

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

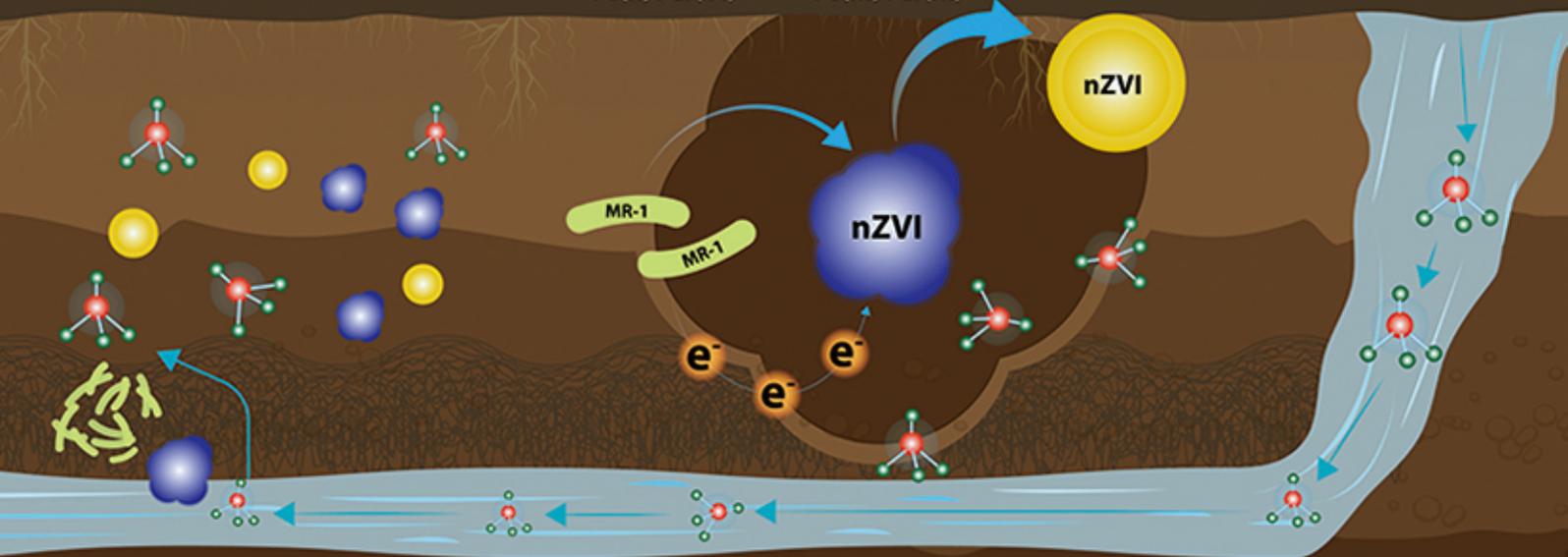
ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJIANG KEXUE

电活性微生物激活生物质炭/零价铁协同钝化Cr(VI)及机制

廖聪坚, 赵晓蕾, 刘凯, 钟松雄, 李芳柏, 方利平, 叶挺进, 石虎砚



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年9月

第42卷 第9期  
Vol.42 No.9

目次

北京市 2014~2020 年 PM<sub>2.5</sub> 和 O<sub>3</sub> 时空分布与健康效应评估 ..... 陈菁, 彭金龙, 徐彦森 (4071)

京津冀地区高分辨率 PM<sub>2.5</sub> 浓度时空变化模拟与分析 ..... 杨晓辉, 宋春杰, 范丽行, 张凌云, 魏强, 李夫星, 王丽艳, 王卫 (4083)

京津冀典型城市冬季人为源减排与气象条件对 PM<sub>2.5</sub> 污染影响 ..... 邵玄逸, 王晓琦, 钟焜盛, 王瑞鹏 (4095)

太行山两侧污染物传输对横谷城市气溶胶的影响分析 ..... 王雁, 郭伟, 闫世明, 裴坤宁, 李明明, 陈二萍 (4104)

嘉善冬季碳质气溶胶变化特征及其来源解析 ..... 张颖龙, 李莉, 吴伟超, 吕升, 秦阳, 祝新明, 高晋徽, 唐倩, 夏崢 (4116)

基于机器学习算法的新冠疫情管控对河南省空气质量影响的模拟分析 ..... 魏煜, 徐起翔, 赵金帅, 张瑞芹 (4126)

新乡市大气 PM<sub>2.5</sub> 载带金属元素季节分布、来源特征与健康风险 ..... 刘桓嘉, 贾梦珂, 刘永丽, 赵艺洁, 郑爱华, 刘恒志, 徐肃阳, 肖晴晴, 苏晓燕, 任言 (4140)

黄渤海气溶胶中砷的分布特征和季节变化 ..... 袁帅, 王艳, 刘汝海, 种习习, 刘晓雨, 邵龙 (4151)

天津市 2020 年冬季重污染过程气溶胶消光特性及其来源 ..... 李立伟, 肖致美, 杨宁, 蔡子颖, 闫斌峰, 元洁, 白宇, 郑乃源, 唐逸 (4158)

中国暖季近地面臭氧浓度空间格局演变及主要气象驱动因素 ..... 何超, 慕航, 杨璐, 王丹璐, 邸彦峰, 叶志祥, 易嘉慧, 柯碧钦, 田雅, 洪松 (4168)

乌海市夏季臭氧污染特征及基于过程分析的成因探究 ..... 张瑞欣, 陈强, 夏佳琦, 刘晓, 郭文凯, 李光耀, 陈梅 (4180)

珠江三角洲海岸背景区大气 VOCs 污染特征与来源 ..... 云龙, 李成柳, 张明棣, 何龙, 郭键锋 (4191)

永定河上游地表水-地下水水化学特征及其成因分析 ..... 孔晓乐, 杨永辉, 曹博, 王艺璇, 裴宏伟, 沈彦军 (4202)

汉江中下游水质时空变异与驱动因素识别 ..... 程兵芬, 张远, 夏瑞, 张楠, 张新飞 (4211)

环境持久性药物在江苏省地表水中的污染水平、分布特征及生态风险评估 ..... 赵美美, 范德玲, 古文, 汪贞, 梁梦园, 刘济宁, 张志 (4222)

柳江流域河流溶解态重金属时空分布及污染评价 ..... 张婉军, 辛存林, 于爽, 刘齐, 曾鹏 (4234)

雷州半岛地下水重金属来源解析及健康风险评价 ..... 师环环, 潘羽杰, 曾敏, 黄长生, 侯清芹, 皮鹏程, 彭红霞 (4246)

龙子祠泉域地下水金属元素分布特征及健康风险评价 ..... 谢浩, 梁永平, 李军, 邹胜章, 申豪勇, 赵春红, 王志恒 (4257)

硫氧同位素解析典型岩溶地下河流域硫酸盐季节变化特征和来源 ..... 任坤, 潘晓东, 兰干江, 彭聪, 梁嘉鹏, 曾洁 (4267)

包头南海湿地磷形态及污染源定量识别 ..... 拜亚红, 钱晨歌, 袁思静, 谢子嫣, 来凌子, 张敏, 刘颖, 苗春林 (4275)

城市新城区公园沟塘沉积物磷释放风险及影响因素分析 ..... 李如忠, 宋敏, 杨继伟 (4287)

水力停留时间对潜流湿地净化效果影响及脱氮途径解析 ..... 齐冉, 张灵, 杨帆, 颜昌宙 (4296)

锰砂人工湿地对污染物的强化去除 ..... 马权, 王东麟, 林慧, 柏耀辉 (4304)

4 种典型沉水植物对去除磷污染底泥的应用效果 ..... 陶理, 王沛芳, 袁秋生, 王洵, 胡斌 (4311)

输水情景下白洋淀好氧反硝化菌群落对溶解性有机物的响应 ..... 周石磊, 张甜娜, 陈召莹, 张紫薇, 于明会, 姚波, 崔建升, 罗晓 (4319)

木屑生物炭在雨水径流中的氮磷淋出和吸附特性 ..... 孟依柯, 王媛, 汪传跃 (4332)

海州湾潮间带沙蚕对沉积物微塑料的指示作用 ..... 王嘉旋, 宋可心, 孙一鑫, 方涛, 李瑾祯, 张涛, 冯志华 (4341)

纳米二氧化钛与镉对斜生栅藻 (*Scenedesmus obliquus*) 生长的拮抗效应及其作用机制 ..... 王璞, 赵丽红, 朱小山 (4350)

螺旋霉素废水处理过程中菌群结构、水质特征及抗性基因之间关系分析 ..... 武彩云, 李慧莉, 覃彩霞, 佟娟, 魏源送 (4358)

螯合铁对厌氧铁氨氧化脱氮效能及微生物群落的影响 ..... 廖宏燕, 宋诚, 万柳杨, 时绍鹏, 王兴祖 (4366)

溶解氧对低碳源城市污水处理系统脱氮性能与微生物群落的影响 ..... 池玉蕾, 石炬, 任童, 王晓昌, 金鹏康 (4374)

间歇梯度曝气下缩短 SRT 强化短程 SNEDPR 系统脱氮除磷 ..... 张玉君, 李冬, 王歆鑫, 张杰 (4383)

生物膜系统中部分反硝化实现特性 ..... 于莉芳, 张兴秀, 张琼, 王晓玉, 彭党聪, 张日霞 (4390)

厌氧推流进水对反硝化除磷好氧颗粒污泥系统的影响 ..... 李冬, 曹思雨, 王琪, 张杰 (4399)

不同好氧/缺氧时长联合分区排泥优化生活污水短程硝化反硝化除磷颗粒系统运行 ..... 王文琪, 李冬, 高鑫, 张杰 (4406)

中国西南地区金属矿开采对矿区土壤重金属影响的 Meta 分析 ..... 张健琳, 瞿明凯, 陈剑, 杨兰芳, 赵永存, 黄标 (4414)

青藏高原典型流域土壤重金属分布特征及其生态风险评价 ..... 杜昊霖, 王莺, 王劲松, 姚玉璧, 周悦, 刘晓云, 芦亚玲 (4422)

电子垃圾拆解区土壤-农作物系统中铜元素的空间分布特征及其风险评价 ..... 张璐瑶, 赵科理, 傅伟军 (4432)

改性生物炭特性表征及对冶炼厂周边农田土壤铜形态的影响 ..... 王鑫宇, 孟海波, 沈玉君, 王佳锐, 张曦, 丁京涛, 周海宾, 李春燕, 程琼仪 (4441)

组配改良剂联合锌肥对土壤-水稻系统镉迁移转运的影响 ..... 周坤华, 周航, 王子钰, 刘雅, 刘佳伟, 辜娇峰, 曾鹏, 廖柏寒 (4452)

不同结构改良剂对铜镉污染土壤水稻生长和重金属吸收的影响 ..... 魏玮, 李平, 郎漫 (4462)

1 株草螺属植物内生菌 R-13 的分离鉴定及对龙葵吸收土壤镉的影响 ..... 鹿杰, 刘月敏, 黄永春, 王常荣, 刘斌, 刘仲齐, 黄益宗, 黄雁飞, 张长波 (4471)

不同地区土壤古菌群落对重金属污染响应 ..... 李雨桐, 杨杉, 张艺, 范例, 刘坤, 张晟 (4481)

高通量测序分析黄土高原退耕还林区土壤细菌群落特征 ..... 刘晓华, 魏天兴 (4489)

餐厨垃圾生物发酵液对黄土丘陵区土壤质量的影响试验 ..... 邵立明, 任俊达, 吕凡, 章骅, 何品晶 (4500)

秦岭不同海拔土壤团聚体稳定性及其与土壤酶活性的耦合关系 ..... 马震菲, 胡汗, 李益, 郭鑫鑫, 任成杰, 赵发珠 (4510)

电活性微生物激活生物质炭/零价铁协同钝化 Cr(VI) 及机制 ..... 廖聪坚, 赵晓蕾, 刘凯, 钟松雄, 李芳柏, 方利平, 叶挺进, 石虎砚 (4520)

降水变化对荒漠草原土壤呼吸的影响 ..... 蒿廉伊, 张丽华, 谢忠奎, 赵锐锋, 王军锋, 郭亚飞, 高江平 (4527)

氮肥分施次数及硝化抑制剂对盆栽玉米 N<sub>2</sub>O 排放的影响 ..... 符佩娇, 吉恒宽, 何秋香, 汤水荣, 王鸿浩, 伍延正, 孟磊 (4538)

负载 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 生物炭对土壤 N<sub>2</sub>O-N 排放和 NH<sub>3</sub>-N 挥发的影响 ..... 马晓刚, 何建桥, 陈玉蓝, 李德天, 刘川, 董建新, 郑学博 (4548)

微塑料添加对橘园土壤有机碳矿化的影响 ..... 张秀玲, 鄢紫薇, 王峰, 王玺, 徐晗, 胡荣桂, 严昶, 林杉 (4558)

1985~2019 年中国全氟辛酸磺酰基化合物的动态物质流分析 ..... 王佳钰, 陈景文, 唐伟豪, 崔蕴晗, 王中钰, 宋国宝, 陈伟强 (4566)

《环境科学》征订启事(4201) 《环境科学》征稿简则(4340) 信息(4382, 4537, 4565)

## 嘉善冬季碳质气溶胶变化特征及其来源解析

张颖龙<sup>1</sup>, 李莉<sup>1</sup>, 吴伟超<sup>1</sup>, 吕升<sup>1</sup>, 秦阳<sup>2</sup>, 祝新明<sup>1</sup>, 高晋徽<sup>3</sup>, 唐倩<sup>4</sup>, 夏峥<sup>4</sup>

(1. 浙江省嘉兴生态环境监测中心, 嘉兴 314000; 2. 南京信息工程大学大气物理学院, 南京 210044; 3. 南方科技大学海洋科学与工程系, 深圳 518055; 4. 浙江省生态环境监测中心, 杭州 310012)

**摘要:** 利用2018年冬季(2018年12月至2019年2月)和2019年冬季(2019年12月至2020年2月)嘉兴市嘉善县善西超级站有机碳(OC)、元素碳(EC)及细颗粒物(PM<sub>2.5</sub>)浓度数据分析嘉兴嘉善地区碳质气溶胶变化特征及潜在来源区域。结果表明, 2018年和2019年冬季OC浓度分别为6.90 μg·m<sup>-3</sup>和5.63 μg·m<sup>-3</sup>, EC浓度分别为2.47 μg·m<sup>-3</sup>和1.57 μg·m<sup>-3</sup>, 2019年冬季OC和EC浓度较2018年冬季降幅分别为18.4%和36.4%。利用Minimum R-squared(MRS)方法计算得到2018年和2019年冬季二次有机碳(SOC)分别为1.49 μg·m<sup>-3</sup>和1.97 μg·m<sup>-3</sup>, 一次有机碳(POC)浓度分别为5.41 μg·m<sup>-3</sup>和3.66 μg·m<sup>-3</sup>, SOC在OC中占比呈上升趋势, 上升31.1个百分点, POC占比变化则相反。值得注意的是, 随着PM<sub>2.5</sub>浓度升高, OC和EC浓度呈上升趋势, 最高上升幅度分别为474.7%和408.2%, 但在PM<sub>2.5</sub>中占比却呈下降趋势, OC和EC占比下降幅度分别为6.5个百分点和2.4个百分点; POC对PM<sub>2.5</sub>的贡献波动不大, 仅在150 μg·m<sup>-3</sup>以上有明显降低趋势, SOC对PM<sub>2.5</sub>的贡献先下降后上升。嘉兴OC和EC潜在源区主要为苏南地区、安徽东南部和浙江北部, 且2019年冬季和2018年冬季相比, OC和EC的主要潜在源区贡献浓度分别下降2 μg·m<sup>-3</sup>和6 μg·m<sup>-3</sup>以上, 且潜在源区高值区域变小。疫情前受机动车尾气排放和燃煤共同影响, 春节和居家隔离期间, 因交通管制等原因, 机动车排放量减少, 燃煤贡献占比上升。

**关键词:** 碳质气溶胶; MRS方法; 二次有机碳; 潜在源区; 居家隔离

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)09-4116-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202101167

## Variation Characteristics and Source Analysis of Carbonaceous Aerosols in Winter in Jiashan

ZHANG Ying-long<sup>1</sup>, LI Li<sup>1</sup>, WU Wei-chao<sup>1</sup>, LÜ Sheng<sup>1</sup>, QIN Yang<sup>2</sup>, ZHU Xin-ming<sup>1</sup>, GAO Jin-hui<sup>3</sup>, TANG Qian<sup>4</sup>, XIA Zheng<sup>4</sup>

(1. Jiaxing Eco-Environmental Monitoring Center of Zhejiang Province, Jiaxing 314000, China; 2. School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 3. Department of Ocean Science and Engineering, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China; 4. Zhejiang Eco-Environmental Monitoring Center, Hangzhou 310012, China)

**Abstract:** Organic carbon (OC), elemental carbon (EC), and PM<sub>2.5</sub> concentration data obtained from Shanxi Super Station in Jiashan County of Jiaxing City, in the winter of 2018 and 2019, were analyzed to determine the variation and potential source areas of carbonaceous aerosols. The results show that OC concentrations in the winter of 2018 and 2019 were 6.90 μg·m<sup>-3</sup> and 5.63 μg·m<sup>-3</sup>, respectively, while EC concentrations were 2.47 μg·m<sup>-3</sup> and 1.57 μg·m<sup>-3</sup>, respectively. The concentrations of OC and EC in the winter of 2019 were lower than those in the winter of 2018, by approximately 18.4% and 36.4%, respectively. In 2018 and 2019, the concentrations of secondary organic carbon (SOC), calculated using the minimum R-squared (MRS) method, were 1.49 μg·m<sup>-3</sup> and 1.97 μg·m<sup>-3</sup>, respectively, and the concentrations of primary organic carbon (POC) were 5.41 μg·m<sup>-3</sup> and 3.66 μg·m<sup>-3</sup>, respectively. The proportion of POC in OC showed a downward trend, from 96.0% in December 2018 to 64.9% in February 2020, indicating a decrease of 31.1 percentage points. SOC showed an upward trend, increasing by 31.1 percentage points from 4.0% in December 2018 to 35.1% in February 2020. It is worth noting that with the increase in PM<sub>2.5</sub> concentration, the concentration of OC and EC increased by 474.7% and 408.2%, respectively, although the proportion of OC in PM<sub>2.5</sub> decreased from 18.8% to 12.3% and the percentage of OC decreased from 5.8% to 3.3%. The contribution of POC to PM<sub>2.5</sub> did not fluctuate, and only decreased significantly above 150 μg·m<sup>-3</sup>, while the contribution of SOC to PM<sub>2.5</sub> first decreased and then increased. In Jiaxing, the potential sources of OC and EC were mainly southern Jiangsu, southeastern Anhui, local Jiaxing, and northern Zhejiang. In the winter of the contribution concentrations of OC and EC in the main potential source regions were approximately 2 μg·m<sup>-3</sup> and 6 μg·m<sup>-3</sup> lower, respectively, than in winter 2018. The range of high values in the potential source regions also decreased in 2019. Before the COVID-19 epidemic, it was affected by both motor vehicle exhaust emissions and coal burning. During the Spring Festival and home isolation, due to traffic control and other reasons, motor vehicle emissions were reduced, which leaving coal burning as the main contributor.

**Key words:** carbonaceous aerosol; MRS method; secondary organic carbon; potential source region; lockdown

收稿日期: 2021-01-20; 修订日期: 2021-02-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(41905114); 中国博士后科学基金项目(2019M662169); 江苏省研究生科研创新项目(SJKY19\_0945)

作者简介: 张颖龙(1989~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为大气环境化学及预报, E-mail: ylzhang219@126.com

碳质气溶胶主要由有机碳 (organic carbon, OC)、元素碳 (elemental carbon, EC) 和碳酸盐碳 (carbonate carbon, CC) 组成<sup>[1]</sup>. OC 和 EC 是气溶胶的重要组成部分<sup>[2]</sup>, 在细颗粒物 (PM<sub>2.5</sub>) 和可吸入颗粒物 (PM<sub>10</sub>) 中质量浓度分别占到 21%~78% 和 10%~43%, EC 完全来自于一次排放, OC 有直接从燃烧中排放的一次有机碳 (POC), 也有通过气粒转化或一次组分老化得到的二次有机物 (SOC)<sup>[3]</sup>. 碳质气溶胶通过辐射强迫对全球气候<sup>[4,5]</sup>、大气能见度<sup>[6]</sup> 和空气质量<sup>[7]</sup> 等有着重要影响, 还会破坏人类呼吸和循环系统, 对人类健康产生严重危害<sup>[8,9]</sup>.

碳质气溶胶是我国主要的污染物之一<sup>[10]</sup>, 长三角地区是我国三大区域中污染浓度最高和时间最长的地区之一<sup>[11]</sup>. 国内外研究者们对 OC 和 EC 已经做了大量的研究, 国内对 OC 和 EC 研究起步较晚, 早期多集中在京津冀、长三角和珠三角等地区<sup>[12~14]</sup>, 污染侧重于日变化、季节和空间变化、SOC 估算及来源分析等方面的研究<sup>[15~17]</sup>. Yao 等<sup>[18]</sup> 研究了 2015~2017 年上海郊区碳质气溶胶的时间变化和来源, 发现 OC 和 EC 浓度逐年下降, 一次排放的碳质气溶胶是污染天的主要来源, 汽车尾气为上海碳质气溶胶的主要来源. 云龙等<sup>[19]</sup> 分析了无锡市 PM<sub>2.5</sub> 和 TCA (total carbonaceous aerosol) 的关系, 发现在霾天气下, 随着 PM<sub>2.5</sub> 浓度升高, TCA 浓度占 PM<sub>2.5</sub> 比例降低, 由此推断出二次无机气溶胶离子的快速增长是造成污染的一个重要原因. 吴梦龙等<sup>[20]</sup> 对南京地区碳质气溶胶分析发现, OC 和 EC 主要存在细粒子中, 且细粒子中 SOC 污染在夏季最高, 说明夏季光照条件有利于光化学反应的发生.

新冠肺炎 (COVID-19) 期间, 居家隔离政策大大减少了污染物的排放<sup>[21]</sup>, 特别是在中国, 有研究表明在全国封锁期间, 一些空气污染物浓度显著降低, 但京津冀地区颗粒物浓度居高不下<sup>[22]</sup>, 全国大部分地区 O<sub>3</sub> 浓度升高<sup>[23,24]</sup>. 在 COVID-19 期间交通源浓度和占比较之前有所下降, 燃煤源和工业源的占比显著增加<sup>[25]</sup>. 作为长三角中心地区的嘉兴, 毗邻上海、苏州和杭州, 机动车保有量已达到 170 万辆, 电力、原煤、液化石油气、柴油和汽油等能源消耗高, 其中煤炭约为 1775 万 t, 占比高达 16.4%. 由于春节和新冠肺炎的影响, 污染物存在大量的减排, 因此, 研究疫情及春节前后气溶胶化学组分的变化, 可以了解人为源排放对大气污染的影响. 到目前为止, 学者们已经开展了很多关于疫情期间的研究, 然而对嘉兴地区还没有该方向的研究. 本研究主要分析了嘉兴 2018 年冬季和 2019 年冬季以及在疫情前、春节和居家隔离期间碳质气溶胶的变化特征, 此

外利用 CWT 方法分析了嘉兴地区污染潜在源区, 期为管理部门空气污染的防治提供宝贵的经验和科学依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 观测地点

观测点位于浙江省嘉兴市嘉善县善西超级站 (30.82°N, 120.87°E), 站点位于长三角中东部地区, 浙江东北部 (图 1). 采样点距地面约 10 m, 周围 1 km 范围内没有明显污染源, 有大面积农田和少量住宅, 东北方向有河流. 采样时间为 2018 年 12 月至 2019 年 2 月和 2019 年 12 月至 2020 年 3 月 2 日, 24 h 在线连续监测. 气象数据包含气温、湿度、风速和风向.

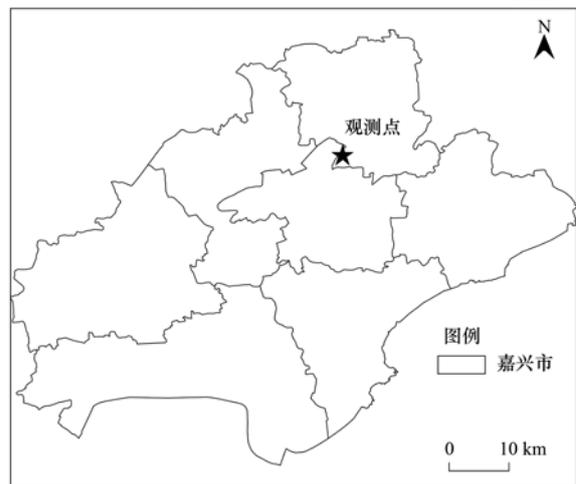


图 1 嘉兴市嘉善善西超级站观测点位示意

Fig. 1 Location of observation site of Shanxi Super Station in Jiashan County of Jiaxing City

### 1.2 采样仪器

Sunset OCEC 分析仪采用美国职业安全与卫生研究所 (National Institute for Occupational Safety and Health, NIOSH) 认可的热学/光学方法测定分析收集在石英滤膜上的 OC 和 EC. 采样流量为 8 L·min<sup>-1</sup>, 采样周期 40 min, 分析时间 20 min. 按照程序设定的时间启动采样泵收集样品, 然后通入纯氮载气, 按照温度梯度进行升温, 首次升温到 840°C, 将样品膜上的 OC 进行分解, 在二氧化锰氧化剂作用下, 氧化成二氧化碳, 在非色散红外检测器 (nondispersive infrared detector, NDIR) 处进行定量; 石英炉第二次升温到 870°C, 然后仪器将载气更换为氮气和氧气混合气, 将样品膜上的 EC 氧化成二氧化碳, 同样在 NDIR 检测器处定量. 同时分析过程中实时监测激光强度的变化, 实现 OC 和 EC 的分割. OC 和 EC 的检出限 (以 C 计) 分别为 0.4 μg·m<sup>-3</sup> 和 0.2 μg·m<sup>-3</sup>, 时间分辨率为 1 h. 该仪器

对每次测量过程进行自动光学校正,并且定期通过蔗糖溶液和空白对比等方法对仪器进行校准,确保仪器的正常运行和数据的可靠性。

### 1.3 MRS (minimum R-squared)方法估算 SOC

EC 是基于碳的燃烧过程产物,且完全来自一次排放,因此 EC 示踪法已被广泛用于估算一次和二次有机气溶胶的贡献<sup>[26~28]</sup>,计算公式为:

$$\text{POC} = (\text{OC}/\text{EC})_{\text{pri}} \times \text{EC} \quad (1)$$

$$\text{SOC} = \text{OC}_{\text{total}} - \text{POC} \quad (2)$$

式中,  $(\text{OC}/\text{EC})_{\text{pri}}$  为新鲜一次排放的气溶胶 OC/EC 值,  $\text{OC}_{\text{total}}$  和 EC 为监测值, POC 为一次有机碳, SOC 为二次有机碳。

EC 示踪法主要考虑的是  $(\text{OC}/\text{EC})_{\text{pri}}$  的准确测定,常用的方法是在最低固定百分位(通常为 5%~25%)上求得 OC/EC 比值<sup>[29~31]</sup>,从而得到 SOC,这种方法缺乏明确的定量标准来确定  $(\text{OC}/\text{EC})_{\text{pri}}$ 。本研究采用 MRS 方法, MRS 方法与传统  $(\text{OC}/\text{EC})_{\text{pri}}$  最小比值法相比, MRS 方法计算的不确定性最小<sup>[32]</sup>。MRS 法基于 EC 与 SOC 本质上不相关的假设(SOC 和 EC 是一次生成的, SOC 是二次生成的<sup>[33]</sup>),假设通过连续不同的  $(\text{OC}/\text{EC})_{\text{pri},h}$  计算得到不同的  $\text{SOC}_h$ ,再将计算得到的  $\text{SOC}_h$  与 EC 做相关性分析,得到最小的相关系数  $R^2$  对应的  $(\text{OC}/\text{EC})_{\text{pri},h}$  即为  $(\text{OC}/\text{EC})_{\text{pri}}$ ,此时  $\text{SOC}_h$  与 EC 相关性最差,说明二次污染影响最弱<sup>[34]</sup>。

### 1.4 浓度权重轨迹法(CWT方法)

利用 TrajStat 软件对观测期间碳质气溶胶进行潜在源区研究<sup>[35]</sup>。使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(GDAS)提供,数据间

隔为 6 h,分别为 00:00、06:00、12:00 和 18:00(世界时),下载链接为 <ftp://arlftp.arlhq.noaa.gov/pub/archives/gdas1>。本研究每隔 1 h 计算一次,起始高度为 300 m 的 72 h 后向轨迹。浓度权重轨迹(concentration-weighted trajectory, CWT)分析法<sup>[36]</sup>是一种计算潜在源区气流轨迹权重浓度的方法,能反映不同轨迹的污染程度, CWT 分析法能模拟出潜在源区污染物的权重浓度数值,而不是贡献大小。因此本文通过浓度权重轨迹分析法对潜在源区的污染物程度进行分析,计算公式:

$$\text{CWT}_{ij} = \sum_{k=1}^M C_k \tau_{ijk} / \sum_{k=1}^M \tau_{ijk} \quad (3)$$

$$\text{WCWT}_{ij} = \text{CWT}_{ij} \times W_{ij} \quad (4)$$

$$W_{ij} = \begin{cases} 1.00, & 80 > y_{ij} \\ 0.70, & 20 < y_{ij} \leq 80 \\ 0.42, & 10 < y_{ij} \leq 20 \\ 0.05, & y_{ij} \leq 10 \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $\text{WCWT}_{ij}$  为网格  $(i, j)$  上的平均污染权重浓度;  $M$  是轨迹总数;  $k$  为某一轨迹;  $C_k$  是轨迹  $k$  经过网格  $(i, j)$  时对应的某要素值;  $\tau_{ijk}$  为轨迹  $k$  在网格  $(i, j)$  停留的时间,  $W_{ij}$  为权重函数,以降低当  $y_{ij}$  较小时引起的不确定性。

## 2 结果与讨论

### 2.1 碳质气溶胶特征分析

图 2 为 2018 年和 2019 年冬季 OC、EC、 $\text{PM}_{2.5}$  浓度和气象因子时序变化。可以看到, 2018 年和 2019 年冬季  $\text{PM}_{2.5}$  均值浓度分别为  $46 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  和  $37 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 日均值浓度范围分别为  $10 \sim 128 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  和

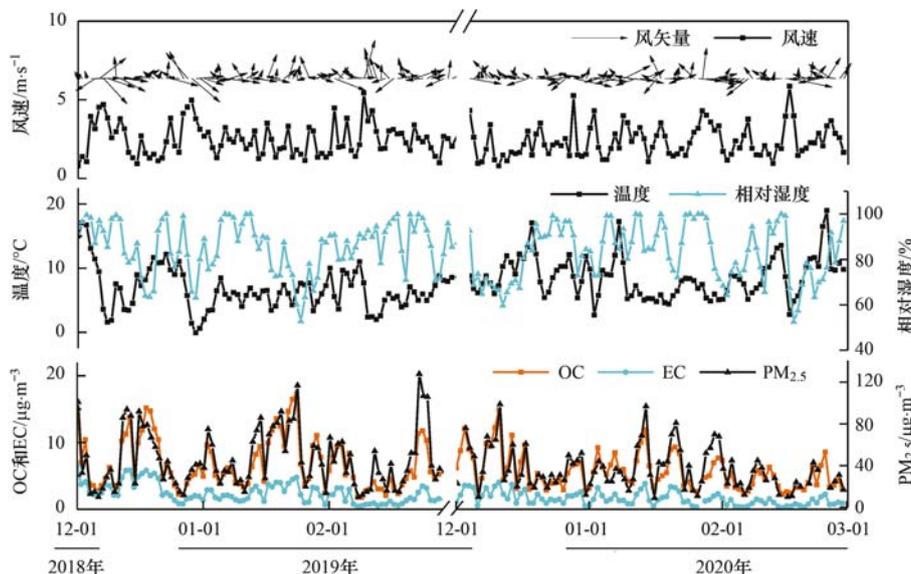


图 2 2018 年冬季和 2019 年冬季观测期间 OC、EC、 $\text{PM}_{2.5}$  浓度和气象因子时间序列

9 ~ 99  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ; OC 均值浓度分别为 6.90  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  和 5.63  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 日均值浓度范围分别为 1.77 ~ 17.37  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  和 1.91 ~ 14.92  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ; EC 均值浓度分别为 2.47  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  和 1.57  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 日均值浓度范围分别为 0.44 ~ 6.51  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  和 0.21 ~ 4.04  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . 2019 年冬季 OC 和 EC 均值浓度较 2018 年冬季分别下降了 18.4% 和 36.4%. 同时气象条件对  $\text{PM}_{2.5}$ 、OC 和 EC 浓度有较高影响, 如高相对湿度和低风速会导致空气污染物的升高. 2019 年冬季温度为 8.5 $^{\circ}\text{C}$ , 较 2018 年冬季(6.7 $^{\circ}\text{C}$ )高 1.8 $^{\circ}\text{C}$ ; 2019 年冬季湿度为 82.7%, 较 2018 年冬季(85.4%)低 2.7%; 2018 年冬季和 2019 年冬季风速相差不大, 分别为 2.5  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  和 2.4  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ . 总的来说, 嘉兴地区 2018 年冬季和 2019 年冬季气象条件相对变化不大, 因此, 嘉兴地区的污染物变化可能主要是由于排放源的变化引起的.

## 2.2 SOC 估算

图 3 为利用 MRS 方法计算得到的 2018 年冬季和 2019 年冬季 (OC/EC)<sub>pmi</sub> 值分别为 2.19 和 2.33. 表 1 为由公式(1)和公式(2)计算得到的相关数据. 2018 年和 2019 年冬季 POC 分别为 5.41  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  和 3.66  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , SOC 浓度分别为 1.49  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  和 1.97  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 2019 年冬季 POC 和 SOC 较 2018 年冬季分别下降 32.4% 和上升 32.3%.

当 OC/EC 比值在 1.0 ~ 4.0 之间时, 说明机动车尾气排放影响较大<sup>[37]</sup>, OC/EC 比值在 2.5 ~ 10.5 之间时, 说明燃煤的贡献大<sup>[38]</sup>. 2018 年冬季和 2019 年冬季 OC/EC 值分别为 2.79 和 3.59, 均受机动车尾气排放和燃煤共同影响. 但从单月来看, 2018 年 12 月 OC/EC 为 2.18, 说明机动车尾气排放影响较大, 2019 年的 1 月、2 月、12 月和 2020 年 1 月 OC/EC 分别为 3.19、3.54、3.16 和 3.51, 说明受机动车尾气排放和燃煤共同影响, 2020 年 2 月受疫情影响, 机动车排放量大量降低, OC/EC 最高(4.58), 因此疫情期间燃煤贡献升高.

图 4 为观测期间碳质气溶胶各组分浓度及占比

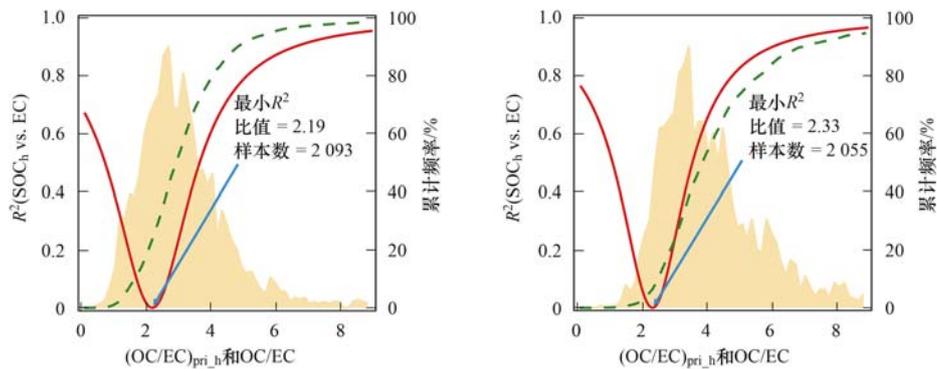
变化, 可以看出 2018 年冬季和 2019 年冬季 OC 和 EC 浓度整体为下降趋势, OC 浓度从 2018 年 12 月的 7.27  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  降至 2020 年 2 月的 4.21  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , EC 从 2018 年 12 月的 3.34  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  降至 2020 年 2 月的 0.92  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , OC 和 EC 冬季平均降幅分别为 18.4% 和 36.4%; POC 浓度呈下降趋势, SOC 呈上升趋势, POC 在 OC 中占比呈下降趋势, POC 在 OC 中占比从 2018 年 12 月的 96.0% 下降至 2020 年 2 月的 64.9%, 下降了 31.1 个百分点, 冬季平均浓度下降约为 32.3%; SOC 在 OC 中呈现上升趋势, 从 2018 年 12 月的 4.0% 上升至 2020 年 2 月的 35.1%, 上升了 31.1 个百分点, 冬季平均浓度上升约为 32.2%. EC 和 POC 浓度降低, 这可能是由于当地管理部门对一次污染排放进行了严格管制有关, 如烹调油烟、工业或民用燃油锅炉改造等.

图 5 为 2018 年冬季和 2019 年冬季 OC、EC、OC/EC、POC 和 SOC 日变化情况, 可以看到 2018 年冬季 OC 和 EC 日变化浓度均高于 2019 年冬季(图 4), OC 和 EC 日变化均呈弱双峰结构, 峰值出现在 08:00 和 18:00, 是早晚上下班高峰期; OC/EC 值越低, 说明受机动车排放影响越强, 2019 年冬季 OC/EC 值高于 2018 年冬季, 说明 2019 年冬季机动车贡献程度降低, 但在每日 07:00 ~ 08:00 和 17:00 ~ 19:00 出现极低值, 说明上下班时间受机动车排放影响增强; 2018 年冬季和 2019 年冬季 POC 和 OC 变化趋势一致, 为双峰结构, 峰值出现在 08:00 和 18:00, 2018 年冬季和 2019 年冬季在 08:00 浓度分别为 6.0  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  和 4.2  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 18:00 浓度分别为 5.5  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  和 3.3  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . 2019 年冬季 POC 较 2018 年冬季日变化降幅在 29.5% ~ 43.3% 之间. 然而 SOC 浓度出现反弹, 2019 年冬季 SOC 日变化浓度较 2018 年冬季变化幅度在 -7.2 ~ 25.6% 之间, 在 02:00 至 17:00 出现高于 2018 年冬季的情况, SOC 浓度不降反升, 平均升高幅度约 10.5%, 这可能与疫情期间臭氧及相关的大气自由基浓度上升, 促

表 1 利用 MRS 方法估算 SOC 和 POC

Table 1 Estimation of SOC and POC using the MRS method

日期 (年-月)	OC/EC	OC / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	EC / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	(OC/EC) <sub>pmi</sub>	POC / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	SOC / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	POC/OC /%	SOC/OC /%
2018-12	2.18	7.27	3.34	2.09	6.98	0.29	96.0	4.0
2019-01	3.19	7.90	2.48	2.97	7.37	0.53	93.2	6.8
2019-02	3.54	5.38	1.52	2.58	3.92	1.46	72.9	27.1
2019-12	3.16	6.50	2.06	2.29	4.72	1.78	72.6	27.4
2020-01	3.51	6.10	1.74	2.32	4.04	2.06	66.2	33.8
2020-02	4.58	4.21	0.92	2.97	2.73	1.48	64.9	35.1
2018-12 ~ 2019-02	2.79	6.90	2.47	2.19	5.41	1.49	78.4	21.6
2019-12 ~ 2020-02	3.59	5.63	1.57	2.33	3.66	1.97	65.0	35.0



红色曲线表示 SOC 与 EC 之间的相关系数 ( $R^2$ ) 和假设的  $(OC/EC)_{pri}$  之间的关系;  
黄色阴影区域为 OC/EC 比值的频率分布; 绿色虚线为 OC/EC 的累计频率

图 3 利用 MRS 方法计算 2018 年冬季和 2019 年冬季  $(OC/EC)_{pri}$  值

Fig. 3 Using MRS method to calculate the  $(OC/EC)_{pri}$  value in the winter of 2018 and 2019

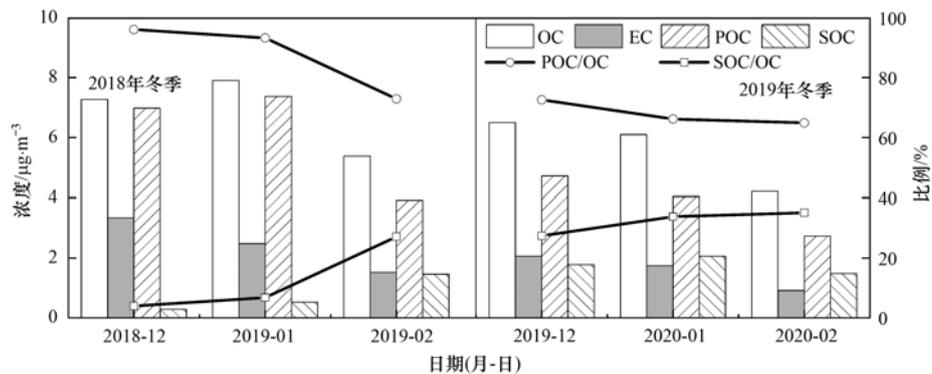


图 4 观测期间碳质气溶胶各组分浓度及占比变化

Fig. 4 Variation in concentration and proportion of carbon aerosol component during observation period

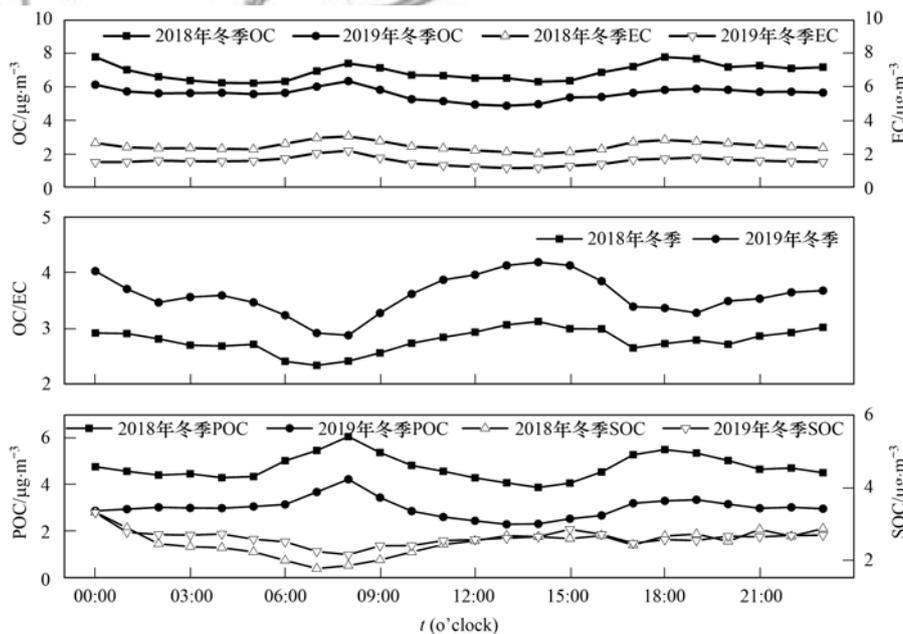


图 5 2018 年冬季和 2019 年冬季 OC、EC、OC/EC、POC 和 SOC 日变化趋势

Fig. 5 Diurnal variation trends of OC, EC, OC/EC, POC, and SOC in winter 2018 and 2019

进了二次颗粒物生成的非均相反应过程有关<sup>[39]</sup>。

### 2.3 不同污染等级下碳质气溶胶的特征分析

为了解不同碳质气溶胶对空气污染程度的贡

献,对  $PM_{2.5}$  进行等级划分,对不同  $PM_{2.5}$  浓度区间下碳质气溶胶特征变化进行分析. 图 6 为观测期间不同  $PM_{2.5}$  区间 OC、EC、POC 和 SOC 浓度及其在  $PM_{2.5}$

浓度占比变化和气象要素变化. 可以看出, 所有含碳组分均随着  $PM_{2.5}$  浓度升高而升高, 但升高的速率不等, 最大升高幅度范围为 408.2% ~ 491.2% [图 6 (a)]. 且随着  $PM_{2.5}$  浓度的升高, POC 浓度从  $1.87 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  升至  $10.37 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 增速先快后慢, SOC 浓度从  $1.79 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  上升至  $10.57 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 增速先慢后快. 图 6(b) 中, POC 对  $PM_{2.5}$  的贡献随  $PM_{2.5}$  浓度升高波动不大, 仅在  $115 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  以上有明显降低趋势, SOC 对  $PM_{2.5}$  的贡献先下降后上升. 值得注意的是, 随着  $PM_{2.5}$  浓度升高, OC 和 EC 浓度呈上升趋势, 最高上升幅度分别为 474.7% 和 408.2%, 但在  $PM_{2.5}$  中占比却呈下降趋势, OC 从 18.8% 下降至

12.3%, EC 从 5.8% 下降至 3.3%, OC 和 EC 下降幅度分别为 6.5 个百分点和 2.4 个百分点, 这可能是由于污染浓度升高时, 二次无机组分占比升高导致<sup>[40]</sup>.

由图 6(c) 可以看到,  $PM_{2.5}$  浓度在  $150 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  以下时, 气温随着  $PM_{2.5}$  浓度上升变化不大,  $PM_{2.5}$  浓度在 150 以上时, 气温急剧上升到最高 ( $9.1^\circ\text{C}$ ); 风速随着  $PM_{2.5}$  浓度升高先下降后上升, 变化范围为  $1.7 \sim 2.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ; 湿度随着  $PM_{2.5}$  浓度升高呈现下降趋势, 但相对湿度均高于 75%, 颗粒物易吸湿增长. 可以发现, 随着  $PM_{2.5}$  浓度升高, 温度和 SOC 变化趋势相似, 说明高温条件下 SOC 可能更易二次形成.

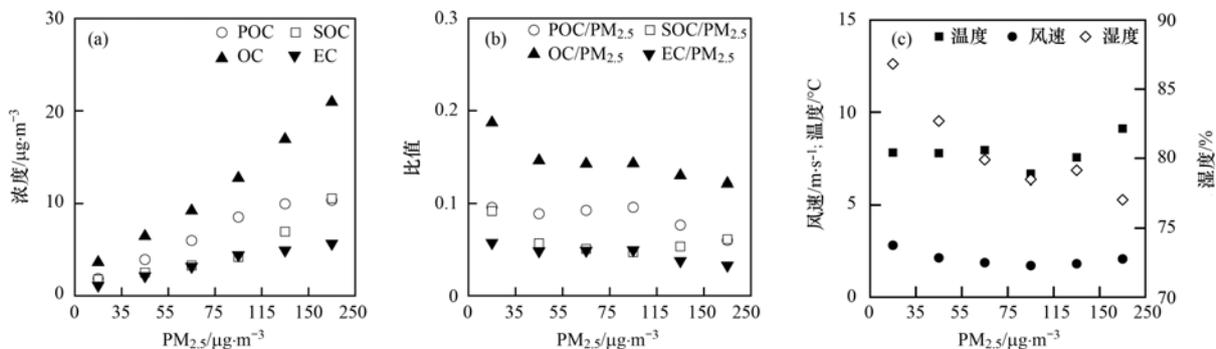


图 6 观测期间在不同  $PM_{2.5}$  浓度区间 OC、EC、POC 和 SOC 浓度及其在  $PM_{2.5}$  中占比变化和气象要素变化

Fig. 6 Changes in OC, EC, POC, and SOC concentrations and their contribution to  $PM_{2.5}$  and meteorological elements in different  $PM_{2.5}$  intervals during the observation period

## 2.4 碳质气溶胶的潜在源区

气团的区域和长距离输送都对目标城市的气溶胶浓度有较大影响<sup>[41]</sup>, 本研究使用 CWT 方法来研究 2018 年冬季和 2019 年冬季嘉兴地区 OC 和 EC 的潜在源区 (图 7). 从 2018 年冬季和 2019 年冬季 WCWT 结果来看, 2018 年冬季 EC 主要潜在源区为浙江北部、江苏南部、安徽南部和安徽与湖北交界处, 其中杭嘉湖宁 (杭州、嘉兴、湖州和宁波) 交界潜在贡献浓度最高, 在  $3.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  以上, OC 和 EC 潜在源区基本一致, 在杭嘉湖宁交界处、安徽与湖北交界处和江苏南部地区潜在贡献浓度最高, 在  $10 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  以上; 2019 年冬季 EC 和 OC 的潜在贡献源区范围和浓度均较 2018 年冬季降低, EC 主要源区在浙江北部和江苏南部地区, 贡献浓度在  $2.4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  以上, OC 主要源区在浙北地区, 贡献浓度为  $8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  左右. 总的来说, 嘉善 OC 和 EC 潜在源区主要为苏南地区、安徽东南部和浙北区域, 同时 2019 年冬季和 2018 年冬季相比, OC 和 EC 的主要潜在源区贡献浓度下降  $2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  和  $6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  以上, 且潜在源区高值区域变小.

## 2.5 疫情前后碳质气溶胶变化情况分析

为了控制 COVID-19 疫情扩散, 中国从 2020 年 1 月 23 日起进行了严格的居家隔离措施. 本研究以封城日期 (1 月 23 日) 和解除一级响应时间 (3 月 2 日) 为时间节点, 对疫情前 (Pre-COVID-19, PC, 12 月 1 日至 1 月 23 日)、春节 (Chinese New Year, CNY, 1 月 24 日至 2 月 2 日) 和居家隔离 (lockdown, LD, 2 月 3 日至 3 月 2 日) 期间碳质气溶胶组分进行分析. 同样利用 MRS 方法对疫情前、春节和居家隔离这 3 个阶段进行二次有机碳估算. 表 2 为 3 个阶段各碳质气溶胶组分浓度, 可以发现 OC 和 EC 浓度在疫情前期间最高, 分别为  $6.45 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $1.97 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ; 其次为春节, 分别为  $5.05 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  和  $1.28 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ; 居家隔离期间最低, 分别为  $4.22 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  和  $0.92 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . 图 8 为不同阶段 OC 和 EC 日变化情况, 春节期间 OC 和 EC 在 01:00 时浓度有突增, 后缓慢下降, 可能与春节燃放烟花爆竹有关; 春节和居家隔离期间, 在 08:00 时 OC 和 EC 浓度升高趋势明显低于疫情前期间, 说明在春节和居家隔离期间, 工厂停工以及机动车排放量减少使得污染物浓度明显降低<sup>[21, 42]</sup>. 疫情前、春节和居

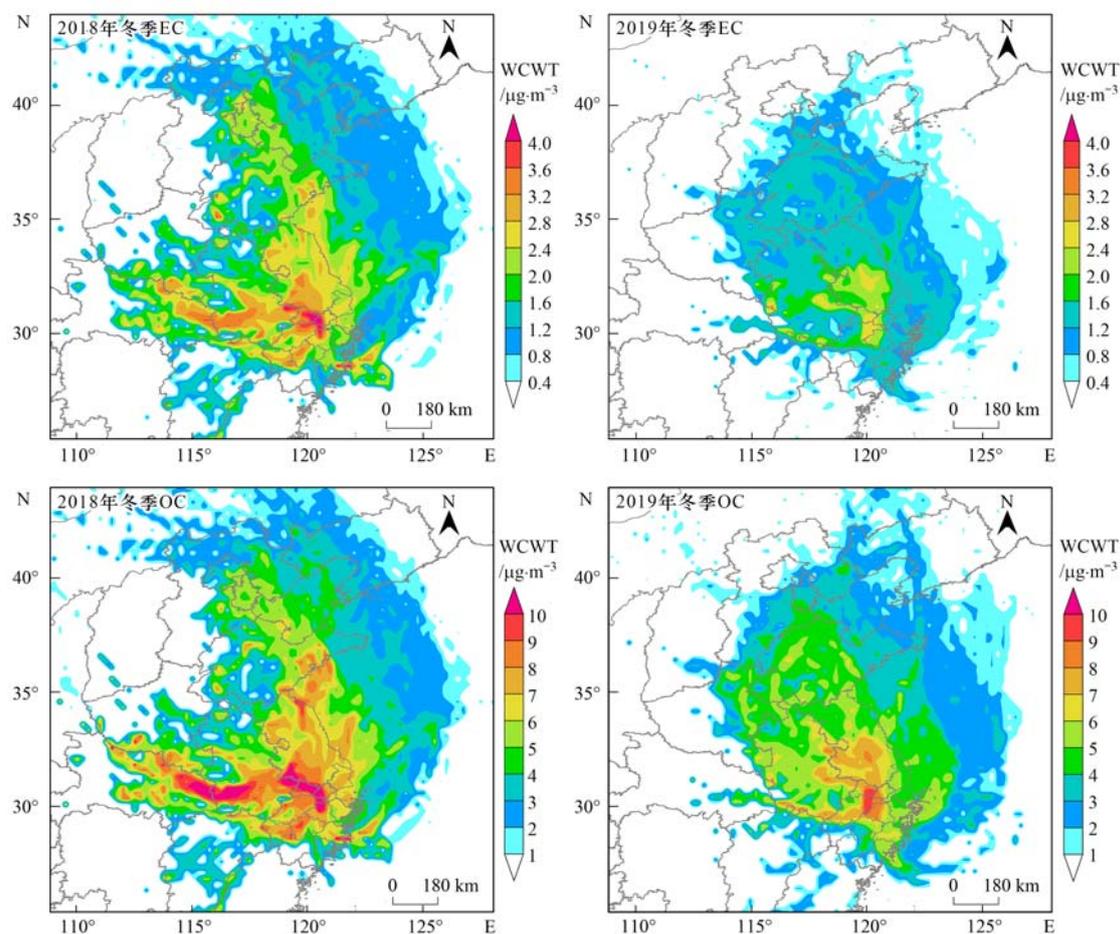


图 7 2018 年冬季和 2019 年冬季 EC 和 OC 浓度权重轨迹分布

Fig. 7 Weight trajectory distribution of EC and OC concentrations in winter of 2018 and 2019

表 2 利用 MRS 方法估算不同阶段的碳质组分浓度

Table 2 Estimation of carbon component concentration at different stages using the MRS method

阶段	OC/EC	OC / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	EC / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	$(\text{OC}/\text{EC})_{\text{pri}}$	POC / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	SOC / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	POC/OC	SOC/OC
疫情前	3.97	6.45	1.97	2.27	4.47	1.98	0.69	0.31
春节	5.02	5.05	1.28	3.12	3.99	1.06	0.79	0.21
居家隔离	5.97	4.22	0.92	2.93	2.70	1.52	0.64	0.36

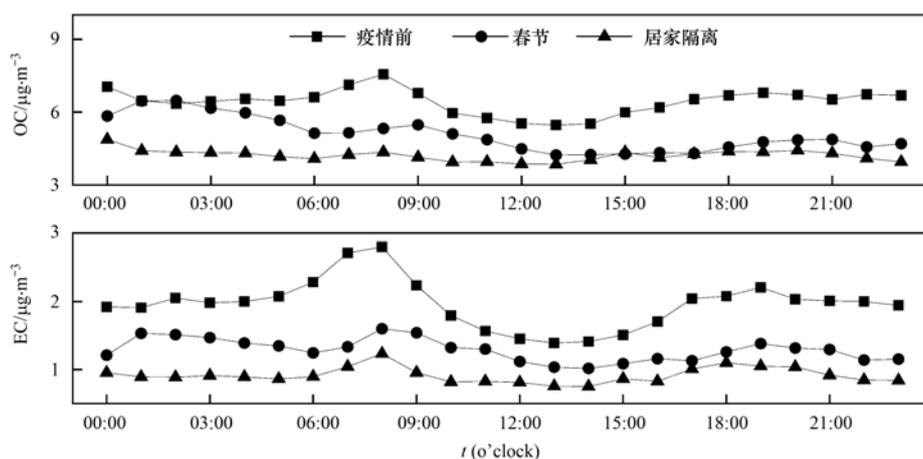


图 8 不同阶段 OC 和 EC 日变化趋势

Fig. 8 Daily variation trends of OC and EC in different periods

居家隔离这 3 个阶段的 OC/EC 分别为 3.97、5.02 和 5.97, 说明在疫情前受机动车尾气排放和燃煤共同影响, 春节和居家隔离期间, 因交通管制等原因, 机动车排放减少, 受燃煤贡献占比升高。

由 MRS 方法估算得到疫情前、春节和居家隔离这 3 个阶段的  $(OC/EC)_{pri}$  值分别为 2.27、3.12 和 2.93, 从而得到 3 个阶段 SOC 和 POC 浓度及占比

情况(图 9)。可以发现, POC 浓度呈下降趋势, 3 个阶段浓度均值分别为  $4.47$ 、 $3.99$  和  $2.70 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 但春节期间 POC 在 OC 中占比最高(0.79), SOC 占比最低(0.21), 可能是因为春节期间燃放烟花爆竹等因素导致一次排放增加; 居家隔离期间 POC 占比最低(0.64), 是由于疫情管控等因素, 一次排放量下降。

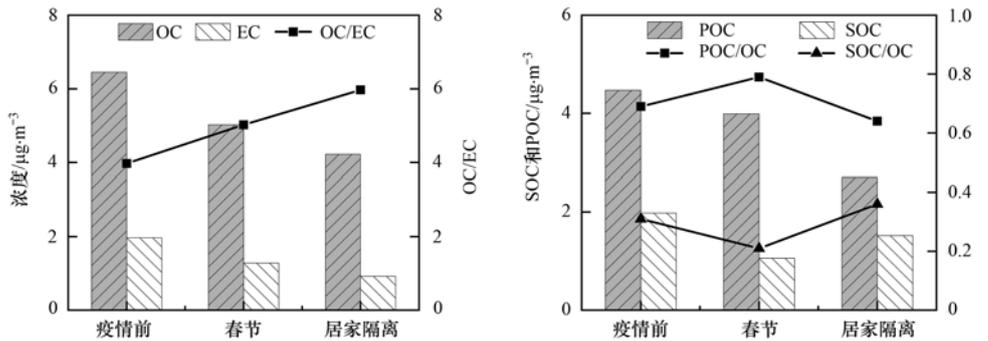


图 9 不同阶段碳组分特征变化趋势

Fig. 9 Variation trend of carbon component characteristics at different stages

在中国特大城市中二次有机气溶胶(SOA)在有机物(OM)中占比较大<sup>[43]</sup>, 因此利用 OM 与 EC 的相对变化可以揭示二次 OM 的生成<sup>[44]</sup>, OM 计算方法为 OC 乘以经验常数 1.6<sup>[45]</sup>. 图 10 为 OM 和 EC 在春节期间和居家隔离期间分别与疫情前日变化比值散点图, 其中 1:1 线以上的点表示较高的二次生成, 但对于 y 轴大于 1.0 的点, 则意味着浓度的增加. 可以看出春节期间和居家隔离期间 OM 和 EC 浓度较疫情前有所下降, 且居家隔离期间 OM 和 EC 浓度下降幅度最大, 但  $OM_{\text{春节/疫情前}}/EC_{\text{春节/疫情前}}$  和  $OM_{\text{居家隔离/疫情前}}/EC_{\text{居家隔离/疫情前}}$  的相对变化略有升高, 分别为 119.3% 和 139.8%, 说明和疫情前相比, 春

节和居家隔离期间二次有机物存在显著的增强, 增强比例依次为: 居家隔离 > 春节 > 疫情前。

### 3 结论

(1) 2018 年冬季 OC、EC、POC 和 SOC 浓度分别为  $6.90$ 、 $2.47$ 、 $5.41$  和  $1.49 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 2019 年冬季浓度分别为  $5.63$ 、 $1.57$ 、 $3.66$  和  $1.97 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 2019 年冬季 OC、EC、POC 和 SOC 浓度较 2018 年冬季变化幅度分别为  $-18.4\%$ 、 $-36.4\%$ 、 $-32.4\%$  和  $32.3\%$ . OC、EC 和 POC 浓度均呈现下降趋势, 但 SOC 浓度为上升趋势。

(2) 含碳组分都随着  $\text{PM}_{2.5}$  浓度升高而增加, 但升高的速率不等, SOC 浓度增速明显, 但 SOC 对  $\text{PM}_{2.5}$  的贡献先下降后上升, 在  $75 \sim 115 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  最低. 随着  $\text{PM}_{2.5}$  浓度升高, OC 和 EC 浓度均有升高, 最高上升幅度分别为  $474.7\%$  和  $408.2\%$ , 但在  $\text{PM}_{2.5}$  中占比却呈下降趋势, OC 和 EC 下降幅度分别为 6.5 个百分点和 2.4 个百分点。

(3) 疫情前、春节和居家隔离 3 个阶段的 OC/EC 分别为 3.97、5.02 和 5.97, 说明疫情前受机动车尾气排放和燃煤共同影响, 春节和居家隔离期间因交通管制等原因, 燃煤贡献占比上升. 同时在居家隔离期间二次有机物存在显著的增强, 增强比例依次为居家隔离 > 疫情前 > 春节. 利用 CWT 方法, 可知嘉兴 OC 和 EC 潜在源区主要为苏南地区、安徽东南部和本地及周边区域, 同时 2019 年冬季较 2018 年冬季相比, OC 和 EC 潜在源区的高值区域范围及浓度都有明显降低。

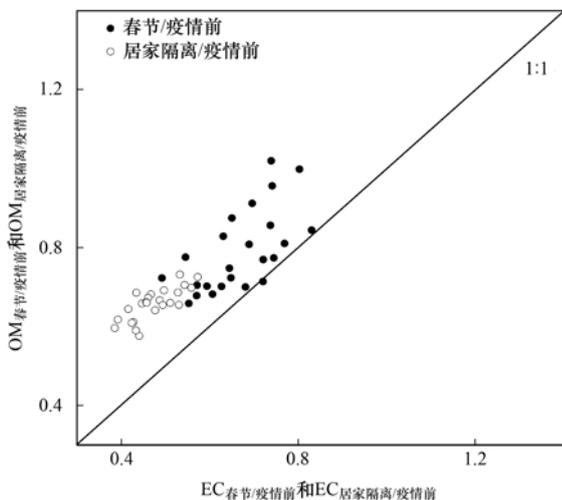


图 10 OM 和 EC 在春节期间和居家隔离期间分别与疫情前相对变化散点图

Fig. 10 Scatter plot of the ratio of OM during CNY and LD versus EC period as a function of the ratio of EC during the three period

## 参考文献:

- [ 1 ] Cao J J, Lee S C, Chow J C, *et al.* Spatial and seasonal distributions of carbonaceous aerosols over China[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2007, **112** ( D22 ), doi: 10.1029/2006JD008205.
- [ 2 ] 霍静, 李彭辉, 韩斌, 等. 天津秋冬季 PM<sub>2.5</sub> 碳组分化学特征与来源分析[J]. *中国环境科学*, 2011, **31** (12): 1937-1942. Huo J, Li P H, Han B, *et al.* Character and source analysis of carbonaceous aerosol in PM<sub>2.5</sub> during autumn-winter period, Tianjin[J]. *China Environmental Science*, 2011, **31** (12): 1937-1942.
- [ 3 ] 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.
- [ 4 ] Ramanathan V, Ramana M V, Roberts G, *et al.* Warming trends in Asia amplified by brown cloud solar absorption[J]. *Nature*, 2007, **448** (7153): 575-578.
- [ 5 ] Cappa C D, Onasch T B, Massoli P, *et al.* Radiative absorption enhancements due to the mixing state of atmospheric black carbon [J]. *Science*, 2012, **337** (6098): 1078-1081.
- [ 6 ] Wang L P, Zhou X H, Ma Y J, *et al.* Carbonaceous aerosols over China—review of observations, emissions, and climate forcing [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, **23** (2): 1671-1680.
- [ 7 ] Zhang X Y, Wang Y Q, Niu T, *et al.* Atmospheric aerosol compositions in China: spatial/temporal variability, chemical signature, regional haze distribution and comparisons with global aerosols[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012, **12** (2): 779-799.
- [ 8 ] Contini D, Vecchi R, Viana M. Carbonaceous aerosols in the atmosphere[J]. *Atmosphere*, 2018, **9** (5), doi: 10.3390/atmos9050181.
- [ 9 ] Yan J P, Wang X P, Gong P, *et al.* Review of brown carbon aerosols: recent progress and perspectives [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **634**: 1475-1485.
- [ 10 ] 康晖, 朱彬, 王红磊, 等. 长三角典型站点冬季大气 PM<sub>2.5</sub> 中 OC、EC 污染特征[J]. *环境科学*, 2018, **39** (3): 961-971. Kang H, Zhu B, Wang H L, *et al.* Characterization and variation of organic carbon (OC) and elemental Carbon (EC) in PM<sub>2.5</sub> during the winter in the Yangtze River Delta Region, China[J]. *Environmental Science*, 2018, **39** (3): 961-971.
- [ 11 ] Wang Z F, Li J, Wang Z, *et al.* Modeling study of regional severe hazes over mid-eastern China in January 2013 and its implications on pollution prevention and control [J]. *Science China Earth Sciences*, 2014, **57** (1): 3-13.
- [ 12 ] Ji D S, Gao M, Maenhaut W, *et al.* The carbonaceous aerosol levels still remain a challenge in the Beijing-Tianjin-Hebei region of China: insights from continuous high temporal resolution measurements in multiple cities[J]. *Environment International*, 2019, **126**: 171-183.
- [ 13 ] Yang F, He K, Ye B, *et al.* One-year record of organic and elemental carbon in fine particles in downtown Beijing and Shanghai[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2005, **5** (6): 1449-1457.
- [ 14 ] Tan J H, Duan J C, Chen D H, *et al.* Chemical characteristics of haze during summer and winter in Guangzhou [J]. *Atmospheric Research*, 2009, **94** (2): 238-245.
- [ 15 ] 吴兑, 毛节泰, 邓雪娇, 等. 珠江三角洲黑碳气溶胶及其辐射特性的观测研究[J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2009, **39** (11): 1542-1553. Wu D, Mao J T, Deng X J, *et al.* Black carbon aerosols and their radiative properties in the Pearl River Delta region [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2009, **52** (8): 1152-1163.
- [ 16 ] Li B, Zhang J, Zhao Y, *et al.* Seasonal variation of urban carbonaceous aerosols in a typical city Nanjing in Yangtze River Delta, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **106**: 223-231.
- [ 17 ] Xu J, Wang Q Z, Deng C R, *et al.* Insights into the characteristics and sources of primary and secondary organic carbon: high time resolution observation in urban Shanghai[J]. *Environmental Pollution*, 2018, **233**: 1177-1187.
- [ 18 ] 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.
- [ 19 ] 云龙龙, 陆钊, 张天舒, 等. 无锡市冬季典型天气 PM<sub>2.5</sub> 中碳组分的污染特征[J]. *环境科学*, 2014, **35** (9): 3280-3286. Yun L L, Lu F, Zhang T S, *et al.* Pollution characteristics of carbonaceous aerosols in PM<sub>2.5</sub> during typical winter days in Wuxi city[J]. *Environmental Science*, 2014, **35** (9): 3280-3286.
- [ 20 ] 吴梦龙, 郭照冰, 刘凤玲, 等. 南京市 PM<sub>2.1</sub> 中有机碳和元素碳污染特征及影响因素[J]. *中国环境科学*, 2013, **33** (7): 1160-1166. Wu M L, Guo Z B, Liu F L, *et al.* Pollution characteristics and influencing factors of organic and elemental carbon in PM<sub>2.1</sub> in Nanjing[J]. *China Environmental Science*, 2013, **33** (7): 1160-1166.
- [ 21 ] Wang H L, Miao Q, Shen L J, *et al.* Characterization of the aerosol chemical composition during the COVID-19 lockdown period in Suzhou in the Yangtze River Delta, China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2021, **102**: 110-122.
- [ 22 ] Pei Z P, Han G, Ma X, *et al.* Response of major air pollutants to COVID-19 lockdowns in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **743**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140879.
- [ 23 ] Sicard P, De Marco A, Agathokleous E, *et al.* Amplified ozone pollution in cities during the COVID-19 lockdown[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **735**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.139542.
- [ 24 ] Wang P F, Chen K Y, Zhu S Q, *et al.* Severe air pollution events not avoided by reduced anthropogenic activities during COVID-19 outbreak [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2020, **158**, doi: 10.1016/j.resconrec.2020.104814.
- [ 25 ] Wang H L, Miao Q, Shen L J, *et al.* Air pollutant variations in Suzhou during the 2019 novel coronavirus (COVID-19) lockdown of 2020: high time-resolution measurements of aerosol chemical compositions and source apportionment [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **271**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.116298.
- [ 26 ] Turpin B J, Huntzicker J J. Identification of secondary organic aerosol episodes and quantitation of primary and secondary organic aerosol concentrations during SCAQS [J]. *Atmospheric Environment*, 1995, **29** (23): 3527-3544.
- [ 27 ] Wu C, Wu D, Yu J Z. Estimation and uncertainty analysis of secondary organic carbon using 1 year of hourly organic and elemental carbon data [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2019, **124** (5): 2774-2795.
- [ 28 ] 张蕾, 姬亚芹, 张军, 等. 盘锦市秋冬季节 PM<sub>2.5</sub> 中碳组分特

- 征及来源解析[J]. 环境科学, 2018, **39**(7): 3051-3056.
- Zhang L, Ji Y Q, Zhang J, *et al.* Characteristics and sources of carbon components in PM<sub>2.5</sub> during autumn and winter in Panjin City[J]. Environmental Science, 2018, **39**(7): 3051-3056.
- [29] Grivas G, Cheristanidis S, Chaloulakou A. Elemental and organic carbon in the urban environment of Athens. Seasonal and diurnal variations and estimates of secondary organic carbon[J]. Science of the Total Environment, 2012, **414**: 535-545.
- [30] 史芳天, 罗彬, 张巍, 等. 成都平原 PM<sub>2.5</sub> 中碳质组分时空分布特征与来源[J]. 环境科学, 2020, **41**(2): 520-528.
- Shi F T, Luo B, Zhang W, *et al.* Spatio-temporal variations and source apportionment of carbonaceous species in PM<sub>2.5</sub> across multiple sampling locations in the Chengdu Plain [J]. Environmental Science, 2020, **41**(2): 520-528.
- [31] Day M C, Zhang M H, Pandis S N. Evaluation of the ability of the EC tracer method to estimate secondary organic carbon[J]. Atmospheric Environment, 2015, **112**: 317-325.
- [32] Wu C, Yu J Z. Determination of primary combustion source organic carbon-to-elemental carbon (OC/EC) ratio using ambient OC and EC measurements: secondary OC-EC correlation minimization method [J]. Atmospheric Chemistry and Physics Discussions, 2016, **16**(8): 1-25.
- [33] Millet D B, Donahue N M, Pandis S N, *et al.* Atmospheric volatile organic compound measurements during the Pittsburgh Air Quality Study: results, interpretation, and quantification of primary and secondary contributions[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2005, **110** (D7), doi: 10.1029/2004JD004601.
- [34] Bao M Y, Cao F, Chang Y H, *et al.* Characteristics and origins of air pollutants and carbonaceous aerosols during wintertime haze episodes at a rural site in the Yangtze River Delta, China[J]. Atmospheric Pollution Research, 2017, **8**(5): 900-911.
- [35] 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.
- [36] Tang X B, Chen X H, Tian Y. Chemical composition and source apportionment of PM<sub>2.5</sub>-A case study from one year continuous sampling in the Chang-Zhu-Tan urban agglomeration [J]. Atmospheric Pollution Research, 2017, **8**(5): 885-899.
- [37] Schauer J J, Kleeman M J, Cass G R, *et al.* Measurement of emissions from air pollution sources. 2. C<sub>1</sub> through C<sub>30</sub> organic compounds from medium duty diesel trucks [J]. Environmental Science & Technology, 1999, **33**(10): 1578-1587.
- [38] Chen Y J, Zhi G R, Feng Y L, *et al.* Measurements of emission factors for primary carbonaceous particles from residential raw-coal combustion in China [J]. Geophysical Research Letters, 2006, **33**(20), doi: 10.1029/2006GL026966.
- [39] Zhang Q Q, Pan Y P, He Y X, *et al.* Substantial nitrogen oxides emission reduction from China due to COVID-19 and its impact on surface ozone and aerosol pollution [J]. Science of the Total Environment, 2020, **753**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.142238.
- [40] Shen L J, Wang H L, Cheng M T, *et al.* Chemical composition, water content and size distribution of aerosols during different development stages of regional haze episodes over the North China Plain [J]. Atmospheric Environment, 2021, **245**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.118020.
- [41] Wang Q Z, Zhuang G S, Huang K, *et al.* Probing the severe haze pollution in three typical regions of China: characteristics, sources and regional impacts [J]. Atmospheric Environment, 2015, **120**: 76-88.
- [42] Zhu S H, Wang Q Q, Qiao L P, *et al.* Tracer-based characterization of source variations of PM<sub>2.5</sub> and organic carbon in Shanghai influenced by the COVID-19 lockdown [J]. Faraday Discussions, 2021, **226**: 112-137.
- [43] Huang R J, Zhang Y L, Bozzetti C, *et al.* High secondary aerosol contribution to particulate pollution during haze events in China [J]. Nature, 2014, **514**(7521): 218-222.
- [44] Huang X, Ding A J, Gao J, *et al.* Enhanced secondary pollution offset reduction of primary emissions during COVID-19 lockdown in China [J]. National Science Review, 2021, **8**(2), doi: 10.1093/nsr/nwaa137.
- [45] Jiang N, Li Q, Su F C, *et al.* Chemical characteristics and source apportionment of PM<sub>2.5</sub> between heavily polluted days and other days in Zhengzhou, China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2018, **66**: 188-198.

## CONTENTS

Spatiotemporal Distribution and Health Impacts of PM <sub>2.5</sub> and O <sub>3</sub> in Beijing, from 2014 to 2020	CHEN Jing, PENG Jin-long, XU Yan-sen (4071)
High-resolution Estimation of Spatio-temporal Variation in PM <sub>2.5</sub> Concentrations in the Beijing-Tianjin-Hebei Region	YANG Xiao-hui, SONG Chun-jie, FAN Li-hang, <i>et al.</i> (4083)
Impacts of Anthropogenic Emission Reduction and Meteorological Conditions on PM <sub>2.5</sub> Pollution in Typical Cities of Beijing-Tianjin-Hebei in Winter	SHAO Xuan-yi, WANG Xiao-qi, ZHONG Yi-sheng, <i>et al.</i> (4095)
Influence of Pollutant Transport from Both Sides of the Taihang Mountains on Cross-Valley Urban Aerosols	WANG Yan, GUO Wei, YAN Shi-ming, <i>et al.</i> (4104)
Variation Characteristics and Source Analysis of Carbonaceous Aerosols in Winter in Jiashan	ZHANG Ying-long, LI Li, WU Wei-chao, <i>et al.</i> (4116)
Simulation Analysis of the Impact of COVID-19 Pandemic Control on Air Quality in Henan Province based on Machine Learning Algorithm	WEI Yu, XU Qi-xiang, ZHAO Jin-shuai, <i>et al.</i> (4126)
Seasonal Variation, Source Identification, and Health Risk of PM <sub>2.5</sub> -bound Metals in Xinxiang	LIU Huan-jia, JIA Meng-ke, LIU Yong-li, <i>et al.</i> (4140)
Distribution Characteristics and Seasonal Variations of Arsenic in Atmospheric Aerosols over the Yellow Sea and Bohai Sea	YUAN Shuai, WANG Yan, LIU Ru-hai, <i>et al.</i> (4151)
Extinction Characteristics of Aerosols and the Contribution of Pollution Sources to Light Extinction During Three Heavy Pollution Episodes in the Winter of 2020 in Tianjin	LI Li-wei, XIAO Zhi-mei, YANG Ning, <i>et al.</i> (4158)
Spatial Variation of Surface Ozone Concentration During the Warm Season and Its Meteorological Driving Factors in China	HE Chao, MU Hang, YANG Lu, <i>et al.</i> (4168)
Exploring Characteristics and Causes of Summer Ozone Pollution Based on Process Analysis in Wuhai	ZHANG Rui-xin, CHEN Qiang, XIA Jia-qi, <i>et al.</i> (4180)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Atmospheric VOCs in the Coastal Background of the Pearl River Delta	YUN Long, LI Cheng-liu, ZHANG Ming-di, <i>et al.</i> (4191)
Hydrochemical Characteristics and Factors of Surface Water and Groundwater in the Upper Yongding River Basin	KONG Xiao-le, YANG Yong-hui, CAO Bo, <i>et al.</i> (4202)
Temporal and Spatial Variations in Water Quality of Hanjiang River and Its Influencing Factors in Recent Years	CHENG Bing-fen, ZHANG Yuan, XIA Rui, <i>et al.</i> (4211)
Pollution Level, Distribution Characteristic, and Ecological Risk Assessment of Environmentally Persistent Pharmaceutical Pollutants in Surface Water of Jiangsu Province	ZHAO Mei-mei, FAN De-ling, GU Wen, <i>et al.</i> (4222)
Spatial and Temporal Distribution and Pollution Evaluation of Soluble Heavy Metals in Liujiang River Basin	ZHANG Wan-jun, XIN Cun-lin, YU Shi, <i>et al.</i> (4234)
Source Analysis and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Groundwater of Leizhou Peninsula	SHI Huan-huan, PAN Yu-jie, ZENG Min, <i>et al.</i> (4246)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Metal Elements in Groundwater of Longzici Spring Area	XIE Hao, LIANG Yong-ping, LI Jun, <i>et al.</i> (4257)
Seasonal Variation and Sources Identification of Dissolved Sulfate in a Typical Karst Subterranean Stream Basin Using Sulfur and Oxygen Isotopes	REN Kun, PAN Xiao-dong, LAN Gan-jiang, <i>et al.</i> (4267)
Phosphorus Fractions and Quantitative Identification of Pollution Sources in Nanhai Wetland, Baotou	BAI Ya-hong, QIAN Chen-ge, YUAN Si-jing, <i>et al.</i> (4275)
Release Risk of Phosphorus by Sediments and Its Influencing Factors in Ponds and Ditches of a New Urban District Park	LI Ru-zhong, SONG Min, YANG Ji-wei (4287)
Effect of Hydraulic Residence Time on Removal Efficiency of Pollutants in Subsurface Flow Constructed Wetlands and Analysis of Denitrification Mechanism	QI Ran, ZHANG Ling, YANG Fan, <i>et al.</i> (4296)
Enhanced Removal of Pollutants in Constructed Wetlands with Manganese Sands	MA Quan, WANG Dong-lin, LIN Hui, <i>et al.</i> (4304)
Application Effect of Four Typical Submerged Macrophytes on Removing Cadmium from Polluted Sediment	TAO Li, WANG Pei-fang, YUAN Qiu-sheng, <i>et al.</i> (4311)
Structure of Aerobic Denitrification Bacterial Community in Response to Dissolved Organic Matter in Baiyangdian Lake During the Water Delivery Period	ZHOU Shi-lei, ZHANG Tian-na, CHEN Zhao-ying, <i>et al.</i> (4319)
Nitrogen and Phosphorus Leaching Characteristics and Adsorption Properties of Hardwood Biochar in Stormwater Runoff	MENG Yi-ke, WANG Yuan, WANG Chuan-yue (4332)
Indicator Function of Ragworm (Nereididae) on Sediment Microplastic in Haizhou Bay Intertidal Zone	WANG Jia-xuan, SONG Ke-xin, SUN Yi-xin, <i>et al.</i> (4341)
Antagonistic Effect and Mechanism of Nano Titanium Dioxide and Cadmium on the Growth of <i>Scenedesmus obliquus</i>	WANG Pu, ZHAO Li-hong, ZHU Xiao-shan (4350)
Mutual Influence Between Microbial Community, Wastewater Characteristics, and Antibiotic Resistance Genes During Spiramycin Production Wastewater Treatment	WU Cai-yun, LI Hui-li, QIN Cai-xia, <i>et al.</i> (4358)
Effect of Chelated Iron on Nitrogen Removal Efficiency and Microbial Community Structure in the Anaerobic Ferric Ammonium Oxidation	LIAO Hong-yan, SONG Cheng, WAN Liu-yang, <i>et al.</i> (4366)
Effects of Dissolved Oxygen on Nutrient Removal Performance and Microbial Community in Low Carbon/Nitrogen Municipal Wastewater Treatment Process	CHI Yu-lei, SHI Xuan, REN Tong, <i>et al.</i> (4374)
Shortening SRT of Intermittent Gradient Aeration to Realize Nitrogen and Phosphorus Removal in Short-range SNEDPR System	ZHANG Yu-jun, LI Dong, WANG Xin-xin, <i>et al.</i> (4383)
Characteristics of Partial Denitrification in Biofilm System	YU Li-fang, ZHANG Xing-xiu, ZHANG Qiong, <i>et al.</i> (4390)
Effect of Anaerobic Plug-flow on Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Aerobic Granular Sludge with Intermittent Aeration	LI Dong, CAO Si-yu, WANG Qi, <i>et al.</i> (4399)
Combining Different Aerobic/Anoxic Durations with Zoned Sludge Discharge to Optimize Short-cut Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Granules in Domestic Sewage	WANG Wen-qi, LI Dong, GAO Xin, <i>et al.</i> (4406)
Meta-analysis of the Effects of Metal Mining on Soil Heavy Metal Concentrations in Southwest China	ZHANG Jian-lin, QU Ming-kai, CHEN Jian, <i>et al.</i> (4414)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Typical Watersheds of the Qinghai-Tibet Plateau	DU Hao-lin, WANG Ying, WANG Jin-song, <i>et al.</i> (4422)
Spatial Distribution Characteristics and Risk Assessment of Cadmium Pollution in Soil-crops system of an E-waste Dismantling Area	ZHANG Lu-yao, ZHAO Ke-li, FU Wei-jun (4432)
Characteristics of Modified Biochars and Their Immobilization Effect on Cu and Cd in Polluted Farmland Soil Around Smelter	WANG Xin-yu, MENG Hai-bo, SHEN Yu-jun, <i>et al.</i> (4441)
Combined Effects of Soil Amendment and Zinc Fertilizer on Accumulation and Transportation of Cadmium in Soil-Rice System	ZHOU Kun-hua, ZHOU Hang, WANG Zi-yu, <i>et al.</i> (4452)
Effects of Different Soil Conditioners on Rice Growth and Heavy Metal Uptake in Soil Contaminated with Copper and Cadmium	WEI Wei, LI Ping, LANG Man (4462)
Isolation and Identification of the Plant Endophyte R-13 and Its Effect on Cadmium Accumulation in <i>Solanum nigrum</i> L.	PANG Jie, LIU Yue-min, HUANG Yong-chun, <i>et al.</i> (4471)
Response of Soil Archaeal Community to Heavy Metal Pollution in Different Typical Regions	LI Yu-tong, YANG Shan, ZHANG Yi, <i>et al.</i> (4481)
High-throughput Sequencing Analysis of Soil Bacterial Community in the Grain for Green Project Areas of the Loess Plateau	LIU Xiao-hua, WEI Tian-xing (4489)
Experimental Influence of Food Waste Fermentation Broth on the Soil Quality in a Loess Hilly Area	SHAO Li-ming, REN Jun-da, LÜ Fan, <i>et al.</i> (4500)
Stability of Soil Aggregates at Different Altitudes in Qinling Mountains and Its Coupling Relationship with Soil Enzyme Activities	MA Huan-fei, HU Han, LI Yi, <i>et al.</i> (4510)
Reactivation of Passivated Biochar/Nanoscale Zero-Valent Iron by an Electroactive Microorganism for Cooperative Hexavalent Chromium Removal and Mechanisms	LIAO Cong-jian, ZHAO Xiao-lei, LIU Kai, <i>et al.</i> (4520)
Influence of Precipitation Change on Soil Respiration in Desert Grassland	HAO Lian-yi, ZHANG Li-hua, XIE Zhong-kui, <i>et al.</i> (4527)
Effects of Nitrogen Fertilizer Application Times and Nitrification Inhibitor on N <sub>2</sub> O Emission from Potted Maize	FU Pei-jiao, JI Heng-kuan, HE Qiu-xiang, <i>et al.</i> (4538)
Gaseous Nitrogen Emission from Soil After Application of NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N Loaded Biochar	MA Xiao-gang, HE Jian-qiao, CHEN Yu-lan, <i>et al.</i> (4548)
Effects of Microplastics Addition on Soil Organic Carbon Mineralization in Citrus Orchard	ZHANG Xiu-ling, YAN Zi-wei, WANG Feng, <i>et al.</i> (4558)
Dynamic Material Flow Analysis of Perfluorooctane Sulfonate in China, 1985-2019	WANG Jia-yu, CHEN Jing-wen, TANG Wei-hao, <i>et al.</i> (4566)