

北京城区PM_{2.5}各组分污染特征及来源分析

安欣欣, 曹阳, 王琴, 富佳明, 王陈婧, 景宽, 刘保献

PM_{2.5} 化学组成

SO₄²⁻ NH₄⁺ NO₃⁻
元素碳 Cl⁻ 有机物 地壳元素

源解析

二次
颗粒物

机动车

扬尘

工业

燃煤

生物质
燃烧



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年5月

第43卷 第5期
Vol.43 No.5

目次

北京城区 PM _{2.5} 各组分污染特征及来源分析	安欣欣, 曹阳, 王琴, 富佳明, 王陈婧, 景宽, 刘保献 (2251)
基于时空混合效应模型的京津冀 PM _{2.5} 浓度变化模拟	范丽行, 杨晓辉, 宋春杰, 李梦诗, 段继福, 王卫, 李夫星, 李伟妙 (2262)
2000~2018 年京津冀城市群 PM _{2.5} 时空演变及其与城市扩张的关联	赵安周, 相恺政, 刘宪锋, 张向蕊 (2274)
海-陆大气交汇作用下青岛冬季大气 PM _{2.5} 污染特征与来源解析	虞雄, 杨凌霄, 张婉, 齐安安, 王滢铭, 王鹏程, 黄琦, 赵彤, 张雄飞, 徐鹏, 张天琪, 王文兴 (2284)
硫酸盐非均相机制对颗粒物污染的影响: 上海典型污染事件的 WRF-Chem 模拟	张茹涵, 张皓然, 冯伟航, 汤克勤, 马亚平, 王红丽, 黄成, 胡建林, 张宏亮, 李楠 (2294)
省会城市不同功能区大气 PM _{2.5} 化学组分季节变化及来源分析	孙友敏, 范晶, 徐标, 李彦, 韩红, 张桂芹 (2304)
太原市冬季不同污染程度下 PM _{2.5} 的化学组成、消光特征及氧化潜势	任娇, 赵荣荣, 王铭, 张欢欢, 尹诗杰, 薛永刚 (2317)
郑州市冬季大气 PM _{2.5} 金属元素来源及健康风险评价	姚森, 王乾恒, 薛妍, 史来文, 张俊美, 杨书申 (2329)
淄博市冬季 PM _{2.5} 载带金属元素污染特征、生态风险评价及来源分析	白雯宇, 徐勃, 郭丽瑶, 殷宝辉, 马银红, 李丽明, 杨文, 赵雪艳 (2336)
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	贺博文, 聂赛赛, 李仪琳, 郭睿瑶, 姚波, 崔建升, 冯亚平, 王帅, 侯晓松 (2343)
珠三角大气中二噁英污染水平与区域迁移	付建平, 谢丹平, 黄锦琼, 杨艳艳, 冯桂贤, 周长风, 廖海婷, 青亮, 张漫雯, 吴明亮, 张素坤 (2355)
华北平原南部农村地区黑碳气溶胶浓度及来源	张玲, 孔少飞, 郑煌, 胡尧, 曾昕, 程溢, 祁士华 (2363)
基于模式过程分析技术天津地区 PM _{2.5} 污染气象成因分析	郝团, 蔡子颖, 韩素芹, 杨旭, 樊文雁, 姚青, 邱晓滨 (2373)
基于排放量和大气反应活性的 VOCs 污染源分级控制	陈鹏, 张月, 邢敏, 李珊珊 (2383)
基于复杂网络的中国臭氧拓扑特征	菅娜, 陈建华, 李冬, 王迪, 薛志钢 (2395)
基于前体物多情景排放的兰州市 2030 年夏季臭氧预测	陈天雷, 吴敏, 潘成珂, 常莉敏, 李洪, 刘鹏, 高宏, 黄韬, 马建民 (2403)
基于源反演和气溶胶同化方法天津空气质量模式预报能力改进	蔡子颖, 唐邈, 肖致美, 杨旭, 朱玉强, 韩素芹, 徐虹, 邱晓滨 (2415)
基于空气质量监测数据的钢铁行业污染源识别方法	石耀耀, 胡京南, 褚咏昕, 段青春, 胡丙鑫, 殷丽娜, 吕玲玲 (2427)
重污染天气应对“绩效分级、差异化管控”措施首次实践效果后评估	曾景海, 王灿 (2436)
黄河流域水污染风险分区	周夏飞, 曹国志, 於方, 杨威杉, 徐泽升 (2448)
黄河流域甘肃段工业行业水污染物空间排放特征	李雪迎, 杨曦, 乔琦, 刘丹丹, 张玥, 赵若楠, 白璐 (2459)
黄河沉积物重金属时空分布与污染评价	王韬轶, 潘保柱, 韩语, 王雨竹, 李晨辉, 杜蕾 (2467)
APCS-MLR 结合 PMF 模型解析厦门杏林湾近郊流域沉积物金属来源	沈宸宇, 闫钰, 于瑞莲, 胡恭任, 崔建勇, 颜妍, 黄华斌 (2476)
河流底泥 DOM、营养盐与重金属空间分异特征及响应关系	肖艳春, 于会彬, 宋永会 (2489)
太原市汾河河岸带土壤重金属分布特征、评价与来源解析	胡杰, 赵心语, 王婷婷, 苟奎贤, 王春玲 (2500)
洪泽湖溶解态有机质与重金属汞的结合特性	胡斌, 王沛芳, 张楠楠, 包天力, 金秋彤 (2510)
富营养化驱动下西凉湖百年生态演化轨迹	郑佳楠, 徐敏, 郑文秀, 朱可欣, 王荣, 张恩楼 (2518)
基于 DGT 技术的黄河上游典型水库沉积物氮磷释放与污染源解析	马玉坤, 朱翔, 庞晴晴, 孔明, 韩天伦, 彭福全, 谢磊, 汪龙眠, 徐斌, 何斐 (2527)
暴雨前后河南北部河流水质分异特征及其污染源解析	张彦, 邹磊, 梁志杰, 姜明, 李平, 黄仲冬, 齐学斌 (2537)
鄱阳湖流域水葫芦 (<i>Eichhornia crassipes</i>) 对水体微塑料的吸附截留效应	李文刚, 吴希恩, 简敏菲, 刘淑丽, 刘海球, 丁惠君 (2548)
太湖塑料添加剂时空分布和生态风险评价	刘舒娇, 丁剑楠, 石波哲, 张军毅, 庄严, 邹华 (2557)
骆马湖表层沉积物微塑料的分布、来源及储量	姚明轩, 白雪, 徐振佳, 李凤杰, 陆滢, 李畅, 华祖林 (2566)
太湖不同介质中磷的污染特征及其治理启示	蔡梅, 陆志华, 王元元, 钱旭 (2575)
辽河四平段流域河流沉积物微生物群落多样性和结构分析	李鹏洋, 安启睿, 王新皓, 孙思宇, 李青乾, 郑娜 (2586)
面源污染诱导嘉陵江沉积物中细菌群落结构与功能异变	薛玉琴, 徐飞, 刘坤和, 王佳颖, 竹兰萍, 朱志豪, 张拓 (2595)
微塑料对沉积物细菌群落组成和多样性的影响	李汶璐, 王志超, 杨文煊, 张博文, 李卫平 (2606)
白洋淀冬季沉积物好氧反硝化菌垂直分布特征及群落构建	张甜娜, 陈召莹, 张紫薇, 周石磊, 孟佳靖, 陈哲, 张一凡, 董宛佳, 崔建升 (2614)
人工诱导水库分层水体提前混合对细菌群落结构和代谢活性的影响	高悦, 黄廷林, 李楠, 齐允之, 司凡, 杨斌 (2624)
鄱阳湖典型区铜锈环螺体内微塑料分布特征	江为群, 胡启武, 简敏菲, 邹龙, 刘淑丽 (2633)
负载多壁碳纳米管的多孔 Ti/SnO ₂ -Sb-Ni 电极电催化氧化双酚 A	符远航, 刘安迪, 黄伟斌, 唐彬彬, 张进忠 (2640)
磁性 Mn _{0.6} Zn _{0.4} Fe ₂ O ₄ 催化 H ₂ O ₂ 降解亚甲基蓝效能及机制	徐冬莹, 余静, 郝旗, 杨迎春, 方淑红 (2650)
两种纳米颗粒对沸石吸附环丙沙星的影响	蒋兰翠, 孟昭福, 刘贤, 刘欣, 王新欣, 曹雪雯 (2662)
AMD 污泥复合材料吸附 As(V) 的机制及其影响因素	张亚辉, 张瑞雪, 吴攀, 陈世万, 杨艳, 安丽, 傅渝然, 张子豪 (2673)
三氯生及其降解中间产物对活性污泥中微生物群落变化和硝化反硝化功能基因的影响	卢英源, 董小琦, 彭星星, 贾晓珊 (2685)
污染场地风险管控可持续评价指标体系构建及关键影响因素分析	李笑诺, 易诗懿, 陈卫平 (2699)
基于生态功能的滨海湿地土壤质量综合评价方法构建及实证分析	张雪, 孔范龙, 姜志翔 (2709)
铜山矿区周边农田土壤重金属来源解析及污染评价	陈航, 王颖, 王澍 (2719)
典型铁、锰矿物对稻田土壤砷形态与酶活性的影响	周一敏, 黄雅媛, 刘凯, 赵儒乐, 李冰玉, 雷鸣 (2732)
两种油菜施肥水溶性壳聚糖修复典型铅污染农田土壤	孟晓飞, 郑国砥, 陈同斌, 杨俊兴, 郭俊梅, 刘杰 (2741)
基于贝叶斯理论的小麦籽粒镉铅超标风险预测	王天齐, 李艳玲, 杨阳, 牛硕, 王美娥, 陈卫平 (2751)
紫色土旱坡地油菜/玉米轮作下氮流失的年度变化特征	徐曼, 高明, 余添, 朱浩宇, 邓华, 王子芳 (2758)
不同原料生物炭的理化特性及其作炭基肥缓释载体的潜力评价	邢莉彬, 成洁, 耿增超, 张宏伟, 梁宏旭, 王强, 孙倩倩, 李艳 (2770)
木醋液酸化生物炭与氮素配施对盐渍土壤活性氮及氨挥发的影响	申书伟, 张丹丹, 王敏鸽, 王旭东 (2779)
生物可降解地膜覆盖对关中地区小麦-玉米农田温室气体排放的影响	郭怡婷, 罗晓琦, 王锐, 陈海心, 冯浩 (2788)
戴云山南坡不同海拔森林土壤微生物群落结构特征和影响因素	何中声, 王紫薇, 朱静, 陈佳嘉, 谷新光, 江蓝, 陈博, 吴则焰, 刘金福, 陈文伟 (2802)
模拟增温和降雨增加对撂荒草地土壤胞外酶活性及计量特征的影响	王兴, 钟泽坤, 简俊楠, 张硕宏, 杨改河, 任成杰, 冯永忠, 任广鑫, 王晓娇, 韩新辉 (2812)
中国主要城市的城市化对局地增温的贡献	李宇, 周德成, 闫章美, 张良侠 (2822)
《环境科学》征订启事 (2293)	
《环境科学》征稿简则 (2426)	
信息 (2585, 2672, 2708)	

省会城市不同功能区大气 PM_{2.5} 化学组分季节变化及来源分析

孙友敏¹, 范晶¹, 徐标², 李彦², 韩红¹, 张桂芹^{1,3*}

(1. 山东建筑大学市政与环境工程学院, 济南 250101; 2. 山东省生态环境监测中心, 济南 250101; 3. 山东建筑大学资源与环境创新研究院, 济南 250101)

摘要: 为探究城市不同功能区大气 PM_{2.5} 污染水平、成分季节差异特征以及来源, 采集了省会城市济南市 2019 年不同季节 (春、秋、冬) 3 类典型功能区 (城市市区、工业区、城乡结合区) 和环境背景点植物园区的 PM_{2.5} 样品, 对其浓度 [$\rho(\text{PM}_{2.5})$]、化学组分 (水溶性离子、碳质组分、元素) 和来源进行分析。结果表明采样期间 3 类功能区 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 在空间上呈现: 工业区 [$(89.88 \pm 49.25) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$] > 城乡结合区 [$(86.73 \pm 57.24) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$] > 城市市区 [$(70.70 \pm 44.89) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$], 远大于植物园区 [$(44.36 \pm 21.54) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$]。各功能区 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 秋冬季明显高于春季, 冬季最高值出现在城乡结合区, 春季和秋季均为工业区最高。工业区各季 PM_{2.5} 中的水溶性离子浓度较高, 主要的水溶性离子 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 和 NH_4^+ 的占比之和在城市市区秋季较大 (52.30%), 占比之和在城乡结合区与城市市区季节相差不大。春季各功能区 SO_4^{2-} 浓度占比最大; 秋季和冬季 NO_3^- 浓度占比最大, NO_3^- 浓度占比最高出现在秋季的城市市区 (29.98%)。工业区各元素浓度明显大于其他功能区, 尤其是秋季 Fe 元素和冬季 Pb 元素浓度最高, 城乡结合区冬季的 Si 元素浓度最高, K 元素在工业区和城乡结合区秋冬季浓度较高。城乡结合区和工业区 PM_{2.5} 中 OC 和 EC 浓度水平相近, 高于城市市区, 城市市区冬季 OC/EC 比值大于 5, 说明该区域采样时段燃煤的排放占主要来源。应用受体模型化学质量平衡来源解析结果表明, 二次源 (硫酸盐 + 硝酸盐 + 二次有机碳) 的贡献率几乎占到 PM_{2.5} 源类的一半, 其中二次硝酸盐是 3 类功能区秋冬季 PM_{2.5} 首要贡献源 (31.90% ~ 39.45%), 秋季贡献率高低顺序为城市市区、城乡结合区和工业区, 冬季贡献率高低顺序为城乡结合区、城市市区和工业区。机动车贡献率为 9.81% ~ 26.75%, 在工业区和城乡结合区贡献率较大, 其中工业区的春季贡献率最大。植物园区扬尘源的贡献突出, 春季最大 (25.75%), 秋冬季是二次硝酸盐为 PM_{2.5} 首要贡献源。二次源的分配贡献结果可知, 各源贡献率有明显的季节和区域变化, 季节上春季各区扬尘源贡献率最大, 冬季燃煤源的贡献率比春、秋季高, 工业源贡献率在工业区最大, 城市市区和城乡结合区移动源的贡献率最大。因此, 不同功能区 PM_{2.5} 组分和来源有明显的区域特征性, 城乡结合区移动源和民用燃煤源对 PM_{2.5} 污染应引起重视。

关键词: 细颗粒物; 功能区; 化学组分; 化学质量平衡; 来源解析

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)05-2304-13 DOI: 10.13227/j.hjks.202108061

Source Apportionment and Seasonal Changes in PM_{2.5} Chemical Components from Different Functional Areas of a Provincial Capital City

SUN You-min¹, FAN Jing¹, XU Biao², LI Yan², HAN Hong¹, ZHANG Gui-qin^{1,3*}

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China; 2. Shandong Provincial Environmental Monitoring Center, Jinan 250101, China; 3. Research Institute of Resources and Environment Innovation, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China)

Abstract: To explore seasonal characteristics and source apportionment in the atmosphere of different functional areas of a provincial capital city, PM_{2.5} samples were collected from three typical functional areas (an urban area, industrial area, and urban-rural transition area) and a botanical garden area, which served as the ambient atmospheric background site, during three seasons (spring, autumn, and winter) in 2019 in Jinan. The mass concentration, chemical components (water-soluble ions, chemical elements, and carbon components), and sources of PM_{2.5} were analyzed in all PM_{2.5} samples. The results showed that during the observation period, the $\rho(\text{PM}_{2.5})$ spatially followed a descending sequence of industrial area [$(89.88 \pm 49.25) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$] > urban-rural transition area [$(86.73 \pm 57.24) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$] > urban area [$(70.70 \pm 44.89) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$] and was much higher than that in the botanical garden area [$(44.36 \pm 21.54) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$]. $\rho(\text{PM}_{2.5})$ in each functional area in autumn and winter was significantly higher than that in spring. The highest value of $\rho(\text{PM}_{2.5})$ in spring and autumn was observed in the industrial area, whereas in winter, the highest value of $\rho(\text{PM}_{2.5})$ was observed in the urban-rural transition area. The mass concentration of water-soluble ions in PM_{2.5} was relatively high in each season in the industrial area, and the sum of the proportions of NO_3^- , SO_4^{2-} , and NH_4^+ in PM_{2.5} was the highest in the urban area in autumn (52.30%). The sum of the proportions of NO_3^- , SO_4^{2-} , and NH_4^+ in PM_{2.5} was similar in the urban-rural transition area and urban area. The proportion of SO_4^{2-} in PM_{2.5} in each functional area was the largest in spring. The proportion of NO_3^- in PM_{2.5} was the largest in autumn and winter, and the highest value (29.98%) occurred in the urban area in autumn. The concentration of each element in the industrial area was significantly higher than those in other functional areas. The concentration of Fe in autumn and Pb in winter in the industrial area were the highest. The concentration of Si in winter was the highest in the urban-rural transition area, and the content of K in autumn and winter was much higher in the industrial area and urban-rural transition area. The mass concentrations of OC and EC in PM_{2.5} in the industrial area and urban-rural transition area were similar and were higher than those in the urban

收稿日期: 2021-08-07; 修订日期: 2021-09-29

基金项目: 济南市政府大气来源解析采购项目 (402015202000024-001); 济南市高校创新团队项目 (2020GXRC008)

作者简介: 孙友敏 (1974 ~), 女, 教授, 主要研究方向为大气颗粒物污染控制, E-mail: ymsun@sdjzu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: zhangguiqin320@163.com

area. The OC/EC ratio in winter in the urban area was greater than 5, indicating that coal-burning emissions were the main pollution source during the sampling period in this region. The results of source analysis using the chemical mass balance model showed that secondary sources (sulfate + nitrate + secondary organic carbon) accounted for almost half of the PM_{2.5} source apportionment. Secondary nitrate was the main contributor to PM_{2.5} in autumn and winter in the three functional areas (31.90%-39.45%). The contribution rate of secondary nitrate followed the descending sequence of urban area, urban-rural transition area, and industrial area in autumn and urban-rural transition area, urban area, and industrial area in winter. The contribution rate of motor vehicles was 9.81%-26.75%, which was relatively high in the industrial area and urban-rural transition area, and the highest contribution rate of motor vehicles appeared in the industrial area in spring, whereas the contribution of the dust source in the botanical garden area was the largest, especially in spring (25.75%). In the botanical garden area, secondary sources were the main contributors to PM_{2.5} in autumn and winter. There were marked seasonal and area-related changes in the distribution of the contribution rate of each source. Seasonally, the dust sources of the three typical functional areas were large, and the contribution of coal-burning sources in winter was higher than that in spring and autumn. The highest number of industrial sources was found in the industrial area. The largest contribution of mobile sources occurred in the urban area and urban-rural transition area. In summary, the contributions of PM_{2.5} and its components and source apportionment in each typical functional area exhibited notable regional characteristics. Our results suggest that mobile sources and civil coal-fired sources should be particularly scrutinized as sources of pollution in the urban-rural transition area.

Key words: fine particulate matter; functional area; chemical composition; chemical mass balance model; source apportionment

近年来国家生态环境部颁布了相关方案^[1,2], 针对“2+26”城市制定了秋冬季大气污染防治措施使得相关城市的空气质量呈现了改善趋势^[2~4]. 尽管细颗粒物(PM_{2.5})污染减轻了,但一些城市PM_{2.5}浓度尚未达到《环境空气质量标准》(GB 3095-2012)二级标准^[5,6]. 尤其是冬季由于供暖需求会显著增加大气污染物排放量,加上较为不利的气象条件和地理位置因素,导致京津冀地区PM_{2.5}重污染过程经常发生^[6,7]. 为了推进全国空气质量持续改善,深入打好污染防治攻坚战,国家提出明确目标^[8], 地级及以下城市PM_{2.5}平均浓度下降10%,基本消除重污染过程,这个目标任重而道远.

PM_{2.5}的成分复杂,主要包括各种水溶性离子、金属元素和含碳物质等,其来源有自然源和人为源. 国内有关城市大气PM_{2.5}的研究集中在污染特征^[9]、化学组分^[10~12]、时空分布^[13~15]、转化形成机制^[16,17]和来源^[18~20],发现各地市大气PM_{2.5}浓度和化学组分特征均具有明显的地域差异性,并且其污染来源受工业结构、气象条件、近距离传输和组分的存在形态等多种因素的影响. 受体模型来源分析发现,PM_{2.5}主要污染来自化石燃料燃烧、汽车尾气排放、工业生产排放和建筑尘^[21~23],而京津冀地区PM_{2.5}污染从燃煤主导的煤烟型污染发展为燃煤和机动车复合型污染^[24]. 污染源构成的复杂性与变化性,要求大气PM_{2.5}源解析工作不断更新,以反映污染源的实际情况,切实为治理和控制当地大气环境污染提供科学支持. 然而目前大部分研究给出了城市大气环境PM_{2.5}中的不同季节或不同污染程度成分变化以及来源解析^[25~27],缺少对城市不同功能区大气PM_{2.5}的研究,或采样点位的选取不能较好地覆盖整个城市的不同功能区. 鉴于区域大气传输作用,有必要对城市典型功能区的PM_{2.5}组分特征和来源进行详细地研究.

济南市是省会城市,也是京津冀大气污染通道上的典型城市之一,本研究选取了济南4类典型的

城市功能区(城市市区、工业区、城乡结合区和植物园区),采集了各功能区春、秋和冬这3季PM_{2.5}样品,分析了各功能区PM_{2.5}浓度和化学组分的季节性变化和区域差异,利用化学质量平衡解析了区域大气污染的来源及贡献,以期对济南市不同功能区的大气污染防治措施制定提供数据与理论支撑.

1 材料与方法

1.1 采样点位和时间

选取了济南市具有代表性的3个功能区(图1):城市市区(布设3个采样点位,建工学院、济钢和市监测站)、工业区(布设2个采样点为,技术学院和莱钢)、城乡结合区(布设1个点位,蓝翔技校)和1个环境参照点植物园区(跑马岭)作为大气PM_{2.5}的采样点,其中市监测站和技术学院采样点是国控点,建工学院和蓝翔技校采样点是省控点,跑马岭采样点是环境参照点. 春季采样时间为2019年5月15~25日,秋季从2019年10月15日~24日,冬季从2019年12月17日至2020年1月16日,在相应的周期内分别进行采样,每天采样23 h,采样高度大于15 m.

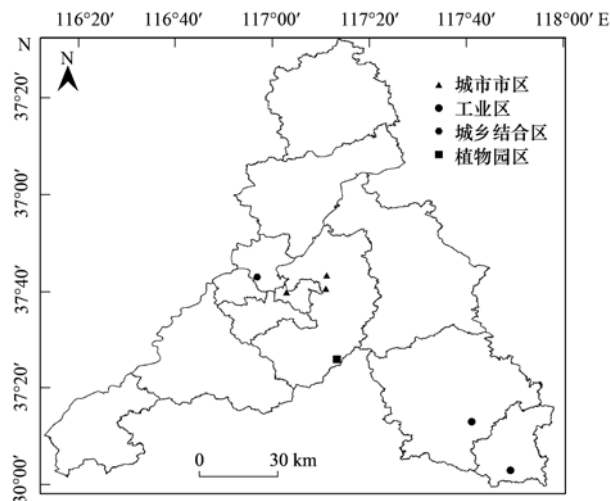


图1 采样点位示意

Fig. 1 Schematic diagram of sampling sites

1.2 采样仪器

PM_{2.5}采样器为符合欧标的德国生产的颗粒物采样器(DERENDA PNS),使用石英滤膜(47mm, Whatman 公司)和Teflon有机滤膜(47 mm, Whatman 公司)同步采集PM_{2.5}样品,采样流量为16.7 L·min⁻¹,对采集到的样品进行低温保存,石英滤膜主要用于水溶性离子和碳组分的采集与分析,Teflon有机滤膜主要用于化学元素的采集与分析。

1.3 分析方法

样品分析前于恒温(20 ± 1)℃、恒湿(50 ± 5)%的天平室平衡48 h,随后使用精度为0.001 mg的天平进行两次循环称重,两次称量的差值均小于0.005 mg。

利用等离子体原子发射光谱仪(ICP-AES)和电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)测定样品中33种元素,包括Si、K、Al、Ca、Mg、Fe、Ti、Ba、Sr、Zr、P、Li、Be、Na、Sc、V、Cr、Mn、Co、Ni、Cu、Zn、As、Rb、Y、Mo、Cd、Sn、Sb、Cs、Tl、Pb和Bi,两种仪器的检出限分别为0.20 μg·L⁻¹和0.01 μg·L⁻¹[28]。使用IC8618型双通道离子色谱仪(带进口自动进样器,青岛鲁海光电科技有限公司)进行分析,检测SO₄²⁻、NO₃⁻、Cl⁻、F⁻、NH₄⁺、Ca²⁺、Na⁺、Mg²⁺、K⁺共9种水溶性离子,离子的检测限分别为0.040、0.001、0.003、0.010、0.003、0.005、0.001、0.001和0.001 μg·mL⁻¹[29]。采用碳分析仪(Sunset Lab Inc Model,美国)和热光法测定膜样品中碳组分和浓度,有机碳OC和元素碳EC最低检测限度分别是0.43 μg·cm⁻²和0.12 μg·cm⁻²,碳分析的精度范围2%~4%[30]。

用CRAESCMB1.0软件在源类、受体成分谱确

定的前提下,将各源类的成分谱(各化学组分的百分浓度平均值及其标准偏差)和受体成分谱(各化学组分的浓度平均值及其标准偏差)纳入化学质量平衡(CMB)模型,获得不同功能区季节性的PM_{2.5}污染来源贡献。

1.4 质量控制

所用滤膜无毛刺无破损,采样时每7 d一个过程空白滤膜,每测定10个样品要至少选取1个样品做平行,平行样的相对标准偏差≤10%,每15个样品做一次空白样品分析。取1/2面积的空白膜也用相同分析方法进行处理,以其3倍空白膜的标准偏差作为检出限。33种无机元素的空白膜测试分两部分进行,等离子体质谱加标测试回收率在87.4%~106.5%,等离子体发射光谱加标测试回收率在85.3%~116.5%,均满足EPA要求。样品分析前,将标准样品配制5个标准浓度系列,标准曲线相关系数平方均在0.999以上,空白滤膜均未检出待测的离子。OC和EC蔗糖溶液测试相对误差均能达到10%以内。

CMB模型结果的残差平方和 X^2 在0.2061~1.6206之间,回归系数 r^2 在0.9478~0.9885之间,PM_{2.5}的质量分数在86.56%~99.46%之间,诊断指标表明结果可以接受。

2 结果与讨论

2.1 PM_{2.5}的季节变化

基于环境空气质量国控点市监测站点位在线数据,分析手工采样和在线监测数据的一致性(图2),手工采样监测数据大部分略高于PM_{2.5}自动监测值。这一现象与郑翔翔等[31]对6个城市手工采

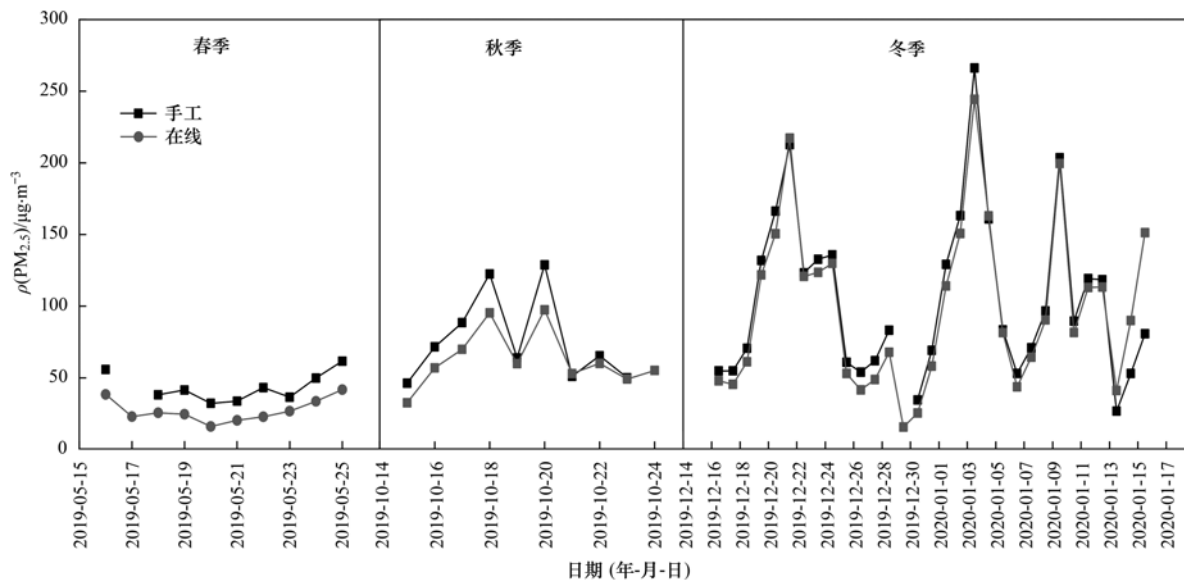


图2 手工 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 和在线 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 对比

Fig. 2 Comparison between PM_{2.5} manual sampling data and online monitoring data

样发现大部分 PM_{2.5} 自动监测值小于手工监测结果相一致,说明本研究获得的数据具有一定的代表性. 对手工采样数据和在线监测数据进行了相关性分析,其相关系数 R^2 为 0.92,说明手工采样数据可信度较高.

图 3 为采样期间各功能区各季节的 PM_{2.5} 浓度,城市市区、工业区、城乡结合区和植物园区的日均 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 分别为 (70.7 ± 44.89) 、 (89.88 ± 49.25) 、 (86.73 ± 57.24) 和 $(44.36 \pm 21.54) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,工业区的日均浓度值最大,工业园区和城乡结合区日均值高于环境空气质量标准(GB 3095-2012) 日均浓度限值 $75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,春季和秋季均为工业区 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 最高,分别为 $(49.78 \pm 12.33) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $(109.64 \pm 30.39) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,冬季 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 最高值出现在城乡结合区,为 $(122.15 \pm 60.73) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 各功能区 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 值秋、冬季明显高于春季,冬季最高值出现在城乡结合区,在春、秋季最高值均出现在工业区,分别为 $(49.78 \pm 12.33) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $(109.64 \pm 30.39) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 城乡结合区的点位设在蓝翔技校,发现周围有大量的物流公司、汽配公司等等,可能是临近春节期间,人员流动更加密集,机动车的排放增加,导致城乡结合区冬季 PM_{2.5} 浓度比工业区的. 工业区由于工业源的排放和人员流动导致的机动车排放使得工业区的 PM_{2.5} 浓度高于其他区. 植物园区秋季的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 最大,为 $(58.97 \pm 17.03) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,这可能是因为植物园区位于山区,周围度假村、风景区较多,秋季上山旅游人数增加,当时山区的机动车辆有所增加,导致 PM_{2.5} 的浓度增加.

表 1 给出不同城市的 PM_{2.5} 日均值,对比采样期间的济南市春、秋和冬季的日均 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 分别为

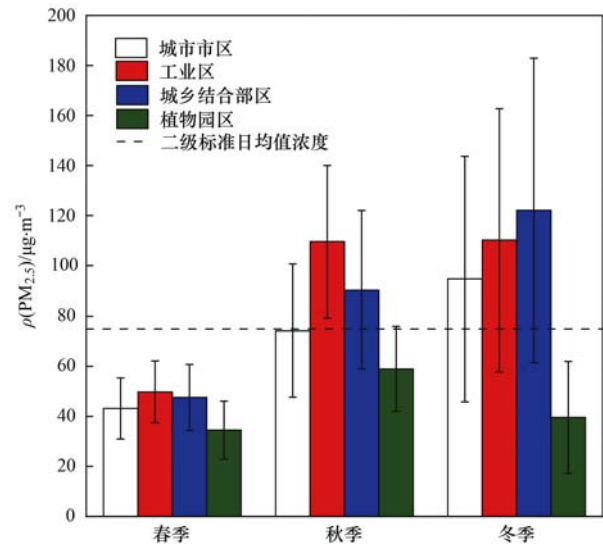


图 3 各功能区季节性 PM_{2.5} 浓度

Fig. 3 PM_{2.5} concentration for each season in each sampling area

(43.76 ± 12.93) 、 (83.32 ± 31.61) 和 $(91.67 \pm 54.86) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,可知冬季的数值跟盘锦市 $[(91.09 \pm 33.38) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}]^{[32]}$ 相近,低于南京市 $(104.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})^{[33]}$; 秋季的浓度高于盘锦市 $[(52.71 \pm 19.44) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}]^{[34]}$ 和福州市 $(23.00 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})^{[35]}$; 春季的数据低于芒市 $(53.70 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})^{[36]}$,高于福州市 $(34.00 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})^{[35]}$. 与往年的数据相比,2019 年济南市春、秋和冬季日均 PM_{2.5} 浓度均低于对应的季节的数值^[30,37],表明济南市细颗粒物在国家和省市相关政策的推动下取得了一些阶段性成果,但济南市秋、冬季仍分别为《环境空气质量标准》(GB 3095-2012) 中规定的二级标准限制 $(75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$ 的 1.11 倍和 1.22 倍,说明济南市的秋、冬季 PM_{2.5} 污染依然较为严重.

表 1 不同城市季节性 PM_{2.5} 浓度对比

Table 1 Comparison of PM_{2.5} concentration in different cities in seasons

城市	年份	季节	$\rho(\text{PM}_{2.5})/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	文献
盘锦市	2017	冬季	91.01 ± 33.38	[32]
南京市	2016	冬季	104.50	[33]
济南市	2017	冬季	90.28	[30]
盘锦市	2016	秋季	52.71 ± 19.44	[34]
福州市	2015	秋季	23.00	[35]
济南市	2016	秋季	122.63	[38]
芒市	2019	春季	53.70	[36]
福州市	2015	春季	34.00	[35]
济南市	2017	春季	87.59	[37]

2.2 PM_{2.5} 化学组分的季节变化

2.2.1 水溶性离子

表 2 给出采样期间各功能区春、秋、冬这 3 季的水溶性离子浓度占 PM_{2.5} 质量浓度的情况,NO₃⁻、SO₄²⁻ 和 NH₄⁺ 质量分数明显高于其它水溶性离子,三者的质量分数之和范围为 20%~58%. 植物园区冬季质量分数之和最大,这跟往年该环境背景点位冬季离子质量分数大于其他采样点结论相一致^[37,38],其次是城市市区秋季质量分数之和较大 (52.30%),城乡结合区与城市市区的质量分数之和在各季差别不大,说明二次离子对于各研究区域大气 PM_{2.5} 的贡献较大. 春季各功能区 SO₄²⁻ 质量分数最大; 秋季和冬季 NO₃⁻ 浓度所占质量分数最大,NO₃⁻ 质量分数最高季节和区域为秋季的城市市区,高达 29.98%,但 SO₄²⁻ 质量分数在这两季各功能区基本上高于 10.00%,最高值出现在冬季的植物园区 (14.48%),NH₄⁺ 质量分数秋冬季高于春季. 城市市区和城乡结合区 Na⁺ 和 Ca²⁺ 质量分数较高,Na⁺ 除了来自海盐外,还可由木材或垃圾焚烧产生^[39,40],说明研究区域附近餐饮油烟较

多且交通流量大,存在人类燃烧活动. Ca^{2+} 为主要来自土壤或道路扬尘的地壳元素^[41,42],春季二者的质量分数明显高于秋、冬季,说明春季扬尘污染对 $\text{PM}_{2.5}$ 的相对贡献较大. Cl^- 冬季各功能区的

质量分数最大,这跟北方冬季燃煤供暖有关,工业区各季的 Cl^- 和 K^+ 相较于其他区更高,可能是生物质燃烧源和煤燃烧对工业区的影响相较于对其他区的影响更大^[43,44].

表 2 各功能区季节水溶性平均离子平均质量分数/%

Table 2 Average mass fraction of water-soluble ions in $\text{PM}_{2.5}$ in each season in each sampling area/%

项目	春季				秋季				冬季			
	城市市区	工业区	城乡结合区	植物园区	城市市区	工业区	城乡结合区	植物园区	城市市区	工业区	城乡结合区	植物园区
NO_3^-	6.83	7.75	6.94	8.60	29.98	26.28	27.25	24.11	23.48	20.62	22.07	29.80
SO_4^{2-}	11.49	11.99	11.33	14.19	11.52	10.67	9.24	11.77	12.44	11.87	13.05	14.48
Cl^-	0.39	1.21	0.32	0.43	0.47	1.32	0.65	0.41	1.73	2.43	2.28	1.34
F^-	0.16	0.22	0.11	0.14	0.11	0.15	0.08	0.07	0.14	0.36	0.12	0.25
NH_4^+	4.43	4.52	4.27	6.02	10.80	8.67	8.65	10.04	8.85	8.06	8.54	13.57
Na^+	5.68	2.67	4.81	7.67	2.57	1.40	2.27	3.88	3.96	3.37	2.68	7.18
Ca^{2+}	3.48	1.65	3.05	4.60	3.44	1.02	1.69	4.34	1.37	1.22	1.26	2.83
K^+	0.79	1.41	0.95	0.87	0.82	1.20	0.76	0.61	0.73	1.20	0.86	0.81
Mg^{2+}	0.42	1.02	0.36	0.58	0.24	0.88	0.22	0.27	0.25	0.61	0.20	0.51

$\text{PM}_{2.5}$ 中 NH_4^+ 、 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 结合可以形成 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 、 NH_4NO_3 和 NH_4HSO_4 ,若 NH_4^+ 不能完全中和 SO_4^{2-} ,则 NH_4^+ 主要以 NH_4HSO_4 和 NH_4NO_3 形式存在,可以采用公式(1)计算 NH_4^+ 的浓度;若 NH_4^+ 能完全中和 SO_4^{2-} ,则 NH_4^+ 主要以 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 和 NH_4NO_3 形式存在,可以采用公式(2)计算 NH_4^+ 的浓度^[45].将 NH_4^+ 的实测值与通过公式计算所得的 NH_4^+ 的值做线性分析,如图 4 所示.可知城市市区、工业区和城乡结合区各季节通过公式(2)计算的 NH_4^+ 浓度和实测值的相关系数和斜率相对来说更高,表明这 3 个功能区的大气 $\text{PM}_{2.5}$ 中的 NH_4^+ 主要以 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 和 NH_4NO_3 的形式存在.植物园区在春季和秋季时通过公式(1)计算的 NH_4^+ 浓度和实测值的相关系数和斜率相对来说更高,植物园区在春秋季节主要是以 NH_4HSO_4 和 NH_4NO_3 的形式存在,而冬季则主要以 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 和 NH_4NO_3 的形式存在.城市市区和城乡结合区的相关系数大小顺序为:秋季 > 冬季 > 春季,说明 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 和 NH_4^+ 的相关性在秋季最好;植物园区的相关系数 R^2 均大于 0.90,且冬季 > 秋季 > 春季,说明 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 和 NH_4^+ 的相关性在冬季最好,表明在城市市区和城乡结合区的秋季和植物园区冬季气象条件更有利于排放源对离子之间的结合.工业区冬季计算的 NH_4^+ 浓度和实测值的相关系数 R^2 为 0.96,但春季和秋季相关系数较差,说明工业区 NH_4^+ 离子的存在形式比较复杂,可能以其他形式如 NH_4Cl 存在.

$$[\text{NH}_4^+] = 0.38[\text{SO}_4^{2-}] + 0.29[\text{NO}_3^-] \quad (1)$$

$$[\text{NH}_4^+] = 0.19[\text{SO}_4^{2-}] + 0.29[\text{NO}_3^-] \quad (2)$$

2.2.2 元素

图 5 给出城市市区、工业区、城乡结合区和植物园区季节化学元素浓度分析,元素总浓度范围为 $4.15 \sim 6.85 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,对 $\text{PM}_{2.5}$ 的贡献率为 $7.62\% \sim 9.36\%$.在空间上, $\text{PM}_{2.5}$ 中化学元素浓度呈现:工业区 > 城乡结合区 > 城市市区 > 植物园区,在季节上呈现秋季 > 春季 > 冬季.其中各功能区季节中浓度较高的元素主要是 Si、Ca、Al、K、Na、Fe、Mg 和 Zn,其占比占所测元素总量的 94% 以上,次量元素中 Pb、Ni、As、Zr 和 Sr 浓度相对较高.工业区各元素浓度明显大于其他功能区,尤其是秋季 $\rho(\text{Fe})$ 最高,为 $0.81 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,这跟采样区域有钢铁行业相关,Fe 元素是钢铁行业工业源的主要代表性元素^[46].城乡结合区的 Fe 元素也较高,Fe 同时也是地壳元素之一^[47],可能是由于人类的活动导致土壤扬尘的增加.Si 元素在各功能区和各季节的浓度均较高,主要来自于土壤和扬尘^[48],最高值出现在城乡结合区的冬季,为 $2.39 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,最低值出现在植物园区的冬季,主要跟人类活动强度有关.Na、Al、Ca 和 Si 在扬尘污染源中较多^[49],秋季的工业区为其浓度之和最高($6.25 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)并且发现除城市市区外,其浓度之和均为秋季最高,说明秋季各功能区的扬尘污染较为严重,城市市区则是春季浓度之和最高,说明城市市区扬尘污染最严重时期在春季.指示生物质燃烧的 K 元素^[43]在工业区和城乡结合区秋冬季浓度较高,说明这两类功能区的生物质燃烧排放较多,像秸秆等物质燃烧无组织排放的现象在秋冬季较为严重.次量元素 Pb、As 和 Ni 等与人为污染有关,As 和 Ni 的排放规律差异不大,主要受工业排放的影响,Pb 主要来源于机动车和煤燃烧排

放,最高值出现在工业区的冬季,为 $0.125 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,主要受工业区运输车的影响,城市市区冬季 Pb 的浓度高主要受冬季煤燃烧影响。

2.2.3 碳组分

PM_{2.5} 中的碳组分指有机碳 (organic carbon, OC)、元素碳 (element carbon, EC) 和无机碳 (主要是碳酸盐),其中碳酸盐浓度较低,OC 和 EC 是主要的碳组分^[50]。图 6 为济南市 PM_{2.5} 中 OC 和 EC 的浓度时空分布状况,时间上,OC 和 EC 浓度均为:冬季 > 春季 > 秋季;空间上,城乡结合区和工业园区 PM_{2.5} 中 OC 和 EC 浓度水平相近,高于城市市区,植

物园区 OC 和 EC 的浓度均较小。这表明碳组分的排放与工业活动密切相关,另外由于稳定的冬季大气环境,工业区周围不易扩散稀释的含碳组分会进一步影响周围地区。

利用 OC/EC 比值法可以判断大气中是否存在二次有机碳(SOC)污染和定性分析 OC 和 EC 来源。已有研究表明^[51],OC/EC > 2 时,大气中有 SOC 生成;OC/EC 值在不同范围内表示不同污染来源,当 OC/EC 比值处于 1.0 ~ 4.2 时代表汽油车和柴油车尾气排放;处于 2.5 ~ 10.5 表明其来自燃煤排放;处于 16.8 ~ 40.0 之间表示生物质燃烧排放;处于 32.9

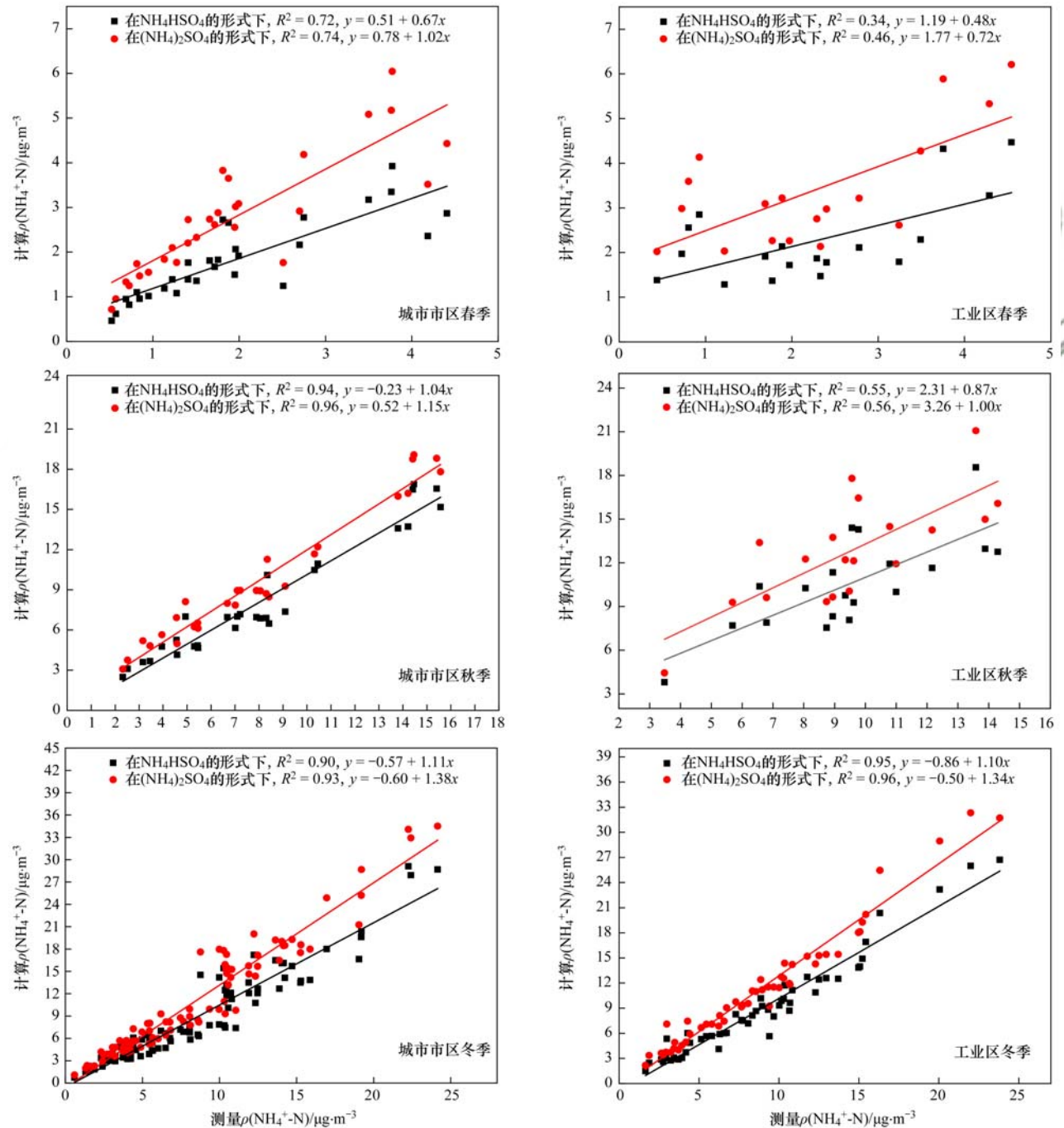
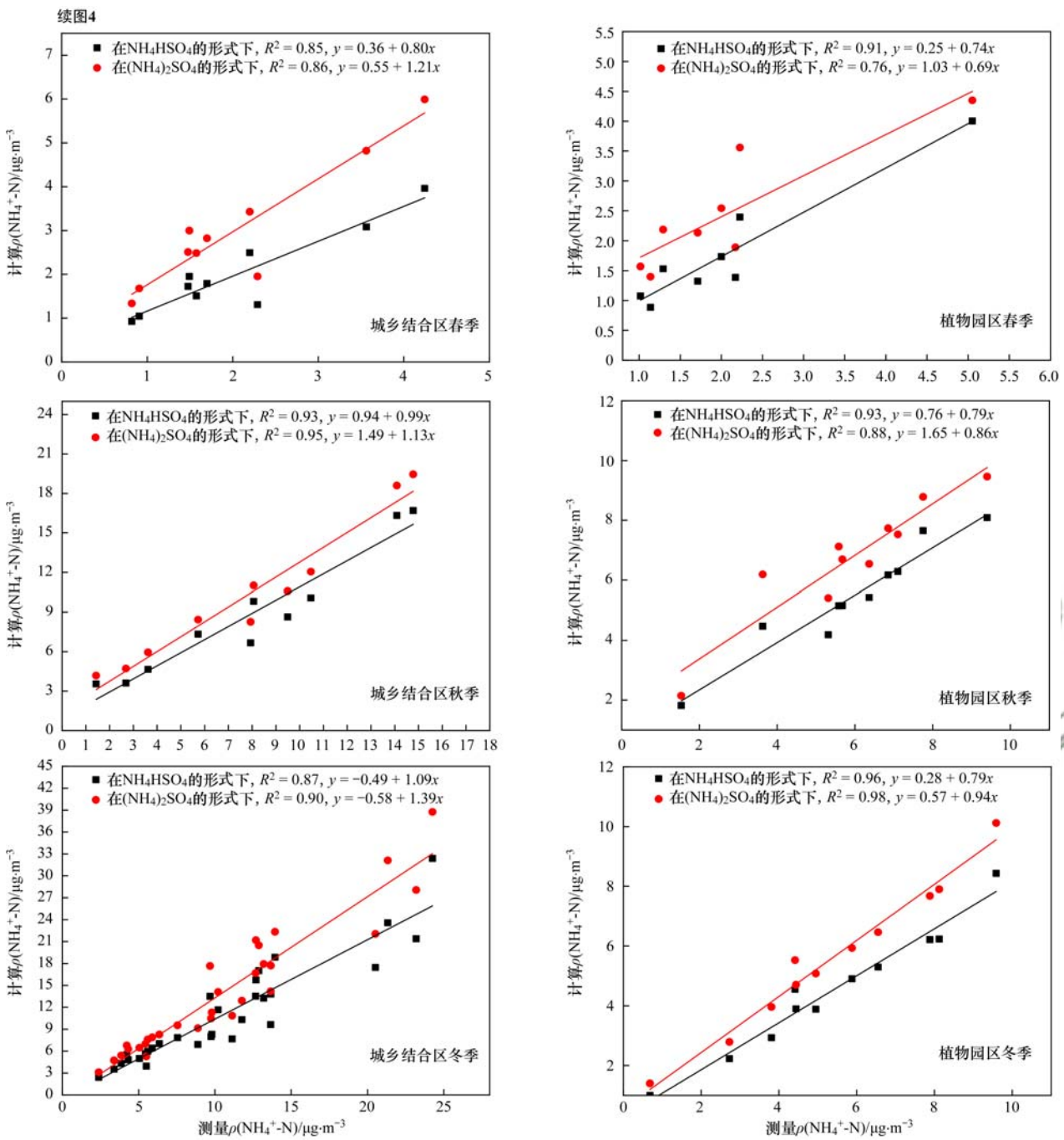


图 4 4 个区水溶性离子 NH_4^+ 的实测值与计算值的季节性变化

Fig. 4 Seasonal changes in the measured and calculated values of the water-soluble ion NH_4^+ in four sampling areas



~81.6 则代表烹调排放.城市市区、工业区、城乡结合区和植物园区 OC/EC 比值范围分别为 3.70 ~ 5.00、3.40 ~ 4.60、3.54 ~ 4.76 和 4.91 ~ 5.49(见表 3),表明 4 个功能区在不同季节下均存在 SOC 的生成,且碳质气溶胶均主要来自于机动车尾气的排放和燃煤的排放,但城市市区冬季 OC/EC 比值大于 5,说明该区域采样时段燃煤的排放占主要来源.

表 3 各功能区季节 OC/EC 情况

Table 3 OC/EC value in each season in each sampling area

项目	OC/EC			
	城市市区	工业区	城乡结合区	植物园区
春季	5.00	3.40	4.76	4.91
秋季	3.70	4.60	3.54	5.21
冬季	4.84	4.11	4.76	5.49

2.3 PM_{2.5}来源解析

往年济南市源解析结果表明^[52,53],道路扬尘、燃煤、机动车排放、工业排放和二次有机碳(SOC)是济南市主要的污染源.因此本研究将尘源(包括城市扬尘、土壤尘、建筑尘、燃煤尘、钢铁尘)、机动车尾气源、二次无机盐(主要是硫酸铵和硝酸铵)和 SOC 纳入模型计算,输入源谱采用 2018 年本地化源谱^[52],得到 3 类功能区城市市区、城乡结合区工业区和环境背景点植物园区在采样期间各污染源对环境 PM_{2.5}的贡献率(图 7).

如图 7 所示,各功能区不同季节污染源贡献率不同,春季各区以二次硫酸盐为首要源,其贡献率高低顺序为:城市市区、城乡结合区、植物园和工业

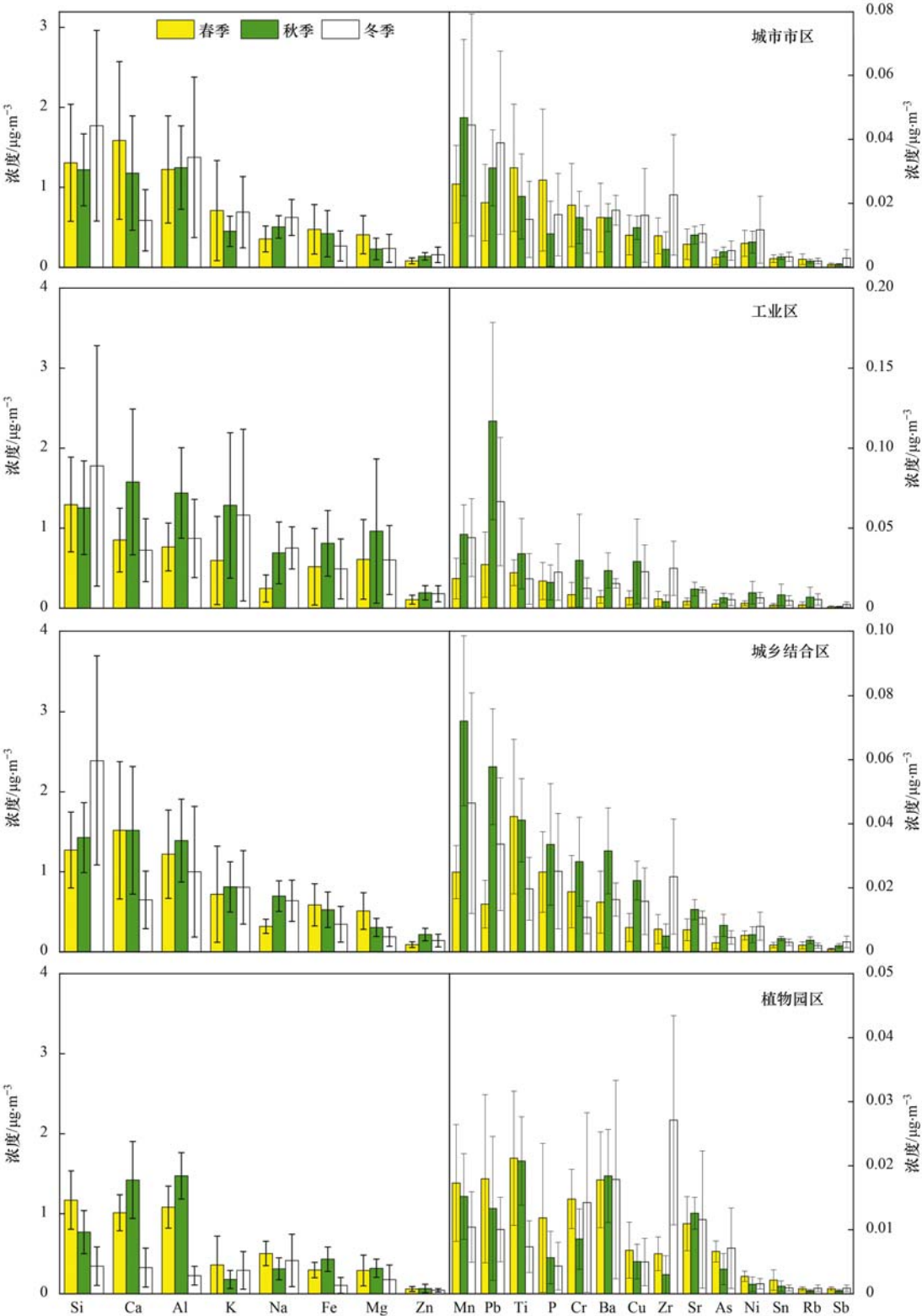


图 5 各功能区季节主次化学元素浓度分析

Fig. 5 Concentration of major and minor chemical elements in each season in each sampling area

区；秋、冬季各功能区以二次硝酸盐为首要源，贡献率最大为秋季城市市区（39.45%），最小的为冬季工业区（31.90%）；冬季二次硝酸铵占比在各功能区相差不大，约为 34.00% 左右。各功能区二次无机盐（硫酸盐 + 硝酸盐）贡献率均超过 40.00%，在秋冬季更高，且二次硝酸盐贡献率超越二次硫酸盐，

这是济南市降煤减排、机动车激增的表现。二次源（硫酸盐 + 硝酸盐 + SOC）的贡献率几乎占到 PM_{2.5} 源类的一半，周睿智等^[54]对山东省各城市 2018 年之前大气细颗粒物来源解析的现状进行了详细的统计分析，发现山东半岛和中、西部这 3 个区域贡献 PM_{2.5} 的最大源均为二次源，因此有效控制二次颗粒

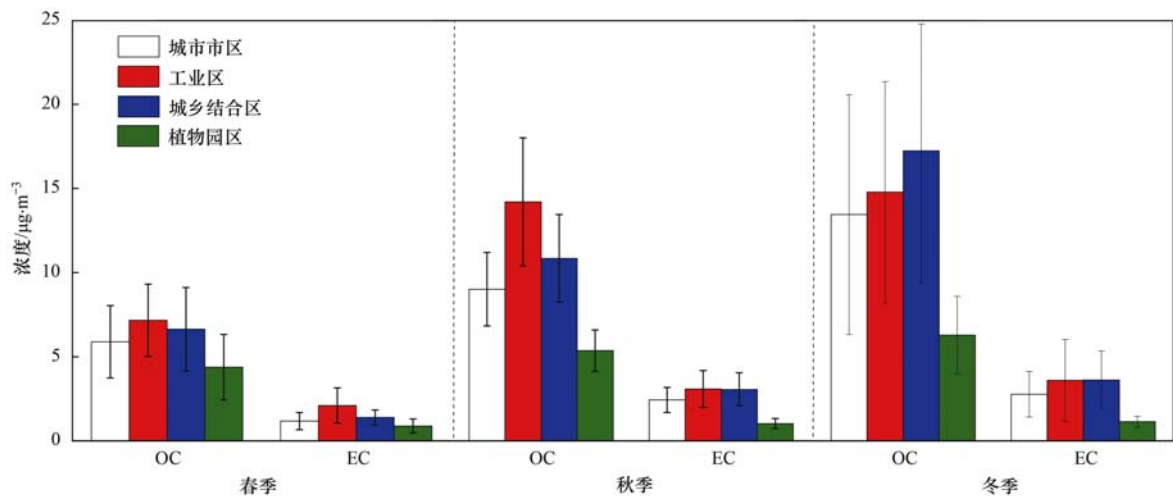


图6 各功能区季节碳组分情况

Fig. 6 Carbon composition in each season in each sampling area

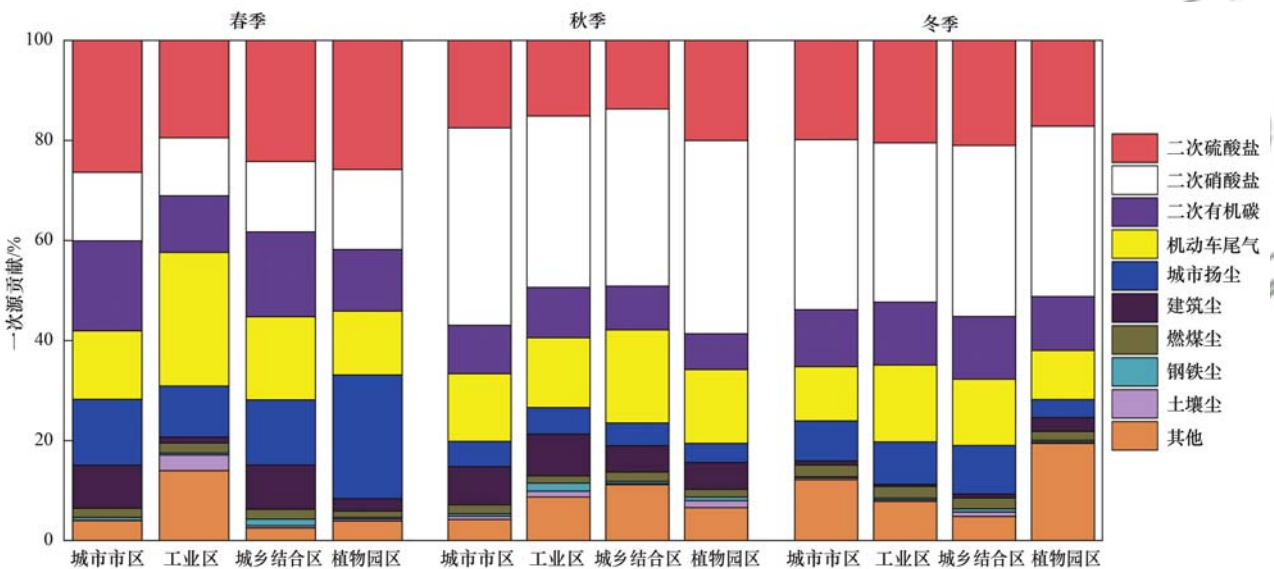


图7 各功能区季节 PM_{2.5}的 CMB 来源解析一次源贡献

Fig. 7 Results of primary source apportionment of CMB model in each season in each sampling area

物的形成是济南市各个区域 PM_{2.5}污染控制的关键之一,需要进一步厘清二次源的形成机制、解析各类源对二次源的贡献。

机动车交通排放的影响不可忽视,机动车贡献率在各区均有响应,贡献率范围为 9.81% ~ 26.75%,在工业区和城乡结合区贡献率较大,尤其是工业区的春季机动车尾气贡献率最大,这主要是由于大型运输车进行物料和产品的输运和城乡结合区有大量的农用燃油车的使用。城市市区机动车贡献率在 3 个季节影响变化不大,主要是由于市区交通道路网密集、车流量大和道路拓宽等因素造成,即便在城市背景点植物园区,机动车对大气 PM_{2.5}也有一定的贡献,春季和秋季由于家庭出游人数较多,机动车尾气的贡献率分别为 12.74% 和 14.77%,另外城市扬尘在植物园春季 PM_{2.5}的贡献率最大,为

24.75%。4 个功能区建筑尘的贡献率在冬季各点位很小,贡献率最高为城乡结合部的春季(8.63%),其次是工业区的秋季、城市市区的春季和秋季,它们贡献率相差不大,约为 8.00%。

结合当地源清单及数值模型将二次源的贡献分摊到具体的一次排放源,得到城市市区、工业区和城乡结合区 CMB 结果中二次源类的分配情况,解析结果见图 8。各源贡献率有明显的季节和区域变化,城市市区春季扬尘源贡献最大,其贡献率为 40.60%,主要是施工扬尘和道路扬尘贡献率高,冬季燃煤源的贡献率(10.00%)比春、秋季(6.50%)明显高,主要原因是城市冬季供暖用煤增加,但自从 2017 年济南市实施相关清洁能源政策后^[53],燃煤源的贡献率逐年下降^[54,55]。工业区的工业源在各季的贡献率较大,主要是由于采样区域钢铁的贡献率

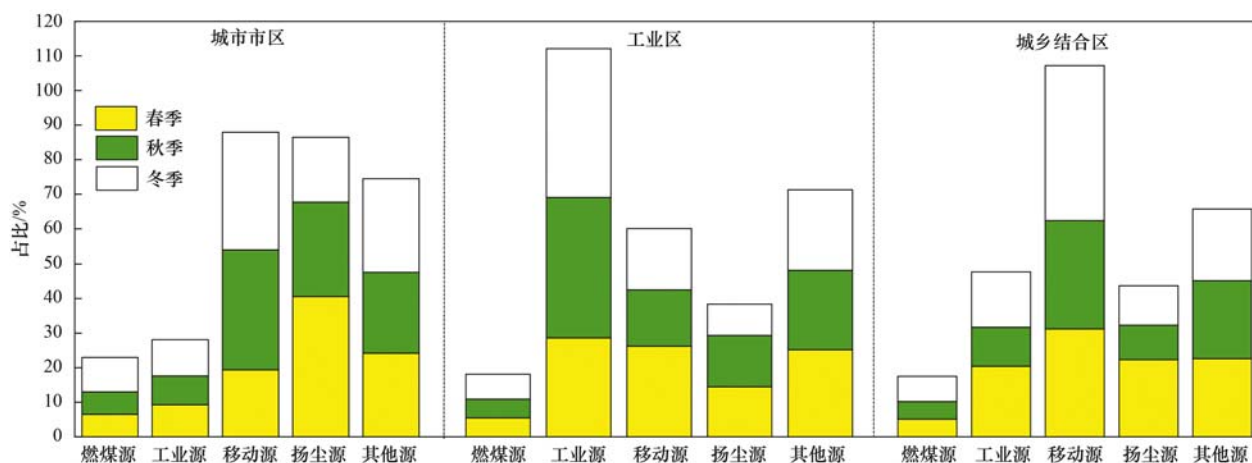
图8 典型功能区季节 PM_{2.5} 的 CMB 来源解析二次源的贡献

Fig. 8 Results of secondary source apportionment of CMB model for each season in each sampling area

高,秋、冬季贡献率均超过 40.00%。城乡结合区移动源贡献率最大,在春、秋和冬季的贡献率分别为 31.20%、31.20% 和 44.80%,主要是由于柴油车和非道路移动源贡献率较高,移动源在城市市区秋、冬季贡献率较高,主要与城市市区机动车保有量不断增加有关。

3 结论

(1) 采样期间 3 类典型功能区 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 在空间上呈现: 工业区 $[(89.88 \pm 49.25) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}] >$ 城乡结合区 $[(86.73 \pm 57.24) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}] >$ 城市市区 $[(70.70 \pm 44.89) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}] >$ 植物园区 $[(44.36 \pm 21.54) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$, 各功能区 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 秋冬季数值较大, 最高值出现在城乡结合区, 而春季和秋季均为工业区最高。

(2) NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 NH_4^+ 和 Na^+ 是 $\text{PM}_{2.5}$ 中水溶性离子的主要成分, 占总离子浓度的 75% 以上。 NH_4^+ 在 3 类功能区各季节和植物园区的冬季主要以 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 和 NH_4NO_3 的形式存在, 植物园区在春季和秋季时主要是以 NH_4HSO_4 和 NH_4NO_3 的形式存在。元素浓度呈现工业区 $>$ 城乡结合区 $>$ 城市市区 $>$ 植物园区, 工业区的特征元素为 Fe 和 Pb, 城乡结合区的特征元素为 Si, K 元素在这两功能区秋冬季浓度较高。Na、Al、Ca 和 Si 元素浓度之和在城市市区较高。OC 和 EC 浓度高低顺序为冬季、春季和秋季; 城乡结合区和工业园区 $\text{PM}_{2.5}$ 中 OC 和 EC 浓度水平相近, 高于城市市区, 植物园区 OC 和 EC 的浓度均较小, 城市市区冬季 OC/EC 比值大于 5, 说明该区域采样时段燃煤的排放为主要来源。

(3) 来源解析结果表明各功能区春季以二次硫酸盐为首要贡献源, 秋、冬季以二次硝酸盐为首要贡献源, 二次无机盐 (硫酸盐 + 硝酸盐) 贡献率均超

过 40.00%, 且二次硝酸盐贡献率超过二次硫酸盐。机动车贡献率为 9.81% ~ 26.75%, 在工业区和城乡结合区贡献率较大, 在城市背景点植物园区, 机动车尾气的贡献率在春、秋季分别为 12.74% 和 14.77%。植物园区扬尘源的贡献率在春季突出 (25.75%)。二次源 (硫酸盐 + 硝酸盐 + SOC) 的贡献率几乎占到 $\text{PM}_{2.5}$ 源类的一半, 对二次源进行分配发现, 春季各区扬尘源贡献率最大, 冬季燃煤源的贡献率比春季和秋季高。工业区中工业源贡献率较大, 其最大值出现在冬季 (42.90%)。城乡结合区和城市市区移动源的贡献率较大, 其中城乡结合区主要是柴油非道路移动源等移动源贡献率较大。

参考文献:

- [1] 央视新闻. 《京津冀及周边地区 2017 年大气污染防治工作方案》发布[J]. 环境与发展, 2017, 29(2): 4.
- [2] Huang X J, Tang G Q, Zhang J K, et al. Characteristics of $\text{PM}_{2.5}$ pollution in Beijing after the improvement of air quality [J]. Journal of Environmental Sciences, 2021, 100: 1-10.
- [3] 生态环境部. 2019 中国生态环境状况公报 [EB/OL]. <http://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/>, 2021-09-27.
- [4] 曹振红. 《大气污染防治行动计划》对京津冀地区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的影响研究[J]. 环境科学与管理, 2021, 46(6): 62-66. Cao Z H. Impact of "Air Pollution Prevention Action Plan" on $\text{PM}_{2.5}$ concentration in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Environmental Science and Management, 2021, 46(6): 62-66.
- [5] 郭明明. 京津冀大气环境质量变化及其影响因素分析[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018.
- [6] 胡京南, 柴发合, 段菁春, 等. 京津冀及周边地区秋冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 爆发式增长成因与应急管控对策[J]. 环境科学研究, 2019, 32(10): 1704-1712. Hu J N, Chai F H, Duan J C, et al. Explosive growth of $\text{PM}_{2.5}$ during the autumn and winter seasons in the Jing-Jin-Ji and surrounding area and its control measures with emergency response [J]. Research of Environmental Sciences, 2019, 32(10): 1704-1712.
- [7] 朱媛媛, 高愈霄, 柴文轩, 等. 京津冀及周边区域 $\text{PM}_{2.5}$ 叠加沙尘重污染过程特征及预报效果分析[J]. 环境科学, 2020, 41(2): 574-586. Zhu Y Y, Gao Y X, Chai W X, et al. Heavy pollution

- characteristics and assessment of PM_{2.5} predicted model results in Beijing-Tianjin-Hebei region and surrounding areas during November 22 to December 4, 2018[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(2): 574-586.
- [8] 中共中央 国务院关于深入打好污染防治攻坚战的意见[EB/OL]. http://www.gov.cn/zhengce/2021-11/07/content_5649656.htm, 2021-09-27.
- [9] Luo Y, Liu S, Che L N, *et al.* Analysis of temporal spatial distribution characteristics of PM_{2.5} pollution and the influential meteorological factors using Big Data in Harbin, China[J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2021, **71**(8): 964-973.
- [10] Lin J J. Characterization of water-soluble ion species in urban ambient particles[J]. *Environment International*, 2002, **28**(1-2): 55-61.
- [11] Liang Z B, Zhao X F, Chen J Y, *et al.* Seasonal characteristics of chemical compositions and sources identification of PM_{2.5} in Zhuhai, China[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2019, **41**(8): 715-728.
- [12] Li J W, Zhang Z S, Wu Y F, *et al.* Effects of chemical compositions in fine particles and their identified sources on hygroscopic growth factor during dry season in urban Guangzhou of South China[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **801**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.149749.
- [13] Yao Y R, He C, Li S Y, *et al.* Properties of particulate matter and gaseous pollutants in Shandong, China: Daily fluctuation, influencing factors, and spatiotemporal distribution[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **660**: 384-394.
- [14] 陈兵红, 靳全锋, 柴红玲, 等. 浙江省大气PM_{2.5}时空分布及相关因子分析[J]. *环境科学学报*, 2021, **41**(3): 817-829.
- Chen B H, Jin Q F, Chai H L, *et al.* Spatiotemporal distribution and correlation factors of PM_{2.5} concentrations in Zhejiang Province[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, **41**(3): 817-829.
- [15] 冯子钰, 施润和. 中国近地面PM_{2.5}浓度与排放的时空分布及其关联分析[J]. *地球信息科学学报*, 2021, **23**(7): 1221-1230.
- Feng Z Y, Shi R H. Spatio-temporal features and the association of ground-level PM_{2.5} concentration and its emission in China[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2021, **23**(7): 1221-1230.
- [16] Mutuku K J, Lee Y Y, Chang-Chien G P, *et al.* Chemical fingerprints for PM_{2.5} in the ambient air near a raw material storage site for iron ore, coal, limestone, and sinter[J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2021, **21**(3), doi: 10.4209/aaqr.200624.
- [17] 蒋滨繁. 复合污染环境大气多元成核及PM_{2.5}形成机制[D]. 北京: 北京科技大学, 2020.
- [18] Li J W, Wu Y F, Ren L H, *et al.* Variation in PM_{2.5} sources in central North China plain during 2017-2019: response to mitigation strategies[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, **288**, doi: 10.1016/j.jenvman.2021.112370.
- [19] 陈慕白, 袁明浩, 林秋菊, 等. 郑州市PM_{2.5}组分季节性特征及来源研究[J]. *中国环境监测*, 2020, **36**(4): 61-68.
- Chen M B, Yuan M H, Lin Q J, *et al.* Seasonal characteristics and source apportionment of PM_{2.5} components in Zhengzhou City[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2020, **36**(4): 61-68.
- [20] 苗青青, 姜楠, 张瑞芹, 等. 中原城市群典型城市秋冬季大气PM_{2.5}污染特征及溯源[J]. *环境科学*, 2021, **42**(1): 19-29.
- Miao Q Q, Jiang N, Zhang R Q, *et al.* Characteristics and sources of PM_{2.5} pollution in typical cities of the central plains urban agglomeration in autumn and winter[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(1): 19-29.
- [21] 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.
- [22] Cheng N N, Zhang C, Jing D J, *et al.* An integrated chemical mass balance and source emission inventory model for the source apportionment of PM_{2.5} in typical coastal areas[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2020, **92**: 118-128.
- [23] 杨妍妍, 李金香, 梁云平, 等. 应用受体模型(CMB)对北京市大气PM_{2.5}来源的解析研究[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(9): 2693-2700.
- Yang Y Y, Li J X, Liang Y P, *et al.* Source apportionment of PM_{2.5} in Beijing by the chemical mass balance[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(9): 2693-2700.
- [24] 王彤, 华阳, 许庆成, 等. 京津冀郊区站点秋冬季大气PM_{2.5}来源解析[J]. *环境科学*, 2019, **40**(3): 1035-1042.
- Wang T, Hua Y, Xu Q C, *et al.* Source apportionment of PM_{2.5} in suburban area of Beijing-Tianjin-Hebei region in autumn and winter[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(3): 1035-1042.
- [25] 高雪倩, 吴建会, 张会涛, 等. 路边微环境PM_{2.5}化学组分特征及来源解析[J]. *中国环境科学*, 2021, **41**(11): 5086-5093.
- Gao X Q, Wu J H, Zhang H T, *et al.* Contributions of vehicle emissions to PM_{2.5} in roadside microenvironments[J]. *China Environmental Science*, 2021, **41**(11): 5086-5093.
- [26] 冯银厂. 我国大气颗粒物来源解析研究工作的进展[J]. *环境保护*, 2017, **45**(21): 17-20.
- Fen Y C. Research progress of source apportionment of atmospheric particulates in china[J]. *Environmental Protection*, 2017, **45**(21): 17-20.
- [27] 王治非, 张文娟, 李敏, 等. 2018年济南市PM_{2.5}叠加沙尘重污染过程分析[J]. *环境科学研究*, 2021, **34**(11): 2588-2598.
- Wang Z F, Zhang W J, Li M, *et al.* Analysis of a heavy air pollution episode with combined sand storm and high PM_{2.5} occurred in Jinan in 2018[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2021, **34**(11): 2588-2598.
- [28] 张敏会, 王建明. 空气中重金属元素的分析方法研究进展[J]. *理化检验(化学分册)*, 2018, **54**(7): 863-868.
- Zhang M H, Wang J M. Recent progress of analytical methods for heavy metal elements in air[J]. *Physical Testing and Chemical Analysis (Part B: Chemical Analysis)*, 2018, **54**(7): 863-868.
- [29] 刘寿东, 张莉, 张园园, 等. 温湿度对南京北郊PM_{2.5}中二次无机离子生成演化的影响[J]. *生态环境学报*, 2018, **27**(4): 714-721.
- Liu S D, Zhang L, Zhang Y Y, *et al.* Influences of Temperature and Humidity on Formation and Evolution of Secondary Aerosol Inorganic Ions of PM_{2.5} at Northern Suburban Nanjing[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2018, **27**(4): 714-721.
- [30] 李恒庆, 丁椿, 潘光, 等. 济南市居住区采暖季大气PM_{2.5}中碳组分构成及变化分析[J]. *生态环境学报*, 2019, **28**(9): 1810-1817.
- Li H Q, Ding C, Pan G, *et al.* Analysis on the composition and change of carbon components in PM_{2.5} of residential area in Jinan during heating period[J]. *Ecology and Environmental Sciences*,

- 2019, **28**(9): 1810-1817.
- [31] 郑翔翔, 洪正昉, 陈浩, 等. PM_{2.5}手工标准方法与自动监测法比对分析[J]. 环境污染与防治, 2015, **37**(7): 77-81.
Zhen X X, Hong Z F, Chen H, *et al.* Intercomparison of PM_{2.5} concentration measured by gravimetric measurement method and automated monitoring method[J]. Environmental Pollution and Control, 2015, **37**(7): 77-81.
- [32] 张蕾, 姬亚芹, 王士宝, 等. 盘锦市冬季 PM_{2.5}水溶性离子特征及来源分析[J]. 环境科学, 2018, **39**(6): 2521-2527.
Zhang L, Ji Y Q, Wang S B, *et al.* Characteristics and source apportionment of water-soluble ions in PM_{2.5} during winter in Panjin [J]. Environmental Science, 2018, **39**(6): 2521-2527.
- [33] 贺瑶, 韩秀秀, 黄晓虎, 等. 南京市不同功能区冬季大气 PM_{2.5}分布特征及其来源解析[J]. 环境科学学报, 2021, **41**(3): 830-841.
He Y, Han X X, Huang X H, *et al.* Distribution characteristics and source apportionment of atmospheric PM_{2.5} in winter season from different functional areas of Nanjing [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, **41**(3): 830-841.
- [34] 马妍, 姬亚芹, 国纪良, 等. 盘锦市秋季 PM_{2.5}水溶性离子特征及来源分析[J]. 环境科学学报, 2020, **40**(2): 401-407.
Ma Y, Ji Y Q, Guo J L, *et al.* Characteristics and source analysis of water-soluble ions in PM_{2.5} during autumn in Panjin [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, **40**(2): 401-407.
- [35] 严宇, 王雪松, 周家斌. 福州市区冬春季 PM_{2.5}污染特征与来源差异性分析[J]. 环境科学学报, 2019, **39**(4): 1049-1056.
Yan Y, Wang X S, Zhou J B. The seasonal differences of PM_{2.5} pollution characteristics and source regions between winter and spring in Fuzhou urban areas[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, **39**(4): 1049-1056.
- [36] 赵雨多, 任丽红, 李军, 等. 云南省芒市春季 PM_{2.5}水溶性离子特征分析及来源分析[J]. 环境工程技术学报, 2021, **11**(6): 1057-1064.
Zhao L D, Ren H L, Li J, *et al.* Characteristics and source analysis of water-soluble ions of PM_{2.5} during spring in Mang City, Yunnan Province [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2021, **11**(6): 1057-1064.
- [37] 唐淑婷. 济南市大气颗粒物中水溶性有机碳污染特征研究[D]. 济南: 山东大学, 2020.
- [38] 别淑君, 杨凌霄, 高颖, 等. 济南市背景区域大气 PM_{2.5}污染特征及其对能见度的影响[J]. 环境科学, 2019, **40**(9): 3868-3874.
Bie S J, Yang L X, Gao Y, *et al.* Characteristics of atmospheric PM_{2.5} pollution and its influence on visibility in background areas of Ji'nan [J]. Environmental Science, 2019, **40**(9): 3868-3874.
- [39] 贺克斌, 杨复沫, 段凤魁, 等. 大气颗粒物与区域复合污染[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [40] 胡珊瑚, 吴晓晨, 徐文帅, 等. 三亚城区 PM_{2.5}中水溶性离子特征与来源分析[J]. 环境科学学报, 2021, **41**(7): 2540-2549.
Hu S H, Wu X C, Xu W S, *et al.* Characteristics and source analysis of water-soluble ions in PM_{2.5} in Sanya [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, **41**(7): 2540-2549.
- [41] Zhang X Y, Zhao X, Ji G X, *et al.* Seasonal variations and source apportionment of water-soluble inorganic ions in PM_{2.5} in Nanjing, a megacity in southeastern China [J]. Journal of Atmospheric Chemistry, 2019, **76**(1): 73-88.
- [42] 薛国强, 朱彬, 王红磊. 南京市大气颗粒物中水溶性离子的粒径分布和来源解析[J]. 环境科学, 2014, **35**(5): 1633-1643.
Xue G Q, Zhu B, Wang H L. Size distributions and source apportionment of soluble ions in aerosol in Nanjing [J]. Environmental Science, 2014, **35**(5): 1633-1643.
- [43] 曹佳阳, 樊晋, 罗彬, 等. 川南四座城市 PM_{2.5}化学组分污染特征及其来源解析[J]. 环境化学, 2021, **40**(2): 559-570.
Cao J Y, Fan J, Luo B, *et al.* Pollution characteristics and source apportionment of PM_{2.5} in four urban environment of Southern Sichuan [J]. Environmental Chemistry, 2021, **40**(2): 559-570.
- [44] Luo L, Zhang Y Y, Xiao H Y, *et al.* Spatial distributions and sources of inorganic chlorine in PM_{2.5} across China in winter[J]. Atmosphere, 2019, **10**(9), doi: 10.3390/atmos10090505.
- [45] 黄含含, 王羽琴, 李升苹, 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.
- [46] Justino A R, Canha N, Gamelas C, *et al.* Contribution of micro-PIXE to the characterization of settled dust events in an urban area affected by industrial activities [J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2019, **322**(3): 1953-1964.
- [47] 周变红, 王锦, 曹夏, 等. 宝鸡市春季 PM_{2.5}中金属元素的污染特征及来源[J]. 环境科学与技术, 2021, **44**(1): 198-206.
Zhou B H, Wang J, Cao X, *et al.* Metal elements in PM_{2.5} during spring season: pollution characteristics and sources in Baoji City [J]. Environmental Science & Technology, 2021, **44**(1): 198-206.
- [48] 王羽琴, 李升苹, 陈庆彩, 等. 西安市大气 PM_{2.5}的化学组分及其来源[J]. 环境化学, 2021, **40**(5): 1431-1441.
Wang Y Q, Li S P, Chen Q C, *et al.* Study on chemical composition and pollution source of atmospheric PM_{2.5} in Xi'an City [J]. Environmental Chemistry, 2021, **40**(5): 1431-1441.
- [49] 李雪梅, 牟玲, 田妹, 等. 山西大学城 PM_{2.5}中元素特征、来源及健康风险评估[J]. 环境科学, 2020, **41**(11): 4825-4831.
- [50] Li X M, Mu L, Tian M, *et al.* Characteristics, sources, and health risks of elements in PM_{2.5} in Shanxi university town [J]. Environmental Science, 2020, **41**(11): 4825-4831.
- [51] 于涛, 刘亚妮, 任丽红, 等. 中国典型沿海城市冬季 PM_{2.5}中碳组分的污染特征及来源解析[J]. 环境化学, 2022, **41**(1): 113-124.
Yu T, Liu Y N, Ren L H, *et al.* Pollution characteristics and sources analysis of carbon components in PM_{2.5} in winter at typical coastal cities of China [J]. Environmental Chemistry, 2022, **41**(1): 113-124.
- [52] 张毓秀, 任万辉, 王嘉禾, 等. 沈阳市冬季不同污染程度 PM_{2.5}中 OC 和 EC 污染特征[J]. 中国环境科学, 2021, **41**(7): 3066-3075.
Zhang Y X, Ren W H, Wang J H, *et al.* Characteristics of organic carbon (OC) and elemental carbon (EC) under different pollution levels of PM_{2.5} during Winter in Shenyang [J]. China Environmental Science, 2021, **41**(7): 3066-3075.
- [53] 田莎莎. 济南市秋冬季不同污染程度下 PM_{2.5}组分特征及来源解析[D]. 天津: 天津师范大学, 2019.
- [54] 魏小锋, 谭路遥, 孙友敏, 等. 清洁能源政策下济南市采暖季 PM_{2.5}中水溶性离子变化分析[J]. 生态环境学报, 2019, **28**(7): 1416-1422.

- Wei X F, Tan L Y, Sun Y M, *et al.* Impact on water soluble ions in $PM_{2.5}$ during heating period in Jinan city by a policy of clean energy[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, **28**(7): 1416-1422.
- [54] 周睿智, 闫才青, 崔敏, 等. 山东省大气细颗粒物来源解析的研究现状与展望[J]. *中国环境科学*, 2021, **41**(7): 3029-3042.
- Zhou R Z, Yan C Q, Cui M, *et al.* Research status and prospects on source apportionment of atmospheric fine particulate matter in Shandong Province[J]. *China Environmental Science*, 2021, **41**(7): 3029-3042.
- [55] 济南市生态环境局. 济南市 2017 年度环境空气 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 来源解析结果发布[EB/OL]. http://jnepb.jinan.gov.cn/art/2018/5/18/art_10429_1115123.html, 2021-09-27.

环 境 科 学

CONTENTS

Chemical Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} in Urban Area of Beijing	AN Xin-xin, CAO Yang, WANG Qin, <i>et al.</i> (2251)
Modeling of PM _{2.5} Concentrations in the Beijing-Tianjin-Hebei Region Using a Space-time Linear Mixed Effects Model	FAN Li-hang, YANG Xiao-hui, SONG Chun-jie, <i>et al.</i> (2262)
Spatio-temporal Evolution Patterns of PM _{2.5} and Relationship with Urban Expansion in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration from 2000 to 2018	ZHAO An-zhou, XIANG Kai-zheng, LIU Xian-feng, <i>et al.</i> (2274)
Characteristics and Source Analysis of PM _{2.5} in Qingdao in Winter Under the Action of Sea-Land-Atmosphere Convergence	TUO Xiong, YANG Ling-xiao, ZHANG Wan, <i>et al.</i> (2284)
Impacts of Heterogeneous Uptake Pathway on Sulfate Formation: A Case Study in Shanghai Based on WRF-Chem	ZHANG Ru-han, ZHANG Hao-ran, FENG Wei-hang, <i>et al.</i> (2294)
Source Apportionment and Seasonal Changes in PM _{2.5} Chemical Components from Different Functional Areas of a Provincial Capital City	SUN You-min, FAN Jing, XU Biao, <i>et al.</i> (2304)
Chemical Compositions, Light Extinction Effect, and Oxidative Potential of PM _{2.5} Under Different Pollution Levels During Winter in Taiyuan	REN Jiao, ZHAO Rong-rong, WANG Ming, <i>et al.</i> (2317)
Source Apportionment and Health Risk Assessment of Metal Elements in Ambient PM _{2.5} in the Winter of Zhengzhou	YAO Sen, WANG Qian-heng, XUE Yan, <i>et al.</i> (2329)
Characteristics, Ecological Risk Assessment, and Sources of the Polluted Metallic Elements in PM _{2.5} During Winter in Zibo City	BAI Wen-yu, XU Bo, GUO Li-yao, <i>et al.</i> (2336)
Seasonal Distribution Characteristics, Source Analysis, and Health Risk Evaluation of PAHs in PM _{2.5} in Chengde	HE Bo-wen, NIE Sai-sai, LI Yi-lin, <i>et al.</i> (2343)
Pollution Level and Regional Migration of PCDD/Fs in Ambient Air from Pearl River Delta, China	FU Jian-ping, XIE Dan-ping, HUANG Jin-qiong, <i>et al.</i> (2355)
Concentrations and Sources of Black Carbon Aerosols in Rural Areas of Southern North China Plain	ZHANG Ling, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i> (2363)
Research on Causes of Severely Polluted Weather in Tianjin Based on Process Analytical Technology	HAO Jian, CAI Zi-ying, HAN Su-qin, <i>et al.</i> (2373)
Classification Control of Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission Pollution Sources Based on Emission Amounts and Atmospheric Reactivity	CHEN Peng, ZHANG Yue, XING Min, <i>et al.</i> (2383)
Complex Networks Reveal the Characteristics of Ozone in China	YING Na, CHEN Jian-hua, LI Dong, <i>et al.</i> (2395)
Ozone Simulation of Lanzhou City Based on Multi-scenario Emission Forecast of Ozone Precursors in the Summer of 2030	CHEN Tian-lei, WU Min, PAN Cheng-ke, <i>et al.</i> (2403)
Improvement of Environmental Model Prediction Based on Inversion and Aerosol Assimilation	CAI Zi-ying, TANG Miao, XIAO Zhi-mei, <i>et al.</i> (2415)
Method of Identifying Air Pollution from Iron and Steel Industry Based on Ambient Air Quality Monitoring Data Analysis	SHI Yao-peng, HU Jing-nan, CHU Yang-xi, <i>et al.</i> (2427)
Assessment of "Differentiated Response Requirement Based on Performance Grading" Policy During Heavy Air Pollution Alert	ZENG Jing-hai, WANG Can (2436)
Risk Zoning of Water Pollution in the Yellow River Basin	ZHOU Xia-fei, CAO Guo-zhi, YU Fang, <i>et al.</i> (2448)
Emission Characteristics of Industrial Water Pollutants in Gansu Section of the Yellow River Basin	LI Xue-ying, YANG Xi, QIAO Qi, <i>et al.</i> (2459)
Spatial-temporal Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in Sediments of the Yellow River	WANG Tao-yi, PAN Bao-zhu, HAN Xu, <i>et al.</i> (2467)
APCS-MLR Combined with PMF Model to Analyze the Source of Metals in Sediment of Xinglin Bay Suburban Watershed, Xiamen	SHEN Chen-yu, YAN Yu, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (2476)
Spatial Differentiation Characteristics and Response Relationship of DOM, Nutrients, and Heavy Metals in River Sediments	XIAO Yan-chun, YU Hui-bin, SONG Yong-hui (2489)
Distribution Characteristics, Evaluation, and Source Analysis of Heavy Metals in Soils of Fenhe Riparian Zone in Taiyuan City	HU Jie, ZHAO Xin-yu, WANG Ting-ting, <i>et al.</i> (2500)
Binding Affinity Between Heavy Metal Hg and Dissolved Organic Matter in Hongze Lake	HU Bin, WANG Pei-fang, ZHANG Nan-nan, <i>et al.</i> (2510)
Ecosystem Evolutionary Trajectory of Lake Xiliang over the Past Century Driven by Eutrophication	ZHENG Jia-nan, XU Min, ZHENG Wen-xiu, <i>et al.</i> (2518)
Sediment Release and Pollution Source Analysis of Typical Reservoirs in the Upper Reaches of the Yellow River Based on DGT Technology	MA Yu-shen, ZHU Xiang, PANG Qing-qing, <i>et al.</i> (2527)
Differential Characteristics and Source Identification of Water Quality of the Rivers in Northern Henan Before and After Rainstorm	ZHANG Yan, ZOU Lei, LIANG Zhi-jie, <i>et al.</i> (2537)
Adsorption and Interception Effects of <i>Eichhornia crassipes</i> on Microplastics in Water of the Poyang Lake Basin	LI Wen-gang, WU Xi-en, JIAN Min-fei, <i>et al.</i> (2548)
Spatiotemporal Distribution and Ecological Risk Assessment of Plastic Additives in Taihu Lake	LIU Shu-jiao, DING Jian-nan, SHI Jun-zhe, <i>et al.</i> (2557)
Distribution Characteristics, Sources, and Storage of Microplastics in Surface Sediments of Luoma Lake	YAO Ming-xuan, BAI Xue, XU Zhen-jia, <i>et al.</i> (2566)
Pollution Characteristics of Phosphorus in Different Media in Taihu Lake and Its Treatment Enlightenment	CAI Mei, LU Zhi-hua, WANG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (2575)
Analysis on Diversity and Structure of Microbial Community in River Sediment of Siping Section of Liaohe River	LI Peng-yang, AN Qi-rui, WANG Xin-hao, <i>et al.</i> (2586)
Non-point Source Pollution (NPS) Induces Structural and Functional Variation in Bacterial Communities in Sediments of Jialing River	XUE Yu-qin, XU Fei, LIU Kun-he, <i>et al.</i> (2595)
Effects of Microplastics on Bacterial Community Composition and Diversity in Sediments	LI Wen-lu, WANG Zhi-chao, YANG Wen-huan, <i>et al.</i> (2606)
Vertical Distribution Characteristics and Community Construction of Aerobic Denitrification Bacteria from the Sediments of Baiyangdian Lake During the Winter Freezing Period	ZHANG Tian-na, CHEN Zhao-ying, ZHANG Zi-wei, <i>et al.</i> (2614)
Effect of Induced Mixing on Bacterial Community Structure and Metabolic Activity in Reservoir	GAO Yue, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2624)
Distribution Characteristics of Microplastics in <i>Bellamyia aeruginosa</i> in Typical Area of Poyang Lake	JIANG Wei-qun, HU Qi-wu, JIAN Min-fei, <i>et al.</i> (2633)
Electrocatalytic Oxidation of Bisphenol A by Porous Ti/SnO ₂ -Sb-Ni Electrode Loaded with Multi-wall Carbon Nanotubes	FU Yuan-hang, LIU An-di, HUANG Wei-bin, <i>et al.</i> (2640)
Efficiency and Mechanism of Degradation of Methylene Blue with H ₂ O ₂ Catalyzed by Magnetic Mn _{0.4} Zn _{0.4} Fe ₂ O ₄ @SiO ₂	XU Dong-ying, YU Jing, HAO Qi, <i>et al.</i> (2650)
Effect of Two Types of Nanoparticles on the Adsorption of Ciprofloxacin on Zeolite	JIANG Lan-cui, MENG Zhao-fu, LIU Xian, <i>et al.</i> (2662)
Adsorption Mechanisms and Effect Factors of As(V) by AMD Sludge Composite Material	ZHANG Ya-hui, ZHANG Rui-xue, WU Pan, <i>et al.</i> (2673)
Shifts in Microbial Community and Variation in Functional Genes for Nitrification and Denitrification in Activated Sludge Affected by Triclosan and Its Transformed Intermediates	LU Ying-yuan, DONG Xiao-qi, PENG Xing-xing, <i>et al.</i> (2685)
Construction of Sustainability Evaluation Index System for Contaminated Site Risk Management and Analysis on Key Influential Factors	LI Xiao-nuo, YI Shi-yi, CHEN Wei-ping (2699)
Construction and Empirical Analysis of a Comprehensive Evaluation Method of Coastal Wetland Soil Quality Based on Ecological Functions	ZHANG Xue, KONG Fan-long, JIANG Zhi-xiang (2709)
Source Analysis and Pollution Assessment of Heavy Metals in Farmland Soil Around Tongshan Mining Area	CHEN Hang, WANG Ying, WANG Shu (2719)
Effects of Typical Iron and Manganese Minerals on Arsenic Speciation and Enzyme Activities in Paddy Soil	ZHOU Yi-min, HUANG Ya-yuan, LIU Kai, <i>et al.</i> (2732)
Phytoremediation Efficiency of Two Cultivars of <i>Brassica napus</i> L. Under Water-soluble Chitosan Treatment in Typical Pb-contaminated Farmland Soils	MENG Xiao-fei, ZHENG Guo-di, CHEN Tong-bin, <i>et al.</i> (2741)
Risk Prediction of Cadmium and Lead in Wheat Grains Based on Bayes Theorem	WANG Tian-qi, LI Yan-ling, YANG Yang, <i>et al.</i> (2751)
Interannual Variation Characteristics of Nitrogen Loss Under Rapeseed/Maize Rotation in Purple Soil Sloping Field	XU Man, GAO Ming, YU Luo, <i>et al.</i> (2758)
Physicochemical Properties of Biochars Prepared from Different Feedstocks and Evaluation of Its Potential as A Slow-release Carriers for Biochar-based Fertilizers	XING Li-bin, CHENG Jie, GENG Zeng-chao, <i>et al.</i> (2770)
Effects of Combined Application of Wood Vinegar-Acidified Biochar and Nitrogen on Active Nitrogen and Ammonia Volatilization in Saline Soil	SHEN Shu-wei, ZHANG Dan-dan, WANG Min-ge, <i>et al.</i> (2779)
Effects of Biodegradable Plastic Film Mulching on Greenhouse Gas Emissions Under Wheat-Maize Rotation System in the Guanzhong Plain	GUO Yi-ting, LUO Xiao-qi, WANG Rui, <i>et al.</i> (2788)
Forest Soil Microbial Community Structure Characteristics and Its Influencing Factors at Different Elevations on the Southern Slope of Daiyun Mountain	HE Zhong-sheng, WANG Zi-wei, ZHU Jing, <i>et al.</i> (2802)
Effects of Simulated Warming and Increased Precipitation on Soil Extracellular Enzyme Activity and Enzymatic Stoichiometry of Abandoned Grassland	WANG Xing, ZHONG Ze-kun, JIAN Jun-nan, <i>et al.</i> (2812)
Contribution of Urbanization to Local Warming in Major Cities of China	LI Yu, ZHOU De-cheng, YAN Zhang-mei, <i>et al.</i> (2822)