soils Based on Source-specific Ecological and Human Health Risk Analysis in the Yellow River Custom Tourist Line of Lanzhou	LI Jun, LI Xu, LI Kai-ming, <i>et al.</i> (2428)
Heavy Metal Accumulation and Assessment of Potential Ecological Risk Caused by Soil pH Changes in Different Types of Purple Soils in Southwest China	ZHANG Hai-lin, ZHANG Yu, WANG Ding, <i>et al.</i> (2440)
Assessment and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Arable Land Around an Iron Ore Mining Area in Chongqing	LIAO Ze-yuan, LI Jie-qin, SHEN Zhi-jie, <i>et al.</i> (2450)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils and Crops Around Metal Mines	WEI Hong-bin, LUO Ming, XIANG Lei, <i>et al.</i> (2461)
Effect of Red Mud-based Nano Zero-valent Iron on Remediation of Polymetallic Contaminated Soil	LIU Long-yu, YANG Shi-li, ZHAO Huang-shi-yu, <i>et al.</i> (2474)
Effects of Zinc Application on Cadmium Accumulation in Alkaline Soil-Wheat Seeding Systems	ZHANG Yao, WANG Tian-qi, NIU Shuo, <i>et al.</i> (2480)