

目次

基于机器学习的珠三角秋季臭氧浓度预测	陈镇, 刘润, 罗征, 薛鑫, 汪瑶, 赵志军 (1)
粤港澳大湾区大气PM _{2.5} 浓度的遥感估算模型	代园园, 龚绍琦, 张存杰, 闵爱莲, 王海君 (8)
典型输送通道城市冬季PM _{2.5} 污染与传输变化特征	代武俊, 周颖, 王晓琦, 齐鹏 (23)
郑州市夏季PM _{2.5} 中二次无机组分污染特征及其影响因素	和兵, 杨洁茹, 徐艺斐, 袁明浩, 翟诗婷, 赵长民, 王申博, 张瑞芹 (36)
重庆典型城区冬季碳质气溶胶的污染特征及来源解析	彭超, 李振亮, 向英, 王晓宸, 汪凌韬, 张晟, 翟崇治, 陈阳, 杨复沐, 翟天宇 (48)
2022年8月成渝两地臭氧污染差异影响因素分析	陈木兰, 李振亮, 彭超, 邓也, 宋丹林, 谭钦文 (61)
2020年“三连击”台风对我国东部地区O ₃ 污染的影响分析	花丛, 尤媛, 王峰, 张碧辉 (71)
北京城区夏季VOCs初始体积分数特征及来源解析	张博韬, 景宽, 王琴, 安欣欣, 鹿海峰, 王陈婧, 王友峰, 刘保献 (81)
机动车减排降碳综合评价体系综述	范朝阳, 佟惠, 梁晓宇, 彭剑飞 (93)
基于LEAP模型的长三角某市碳达峰情景	杨峰, 张贵驰, 孙佑, 谢放尖, 揣小伟, 孙瑞玲 (104)
广东省船舶二氧化碳排放驱动因素与减排潜力	翁淑娟, 刘颖颖, 唐凤, 沙青娥, 彭勃, 王辉嘉, 陈诚, 张雪驰, 李京洁, 陈豪琪, 郑君瑜, 宋献中 (115)
给水厂典型工艺碳排放特征与影响因素	张翔宇, 胡建坤, 马凯, 高欣慰, 魏月华, 韩宏大, 李克勋 (123)
中国饮用水中砷的分布特征及基于伤残调整寿命年的健康风险评价	窦殿程, 齐媛, 肖淑敏, 苏高新, 郭宇新 (131)
太湖水体和沉积物中有机磷酸酯的时空分布和风险评价	张成诺, 钟琴, 栾博文, 周涛, 顾帆, 李伟飞, 邹华 (140)
水产养殖环境中农兽药物的污染暴露水平及其风险影响评价	张楷文, 张海燕, 孔聪, 顾润润, 田良良, 杨光昕, 王媛, 陈凤, 沈晓盛 (151)
长江朱沱断面磷浓度与通量变化及来源解析	姜保峰, 谢卫民, 黄波, 刘旻璇 (159)
珠江河口地表水锰氧化物对磷的“载-卸”作用	李睿, 梁作兵, 伍祺瑞, 杨晨晨, 田帝, 高磊, 陈建耀 (173)
富春江水库浮游植物功能群变化的成因	张萍, 王炜, 朱梦圆, 国超旋, 邹伟, 许海, 朱广伟 (181)
合浦盆地西部地区地下水水化学特征及形成机制	陈雯, 吴亚, 张宏鑫, 刘怀庆 (194)
新疆车尔臣河流域绿洲带地下水咸化与污染主控因素	李军, 欧阳宏涛, 周金龙 (207)
京津冀地区生态系统健康时空演变及其影响因素	李魁明, 王婉燕, 姚罗兰 (218)
近30年辽河三角洲生态系统服务价值时空演变及影响因素分析	王耕, 张芙蓉 (228)
光伏电站建设对陆地生态环境的影响:研究进展与展望	田政卿, 张勇, 刘向, 陈生云, 柳本立, 吴纪华 (239)
大兴安岭林草交错带植被NDVI时空演变及定量归因	石淞, 李文, 曲琛, 杨子仪 (248)
西南地区不同类型植被NPP时空演变及影响因素探究	徐勇, 郑志威, 孟禹弛, 盘钰春, 郭振东, 张炎 (262)
不同海拔梯度下极端气候事件对松花江流域植被NPP的影响	崔嵩, 贾朝阳, 郭亮, 付强, 刘东 (275)
基于InVEST与CA-Markov模型的昆明市碳储量时空演变与预测	帕茹克·吾斯曼江, 艾东, 方一舒, 张益宾, 李牧, 郝晋琨 (287)
基于PLUS-InVEST模型的酒泉市生态系统碳储量时空演变与预测	石晶, 石培基, 王梓洋, 程番苑 (300)
长江下游沿江平原土壤发育过程中碳库分配动态	胡丹阳, 张欢, 宿宝巍, 张娅璐, 王永宏, 纪佳辰, 杨洁, 高超 (314)
漓江流域喀斯特森林土壤有机碳空间分布格局及其驱动因子	申楷慧, 魏识广, 李林, 储小雪, 钟建军, 周景钢, 赵毅 (323)
不同土地利用方式对岩溶区土壤有机碳组分稳定性的影响	陈坚淇, 贾亚男, 贺秋芳, 江可, 陈畅, 叶凯 (335)
紫色土丘陵区坡地柑橘园土壤碳氮的空间分布特征	李子阳, 陈露, 赵鹏, 周明华, 郑静, 朱波 (343)
氮添加与凋落物处理对橡胶林砖红壤有机碳组分及酶活性的影响	薛欣欣, 任常琦, 罗雪华, 王文斌, 赵春梅, 张永发 (354)
重庆化肥投入驱动因素、减量潜力及环境效应分析	梁涛, 赵敬坤, 李红梅, 王妍, 曹中华, 张务帅, 王孝忠, 郭超仪, 石孝均, 陈新平 (364)
中国土壤中全氟和多氟烷基物质的分布、迁移及管控研究进展	刘浩然, 邢静怡, 任文杰 (376)
基于多源辅助变量和随机森林模型的耕地土壤重金属含量空间分布预测	解雪峰, 郭炜炜, 濮励杰, 缪源卿, 蒋国俊, 张建珍, 徐飞, 吴涛 (386)
基于源导向的农用地土壤重金属健康风险评估及优先控制因子分析	马杰, 葛森, 王胜蓝, 邓力, 孙静, 蒋月, 周林 (396)
铜陵某废弃硫铁矿矿区土壤重金属污染特征及来源解析	李如忠, 刘宇昊, 黄言欢, 吴鸿飞 (407)
天水市主城区公交站地表灰尘重金属来源解析及污染评价	李春艳, 王新民, 王海, 吕晓斌 (417)
基于大田试验的土壤-水稻镉对不同调理剂的响应	唐乐斌, 刘新彩, 宋波, 马丽钧, 黄凤艳 (429)
腐殖质活性组分对土壤镉有效性的调控效应与水稻安全临界阈值	胡秀芝, 宋毅, 王天雨, 蒋珍芬, 魏世强 (439)
生物炭与铁钙材料对镉砷复合污染农田土壤的修复	吴秋产, 吴骥子, 赵科理, 连斌, 袁峰, 孙洪, 田欣 (450)
人体微塑料污染特征及健康风险研究进展	马敏东, 赵洋尘, 朱龙, 王伟平, 康玉麟, 安立会 (459)
聚苯乙烯微塑料联合镉污染对土壤理化性质和生菜(<i>Lactuca sativa</i>)生理生态的影响	牛佳瑞, 邹勇军, 简敏菲, 黄楚红, 李金燕, 穆霞, 刘淑丽 (470)
转录组分析植物促生细菌缓解高粱微塑料和重金属复合污染胁迫机制	刘泳岐, 赵超禹, 任学敏, 李玉英, 张英君, 张浩, 韩辉, 陈兆进 (480)
微塑料对土壤中养分和镉淋失的影响	赵群芳, 褚龙威, 丁原红, 王发园 (489)
微塑料和非对土壤化学性质、酶活性及微生物群落的影响	刘沙沙, 秦建桥, 吴贤格 (496)
民勤荒漠绿洲过渡带人工梭梭林土壤细菌群落结构及功能预测	王安林, 马瑞, 马彦军, 吕彦勋 (508)
不同灌溉水盐度下土壤真菌群落对生物炭施用的响应	郑志玉, 郭晓雯, 闵伟 (520)
厨余垃圾有机肥对土壤微生物活性及功能的影响	刘美灵, 汪益民, 金文豪, 王永冉, 王嘉和, 柴一博, 彭丽媛, 秦华 (530)
土壤真菌群落结构对辣椒长期连作的响应特征	陈芬, 余高, 王谢丰, 李廷亮, 孙约兵 (543)
叶面喷施硅肥对再生水灌溉水稻叶际细菌群落结构及功能基因的影响	梁胜贤, 刘春成, 胡超, 崔二苹, 李中阳, 樊向阳, 崔丙健 (555)
昌黎县海域细菌群落和抗生素抗性基因分析	王秋水, 程波, 刘悦, 邓婕, 徐岩, 孙朝徽, 袁立艳, 左嘉, 司飞, 高丽娟 (567)
基于高通量定量PCR与高通量测序技术研究城市湿地公园抗生素抗性基因污染特征	黄福义, 周曙仡, 潘婷, 周昕原, 苏建强, 张炯 (576)
城区第四系沉积柱中抗生素的垂向分布特征及环境影响因素	刘可, 童蕾, 甘翠, 王逸文, 张嘉越, 何军 (584)
氢氧化钾改性玉米秸秆生物炭对水中土霉素的吸附特性及机制	刘总堂, 孙玉凤, 费正皓, 沙新龙, 温小菊, 钱彬彬, 陈建, 谷成刚 (594)
CO ₂ 气氛热解与硝酸改性的生物炭Pb ²⁺ 吸附性能对比	江豪, 陈瑞芝, 朱自洋, 王琳, 段文斌, 陈芳媛 (606)

重庆典型城区冬季碳质气溶胶的污染特征及来源解析

彭超^{1,2,3}, 李振亮^{1,2,3*}, 向英^{1,2,3}, 王晓宸^{1,2,3}, 汪凌韬^{1,2,3}, 张晟^{1,2,3}, 翟崇治^{1,2,3}, 陈阳⁴, 杨复沫⁵, 翟天宇⁶

(1. 重庆市生态环境科学研究院, 重庆 401147; 2. 中国环境科学研究院西南分院, 重庆 401147; 3. 城市大气环境综合观测与污染防治重庆市重点实验室, 重庆 401147; 4. 中国科学院重庆绿色智能技术研究院, 重庆 400714; 5. 四川大学建筑与环境学院, 成都 610065; 6. 北京大学环境科学与工程学院, 北京 100871)

摘要: 于2021年1~2月在重庆典型城区万州区(WZ)、渝北区(YB)和双桥区(SQ)同步采集PM_{2.5}样品, 分析冬季碳质气溶胶的污染特征、来源及潜在源区。结果表明, 观测期间SQ的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 、 $\rho(\text{OC})$ 和 $\rho(\text{EC})$ 均值分别为 (72.6 ± 33.3) 、 (18.2 ± 8.2) 和 $(4.4 \pm 1.7) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 高于WZ $[(67.2 \pm 30.3)$ 、 (17.2 ± 7.4) 和 $(5.1 \pm 2.4) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$ 和YB $[(63.4 \pm 25.7)$ 、 (15.4 ± 6.3) 和 $(4.2 \pm 1.9) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$ 。与清洁日相比, WZ污染日EC浓度及其对总碳的贡献率均涨幅最大(103.0%和8.1%), 但OC/EC值下降最明显(-10.5%), 表明WZ污染日碳质气溶胶的一次排放明显增强。观测期间SQ和YB的 $\rho(\text{SOC})$ 均值分别为 $(7.7 \pm 4.8) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $(6.9 \pm 2.8) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 明显高于WZ $[(4.5 \pm 1.9) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$, 表明二次转化对SQ和YB碳质气溶胶的影响相对较大。此外, 与WZ不同, SQ和YB的SOC/OC值整体随PM_{2.5}浓度上升而增大, 且SOC浓度与气溶胶液态水含量(AWC)、NO₂浓度和NOR值等均显著线性相关($P < 0.01$), 表明通过液相反应生成含—NO₂官能团的SOC可能是SQ和YB碳质气溶胶浓度持续上升的主要因素。正定矩阵因子(PMF)解析结果表明, WZ的生物质/煤炭燃烧混合源贡献率(47.4%)明显高于YB(34.2%)和SQ(38.1%), 而YB受汽油车排放和二次转化的影响较为突出。浓度权重轨迹分析(CWT)结果表明, 各城区污染日碳质气溶胶主要受本地及其东北方向相邻城区(如长寿区)的影响。

关键词: 碳质气溶胶; 污染过程; 二次有机碳; 来源解析; 重庆

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)01-0048-13 DOI: 10.13227/j.hj.kx.202302166

Characteristics and Source Apportionment of Carbonaceous Aerosols in the Typical Urban Areas in Chongqing During Winter

PENG Chao^{1,2,3}, LI Zhen-liang^{1,2,3*}, XIANG Ying^{1,2,3}, WANG Xiao-chen^{1,2,3}, WANG Ling-tao^{1,2,3}, ZHANG Sheng^{1,2,3}, ZHAI Chong-zhi^{1,2,3}, CHEN Yang⁴, YANG Fu-mo⁵, ZHAI Tian-yu⁶

(1. Chongqing Academy of Eco-Environmental Science, Chongqing 401147, China; 2. Chongqing Branch Academy of Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Chongqing 401147, China; 3. Key Laboratory for Urban Atmospheric Environment Integrated Observation & Pollution Prevention and Control of Chongqing, Chongqing 401147, China; 4. Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714, China; 5. College of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 6. College of Environmental Sciences and Engineering, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: To investigate the characteristics, source apportionment, and potential source areas of carbonaceous aerosols in Chongqing during winter, PM_{2.5} samples were collected from January 2021 to February 2021 in the urban areas of Wanzhou (WZ), Yubei (YB), and Shuangqiao (SQ). The results showed that the average mass concentrations of PM_{2.5}, OC, and EC in SQ were (72.6 ± 33.3) , (18.2 ± 8.2) , and $(4.4 \pm 1.7) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, respectively, higher than those in WZ $[(67.2 \pm 30.3)$, (17.2 ± 7.4) , and $(5.1 \pm 2.4) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$ and YB $[(63.4 \pm 25.7)$, (15.4 ± 6.3) , and $(4.2 \pm 1.9) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$. Compared with that during the clear period, the concentration and fraction of EC in total carbon increased by 103.0% and 8.1%, respectively, in WZ compared to that in other areas during pollution period, whereas the OC/EC ratio was decreased significantly (-10.5%), indicating that the primary emission of carbonaceous aerosols increased significantly during the pollution period. The average mass concentrations of secondary organic carbon (SOC) in SQ and YB were $(7.7 \pm 4.8) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ and $(6.9 \pm 2.8) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ significantly higher, respectively, than that in WZ $[(4.5 \pm 1.9) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$ during the campaign. This indicated that the secondary transformation had a greater influence on the carbonaceous aerosols in SQ and YB than that in WZ. Furthermore, in contrast to that in WZ, the ratios of SOC/OC were increased with the increase in PM_{2.5} concentrations, and significant correlations between SOC concentration and aerosol water content, NO₂ concentration, and the value of NOR were observed in SQ and YB ($P < 0.01$), indicating that the increasing of carbonaceous aerosol concentrations might be mainly driven by the SOC with —NO₂ groups produced by aqueous chemical reactions during winter in SQ and YB. The positive definite matrix factor (PMF) results in these urban areas showed that the contribution of biomass/coal combustion source in WZ (47.4%) was significantly higher than that in YB (34.2%) and SQ (38.1%), whereas the gasoline motor vehicle emission and secondary transformation impacts were more significant in YB. The results of the concentration weighted trajectory (CWT) showed that the potential sources of carbonaceous aerosols were mainly the local and northeastern parts of these urban areas (such as Changshou).

Key words: carbonaceous aerosols; pollution period; secondary organic carbon; source apportionment; Chongqing

收稿日期: 2023-02-21; 修订日期: 2023-04-11

基金项目: 重庆市自然科学基金项目(CSTB2022NSCQ-MSX0504); 重庆市博士“直通车”科研项目(CSTB2022BSXM-JCX0157); 重庆市基本科研业务费计划项目(Cqhkyl2021jxj100004)

作者简介: 彭超(1990~), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为大气污染成因和来源解析, E-mail: pengchao0623@sina.com

* 通信作者, E-mail: zhenliangli@163.com

碳质气溶胶是环境大气中 $\text{PM}_{2.5}$ 的重要组成部分,约占 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的20%~50%^[1,2],主要包括有机碳(organic carbon, OC)、元素碳(elemental carbon, EC)和碳酸盐碳(carbonate carbon, CC),其中CC占比通常小于5%,在研究中一般不予考虑^[3,4]. OC由上百种有机物组成,既包括燃烧源直接排放的一次有机碳(primary organic carbon, POC),也包括挥发性有机物(volatile organic compounds, VOCs)等气态前体物通过复杂化学反应或POC经老化反应等生成的二次有机碳(secondary organic carbon, SOC)^[5,6]. EC(通常也称blank carbon, BC)是以单质状态存在的碳,来源于化石燃料和生物质燃料的不完全燃烧^[7]. OC具有散射和吸收光的作用,EC则是具有强吸光性的物质,两者直接或间接影响全球和区域气候变化^[8,9]. 鉴于碳质气溶胶对空气质量、气候变化和人体健康的重要影响,且具有复杂的污染来源,环境大气中碳质气溶胶的污染特征及来源一直是国内外研究的热点^[10,11].

目前,国内外关于碳质气溶胶的研究方向主要聚焦于污染特征、来源解析和光学特性等方面^[5,12-14]. OC和EC是我国环境大气气溶胶的主要污染物,但国内的相关研究起步较晚,主要集中在京津冀、珠三角、长三角和汾渭平原等地区,且各地区的污染特征差异明显^[15-18]. Yang等^[15]研究了北京市2005~2008年OC和EC的污染特征,发现秋冬季较高的OC和EC浓度主要受生物质燃烧排放影响.Yao等^[17]研究发现上海市2015~2017年冬季OC和EC浓度逐年下降,主要受机动车排放的影响.张颖龙等^[18]基于嘉兴市冬季碳质气溶胶的污染特征研究发现,轻度污染时段POC对 $\text{PM}_{2.5}$ 贡献较大,而中度以上污染时段 $\text{PM}_{2.5}$ 主要受SOC影响.此外,早期研究指出我国城市大气霾污染期间二次有机气溶胶约占有有机气溶胶的44%~71%^[19,20],其中二次有机气溶胶可能主要由液相反应生成,但相关研究成果主要来源于实验室模拟.

重庆位于我国西南地区,是代表四川盆地大地形的典型山地城市,其大气污染物的排放源复杂、排放强度大;同时,该地区还是我国传统的雾多发区,冬季高湿静稳天气频发.早期研究发现,四川盆地 $\text{PM}_{2.5}$ 污染源贡献及其组分特征与国内其他地区存在较大差异,且重庆 $\text{PM}_{2.5}$ 中碳质组分占比高于其他城市^[21],这可能与山地城市特殊的地形地貌、气象条件和污染源分布等有关.近年来,重庆碳质气溶胶的污染问题引起了研究学者的广泛关注^[22-26].例如,Wang等^[22]研究发现冬季重庆碳质气溶胶浓度以及OC/EC值均明显高于盆地内的成都.文献^[23,24]研究了重庆城区夏冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 中碳质组分污染特征,发现冬季OC和EC浓度约为夏季的2~3倍,主要来源于冬季

生物质燃烧和机动车尾气排放.Ding等^[25]研究发现冬季碳质气溶胶浓度高于其他季节,除了受生物质燃烧影响外,还可能与冬季较强的非均相反应有关.Chen等^[26]基于单颗粒气溶胶质谱仪研究了重庆城区冬季颗粒物污染特征,发现二次老化是颗粒物中OC的重要来源.以上研究表明,重庆冬季碳质气溶胶的污染来源复杂,污染程度在盆地内相对较重,对 $\text{PM}_{2.5}$ 污染形成和区域气候变化影响明显.然而,目前关于重庆碳质气溶胶的研究主要集中在单个观测点OC、EC浓度水平和污染来源的季节变化特征等方面,关于山地城市不同碳质组分污染的空间差异性及其对 $\text{PM}_{2.5}$ 污染和二次有机气溶胶形成的研究较少.

本研究以重庆典型城区(渝北区、万州区和双桥区)为研究区域,其中渝北区、万州区和双桥区分别位于重庆中心城区、渝东北地区 and 渝西地区,同步采集2021年1~2月(2021年冬季) $\text{PM}_{2.5}$ 样品,分析盆地大地形下典型山地城市冬季不同城区不同碳质组分的污染特征及其对 $\text{PM}_{2.5}$ 污染贡献,初步探讨SOC的形成途径,并基于PMF受体模型、浓度权重轨迹分析等方法解析碳质气溶胶的污染源贡献和污染潜在源区,以期为重庆 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的防控治理和深入研究提供宝贵的经验和科学依据.

1 材料与方法

1.1 样品采集

本研究采样地点分别设置在渝北区、万州区和双桥区3个主要城区,采样点位于空气质量监测站附近,具有较强的城区代表性(图1).位于重庆中心城区的渝北区采样点(YB:29.60°N,106.37°E)和渝东北地区的万州区采样点(WZ:30.84°N,106.50°E)周边均以居住区和办公区为主,点位距离城市主干道约50 m.其中,YB点位地势较为平坦,周边商业写字楼和高层住宅小区相对较多;WZ点位三面环山,周边以老旧小区为主,两个点位的局地污染源排放和

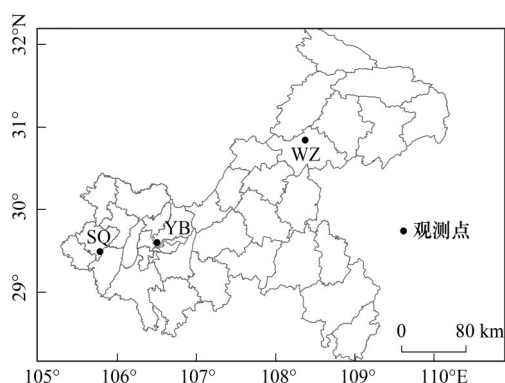


图1 采样点位分布示意

Fig. 1 Distribution of the sampling sites

传输情况存在较大的差异。位于渝西地区的双桥区采样点(SQ: 29. 49°N, 105. 78°E)周边以居住区和工业区为主, 附近汽车装备制造等行业企业较多。各点位同步采样时间为2021年1月21日至2月20日, 采样频率为逐日(每天采样23 h), 采样仪器为Comde-Derenda PNS 颗粒物采样器, 采样流量为16.7 L·min⁻¹, 采样滤膜为石英纤维滤膜和Teflon 滤膜(whatman)。采样前将石英纤维滤膜置于600℃的马弗炉中焙烧6 h, 去除残留的碳质组分; 采样前后将Teflon 滤膜置于恒温恒湿条件下(20℃, 相对湿度50%)48 h后称重。此外, 本研究在采样期间每10天随机采集一组全程空白样品, 空白样品的采集工作在当日PM_{2.5}样品采集开始之前完成, 采集时间为0 h, 其前处理、采样操作和运输保存等环节与PM_{2.5}样品一致。同期的SO₂、NO₂等常规污染物浓度数据来自附近空气质量监测站, 温度(*T*)和相对湿度(RH)等气象数据来自重庆市气象局每日发布。

1.2 样品分析

本研究根据IMPROVE协议规定的热/光反射法(thermal/optical reflection, TOR), 采用DRI Model 2015多波段热/光碳分析仪分析PM_{2.5}样品中各碳质组分浓度。具体分析过程: 截取0.526 cm²的样品滤膜放入仪器样品舟中进行加热分析, 首先在无O₂的纯He环境中, 依次在140、280、480和580℃下进行加热将OC1、OC2、OC3和OC4转化为CO₂; 然后在含2%O₂的He/O₂环境中, 分别在580、740和840℃下逐步加热, 将EC1、EC2和EC3转化为CO₂, 上述CO₂均是由各环节加热释放的碳质组分经MnO₂氧化炉转化生成, 最终由NDIR非分散红外检测器定量检测。IMPROVE协议将OC定义为OC1+OC2+OC3+OC4+OP, EC定义为EC1+EC2+EC3-OP, 总碳(TC)定义为OC+EC^[27], 本研究采用635 nm波段的测量数据进行分析, 当OP值为负值时记为0。该仪器检出限为0.2 μg·m⁻³, 精密度要求为±5%以内, 每天测试样品前对仪器进行烘炉[ρ(TC)≤0.3 μg·m⁻³]、CH₄/He标准气校准(OC3、EC1和CH₄三者峰面积的相对标准偏差≤5%)。此外, 每10个样品随机开展1次平行样品分析(相对误差≤5%), 同时测量全程空白并在结果中扣除。PM_{2.5}中水溶性无机离子浓度采用Dionex-1100型离子色谱分析仪测定, 分析方法及质控信息见文献[28]。

1.3 数据分析

1.3.1 ISORROPIA-II模型

ISORROPIA-II模型可以模拟Na⁺-K⁺-NH₄⁺-Mg²⁺-Ca²⁺-SO₄²⁻-NO₃⁻-Cl⁻-H₂O气溶胶系统的热力学平衡, 并通过“Forward Problem”和“Reverse Problem”两种模式推算处于稳态模式下的颗粒态水溶性离子浓度和气

态酸性气体浓度, 进而模拟计算气溶胶液态水含量(aerosol water content, AWC)^[29]。其中, “forward problem”模式以气温、相对湿度以及NH₃、H₂SO₄、Na、HCl、HNO₃、K、Ca和Mg在气态和颗粒态中的总浓度为输入参数进行模拟计算; 而“reverse problem”模式则是以气温、相对湿度和上述各组分在颗粒态中的浓度为输入参数进行模拟计算。鉴于观测期间未获取气态NH₃、HNO₃和HCl浓度, 本研究以颗粒态水溶性离子浓度、气温和相对湿度为输入参数, 采用“Reverse Problem”模式计算获得AWC值。早期研究发现AWC值与RH正相关, 其中AWC值的模拟误差随RH的增大而减小^[30,31], 考虑到观测期间各采样点的RH日均值较高(>60%), 因此本研究模拟计算的AWC值较为可靠。

1.3.2 SOC的计算

EC来自污染源的一次排放, 因此EC示踪法常用于估算一次和二次有机碳含量, 本研究基于OC/EC最小值法估算SOC的浓度:

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

式中, SOC为二次有机碳的浓度, μg·m⁻³; OC和EC分别为有机碳和元素碳的浓度, μg·m⁻³; (OC/EC)_{min}为观测期间OC/EC最小值。

1.3.3 正定矩阵因子分解(PMF)

正定矩阵因子分解(positive matrix factorization, PMF)是一种基于化学组分并结合源特征定量解析污染源贡献的源解析方法, 不依赖污染源的结构和数目, 避免了因污染源成分谱缺失或不确定性导致的结果偏差^[32]。PMF方法采用最小二乘法解析出非负、非正交的因子:

$$X_{ij} = \sum_{k=1}^p G_{ik} F_{kj} + E_{ij} \quad (2)$$

$$Q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (E_{ij}/\sigma_{ij})^2 \quad (3)$$

式中, *X*为*n*×*m*的化学组分浓度矩阵, *G*为*n*×*p*的源贡献矩阵, *F*为*p*×*m*源廓线矩阵, *E*为*n*×*m*残差矩阵; *X_{ij}*为样品*i*中组分*j*的浓度, *G_{ik}*为因子*k*对样品*i*的贡献(*G_{ik}*≥0), *F_{kj}*为因子*k*中组分*j*的浓度(*F_{kj}*≥0), *E_{ij}*为样品*i*中组分*j*的浓度与其解析值的残差, *σ_{ij}*为数据*X_{ij}*的不确定度, 其计算方法见文献[33]。当获得的污染源数量较为合理时, 本研究选择*Q*值最小的拟合结果作为最优解。

1.3.4 浓度权重轨迹分析(CWT)

利用TrajStat软件分析观测期间碳质气溶胶的气团来源及潜在源区^[34]。后向轨迹分析(HYSPLIT)所用的气象数据由美国国家环境预报中心全球资料同化系统(global data assimilation system)提供。由于采样开始时间为北京时间23:00, 本研究以世界标准时间

(UTC) 15:00 为起始时间(间隔 1 h),以地面以上 100 m 为起始高度开始往后推算 48 h 气团轨迹,并将所有后向轨迹进行聚类分析^[35]. 浓度权重轨迹分析(CWT)基于污染物浓度和轨迹停留时间,通过引入权重函数,模拟潜在源区污染物的权重浓度数值,进而反映潜在源区的污染程度^[36]. 本研究将轨迹覆盖区域划分为 $i \times j$ 个网格,网格分辨率为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$,具体计算公式:

$$CWT_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^M C_k \tau_{ijk}}{\sum_{k=1}^M \tau_{ijk}} \quad (4)$$

$$WCWT_{ij} = CWT_{ij} \times W_{ij} \quad (5)$$

$$W_{ij} = \begin{cases} 1.00, & 80 > n_{ij}, \\ 0.70, & 20 < n_{ij} \leq 80, \\ 0.42, & 10 < n_{ij} \leq 20, \\ 0.05, & n_{ij} \leq 10. \end{cases} \quad (6)$$

式中, C_k 为轨迹 k 经过网格 (i, j) 时对应的污染物浓度, τ_{ijk} 为轨迹 k 在网格 (i, j) 停留的时间, M 为轨迹总数, $WCWT_{ij}$ 为网格 (i, j) 上的平均污染权重浓度, n_{ij} 为经过网格 (i, j) 的所有轨迹数, W_{ij} 为权重函数,用于降低 $WCWT_{ij}$ 的不确定性.

2 结果与讨论

2.1 $PM_{2.5}$ 、OC 和 EC 浓度变化特征

观测期间, SQ、WZ 和 YB 的 $PM_{2.5}$ 及其碳质组分

浓度日变化特征如图 2 所示. 2021 年冬季 SQ、WZ 和 YB 的 $\rho(PM_{2.5})$ 均值分别为 (72.6 ± 33.3) 、 (67.2 ± 30.3) 和 $(63.4 \pm 25.7) \mu g \cdot m^{-3}$; $\rho(OC)$ 均值分别为 (18.2 ± 8.2) 、 (17.2 ± 7.4) 和 $(15.4 \pm 6.3) \mu g \cdot m^{-3}$, 占 $PM_{2.5}$ 浓度的 25.6%、25.3% 和 27.1%; $\rho(EC)$ 均值分别为 (4.4 ± 1.7) 、 (5.1 ± 2.4) 和 $(4.2 \pm 1.9) \mu g \cdot m^{-3}$, 在 $PM_{2.5}$ 中占比为 6.6%、6.1% 和 7.6% (图 2 和表 1). 从空间分布上看, 观测期间 SQ 和 WZ 的 $PM_{2.5}$ 及其 OC 和 EC 浓度明显高于中心城区 YB, 表明重庆主城周边城区的碳质气溶胶污染程度相对较高. 此外, YB 的 OC 和 EC 浓度变化幅度相对较大 (图 2), 两者最高浓度与最低浓度的比值分别为 7.0 和 9.0, 高于 SQ (6.8 和 6.0) 和 WZ (5.8 和 8.6), 可能与各城区排放源和气象条件差异有关^[23-26]. 值得注意的是, YB 的 $\rho(OC)$ 和 $\rho(EC)$ 均值明显低于 2015 年冬季 $[(24.2 \pm 13.6) \mu g \cdot m^{-3}$ 和 $(5.9 \pm 3.2) \mu g \cdot m^{-3}]$ ^[22] (表 1); 但 WZ 的 $\rho(OC)$ 均值略高于 2013 年冬季 $[(16.82 \pm 6.87) \mu g \cdot m^{-3}]$ ^[24], 表明在长期治理下重庆中心城区碳质气溶胶浓度明显下降, 但渝东北地区的效果不明显. 与国内主要城市相比 (表 1), 重庆典型城区冬季 OC 和 EC 浓度均高于成都^[37]、上海^[38]、南京^[39] 和广州^[40], 低于北京^[41]、承德^[42]、西安^[43] 和宝鸡^[44]; 与国外主要城市相比, 高于发达国家城市, 如韩国光州^[45]、美国洛杉矶^[46] 和意大利

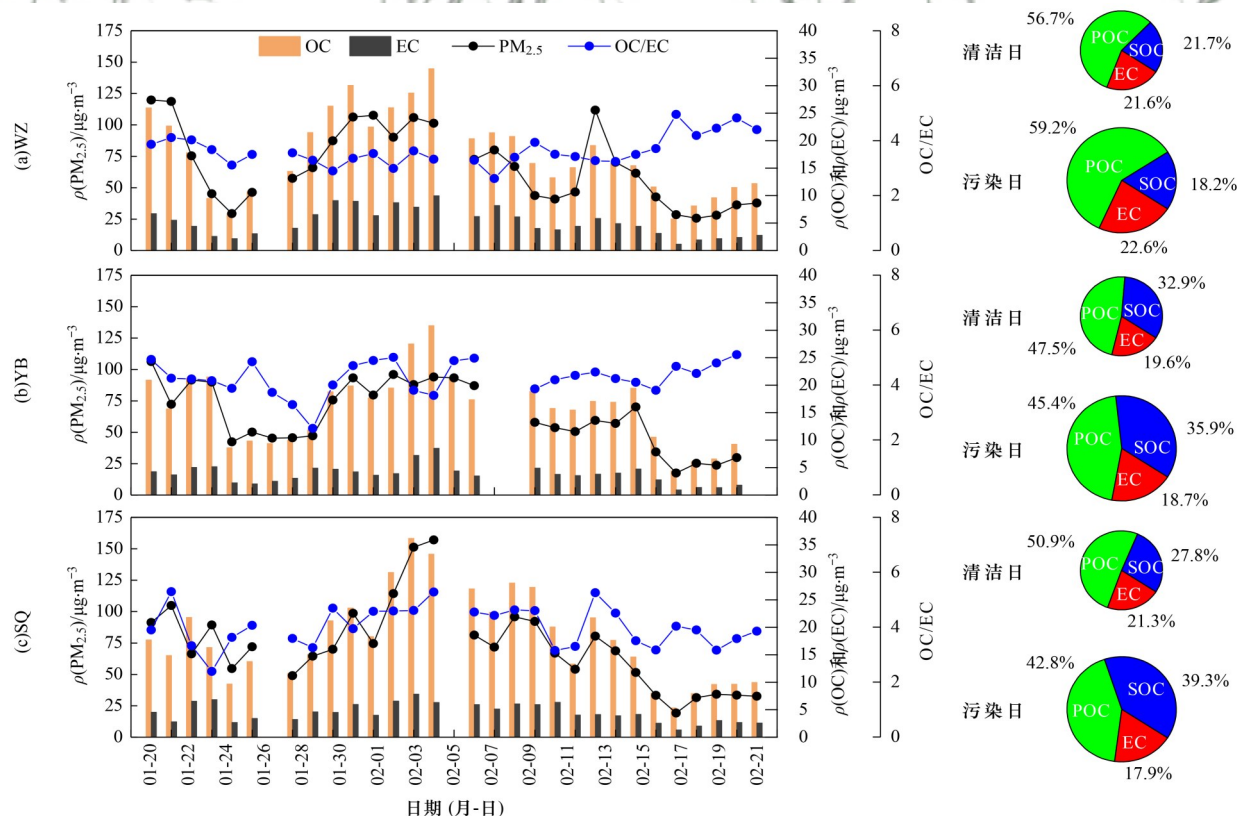


图 2 2021 年重庆典型城区冬季 $PM_{2.5}$ 、OC 和 EC 浓度时间变化

Fig. 2 Temporal variations in $PM_{2.5}$, OC, and EC concentrations during winter in the typical urban areas in Chongqing in 2021

米兰^[47],但明显低于一些发展中国家城市,如印度新德里^[48],这可能主要与各地不同的能源结构有关。

按照我国环境空气质量标准(GB 3095-2012)规定,本研究将污染日定义为 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 日均值 $>75\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,清洁日 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 日均值 $\leq 75\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。如图2所示,观测期间WZ、YB和SQ污染天数分别为11、11

和12 d,污染天数占比均超过38%,各采样点OC和EC浓度变化趋势与 $\text{PM}_{2.5}$ 一致。WZ、YB和SQ污染日 $\rho(\text{OC})$ 日均值分别为 (24.9 ± 4.7) 、 (21.5 ± 4.1) 和 $(24.5\pm 6.9)\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,约为清洁日的1.9、1.8和1.8倍; $\rho(\text{EC})$ 均值分别为 (7.4 ± 1.8) 、 (5.0 ± 1.6) 和 $(5.6\pm 1.4)\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,约为清洁日的2.0、1.6和1.5

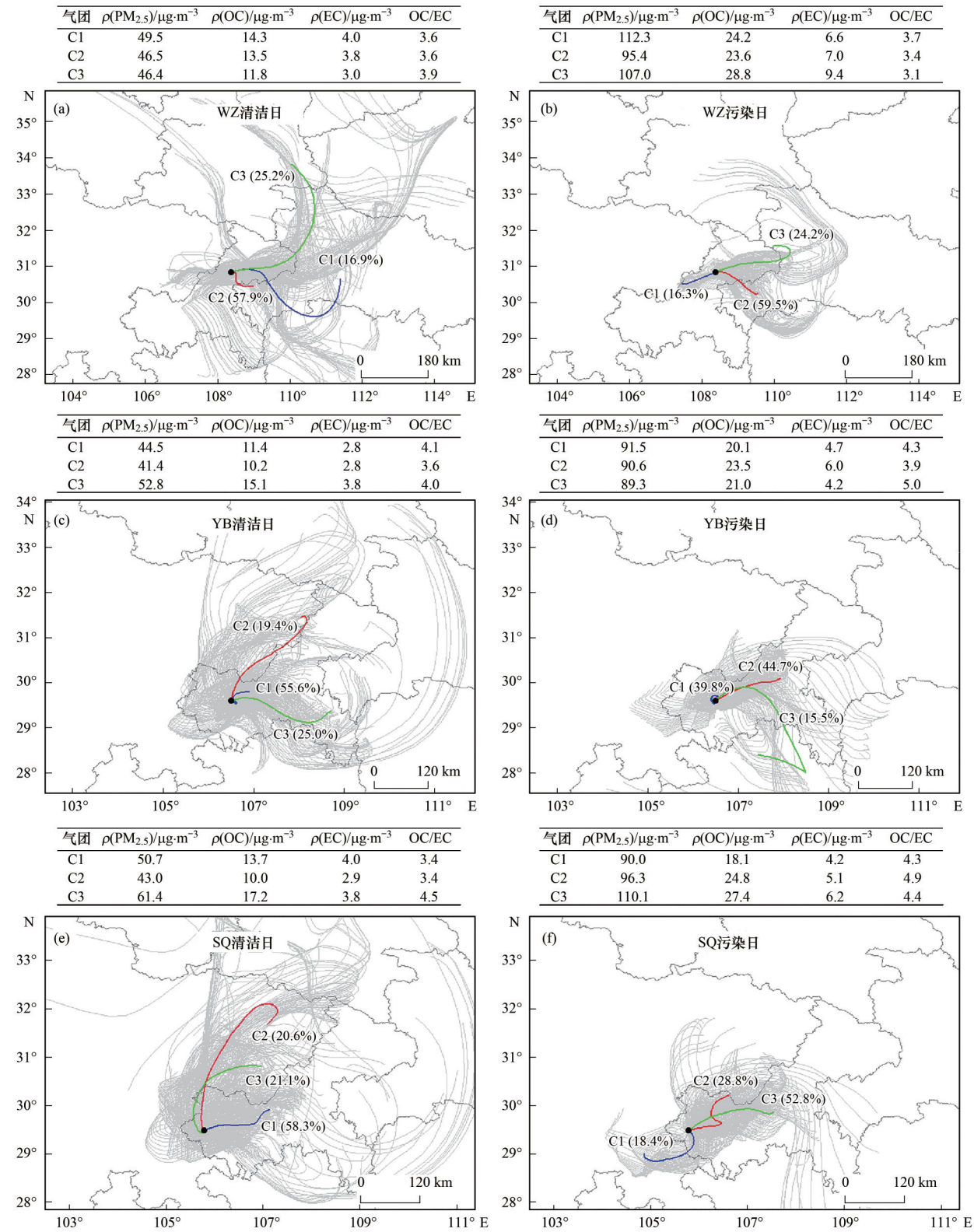


图3 重庆典型城区污染日和清洁日后向轨迹聚类分析

Fig. 3 Cluster analysis of the backward trajectory during the pollution period and clear period in the typical urban areas in Chongqing

倍. 与其他城区相比,WZ污染日EC浓度和EC/TC值较清洁日均涨幅最大,但EC/PM_{2.5}降幅最小;此外,与SQ(4.5、3.7)和YB(4.5、4.1)相反,WZ污染日OC/EC值仅为3.4,明显低于清洁日(3.8),表明WZ污染日碳质气溶胶的一次排放明显增强,且排放强度高高于其他城区.值得注意的是,各采样点污染日来自东北方向的短距离气团均携带较高的PM_{2.5}、OC和

EC浓度,且OC/EC值低于其他气团(图3),表明污染日较高的PM_{2.5}及其碳质组分浓度可能主要受点位东北方向的局地排放影响.其中,WZ污染日来自东北方向的气团轨迹3对应图3所有气团轨迹中最高的 $\rho(\text{OC})$ 值和 $\rho(\text{EC})$ 值($28.8\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $9.4\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$),以及最低的OC/EC值(3.1),表明WZ东北方向碳质气溶胶的一次排放强度较大,对站点影响较明显.

表 1 国内外主要城市冬季PM_{2.5}、OC和EC浓度对比¹⁾/μg·m⁻³

Table 1 Comparison of PM _{2.5} , OC, and EC concentrations during winter in domestic and foreign cities /μg·m ⁻³							
位置	城市	采样时间(年-月)	$\rho(\text{PM}_{2.5})$	$\rho(\text{OC})$	$\rho(\text{EC})$	方法	文献
重庆城区	万州		67.2 ± 30.3	17.6 ± 7.4	5.1 ± 2.4		
	渝北	2021-01 ~ 2021-02	63.4 ± 25.7	15.4 ± 6.3	4.2 ± 1.9	TOR/IMPROVE-A	本研究
	双桥		72.6 ± 33.3	18.2 ± 8.2	4.4 ± 1.7		
成渝地区	万州	2013-11 ~ 2013-12	—	16.82 ± 6.87	6.21 ± 2.06	TOR/IMPROVE-A	[24]
	渝北	2015-01 ~ 2015-02	115.1 ± 53.9	24.2 ± 13.6	5.9 ± 3.2	TOR/IMPROVE-A	[22]
	成都	2020-12 ~ 2021-02	70.1 ± 36.5	11.1 ± 5.8	4.6 ± 2.5	热燃烧/光吸收法	[37]
长三角地区	上海	2014-12	—	10.13 ± 6.22	3.06 ± 2.14	TOT/NIOSH	[38]
	南京	2017-01	—	8.61 ± 3.46	2.42 ± 1.11	TOT/NIOSH	[39]
珠三角地区	广州	2014-12 ~ 2015-01	63 ± 28	11.6 ± 5.5	5.0 ± 2.5	TOR/IMPROVE-A	[40]
京津冀地区	北京	2016-12	—	19.0	5.5	TOT/NIOSH	[41]
	承德	2019-01	47.68 ± 30.37	23.48 ± 11.44	5.06 ± 1.93	TOR/IMPROVE-A	[42]
汾渭平原	西安	2017-01 ~ 2017-02	145.43 ± 96.28	29.02 ± 14.01	6.96 ± 4.16	TOR/IMPROVE-A	[43]
	宝鸡	2018-11 ~ 2019-01	—	18.2 ± 10.4	4.6 ± 3.0	TOR/IMPROVE-A	[44]
国外城区	韩国光州	2015-12 ~ 2016-01	35 ± 18	5.0 ± 2.7	1.0 ± 0.4	TOT/NIOSH	[45]
	印度新德里	2015-12 ~ 2016-01	223 ± 69	31.6 ± 12.2	10.5 ± 4.0	TOR/IMPROVE-A	[46]
	美国洛杉矶	2013-01	10.36 ± 1.09	3.97 ± 0.68	0.51 ± 0.05	TOT/NIOSH	[47]
	意大利米兰	2014-01 ~ 2014-02	—	4.62 ± 1.76	0.86 ± 0.36	TOT/NIOSH	[48]

1)“—”表示相关信息未报道

2.2 SOC 的污染特征

EC主要来源于一次排放,在大气中相对稳定,因此通常被用来分析OC的一次排放和二次转化^[49].如图4所示,各采样点观测期间OC和EC浓度均显著线性相关($P < 0.01$),WZ的相关系数($R^2 = 0.93$)明显高于YB和SQ(R^2 为0.87和0.77),表明OC和EC主要的一次来源相近,其中WZ两者一次污染源的同源性可能强于其他地区.早期研究表明,OC/EC > 2则存在二次反应生成的SOC^[50],观测期间SQ、WZ和YB的OC/EC值范围分别为2.4 ~ 5.3、2.6 ~ 5.0和2.4 ~ 5.1,均值分别为 3.6 ± 0.5 、 4.0 ± 0.7 和 4.3 ± 0.6 ,表明各采样点每天都有SOC生成.

由表2可知,观测期间WZ、YB和SQ的 $\rho(\text{SOC})$ 均值分别为(4.5 ± 1.9)、(6.9 ± 2.8)和(7.7 ± 4.8) $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,对OC的平均贡献率分别为27.5%、43.4%和40.0%.其中,YB的SOC/OC均值高于其他城区,且SOC浓度仅次于SQ,表明中心城区冬季二次污染对碳质气溶胶的影响较为显著.污染日WZ、YB和SQ

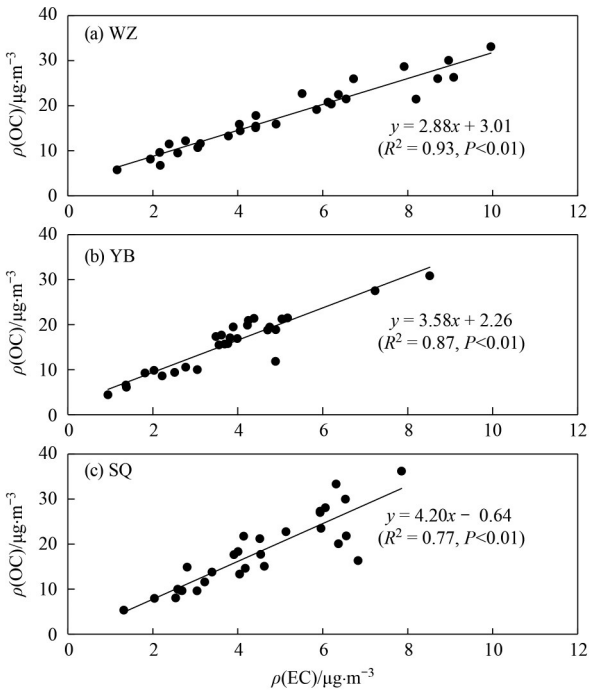


图 4 典型城区冬季OC和EC浓度的相关性
Fig. 4 Correlations between OC and EC during winter in the typical urban areas

表 2 典型城区冬季 POC、SOC 浓度以及 SOC/POC、SOC/OC 均值

Table 2 Averages of POC, and SOC concentrations and the ratios of SOC/POC, and SOC/OC during winter in the typical urban areas

项目	WZ			YB			SQ		
	清洁日	污染日	平均值	清洁日	污染日	平均值	清洁日	污染日	平均值
$\rho(\text{SOC})/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	3.7 ± 1.1	6.0 ± 2.1	4.5 ± 1.9	5.1 ± 2.1	9.5 ± 1.0	6.9 ± 2.8	4.8 ± 2.6	12.2 ± 3.7	7.7 ± 4.8
$\rho(\text{POC})/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	9.6 ± 4.1	19.4 ± 4.6	13.3 ± 6.4	7.3 ± 3.1	12.0 ± 3.8	9.2 ± 4.0	8.8 ± 3.4	13.3 ± 3.4	10.7 ± 4.0
SOC/POC/%	44.2	33.7	40.4	75.4	84.6	79.1	55.5	94.9	71.0
SOC/OC/%	29.3	24.2	27.5	42.3	45.1	43.4	34.7	48.2	40.0

的 $\rho(\text{SOC})$ 均值分别为 (6.0 ± 2.1) 、 (9.5 ± 1.0) 和 $(12.2 \pm 3.7)\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 较清洁日分别增加 0.6 倍、0.9 倍和 1.5 倍(表 2). 此外, 本研究还对比分析了 3 个站点碳质组分对 1 月 28 日至 2 月 9 日 $\text{PM}_{2.5}$ 污染生消的影响, 发现各站点差异明显. 如图 5 所示, WZ 的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 仅与 $\rho(\text{POC})$ 显著正相关 ($P < 0.01$); YB 的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 值则分别随 OC/EC、 $\rho(\text{SOC})$ 和 SOC/OC 值的增大而增大; 而 SQ 的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 值与一次和二次碳质组分浓度均显著正相关 ($P < 0.01$). 此外, YB 轻度污染日 [$75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3} < \rho(\text{PM}_{2.5}) \leq 115 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$] 的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度、SOC 浓度和 SOC/TC 值较清洁日分别上涨 69.3%、91.1% 和 118.5%, 涨幅显著高于 SQ (58.2%、66.6% 和 22.1%) 和 WZ (45.5%、23.8% 和 -31.5%); SQ 中度及以上污染日 [$\rho(\text{PM}_{2.5}) > 115 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$] 的 SOC 浓度和 SOC/TC 值较轻度污染日分别

上涨 48.9% 和 12.6%, 涨幅低于 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度 (66.2%). 上述结果表明, 冬季 SOC 对 YB 的 $\text{PM}_{2.5}$ 及其碳质气溶胶浓度上升的影响大于 SQ 和 WZ, 尤其是在轻度污染日.

早期研究发现, SOC 是由挥发性有机物 (VOCs) 在大气中化学转化生成, 其中以液态水作为介质发生的液相反应是城市大气气溶胶中 SOC 生成的重要途径, 而气溶胶液态水含量 AWC 是影响液相反应速率的关键因素^[51,52]. 观测期间, WZ、YB 和 SQ 的 AWC 值范围分别为 3.4 ~ 72.1、4.6 ~ 76.6 和 3.9 ~ 70.9 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 均值分别为 (33.4 ± 21.3) 、 (38.3 ± 18.0) 和 $(24.7 \pm 16.8) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 图 6 展示了冬季 WZ、YB 和 SQ 的 SOC 浓度与 AWC、氮氧化率 (NOR)、硫氧化率 (SOR) 和 NO_2 浓度的相关性, 其中 NOR 和 SOR 的计算公式见文献[22]. 与 WZ 不同 ($P > 0.1$),

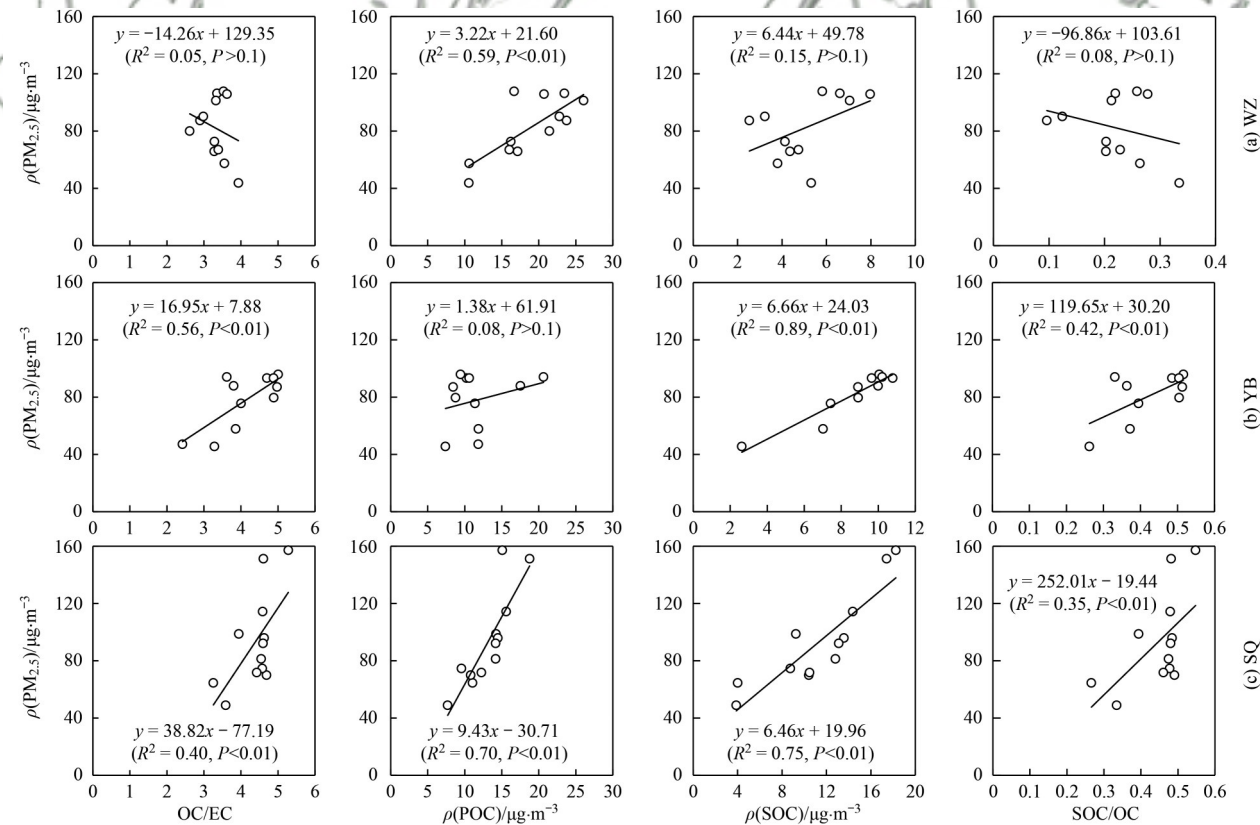


图 5 典型城区 1 月 28 日至 2 月 9 日 $\text{PM}_{2.5}$ 与 POC、SOC 浓度和 OC/EC、SOC/OC 值的相关性

Fig. 5 Correlations between $\text{PM}_{2.5}$ and the concentrations of POC and SOC and the values of OC/EC and SOC/OC from January 28 to February 9 in the typical urban areas

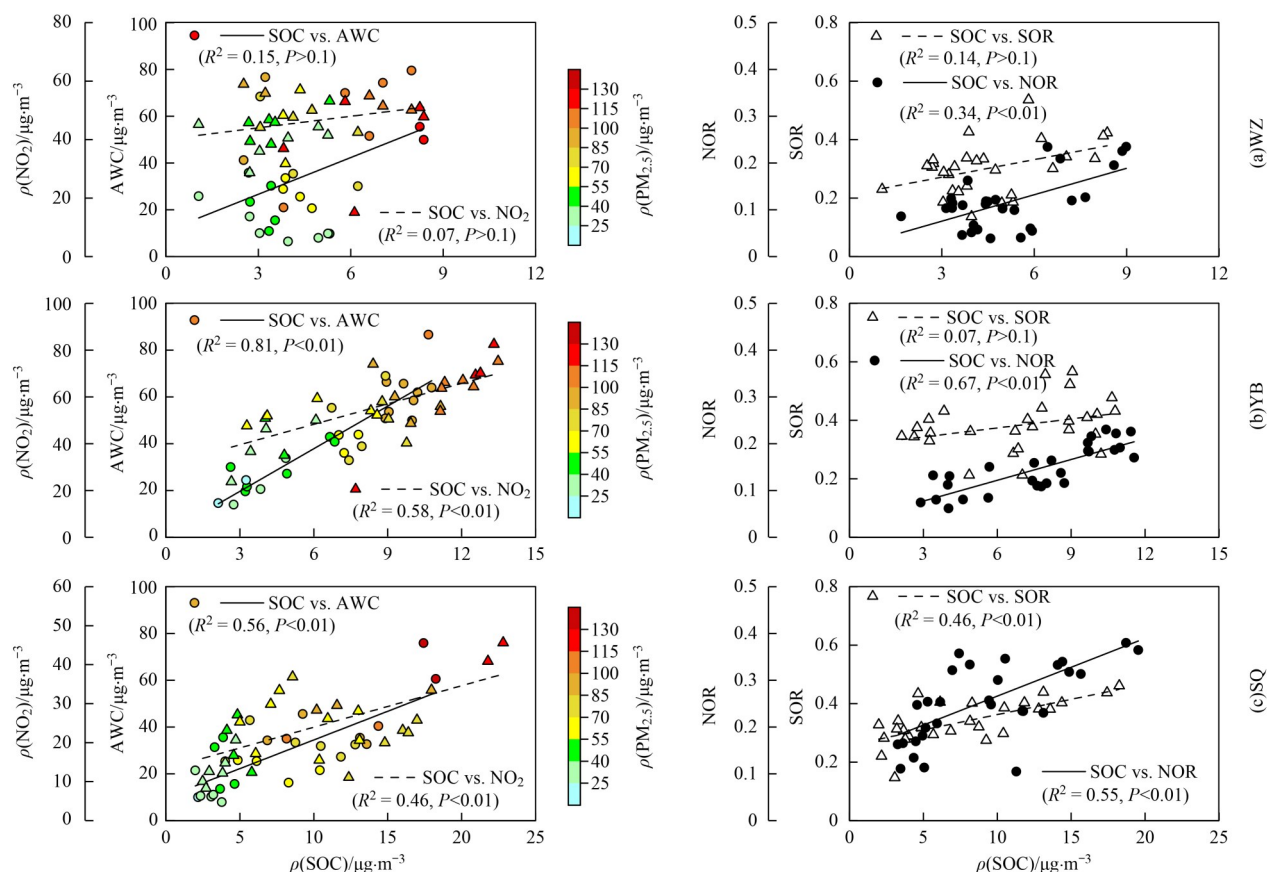
图6 典型城区冬季SOC浓度与AWC、NOR、SOR和NO₂浓度的相关性

Fig. 6 Correlations between SOC concentrations and the values of AWC, NOR, SOR, and NO₂ concentrations during winter in the typical urban areas

观测期间SQ和YB的SOC浓度与AWC显著线性相关($P < 0.01$),两者的相关系数 R^2 分别为0.54和0.77,表明SQ和YB气溶胶中SOC的主要生成途径可能是液相反应,而不是光化学反应,这与Bao等^[53]在四川德阳发现的当 $AWC < 200 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 时液相反应主导夜间二次有机气溶胶形成的结果相吻合。值得注意的是,SQ和YB的SOC浓度与NO₂浓度和NOR值均显著线性相关($P < 0.01$),其中YB的相关系数($R^2 = 0.58, 0.67$)高于SQ($R^2 = 0.46, 0.55$);此外,SOC、NO₂、AWC浓度和NOR值均随PM_{2.5}浓度的上升而增大(图6)。上述结果表明,在工业和交通较为发达的SQ和YB,SOC是导致PM_{2.5}浓度上升的主要因素,其中通过液相反应生成含—NO₂官能团的有机物可能是SOC的重要组分,且高NO₂浓度可能有利于这类有机物的生成,因此亟需加大工业源和移动源NO₂排放的管控力度。

2.3 碳质组分含量与来源解析

本研究基于IMPROVE协议规定的热/光反射法测得PM_{2.5}中碳质组分OC1、OC2、OC3、OC4、EC1、EC2和EC3的浓度。早期研究表明,OC1是生物质燃烧排放的特征组分,OC2和OC4常用于示踪燃煤

排放,OC3和EC1在汽油车尾气中含量丰富,EC2和EC3则是柴油车排放的标识组分^[50]。此外,本研究还使用K⁺示踪生物质燃烧排放,Cl⁻示踪燃煤排放^[54]。如图7所示,WZ、YB和SQ污染日OC1在TC中占比分别为12.8%、11.7%和10.2%,均高于清洁日(11.3%、11.1%和8.8%)。与YB和SQ不同,WZ污染日(OC2+OC4)/TC值同比清洁日上升24.5%,而(OC3+EC1)/TC值同比下降16.7%(图7)。此外,虽然各城区污染日和清洁日(EC2+EC3)/TC值差异较小(1.1%~1.8%),但WZ污染日EC2和EC3总浓度值 $[(0.54 \pm 21.3) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$ 显著高于YB和SQ($P < 0.01$)。值得注意的是,WZ污染日K⁺和Cl⁻浓度均值同比清洁日分别上升62.5%和231.2%,涨幅高于YB(36.4%和192.9%)和SQ(31.1%和153.3%);同时,与YB和SQ不同($P > 0.1$),WZ污染日Cl⁻浓度与SO₂和OC2+OC4浓度均显著线性相关($P < 0.01$),相关系数 R^2 分别为0.44和0.34。上述结果表明,与YB和SQ相比,污染日WZ碳质气溶胶受生物质燃烧、燃煤和柴油车排放的影响可能相对较大,而受汽油车排放的影响较小。

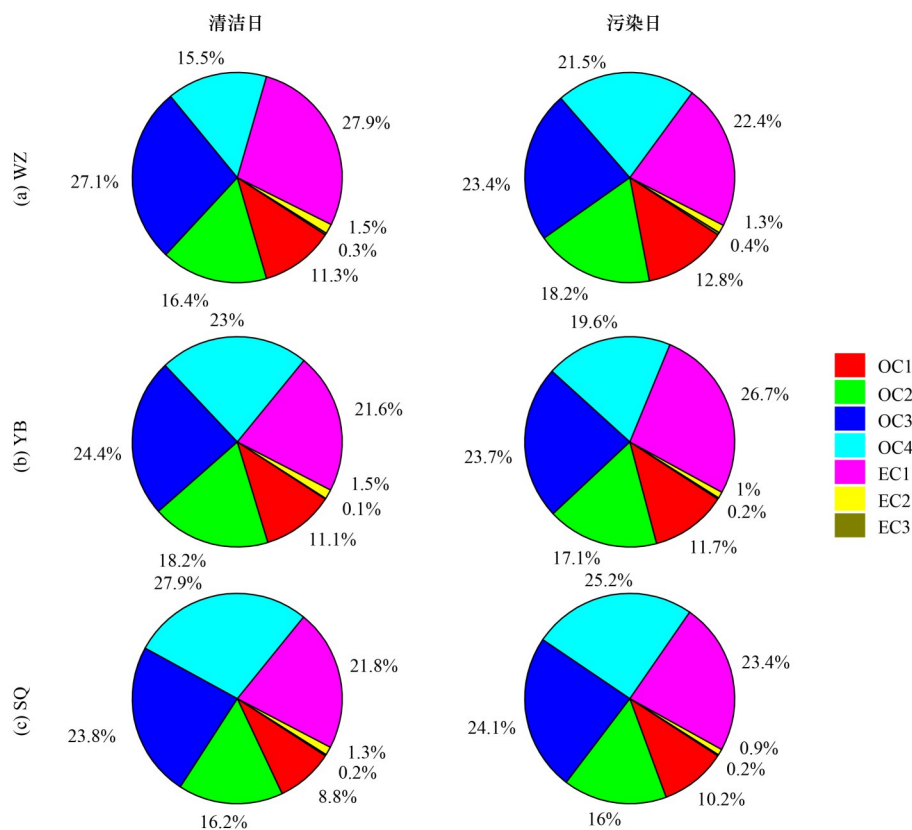


图7 典型城区污染日和清洁日碳质组分在TC中的贡献率

Fig. 7 Mass fraction of carbon components in TC during the pollution period and clear period in the typical urban areas

为进一步识别冬季各典型城区碳质气溶胶的污染源,本研究采用受体源解析模型PMF 5.0基于碳质组分和水溶性离子组分浓度定量判定污染源排放因子,定量解析气溶胶中TC的污染源贡献,源解析结果如图8所示.因子1中OC2、OC4、 Na^+ 、 K^+ 和 Cl^- 的载荷较大,可代表生物质/煤炭燃烧混合源;因子2中EC2、EC3和 Ca^{2+} 的载荷较大,可代表柴油车排放源;因子3的主要组分为OC3和EC1,可代表汽油车排放源;因子4中二次组分 NH_4^+ 、 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 的载荷较大,可代表二次转化.如图8所示,WZ的TC污染源贡献大小依次为生物质/煤炭燃烧混合源(47.4%)>汽油车排放源(21.6%)>柴油车排放源(18.1%)>二次转化源(12.9%);YB依次为生物质/煤炭燃烧混合源(34.2%)>汽油车排放源(26.9%)>二次转化源(23.6%)>柴油车排放源(15.3%);SQ依次为生物质/煤炭燃烧混合源(38.1%)>柴油车排放源(23.1%)>二次转化源(19.7%)>汽油车排放源(19.1%).从空间分布上看,WZ的生物质/煤炭燃烧混合源贡献率明显高于YB和SQ;YB的汽油车排放源和二次转化源贡献率高于WZ和SQ相对较高;而SQ的柴油车排放源贡献率相对较高.鉴于PMF源解析方法和OC/EC最小值法的差异,两种方法获取二次转化对TC的贡献率有所不同,但该污染源贡献率的空间分布较为一致(图2和图8).

致(图2和图8).综上,生物质/煤炭燃烧混合源是冬季气溶胶中TC的主要污染源,尤其是在渝东北地区;而中心城区受汽油车排放和二次转化的影响相对较大,这与上述各城区能源结构的实际情况相符.

鉴于大气污染物通过气团传输对受体点气溶胶浓度影响较大,本研究使用CWT方法分析冬季各典型城区污染日和清洁日的OC和EC潜在源区,其WCWT的空间分布如图9所示.与清洁日不同,各典型城区污染日OC和EC主要潜在源区均分布在城区本地及东北方向的局部地区.其中,WZ污染日EC主要潜在源区为万州区东北部本地区域,贡献浓度在 $8.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 左右,而OC主要潜在源区为梁平区西南部地区、万州区、云阳县和巫溪县南部地区($> 18 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$);YB污染日EC主要潜在源区为渝北区本地东北部地区和长寿区,贡献浓度在 $4.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上,OC和EC潜在源区的空间分布基本一致,在渝北区与长寿区交界处、渝北区与涪陵区交界处和长寿区本地西南部地区的潜在贡献浓度最高($> 20 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$).与YB相似,SQ污染日OC和EC主要潜在源区一致,分布在双桥区东北部地区、中心城区南部的大渡口、渝北区与长寿区交界处,对OC和EC贡献的浓度分别在 $24 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上和 $5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上.整体上看,各城区冬季污染日OC、EC主要潜在源区基本一致,主

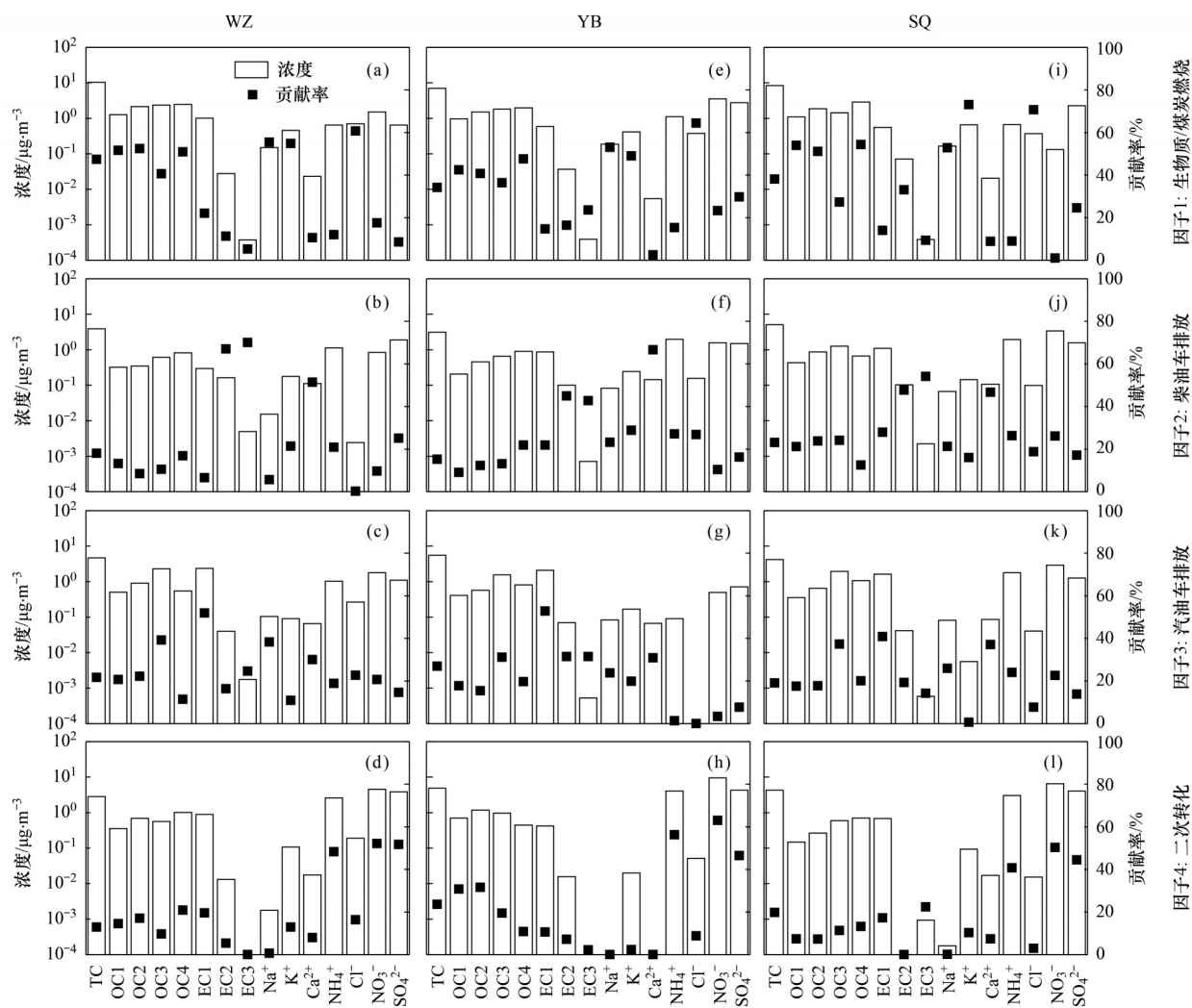


图8 重庆典型城区冬季气溶胶中TC的污染源成分谱及贡献率

Fig. 8 Source profiles and source contributions of TC in aerosols during winter in the typical urban areas in Chongqing

要分布在本地及其东北方向的相邻城区,表明污染日碳质气溶胶仍以本地排放为主,同时来自长寿区的污染传输也需要高度关注。

3 结论

(1)2021年冬季重庆典型城区WZ、YB和SQ的 ρ (OC)均值分别为 (17.2 ± 7.4) 、 (15.4 ± 6.3) 和 $(18.2 \pm 8.2) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, ρ (EC)均值分别为 (5.1 ± 2.4) 、 (4.2 ± 1.9) 和 $(4.4 \pm 1.7) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,呈重庆主城周边城区高于中心城区的分布趋势。污染日WZ、YB、SQ的OC和EC均值浓度约为清洁日的1.9倍和2.0倍、1.8倍和1.6倍、1.8倍和1.5倍;同比YB和SQ,污染日WZ碳质气溶胶受本地一次排放的影响较为明显。

(2)WZ、YB和SQ冬季 ρ (SOC)均值分别为 (4.5 ± 1.9) 、 (6.9 ± 2.8) 和 $(7.7 \pm 4.8) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,占OC的27.5%、43.4%和40.0%。观测期间,SOC是导致YB和SQ的 $\text{PM}_{2.5}$ 及其碳质组分浓度持续上升的主要因素,通过液相反应生成含 $-\text{NO}_2$ 官能团的有机物可能

是SOC的重要组成部分,高 NO_2 浓度有利于这类有机物的生成。

(3)碳质气溶胶主要受生物质/煤炭燃烧排放影响,其次是汽油车排放、柴油车排放和二次转化。生物质/煤炭燃烧混合源对WZ碳质气溶胶的贡献率为47.4%,高于YB和SQ;中心城区YB的汽油车排放和二次转化贡献相对突出(26.9%和23.6%);而SQ受柴油车排放影响相对较大(38.1%和23.1%)。污染日各城区碳质气溶胶受本地及其东北方向相邻城区的影响,其中长寿区大气污染物的排放对YB和SQ影响较大。

参考文献:

- [1] Jimenez J L, Canagaratna M R, Donahue N M, et al. Evolution of organic aerosols in the atmospheric [J]. Science, 2009, 326 (5959): 1525-1529.
- [2] Ram K, Sarin M M. Day-night variability of EC, OC, WSOC and inorganic ions in urban environment of Indo-Gangetic plain: implications to secondary aerosol formation [J]. Atmospheric Environment, 2011, 45(2): 460-468.
- [3] Na K, Sawant A A, Song C, et al. Primary and secondary

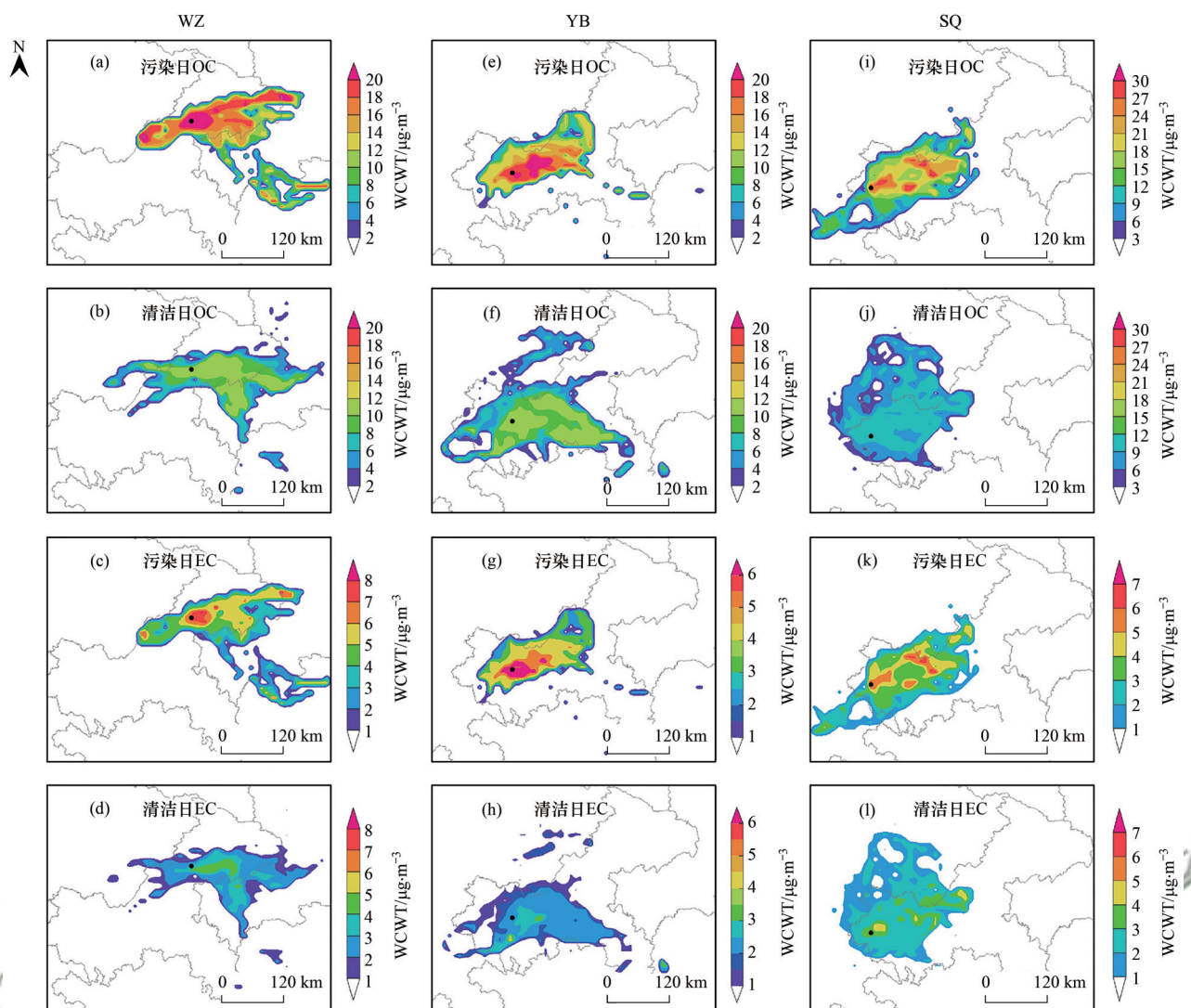


图9 典型城区污染日和清洁日OC和EC浓度权重轨迹分布

Fig.9 Weight-trajectory distribution of OC and EC concentrations during the pollution period and clear period in the typical urban areas

carbonaceous species in the atmosphere of western Riverside County, California[J]. *Atmospheric Environment*, 2004, **38**(9): 1345-1355.

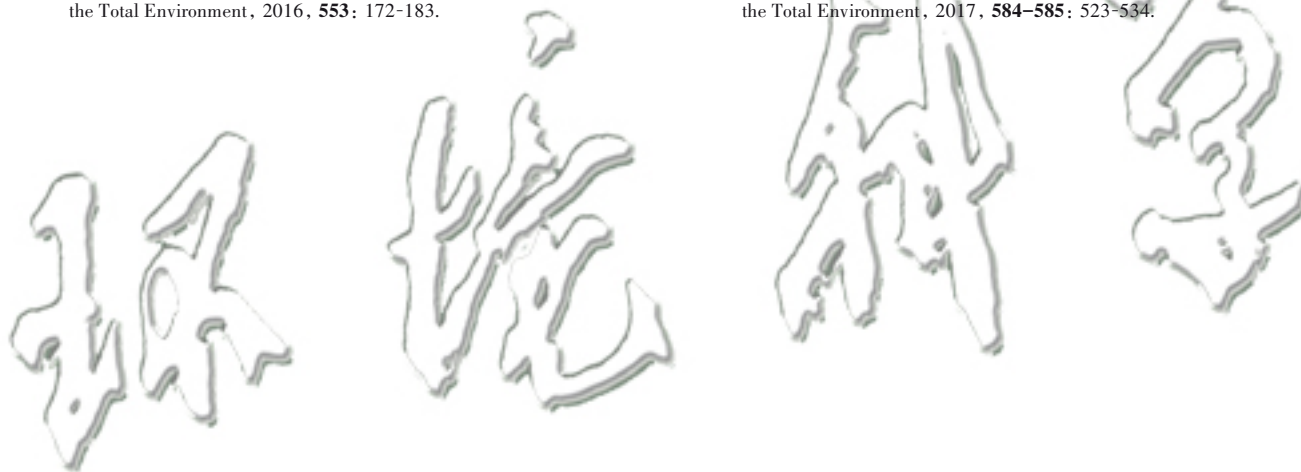
- [4] Ji D S, Gao W K, Maenhaut W, et al. Impact of air pollution control measures and regional transport on carbonaceous aerosols in fine particulate matter in urban Beijing, China: insights gained from long-term measurement[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, **19**(13): 8569-8590.
- [5] Li M, Bao F X, Zhang Y, et al. Role of elemental carbon in the photochemical aging of soot[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, **115**(30): 7717-7722.
- [6] Pio C, Cerqueira M, Harrison R M, et al. OC/EC ratio observations in Europe: re-thinking the approach for apportionment between primary and secondary organic carbon[J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(34): 6121-6132.
- [7] Zhou S Z, Wang Z, Gao R, et al. Formation of secondary organic carbon and long-range transport of carbonaceous aerosols at Mount Heng in South China[J]. *Atmospheric Environment*, 2012, **63**: 203-212.
- [8] Jacobson M Z. Correction to "Control of fossil-fuel particulate black carbon and organic matter, possibly the most effective method of slowing global warming" [J]. *Journal of Geophysical Research*:

Atmospheres, 2005, **110**, doi: 10.1029/2005JD005888.

- [9] Zhang Y Z, Forrister H, Liu J M, et al. Top-of-atmosphere radiative forcing affected by brown carbon in the upper troposphere[J]. *Nature Geoscience*, 2017, **10**(7): 486-489.
- [10] Liu S, Aiken A C, Gorkowski K, et al. Enhanced light absorption by mixed source black and brown carbon particles in UK winter[J]. *Nature Communications*, 2015, **6**, doi: 10.1038/ncomms9435.
- [11] Pathak R K, Wang T, Ho K F, et al. Characteristics of summertime PM_{2.5} organic and elemental carbon in four major Chinese cities: implications of high acidity for water-soluble organic carbon (WSOC)[J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(2): 318-325.
- [12] Zhou H J, He J, Zhao B Y, et al. The distribution of PM₁₀ and PM_{2.5} carbonaceous aerosol in Baotou, China[J]. *Atmospheric Research*, 2016, **178-179**: 102-113.
- [13] Saleh R, Robinson E S, Tkacik D S, et al. Brownness of organics in aerosols from biomass burning linked to their black carbon content[J]. *Nature Geoscience*, 2014, **7**(9): 647-650.
- [14] Laskin A, Laskin J, Nizkorodov S A. Chemistry of atmospheric brown carbon[J]. *Chemical Reviews*, 2015, **115**(10): 4335-4382.
- [15] Yang F, Huang L, Duan F, et al. Carbonaceous species in PM_{2.5} at a pair of rural/urban sites in Beijing, 2005-2008[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, **11**(15): 7893-7903.
- [16] Cao J J, Wu F, Chow J C, et al. Characterization and source

- apportionment of atmospheric organic and elemental carbon during fall and winter of 2003 in Xi'an, China[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2005, **5**(11): 3127-3137.
- [17] Yao L, Huo J T, Wang D F, *et al.* Online measurement of carbonaceous aerosols in suburban Shanghai during winter over a three-year period: temporal variations, meteorological effects, and sources[J]. *Atmospheric Environment*, 2020, **226**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.117408.
- [18] 张颖龙, 李莉, 吴伟超, 等. 嘉善冬季碳质气溶胶变化特征及其来源解析[J]. *环境科学*, 2021, **42**(9): 4116-4125.
- Zhang Y L, Li L, Wu W C, *et al.* Variation characteristics and source analysis of carbonaceous aerosols in winter in Jiashan[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(9): 4116-4125.
- [19] 胡若兰, 王书肖. 大气二次有机气溶胶研究进展[J]. *科技导报*, 2021, **39**(15): 95-109.
- Hu R L, Wang S X. Research progress of secondary organic aerosol[J]. *Science & Technology Review*, 2021, **39**(15): 95-109.
- [20] 肖瑶, 吴志军, 郭松, 等. 大气气溶胶液态水中二次有机气溶胶生成机制研究进展[J]. *科学通报*, 2020, **65**(28-29): 3118-3133.
- Xiao Y, Wu Z J, Guo S, *et al.* Formation mechanism of secondary organic aerosol in aerosol liquid water: a review[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2020, **65**(28-29): 3118-3133.
- [21] Tao J, Zhang L M, Cao J J, *et al.* A review of current knowledge concerning PM_{2.5} chemical composition, aerosol optical properties and their relationships across China[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, **17**(15): 9485-9518.
- [22] Wang H B, Tian M, Chen Y, *et al.* Seasonal characteristics, formation mechanisms and source origins of PM_{2.5} in two megacities in Sichuan Basin, China[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, **18**(2): 865-881.
- [23] Peng C, Tian M, Wang X L, *et al.* Light absorption of brown carbon in PM_{2.5} in the Three Gorges Reservoir region, southwestern China: implications of biomass burning and secondary formation[J]. *Atmospheric Environment*, 2020, **229**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.117409.
- [24] 彭超, 翟崇治, 王欢博, 等. 万州城区夏季、冬季PM_{2.5}中有机碳和元素碳的浓度特征[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(6): 1638-1644.
- Peng C, Zhai C Z, Wang H B, *et al.* Characteristics of organic carbon and elemental carbon in PM_{2.5} in the urban Wanzhou area in summer and winter[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(6): 1638-1644.
- [25] Ding J J, Huang W, Zhao J, *et al.* Characteristics and source origins of carbonaceous aerosol in fine particulate matter in a megacity, Sichuan Basin, southwestern China[J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2022, **13**, doi: 10.1016/j.apr.2021.101266.
- [26] Chen Y, Tian M, Huang R J, *et al.* Characterization of urban amine-containing particles in southwestern China: seasonal variation, source, and processing[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, **19**(5): 3245-3255.
- [27] Chow J C, Watson J G, Chen L W A, *et al.* The IMPROVE_A temperature protocol for thermal/optical carbon analysis: Maintaining consistency with a long-term database[J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2007, **57**(9): 1014-1023.
- [28] 彭超, 张丹, 方维凯, 等. 重庆市不同粒径颗粒物中水溶性离子污染特征[J]. *中国环境科学*, 2021, **41**(10): 4529-4540.
- Peng C, Zhang D, Fang W K, *et al.* Characteristics of water-soluble ions in multi-size particles in Chongqing[J]. *China Environmental Science*, 2021, **41**(10): 4529-4540.
- [29] Fountoukis C, Nenes A. ISORROPIA II: a computationally efficient thermodynamic equilibrium model for K⁺-Ca²⁺-Mg²⁺-NH₄⁺-Na⁺-SO₄²⁻-NO₃⁻-Cl⁻-H₂O aerosols[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2007, **7**(17): 4639-4659.
- [30] Zhao J, Qiu Y M, Zhou W, *et al.* Organic aerosol processing during winter severe haze episodes in Beijing[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2019, **124**(17-18): 10248-10263.
- [31] Pye H O T, Nenes A, Alexander B, *et al.* The acidity of atmospheric particles and clouds[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2020, **20**(8): 4809-4888.
- [32] 张延君, 郑玫, 蔡靖, 等. PM_{2.5}源解析方法的比较与评述[J]. *科学通报*, 2015, **60**(2): 109-121.
- Zhang Y J, Zheng M, Cai J, *et al.* Comparison and overview of PM_{2.5} source apportionment methods[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2015, **60**(2): 109-121.
- [33] 彭超. 重庆PM_{2.5}中棕色碳的污染特征和光学特性研究[D]. 重庆: 中国科学院大学(中国科学院重庆绿色智能技术研究院), 2020.
- Peng C. Characteristics and optical properties of brown carbon in PM_{2.5} in Chongqing [D]. Chongqing: University of Chinese Academy of Sciences (Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences), 2020.
- [34] Wang Y Q, Zhang X Y, Draxler R R. TrajStat: GIS-based software that uses various trajectory statistical analysis methods to identify potential sources from long-term air pollution measurement data[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2009, **24**(8): 938-939.
- [35] Peng C, Tian M, Chen Y, *et al.* Characteristics, formation mechanisms and potential transport pathways of PM_{2.5} at a rural background site in Chongqing, southwest China[J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2019, **19**(9): 1980-1992.
- [36] Lucey D, Hadjiiski L, Hopke P K, *et al.* Identification of sources of pollutants in precipitation measured at the mid-Atlantic US coast using potential source contribution function (PSCF) [J]. *Atmospheric Environment*, 2001, **35**(23): 3979-3986.
- [37] 李朝阳, 袁亮, 张小玲, 等. 成都碳质气溶胶变化特征及二次有机碳的估算[J]. *中国环境科学*, 2022, **42**(6): 2504-2513.
- Li C Y, Yuan L, Zhang X L, *et al.* Characteristics of carbonaceous aerosols and estimation of secondary organic carbon in Chengdu[J]. *China Environmental Science*, 2022, **42**(6): 2504-2513.
- [38] Chang Y H, Deng C R, Cao F, *et al.* Assessment of carbonaceous aerosols in Shanghai, China-Part 1: long-term evolution, seasonal variations, and meteorological effects[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, **17**(16): 9945-9964.
- [39] Chen D, Zhao Y, Lyu R T, *et al.* Seasonal and spatial variations of optical properties of light absorbing carbon and its influencing factors in a typical polluted city in Yangtze River Delta, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2019, **199**: 45-54.
- [40] Tao J, Zhang L M, Cao J J, *et al.* Source apportionment of PM_{2.5} at urban and suburban areas of the Pearl River Delta region, South China - With emphasis on ship emissions[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **574**: 1559-1570.
- [41] Cui Y, Cao W, Ji D S, *et al.* Estimated contribution of vehicular emissions to carbonaceous aerosols in urban Beijing, China[J]. *Atmospheric Research*, 2021, **248**, doi: 10.1016/j.atmosres.2020.105153.
- [42] 贺博文, 裴赛赛, 王帅, 等. 承德市PM_{2.5}中碳质组分的季节分布特征及来源解析[J]. *环境科学*, 2021, **42**(11): 5152-5161.
- He B W, Nie S S, Wang S, *et al.* Seasonal variation and source apportionment of carbonaceous species in PM_{2.5} in Chengde[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(11): 5152-5161.

- [43] 牟臻, 陈庆彩, 王羽琴, 等. 西安市 $PM_{2.5}$ 中碳质气溶胶污染特征[J]. 环境科学, 2019, **40**(4): 1529-1536.
Mu Z, Chen Q C, Wang Y Q, *et al.* Characteristics of carbonaceous aerosol pollution in $PM_{2.5}$ in Xi'an [J]. Environmental Science, 2019, **40**(4): 1529-1536.
- [44] 周变红, 王锦, 曹夏, 等. 宝鸡市冬季碳质气溶胶污染特征及来源解析[J]. 环境化学, 2020, **39**(12): 3336-3345.
Zhou B H, Wang J, Cao X, *et al.* Characteristics and sources of carbon fractions during winter in Baoji City [J]. Environmental Chemistry, 2020, **39**(12): 3336-3345.
- [45] Park S, Son S C, Lee S. Characterization, sources, and light absorption of fine organic aerosols during summer and winter at an urban site[J]. Atmospheric Research, 2018, **213**: 370-380.
- [46] Sharma S K, Karapurkar S G, Shenoy D M, *et al.* Stable carbon and nitrogen isotopic characteristics of $PM_{2.5}$ and PM_{10} in Delhi, India [J]. Journal of Atmospheric Chemistry, 2022, **79**(1): 67-79.
- [47] Shirmohammadi F, Hasheminassab S, Saffari A, *et al.* Fine and ultrafine particulate organic carbon in the Los Angeles basin: trends in sources and composition[J]. Science of the Total Environment, 2016, **541**: 1083-1096.
- [48] Pietrogrande M C, Bacco D, Ferrari S, *et al.* Characteristics and major sources of carbonaceous aerosols in $PM_{2.5}$ in Emilia Romagna Region (northern Italy) from four-year observations[J]. Science of the Total Environment, 2016, **553**: 172-183.
- [49] Salma I, Chi X G, Maenhaut W. Elemental and organic carbon in urban canyon and background environments in Budapest, Hungary [J]. Atmospheric Environment, 2004, **38**(1): 27-36.
- [50] Chow J C, Watson J G, Lu Z Q, *et al.* Descriptive analysis of $PM_{2.5}$ and PM_{10} at regionally representative locations during SJVAQS/AUSPEX [J]. Atmospheric Environment, 1996, **30**(12): 2079-2112.
- [51] Shivani, Gadi R, Sharma S K, *et al.* Seasonal variation, source apportionment and source attributed health risk of fine carbonaceous aerosols over National Capital Region, India [J]. Chemosphere, 2019, **237**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.124500.
- [52] Zhang Y J, Favez O, Petit J E, *et al.* Six-year source apportionment of submicron organic aerosols from near-continuous highly time-resolved measurements at SIRTa (Paris area, France) [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2019, **19**(23): 14755-14776.
- [53] Bao Z E, Zhang X Y, Li Q, *et al.* Measurement report: intensive biomass burning emissions and rapid nitrate formation drive severe haze formation in the Sichuan Basin, China—insights from aerosol mass spectrometry[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2023, **23**(2): 1147-1167.
- [54] Chen Y, Xie S D, Luo B, *et al.* Particulate pollution in urban Chongqing of southwest China: historical trends of variation, chemical characteristics and source apportionment[J]. Science of the Total Environment, 2017, **584-585**: 523-534.



CONTENTS

Prediction of Autumn Ozone Concentration in the Pearl River Delta Based on Machine Learning	CHEN Zhen, LIU Run, LUO Zheng, <i>et al.</i> (1)
Remote Sensing Model for Estimating Atmospheric PM _{2.5} Concentration in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	DAI Yuan-yuan, GONG Shao-qi, ZHANG Cun-jie, <i>et al.</i> (8)
Variation Characteristics of PM _{2.5} Pollution and Transport in Typical Transport Channel Cities in Winter	DAI Wu-jun, ZHOU Ying, WANG Xiao-qi, <i>et al.</i> (23)
Characteristics of Secondary Inorganic Ions in PM _{2.5} and Its Influencing Factors in Summer in Zhengzhou	HE Bing, YANG Jie-ru, XU Yi-fei, <i>et al.</i> (36)
Characteristics and Source Apportionment of Carbonaceous Aerosols in the Typical Urban Areas in Chongqing During Winter	PENG Chao, LI Zhen-liang, XIANG Ying, <i>et al.</i> (48)
Analysis of Influencing Factors of Ozone Pollution Difference Between Chengdu and Chongqing in August 2022	CHEN Mu-lan, LI Zhen-liang, PENG Chao, <i>et al.</i> (61)
Analysis of O ₃ Pollution Affected by a Succession of Three Landfall Typhoons in 2020 in Eastern China	HUA Cong, YOU Yuan, WANG Qian, <i>et al.</i> (71)
Characteristics and Source Apportionment of VOCs Initial Mixing Ratio in Beijing During Summer	ZHANG Bo-tao, JING Kuan, WANG Qin, <i>et al.</i> (81)
Review of Comprehensive Evaluation System of Vehicle Pollution and Carbon Synergistic Reduction	FAN Zhao-yang, TONG Hui, LIANG Xiao-yu, <i>et al.</i> (93)
Study of Peak Carbon Emission of a City in Yangtze River Delta Based on LEAP Model	YANG Feng, ZHANG Gui-chi, SUN Ji, <i>et al.</i> (104)
Driving Forces and Mitigation Potential of CO ₂ Emissions for Ship Transportation in Guangdong Province, China	WENG Shu-juan, LIU Ying-ying, TANG Feng, <i>et al.</i> (115)
Carbon Emission Characteristics and Influencing Factors of Typical Processes in Drinking Water Treatment Plant	ZHANG Xiang-yu, HU Jian-kun, MA Kai, <i>et al.</i> (123)
Distribution Characteristics of Arsenic in Drinking Water in China and Its Health Risk Based on Disability-adjusted Life Years	DOU Dian-cheng, QI Rong, XIAO Shu-min, <i>et al.</i> (131)
Spatiotemporal Occurrence of Organophosphate Esters in the Surface Water and Sediment of Taihu Lake and Relevant Risk Assessment	ZHANG Cheng-nuo, ZHONG Qin, LUAN Bo-wen, <i>et al.</i> (140)
Exposure Level and Risk Impact Assessment of Pesticides and Veterinary Drugs in Aquaculture Environment	ZHANG Kai-wen, ZHANG Hai-yan, KONG Cong, <i>et al.</i> (151)
Variation in Phosphorus Concentration and Flux at Zhutuo Section in the Yangtze River and Source Apportionment	LOU Bao-feng, XIE Wei-min, HUANG Bo, <i>et al.</i> (159)
“Load-Unload” Effect of Manganese Oxides on Phosphorus in Surface Water of the Pearl River Estuary	LI Rui, LIANG Zuo-bing, WU Qi-rui, <i>et al.</i> (173)
Factors Influencing the Variation in Phytoplankton Functional Groups in Fuchunjiang Reservoir	ZHANG Ping, WANG Wei, ZHU Meng-yuan, <i>et al.</i> (181)
Hydrochemical Characteristics and Formation Mechanism of Groundwater in the Western Region of Hepu Basin, Beihai City	CHEN Wen, WU Ya, ZHANG Hong-xin, <i>et al.</i> (194)
Controlling Factors of Groundwater Salinization and Pollution in the Oasis Zone of the Cherchen River Basin of Xinjiang	LI Jun, OUYANG Hong-tao, ZHOU Jin-long (207)
Spatial-temporal Evolution of Ecosystem Health and Its Influencing Factors in Beijing-Tianjin-Hebei Region	LI Kui-ming, WANG Xiao-yan, YAO Luo-lan (218)
Spatial and Temporal Evolution and Impact Factors Analysis of Ecosystem Service Value in the Liaohe River Delta over the Past 30 Years	WANG Geng, ZHANG Fu-rong (228)
Effects of Photovoltaic Power Station Construction on Terrestrial Environment: Retrospect and Prospect	TIAN Zheng-qing, ZHANG Yong, LIU Xiang, <i>et al.</i> (239)
Spatiotemporal Evolution and Quantitative Attribution Analysis of Vegetation NDVI in Greater Khingan Mountains Forest-Steppe Ecotone	SHI Song, LI Wen, QU Chen, <i>et al.</i> (248)
Spatio-temporal Variation in Net Primary Productivity of Different Vegetation Types and Its Influencing Factors Exploration in Southwest China	XU Yong, ZHENG Zhi-wei, MENG Yu-chi, <i>et al.</i> (262)
Impacts of Extreme Climate Events at Different Altitudinal Gradients on Vegetation NPP in Songhua River Basin	CUI Song, JIA Zhao-yang, GUO Liang, <i>et al.</i> (275)
Spatial and Temporal Evolution and Prediction of Carbon Storage in Kunming City Based on InVEST and CA-Markov Model	Paruke Wusimanjiang, AI Dong, FANG Yi-shu, <i>et al.</i> (287)
Spatial-Temporal Evolution and Prediction of Carbon Storage in Jiuquan City Ecosystem Based on PLUS-InVEST Model	SHI Jing, SHI Pei-ji, WANG Zi-yang, <i>et al.</i> (300)
Soil Carbon Pool Allocation Dynamics During Soil Development in the Lower Yangtze River Alluvial Plain	HU Dan-yang, ZHANG Huan, SU Bao-wei, <i>et al.</i> (314)
Spatial Distribution Patterns of Soil Organic Carbon in Karst Forests of the Lijiang River Basin and Its Driving Factors	SHEN Kai-hui, WEI Shi-guang, LI Lin, <i>et al.</i> (323)
Effect of Land Use on the Stability of Soil Organic Carbon in a Karst Region	CHEN Jian-qi, JIA Ya-nan, HE Qiu-fang, <i>et al.</i> (335)
Spatial Distribution Characteristics of Soil Carbon and Nitrogen in Citrus Orchards on the Slope of Purple Soil Hilly Area	LI Zi-yang, CHEN Lu, ZHAO Peng, <i>et al.</i> (343)
Effects of Experimental Nitrogen Deposition and Litter Manipulation on Soil Organic Components and Enzyme Activity of Latosol in Tropical Rubber Plantations	XUE Xin-xin, REN Chang-qi, LUO Xue-hua, <i>et al.</i> (354)
Analysis on Driving Factors, Reduction Potential, and Environmental Effect of Inorganic Fertilizer Input in Chongqing	LIANG Tao, ZHAO Jing-kun, LI Hong-mei, <i>et al.</i> (364)
Research Progress on Distribution, Transportation, and Control of Per- and Polyfluoroalkyl Substances in Chinese Soils	LIU Hao-ran, XING Jing-yi, REN Wen-jie (376)
Prediction of Spatial Distribution of Heavy Metals in Cultivated Soil Based on Multi-source Auxiliary Variables and Random Forest Model	XIE Xue-feng, GUO Wei-wei, PU Li-jie, <i>et al.</i> (386)
Health Risk Assessment and Priority Control Factors Analysis of Heavy Metals in Agricultural Soils Based on Source-oriented	MA Jie, GE Miao, WANG Sheng-lan, <i>et al.</i> (396)
Contamination Characteristics and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in an Abandoned Pyrite Mining Area of Tongling City, China	LI Ru-zhong, LIU Yu-hao, HUANG Yan-huan, <i>et al.</i> (407)
Source Appointment and Assessment of Heavy Metal Pollution in Surface Dust in the Main District Bus Stops of Tianshui City	LI Chun-yan, WANG Xin-min, WANG Hai, <i>et al.</i> (417)
Response of Cadmium in Soil-rice to Different Conditioners Based on Field Trials	TANG Le-bin, LIU Xin-cai, SONG Bo, <i>et al.</i> (429)
Regulation Effects of Humus Active Components on Soil Cadmium Availability and Critical Threshold for Rice Safety	HU Xiu-zhi, SONG Yi, WANG Tian-yu, <i>et al.</i> (439)
Using Biochar and Iron-calcium Material to Remediate Paddy Soil Contaminated by Cadmium and Arsenic	WU Qiu-chan, WU Ji-zi, ZHAO Ke-li, <i>et al.</i> (450)
Research Progress on Characteristics of Human Microplastic Pollution and Health Risks	MA Min-dong, ZHAO Yang-chen, ZHU Long, <i>et al.</i> (459)
Effects of Polystyrene Microplastics Combined with Cadmium Contamination on Soil Physicochemical Properties and Physiological Ecology of <i>Lactuca sativa</i>	NIU Jia-rui, ZOU Yong-jun, JIAN Min-fei, <i>et al.</i> (470)
Transcriptome Analysis of Plant Growth-promoting Bacteria Alleviating Microplastic and Heavy Metal Combined Pollution Stress in Sorghum	LIU Yong-qi, ZHAO Si-yu, REN Xue-min, <i>et al.</i> (480)
Effects of Microplastics on the Leaching of Nutrients and Cadmium from Soil	ZHAO Qun-fang, CHU Long-wei, DING Yuan-hong, <i>et al.</i> (489)
Effect of Microplastics and Phenanthrene on Soil Chemical Properties, Enzymatic Activities, and Microbial Communities	LIU Sha-sha, QIN Jian-qiao, WU Xian-ge (496)
Prediction of Soil Bacterial Community Structure and Function in Minqin Desert-oasis Ecotone Artificial <i>Haloxylon ammodendron</i> Forest	WANG An-lin, MA Rui, MA Yan-jun, <i>et al.</i> (508)
Response of Soil Fungal Community to Biochar Application Under Different Irrigation Water Salinity	ZHENG Zhi-yu, GUO Xiao-wen, MIN Wei (520)
Effects of Organic Fertilizer of Kitchen Waste on Soil Microbial Activity and Function	LIU Mei-ling, WANG Yi-min, JIN Wen-hao, <i>et al.</i> (530)
Response Characteristics of Soil Fungal Community Structure to Long-term Continuous Cropping of Pepper	CHEN Fen, YU Gao, WANG Xie-feng, <i>et al.</i> (543)
Effects of Foliar Application of Silicon Fertilizers on Phyllosphere Bacterial Community and Functional Genes of Paddy Irrigated with Reclaimed Water	LIANG Sheng-xian, LIU Chun-cheng, HU Chao, <i>et al.</i> (555)
Analysis of Bacterial Communities and Antibiotic Resistance Genes in the Aquaculture Area of Changli County	WANG Qiu-shui, CHENG Bo, LIU Yue, <i>et al.</i> (567)
High-throughput qPCR and Amplicon Sequencing as Complementary Methods for Profiling Antibiotic Resistance Genes in Urban Wetland Parks	HUANG Fu-yi, ZHOU Shu-yi-dan, PAN Ting, <i>et al.</i> (576)
Characteristics of Vertical Distribution and Environmental Factors of Antibiotics in Quaternary Sedimentary Column in Urban Areas	LIU Ke, TONG Lei, GAN Cui, <i>et al.</i> (584)
Adsorption Performance and Mechanism of Oxytetracycline in Water by KOH Modified Biochar Derived from Corn Straw	LIU Zong-tang, SUN Yu-feng, FEI Zheng-hao, <i>et al.</i> (594)
Comparison of Pb ²⁺ Adsorption Properties of Biochars Modified Through CO ₂ Atmosphere Pyrolysis and Nitric Acid	JIANG Hao, CHEN Rui-zhi, ZHU Zi-yang, <i>et al.</i> (606)