

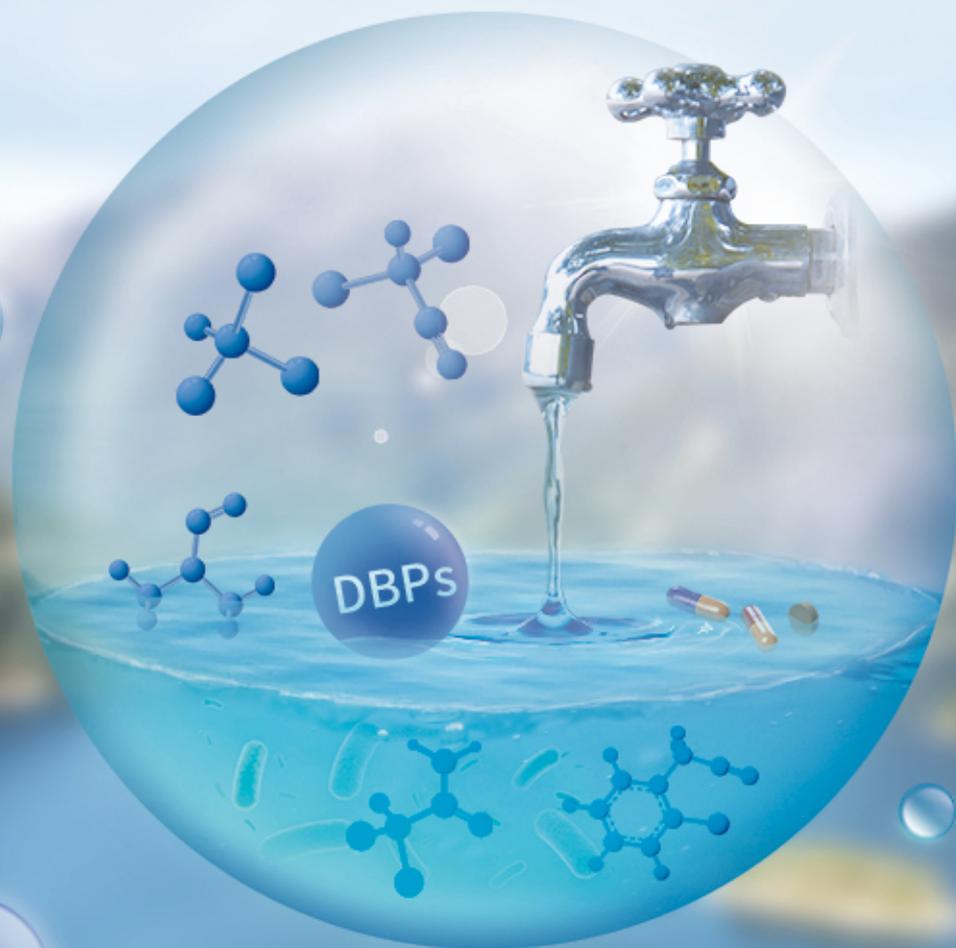
方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV  
HUANJING KEXUE

饮用水中的消毒副产物及其控制策略  
楚文海, 肖融, 丁顺克, 张瑞华



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心  
■ 出版 科学出版社



2021年11月

第42卷 第11期  
Vol.42 No.11

目次

综述与专论

饮用水中的消毒副产物及其控制策略 ..... 楚文海, 肖融, 丁顺克, 张瑞华(5059)

生物炭吸附硫化氢机制与影响因素研究进展 ..... 徐期勇, 梁铭坤, 许文君, 黄丹丹(5086)

研究报告

1998~2016 中国八大经济区植被覆盖对 PM<sub>2.5</sub> 浓度时空分布的影响 ..... 杨玉莲, 杨昆, 罗毅, 喻臻钰, 孟超, 李岑(5100)

COVID-19 疫情期间北京市两次重霾污染过程大气污染物演变特征及潜在源区分析 ..... 赵德龙, 田平, 周崑, 肖伟, 盛久江, 王飞, 杜远谋, 黄梦宇, 何晖, 丁德平(5109)

汾渭平原临汾市 2019 年春节期间大气污染特征与来源解析 ..... 刘威杰, 胡天鹏, 毛瑶, 许安, 苏业旺, 李星谕, 程铨, 石明明, 梁莉莉, 邢新丽, 张家泉, 祁士华(5122)

石家庄市大气污染物的季节性时空特征及潜在源区 ..... 聂赛赛, 王帅, 崔建升, 刘大喜, 陈静, 田亮, 贺博文, 沈梦宇(5131)

天津市冬季空气湿度对 PM<sub>2.5</sub> 和能见度的影响 ..... 丁净, 唐颖潇, 郝天依, 姚青, 蔡子颖, 张裕芬, 韩素芹(5143)

承德市 PM<sub>2.5</sub> 中碳质组分的季节分布特征及来源解析 ..... 贺博文, 聂赛赛, 王帅, 冯亚平, 姚波, 崔建升(5152)

中国生活源挥发性有机物排放清单 ..... 梁小明, 陈来国, 沈国锋, 卢清, 刘明, 陆海涛, 任璐, 孙西勃, 林奎, 梁明易, 叶代启, 陶澍(5162)

2011~2019 年中国工业源挥发性有机物排放特征 ..... 刘锐源, 钟美芳, 赵晓雅, 卢诗文, 田俊泰, 李银松, 侯墨, 梁小明, 黄皓旻, 范丽雅, 叶代启(5169)

基于 LHS-MC 青岛市工业源 VOCs 排放清单及不确定性 ..... 徐琬莹, 付飞, 吕建华, 李瑞凡, 邵蕊, 和慧, 李淑芬, 左华(5180)

典型橡胶制品业 VOCs 排放特征及对周边环境的影响 ..... 王海林, 辛国兴, 朱立敏, 薛松, 聂磊, 郝润(5193)

沈阳市不同功能区挥发性有机物分布特征及臭氧生成潜势 ..... 库盈盈, 任万辉, 苏枫棋, 于兴娜(5201)

天津城区夏冬季典型污染过程中 BTEX 变化特征及其健康风险评估 ..... 韩婷婷, 李颖若, 蒲维维, 姚青, 刘敬乐, 吴进, 张楠楠, 李梓铭, 马志强(5210)

郑州市大气氨排放清单及驱动力分析 ..... 计尧, 王琛, 卢轩, 张欢, 尹沙沙(5220)

基于 GAMs 模型分析成都市气象因子交互作用对 O<sub>3</sub> 浓度变化的影响 ..... 张莹, 倪长健, 冯鑫媛, 王式功, 张小玲, 张家熙, 李运超(5228)

长江干流表层水体悬浮物的空间变化特征及遥感反演 ..... 李建鸿, 黄昌春, 查勇, 王川, 尚娜娜, 郝维月(5239)

河北省夏季降雨溶解性有机物光谱特征的空间分布、来源解析及氮素响应 ..... 张紫薇, 周石磊, 陈召莹, 张甜娜, 董宛佳, 甄瑞晗, 张馨童, 姚波, 崔建升(5250)

城镇与城郊污染河道中 DOM 成分分布与影响因素 ..... 朱奔, 陈浩, 丁国平, 孙晓楠, 刘辉, 叶建锋(5264)

北京城市河流水和沉积物中微塑料的组成与分布 ..... 胡嘉敏, 左剑恶, 李頔, 谢珍雯, 陈磊(5275)

太湖西岸地表水中中性有机污染物非靶向筛查与生态风险评估 ..... 卢昕妍, 王菲, 张丽敏, 任晓鸣, 于南洋, 韦斯(5284)

河水-地下水交互带沉积物中抗生素和代谢产物提取方法优化及其分布特征 ..... 李玉琼, 童蕾, 严涵, 尤悦, 卢钰茜, 刘慧(5294)

白洋淀清淤示范区沉积物中抗生素和多环芳烃的分布特征与风险评估 ..... 王同飞, 张伟军, 李立青, 张美一, 廖桂英, 王东升(5303)

雄安新区唐河污水库残留污染物对地下水水化学动态的作用机制 ..... 张志雄, 王仕琴, 张依章, 冯文钊(5312)

基于时间序列模型的饮用水源地重金属健康风险分析与预测 ..... 姬超, 侯大伟, 谢丽, 孙华, 李发志, 周宇, 邓爱萍, 沈红军, 包广静, 王逸南(5322)

千河下游水体-沉积物重金属空间分布、风险及影响因素 ..... 高煜, 王国兰, 金梓函, 张军, 耿雅妮(5333)

巢湖流域丰水期可溶态重金属空间分布及污染评价 ..... 何苗, 刘桂建, 吴蕾, 齐翠翠(5346)

洪泽湖围栏养殖对表层沉积物重金属含量影响与生态风险评估 ..... 訾鑫源, 张鸣, 谷孝鸿, 阚可聪, 毛志刚, 陈辉辉, 曾庆飞(5355)

成都市地表水天然水化学变化特征及影响因素 ..... 许秋瑾, 赖承钺, 丁瑶, 王照丽, 程中华, 于涛(5364)

雷州半岛地下水化学特征及控制因素分析 ..... 彭红霞, 侯清芹, 曾敏, 黄长生, 师环环, 皮鹏程, 潘羽杰(5375)

粤港澳大湾区陆源氮污染来源结构与空间分布 ..... 董斯齐, 黄翀(5384)

红壤丘陵区小流域典型土地利用的面源氮磷输出特征 ..... 房志达, 苏静君, 赵洪涛, 胡炼, 李叙勇(5394)

减氮条件下不同施肥模式对稻田氮素淋溶流失的影响 ..... 姜海斌, 张克强, 邹洪涛, 马璞骏, 渠清博, 谷艳茹, 沈仕洲(5405)

互花米草入侵对胶州湾湿地土壤碳赋存形态的影响 ..... 沙梦乔, 柴娜, 赵洪涛, 刘春井, 丁文超, 谢文霞(5414)

基于 16S rRNA 高通量测序的北运河水体及沉积物微生物群落组成对比分析 ..... 彭柯, 董志, 邸琰蓉, 郭道宇(5424)

硅改性花生壳生物炭对水中磷的吸附特性 ..... 赵敏, 张小平, 王梁嵘(5433)

高锰酸钾改性桉木生物炭对 Pb(II) 的吸附特性 ..... 莫贞林, 曾鸿鹤, 林华, Asfandiyar Shahab, 石清亮, 张华(5440)

混合金属氧化物/碳复合材料的制备及其对 Pb(II) 的吸附性能 ..... 卢予沈, 宗莉, 于惠, 牟斌, 王爱勤(5450)

负载型钛凝胶的制备及其吸附去除三价砷的性能 ..... 孙晔洋, 周畅, 甘永海, 吴兵党, 张淑娟(5460)

一体式短程硝化-厌氧氨氧化工艺启动过程的亚硝酸盐调控 ..... 左富民, 郑蕊, 隋倩雯, 钟慧, 陈彦霖, 魏源送(5472)

生物炭和秸秆还田对紫色土旱坡地土壤团聚体与有机碳的影响 ..... 邓华, 高明, 龙翼, 赖佳鑫, 王莹燕, 王子芳(5481)

紫色土旱坡地不同坡位土壤有机碳组含量对施肥管理的响应 ..... 徐曼, 余添, 王富华, 王丹, 王莹燕, 杨文娜, 高明, 王子芳(5491)

南阳盆地东部山区土壤重金属分布特征及生态风险评估 ..... 赖书雅, 董秋瑶, 宋超, 杨振京(5500)

城郊农田土壤多环芳烃污染特征及风险评估 ..... 张秀秀, 卢晓丽, 魏宇宸, 朱昌达, 潘剑君(5510)

我国东部沿海地区蔬菜中重金属累积分布特征及居民膳食暴露评估 ..... 孙帅, 耿柠波, 郭崔崔, 张保琴, 卢宪波, 张海军, 陈吉平(5519)

典型矿区周边农业用地农产品安全风险及影响因素 ..... 霍彦慧, 王美娥, 谢天, 姜蓉, 陈卫平(5526)

稻田土壤 Cd 污染与安全种植分区, 以重庆市某区为例 ..... 曹淑珍, 母悦, 崔敬鑫, 刘安迪, 程先, 符远航, 魏世强, 张进忠(5535)

镉污染大田条件下不同品种水稻镉积累的特征及影响因素 ..... 王宇豪, 杨力, 康愉晨, 陈小红, 耿杰, 李佳欣, 陈文清(5545)

纳米膜覆盖对畜禽粪便好氧堆肥进程及恶臭气体排放的影响 ..... 李永双, 孙波, 陈菊红, 彭霞薇, 白志辉, 庄绪亮(5554)

《环境科学》征订启事(5108) 《环境科学》征稿简则(5151) 信息(5249, 5263, 5283)

# 承德市 PM<sub>2.5</sub> 中碳质组分的季节分布特征及来源解析

贺博文, 聂赛赛, 王帅, 冯亚平, 姚波\*, 崔建升

(河北科技大学环境科学与工程学院, 石家庄 050018)

**摘要:** 为研究承德市 PM<sub>2.5</sub> 中碳质组分的季节变化及污染来源, 于 2019 年 1、4、7 和 10 月采集大气 PM<sub>2.5</sub> 样品, 测定碳质组分浓度. 通过有机碳(OC)与元素碳(EC)比值、总碳质气溶胶(TCA)及二次有机碳(SOC)的估算, 分析碳质组分的变化特征; 结合后向轨迹和主成分分析(PCA)方法, 分析污染来源. 结果表明, 采样期间 PM<sub>2.5</sub>、OC 和 EC 的平均质量浓度分别为 (31.26 ± 21.39)、(13.27 ± 8.68) 和 (2.80 ± 1.95) μg·m<sup>-3</sup>. PM<sub>2.5</sub> 的季节变化趋势为: 冬季 [(47.68 ± 30.37) μg·m<sup>-3</sup>] > 秋季 [(28.72 ± 17.12) μg·m<sup>-3</sup>] > 春季 [(26.59 ± 15.32) μg·m<sup>-3</sup>] > 夏季 [(23.17 ± 8.38) μg·m<sup>-3</sup>], 与总碳(TC)、OC 和 EC 季节变化趋势一致, 冬季 (R<sup>2</sup> = 0.85) 的 OC 与 EC 来源较一致; OC/EC 值得出 4 个季节均受到交通和燃煤源排放的影响, 且冬季受烟煤排放影响显著. TCA 的平均浓度为 (21.38 ± 13.68) μg·m<sup>-3</sup>, 占 PM<sub>2.5</sub> 比例达 68.39%, 二次转化率 (SOC/OC) 为: 春季 (54.09%) > 秋季 (37.64%) > 夏季 (32.91%) > 冬季 (25.43%). 后向轨迹模拟结果表明, 春季和夏季气团携带的污染物浓度相对较低, 秋季污染物的传输通道为西南方向, 冬季为西北方向, 主成分分析(PCA)表明, 承德市 PM<sub>2.5</sub> 削减的关键是控制机动车尾气、燃煤和生物质燃烧源的排放.

**关键词:** 碳质组分; PM<sub>2.5</sub>; 季节分布特征; 后向轨迹; 主成分分析(PCA); 承德市

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)11-5152-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202101082

## Seasonal Variation and Source Apportionment of Carbonaceous Species in PM<sub>2.5</sub> in Chengde

HE Bo-wen, NIE Sai-sai, WANG Shuai, FENG Ya-ping, YAO Bo\*, CUI Jian-sheng

(School of Environmental Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China)

**Abstract:** In order to study the seasonal variations and pollution sources of carbonaceous species in PM<sub>2.5</sub> in Chengde, the concentration of these components was determined in atmospheric PM<sub>2.5</sub> samples collected in January, April, July, and October 2019. The change in carbonaceous species were analyzed based on the estimation of the ratio of organic carbon(OC) to elemental carbon(EC), total carbonaceous aerosol(TCA), and secondary organic carbon(SOC). The source of these pollutants was determined by means of the backward trajectory and principal component analysis(PCA). The results showed that the mean mass concentrations of PM<sub>2.5</sub>, OC, and EC during the sampling period were (31.26 ± 21.39) μg·m<sup>-3</sup>, (13.27 ± 8.68) μg·m<sup>-3</sup>, and (2.80 ± 1.95) μg·m<sup>-3</sup>, respectively. The seasonal variations of PM<sub>2.5</sub> were: winter [(47.68 ± 30.37) μg·m<sup>-3</sup>] > autumn [(28.72 ± 17.12) μg·m<sup>-3</sup>] > spring [(26.59 ± 15.32) μg·m<sup>-3</sup>] > summer [(23.17 ± 8.38) μg·m<sup>-3</sup>], consistent with the trend of total carbon(TC), OC, and EC. The source of OC and EC during winter (R<sup>2</sup> = 0.85) was similar. Based on the ratio of OC/EC, all four seasons were affected by traffic and coal-burning source emissions, and the most affected season by bituminous coal emissions was winter. The average concentration of TCA was (21.38 ± 13.68) μg·m<sup>-3</sup>, which accounted for 68.39% of PM<sub>2.5</sub>. The order of secondary conversion rate(SOC/OC) was: spring(54.09%) > autumn(37.64%) > summer(32.91%) > winter(25.43%). The results of the backward trajectory simulation show that the pollutant concentrations carried by air masses are relatively low in spring and summer, and the transport channels of pollutants are southwest in autumn and northwest in winter. The results of the PCA showed that the key to reducing PM<sub>2.5</sub> in Chengde is to control emissions from vehicle exhausts, and coal and biomass combustion sources.

**Key words:** carbonaceous species; PM<sub>2.5</sub>; characteristics of seasonal variation; backward trajectory; principal component analysis(PCA); Chengde City

大气气溶胶对气候变化、生态系统和人的健康具有重要的影响<sup>[1]</sup>, 短期接触 PM<sub>10</sub> 会导致人体呼吸系统受损, 长期暴露于 PM<sub>2.5</sub> 中甚至会提高心肺死亡的风险<sup>[2]</sup>. 碳质组分是大气气溶胶的重要组成<sup>[3]</sup>, 其中有机气溶胶(organic aerosol, OA) 通常以有机碳(organic carbon, OC)、元素碳(element carbon, EC)和碳酸盐碳(carbonate carbon, CC)的形式存在, 由于碳酸盐碳含量很小, 一般不予考虑<sup>[4]</sup>. OC 由多种有机化合物组成, 既包括直接排放的一次有机碳(primary organic carbon, POC), 也包括气态有机前体物经过光化学反应等途径形成的二次有机碳(secondary organic carbon, SOC)<sup>[5]</sup>. OC 和 EC 都是由同一燃烧源排放的, 但它们的物理化学性质取决

于燃烧过程中的物质和条件. EC 具有石墨结构, 几乎全由碳原子组成, 在不完全(即低温或低氧)燃烧过程中排放, 如汽车尾气(特别是柴油)、住宅供暖用的木材或煤炭燃烧、电厂用煤以及生物质燃烧等<sup>[6]</sup>. EC 对太阳辐射有较强的吸收, 是全球变暖的重要驱动因素之一, 也是主要的碳源示踪物, 当 EC 与 OC 结合测量时, 可以估计有机碳主要和次要的贡献<sup>[7]</sup>.

收稿日期: 2021-01-10; 修订日期: 2021-04-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(21906040); 河北省自然科学基金项目(B2019208413); 河北省教育厅项目(BJ2020051)

作者简介: 贺博文(1997~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为环境监测与评价, E-mail: 956241220@qq.com

\* 通信作者, E-mail: byao18@hebut.edu.cn

碳质气溶胶的组分及其重要性已经受到国内外的广泛关注, Wang 等<sup>[8]</sup>对 2011 ~ 2013 年上海地区 PM<sub>2.5</sub> 化学成分进行研究, 发现 3 年来 PM<sub>2.5</sub> 中 EC 的变化显著, 且降幅达 70%, OC 则没有明显的变化趋势但也有较大变幅. Tao 等<sup>[9]</sup>的研究通过对北京 PM<sub>2.5</sub> 碳组分 1a 的观测, 指出北京市 OC 和 EC 分别占 PM<sub>2.5</sub> 的 (13.2 ± 4.7)% 和 (3.5 ± 1.4)%. 对西安市 PM<sub>2.5</sub> 碳质组分的研究发现<sup>[10]</sup>, 其浓度变化很大: OC 的变化范围为 7.9 ~ 116.2 μg·m<sup>-3</sup>; EC 的变化范围为 1.5 ~ 55.6 μg·m<sup>-3</sup>, 在春节期间 OC 和 EC 的浓度分别降低了 30.8% 和 54.7%. 我国关于碳质溶胶的研究主要集中在上海<sup>[8]</sup>、北京<sup>[9,11]</sup> 和西安<sup>[10]</sup> 等大城市, 而关于中等城市的研究较少. 2013 年 1 月, 华北地区大片的浓雾-霾污染引起了全世界的关注, 为了减轻严重的空气污染, 国务院于 2013 年 9 月发布了大气污染防治行动计划<sup>[12]</sup>. 京津冀地区 PM<sub>2.5</sub> 浓度在 2013 ~ 2017 年间显著下降 106 ~ 64 μg·m<sup>-3</sup>, 但该地区 PM<sub>2.5</sub> 的浓度仍然远高于珠江三角洲和长江三角洲地区<sup>[13]</sup>. 由于化石燃料和生物能源 (OC 和 EC 的主要来源) 大量使用, 京津冀地区及其周边省份在秋季和冬季仍然经常发生严重的污染事件<sup>[14]</sup>, 京津冀地区仍然是中国污染最严重的地区之一<sup>[15]</sup>.

承德位于河北省东北部, 是首都主要的生态涵

养区和生态屏障城市, 在京津冀协同发展战略中具有重要地位. 但近年来, 随着经济持续发展, 能源消耗和机动车数量均有所增加, 大量污染物排放<sup>[16]</sup>, 导致承德出现多次区域性的重污染灰霾天气<sup>[17,18]</sup>. 因此, 在当前碳减排形势下, 采用膜采样对 PM<sub>2.5</sub> 样品进行采集, 研究承德市 PM<sub>2.5</sub> 中碳质组分的季节污染特征及污染来源, 以期为承德大气颗粒物的污染防治工作提供理论依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 采样点位及时间

选取承德市双滦区文化中心 (117.8° E, 40.96° N) 为研究点位 (图 1), 其西侧主要是公路、高速等交通要道, 西北方有森林覆盖区和农田耕作区; 西南方有工业集中区 (承德市钢铁工业区); 采样点附近有旅游区、居民区、工业和交通要道分布, 造成该区域大气复合污染具有多样性. 样品采集时间为冬季 (2019 年 1 月 1 ~ 31 日)、春季 (2019 年 4 月 1 ~ 30 日)、夏季 (2019 年 7 月 1 ~ 31 日) 和秋季 (2019 年 10 月 8 日 ~ 11 月 8 日), 使用的 4 通道小流量采样器 (采样流速为 16.7 L·min<sup>-1</sup>) 对 PM<sub>2.5</sub> 样品进行采集, 每天样品采集时长为 23 h (10:00 ~ 次日 09:00).



A: 承钢工业区; B: 农田及森林覆盖区; C: 商业区; D: 双塔山旅游区; E: 元宝山旅游区

图 1 采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of the sampling sites

### 1.2 分析方法

根据 IMPROVE 协议规定的热反射法 (Thermal/Optical Reflection, TOR) 使用大气有机/无机碳分析仪 (Sunset OC/EC Model 5 L, 美国 Sunset) 测定颗粒物中的 OC、EC 及 8 种碳组分的浓度. 分析流程为: 使用 1.5 cm<sup>2</sup> 的打孔器截取 1.5 cm<sup>2</sup> 的待测样品置于仪器样品舟中, 首先加热炉经过氦气吹扫, 加热炉经过梯度升温至 870°C, 释放出的有机混合物和热分解产物进入二氧化锰炉. 当含碳微粒流经二氧化锰炉将会转化为二氧化碳气体. 二氧化碳气体会被

氦气流吹扫出并混入氢气. 混合气体流经加热过的镍催化剂, 其被定量地转化为甲烷. 然后甲烷随即被 (flame ionization detector, FID) 定量地检测出来. 在石英炉中最初的温度梯度结束后, 加热炉冷却至 550°C, 气流被转化成氮/氧混合载气. 第二个温度梯度在氧化气流中开始, 所有的 EC 被氧化离开滤膜进入氧化炉. 与 OC 一样, EC 用相同的方法被检测出来. 一个样品完成测试时, OC 和 EC 的 8 个组分 (OC1、OC2、OC3、OC4、EC1、EC2、EC3、OPC) 同时给出. IMPROVE 协议将 OC 定义为 OC1 + OC2 +

OC3 + OC4 + OPC, 将 EC 定义为 EC1 + EC2 + EC3 - OPC. TC = OC + EC. 分析仪的精密为  $\pm 5\%$ , 检出限为  $0.2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . 仪器开机后使用  $0.2 \mu\text{g}\cdot\mu\text{L}^{-1}$  蔗糖溶解进行校准, 空白实验采用空白膜做相同的实验处理, 每次平行做 3 次空白实验, 取其 3 次平均值作为空白背景值, 所有实验数据均已扣除空白背景值.

OC 和 EC 的质量浓度按照以下公式计算:

$$c = (c^* \times n) / V \quad (1)$$

式中,  $c$  为整个样品的碳浓度,  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ;  $c^*$  为  $1.5 \text{ cm}^2$  样品测定得到的碳浓度,  $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ ;  $n$  为整个样品的有效面积,  $\text{cm}^2$ ;  $V$  为样本在标准状况下的体积,  $\text{m}^3$ .

### 1.2.1 TCA 与 SOC 的计算

使用经验计算公式<sup>[19]</sup>来估算总碳质气溶胶 (total carbonaceous aerosol, TCA) 的质量浓度, 计算公式为:

$$\text{TCA} = 1.4 \times \text{OC} + \text{EC} \quad (2)$$

式中, TCA 为总碳质气溶胶的浓度,  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , OC 与 EC 分别为有机碳和元素碳的浓度,  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ .

使用 OC/EC 比值法对 SOC 进行估算, 表达式为:

$$\text{SOC} = \text{OC} - \text{EC} \times (\text{OC}/\text{EC})_{\min} \quad (3)$$

式中, SOC 为二次有机碳的质量浓度,  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ; OC 与 EC 分别为有机碳和元素碳的浓度,  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ;  $(\text{OC}/\text{EC})_{\min}$  为采样期间 OC/EC 的最小值

### 1.2.2 后向轨迹模式

后向轨迹聚类分析是采用美国国家大气海洋管理局 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) 开发的 HYSPLIT 模型对气团轨迹的空间相似度进行分析, 并结合该时段的细颗粒物浓度对聚类结果进行统计, 从而识别污染物的外向来源和传输路径. 研究后向轨迹目标点为承德市文化中心, 模拟距地面起始高度为 100 m 的 48 h 的后向轨迹, 时间分辨率为 1 h, 空间分辨率为  $0.25^\circ$ . 气团轨迹在到达观测点前所经过区域可以由轨迹的路线及方向来判断, 气团轨迹的移动速度可以根据气团路线的长短来判断, 气团路线长的移动速度较快, 路线短的移动速度较慢.

### 1.3 质量控制

如遇到雨雪天气采样不足 12 h, 采集样品视为无效样品. 研究采用石英纤维滤膜 ( $\phi 47 \text{ mm}$ ), 将滤膜置于马弗炉中  $600^\circ\text{C}$  下烘干 2 h 以除去挥发性组分, 恒温恒湿的环境下平衡 72 h 后密封保存, 收集样品后立即使用滤膜密封、避光并在  $-4^\circ\text{C}$  条件下保存以待分析.

## 2 结果与讨论

### 2.1 $\text{PM}_{2.5}$ 、OC 和 EC 浓度特征

承德市采样期间  $\text{PM}_{2.5}$  及其碳组分的日均浓度如图 2 所示,  $\text{PM}_{2.5}$ 、OC 和 EC 呈显著的季节变化特征, 且不同季节每日的  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度波动较大, 这是由于气象条件具有显著的季节和日变化特征<sup>[20]</sup>. 采样期间  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度变化幅度较大 ( $9 \sim 121 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ), OC ( $3.58 \sim 51.41 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) 和 EC ( $0.44 \sim 8.93 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) 最高值与最低值的比分别为 14.36 和 20.30,  $\text{PM}_{2.5}$ 、OC 和 EC 浓度在暖季较低, 而在冷季较高. 按照我国现行环境空气质量标准 (GB 3095-2012) 规定,  $\text{PM}_{2.5}$  二级标准为  $75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 承德市存在  $\text{PM}_{2.5}$  污染, 且冬季超标天数为 4 d, 秋季超标天数为 1 d. 采样期间 OC 和 EC 的总体变化趋势与  $\text{PM}_{2.5}$  的变动基本保持一致, 但也存在  $\text{PM}_{2.5}$  与 OC、EC 变动相反的情景, 这是因为  $\text{PM}_{2.5}$  的浓度不仅受到碳质组分的影响还与一些水溶性离子及无机元素等物质有关<sup>[21]</sup>.

承德市  $\text{PM}_{2.5}$  及其碳组分的质量浓度统计如表 1 所示,  $\text{PM}_{2.5}$  的质量浓度变动: 冬季 [ $(47.68 \pm 30.37) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ] > 秋季 [ $(28.72 \pm 17.12) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ] > 春季 [ $(26.59 \pm 15.32) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ] > 夏季 [ $(23.17 \pm 8.38) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ]. 其中, 冬季是夏季的 2.05 倍, 可能是因为夏季偏南风较强, 且较大的降水量能够在很大程度上缓解  $\text{PM}_{2.5}$  污染, 加之冬季气候条件和当地排放叠加, 造成  $\text{PM}_{2.5}$  浓度增加明显. 此外, 春季和秋季相差不多, 是由于春季和秋季都是季风转换的季节.

由表 1 可知, 采样期间承德市  $\text{PM}_{2.5}$  中 TC 的质量浓度为  $(16.07 \pm 10.23) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 与国内典型城市相比, 低于广州 ( $19.2 \sim 42.8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) 和北京 ( $32.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) 等城市<sup>[22,23]</sup>, 而高于智利圣地亚哥<sup>[24]</sup> ( $5.3 \sim 7.9 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) 和名古屋<sup>[25]</sup> ( $11.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) 等国外城市. 此外, 季节变动为: 冬季 [ $(28.54 \pm 13.25) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ] > 春季 [ $(15.61 \pm 4.24) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ] > 秋季 [ $(12.34 \pm 3.99) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ] > 夏季 [ $(8.85 \pm 2.19) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ]. 采样期间 TC 的浓度占到了  $\text{PM}_{2.5}$  的一半以上 (51.41%), 说明 OC 与 EC 等含碳物质是承德市  $\text{PM}_{2.5}$  的重要组分, 且承德市  $\text{PM}_{2.5}$  碳组分污染已经十分严重, 应当加强碳源污染排放控制. 从表 1 可以看出, OC 浓度季节特征呈现出: 冬季 [ $(23.48 \pm 11.44) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ] > 春季 [ $(12.72 \pm 4.72) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ] > 秋季 [ $(9.91 \pm 3.43) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ] > 夏季 [ $(7.84 \pm 1.89) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ], 夏季最低, 冬季最高; 而这与 EC 特征略有差异; EC 季节变动为: 冬季 [ $(5.06 \pm 1.93)$

$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ] > 春季 [(2.88 ± 1.72)  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ] > 秋季  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ], 呈夏季最低冬季最高, 且冬季的 EC 是夏季 [(2.42 ± 0.78)  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ] > 夏季 [(1.04 ± 0.30)  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ], 呈夏季最低冬季最高, 且冬季的 EC 是夏季的 4.87 倍, OC 是夏季的 2.99 倍.

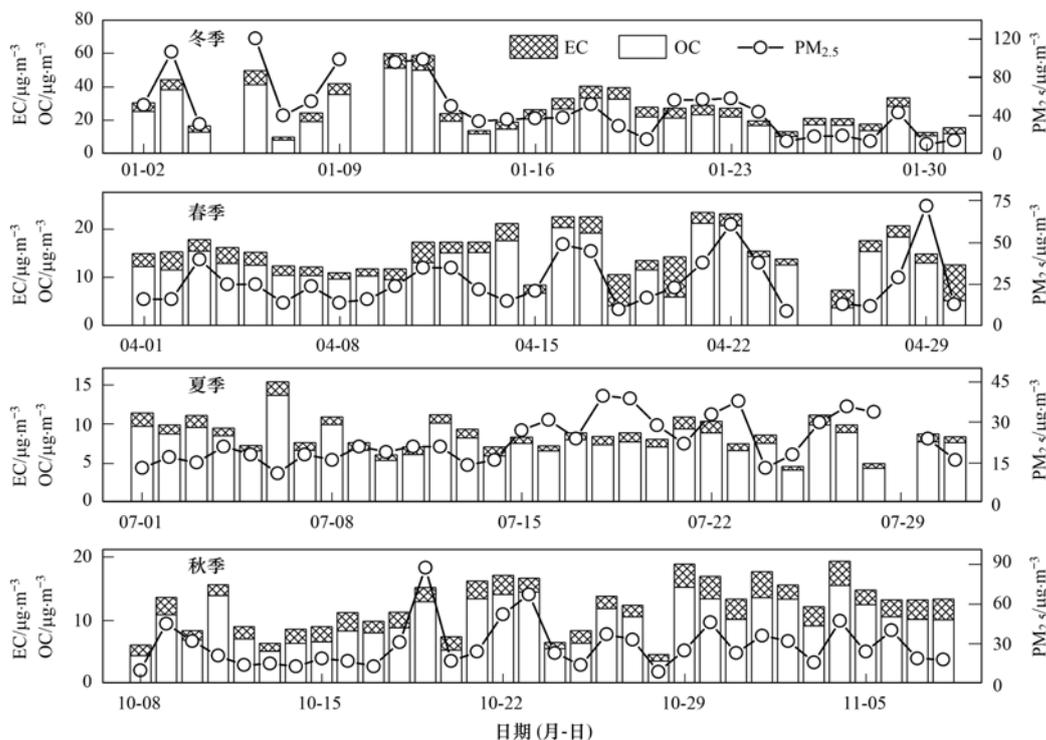


图 2 2019 年承德市 PM<sub>2.5</sub> 与碳组分浓度逐日变化

Fig. 2 Daily changes of PM<sub>2.5</sub> and carbon component concentrations in Chengde City in 2019

表 1 承德市不同季节的 PM<sub>2.5</sub> 及其碳组分质量浓度/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

Table 1 Mass concentration of PM<sub>2.5</sub> and carbon components in different seasons in Chengde City/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

项目	春季	夏季	秋季	冬季	均值
样品数量	29	30	32	28	—
PM <sub>2.5</sub> 质量浓度	26.59 ± 15.32	23.17 ± 8.38	28.72 ± 17.12	47.68 ± 30.37	31.26 ± 21.39
OC	12.72 ± 4.72	7.84 ± 1.89	9.91 ± 3.43	23.48 ± 11.44	13.27 ± 8.68
EC	2.88 ± 1.72	1.04 ± 0.30	2.42 ± 0.78	5.06 ± 1.93	2.80 ± 1.95
TC	15.61 ± 4.24	8.85 ± 2.19	12.34 ± 3.99	28.54 ± 13.25	16.07 ± 10.23
OC/EC	5.77 ± 2.98	7.82 ± 1.44	4.24 ± 1.34	4.60 ± 0.87	—

图 3 展示了 OC 和 EC 组分对 PM<sub>2.5</sub> 的贡献率及季节性变化, 其中, 冬季和春季 OC 在 PM<sub>2.5</sub> 中占比较高, 而夏季和秋季相对较低, EC 在夏季 PM<sub>2.5</sub> 中占比较少, 在秋季、冬季和春季占比基本稳定, 由此说明不同季节的 PM<sub>2.5</sub> 化学组分及来源构成是不同的. 冬季和春季 PM<sub>2.5</sub> 中含有较高的 OC, 说明二次转化导致了 OC 生成较多.

### 2.2 OC 与 EC 的相关性关系

承德市 PM<sub>2.5</sub> 碳质组分的来源能通过 OC 与 EC 的关系反映<sup>[26]</sup>, OC/EC 可以指示气溶胶的排放和转化特征<sup>[27]</sup>. 若 OC 和 EC 是由初级污染源排放的, 则 OC 与 EC 的相关性应该很强, 这是由于 OC 和 EC 的排放速率彼此成正比<sup>[28]</sup>. 研究表明, 机动车排放源的 OC/EC 值相对较低(1.0 ~ 4.2)、燃煤和生物质燃烧源的 OC/EC 值较高, 如居民烟煤(2.5 ~

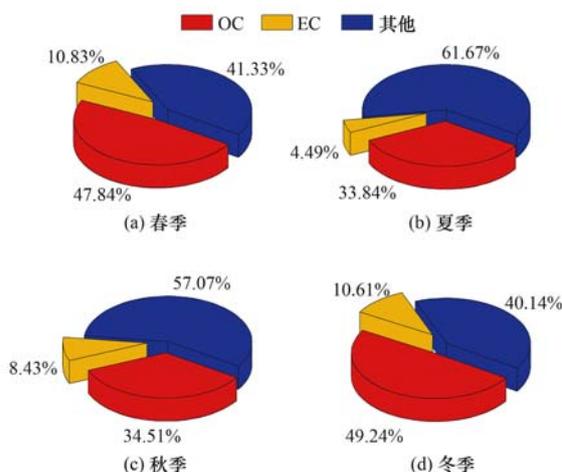


图 3 OC 与 EC 组分对 PM<sub>2.5</sub> 的贡献以及季节性变化

Fig. 3 Contributions of OC and EC components to PM<sub>2.5</sub> and seasonal changes

10.5)、木材燃烧(16.8~40.0)、厨房废气排放(32.9~81.6)和生物质燃烧(7~11.5)<sup>[29~33]</sup>.

承德市4个季节OC与EC间的线性回归关系如图4所示,春季、夏季、秋季和冬季的相关系数( $R^2$ )分别为0.17、0.60、0.38和0.85,冬季OC与EC的相关性较好,说明承德市冬季OC和EC来源较为一致,而春季、夏季和秋季OC和EC的来源一致性差,即可能来源于不同的污染源.结合承德市不同季节OC/EC的变化范围:0.66~13.04(春季)、5.08~10.28(夏季)、2.55~8.21(秋季)和3.5~6.22(冬季);OC/EC的稳定程度为:5.77±2.98(春季)、7.82±1.44(夏季)、4.24±1.34(秋季)

和4.60±0.87(冬季),初步表明冬季主要的排放源是燃煤和机动车尾气;春季、夏季和秋季的OC与EC受气候影响来源相对复杂,除机动车尾气和燃煤排放外,还有生物质燃烧的贡献;此外,春季的OC与EC的相关性系数最低且OC/EC变化波动较大,除受气象影响外,还与OC的二次转化有关;有研究表明,SOC的生成可导致OC与EC的相关性较低<sup>[34]</sup>.因此,在承德市春季和夏季相较于秋季和冬季节有着更高的OC/EC比值,这主要是由于在春季和夏季温度较高、阳光辐射强,挥发性有机物(VOCs)更容易在大气中发生光化学反应生成二次污染物<sup>[35]</sup>.

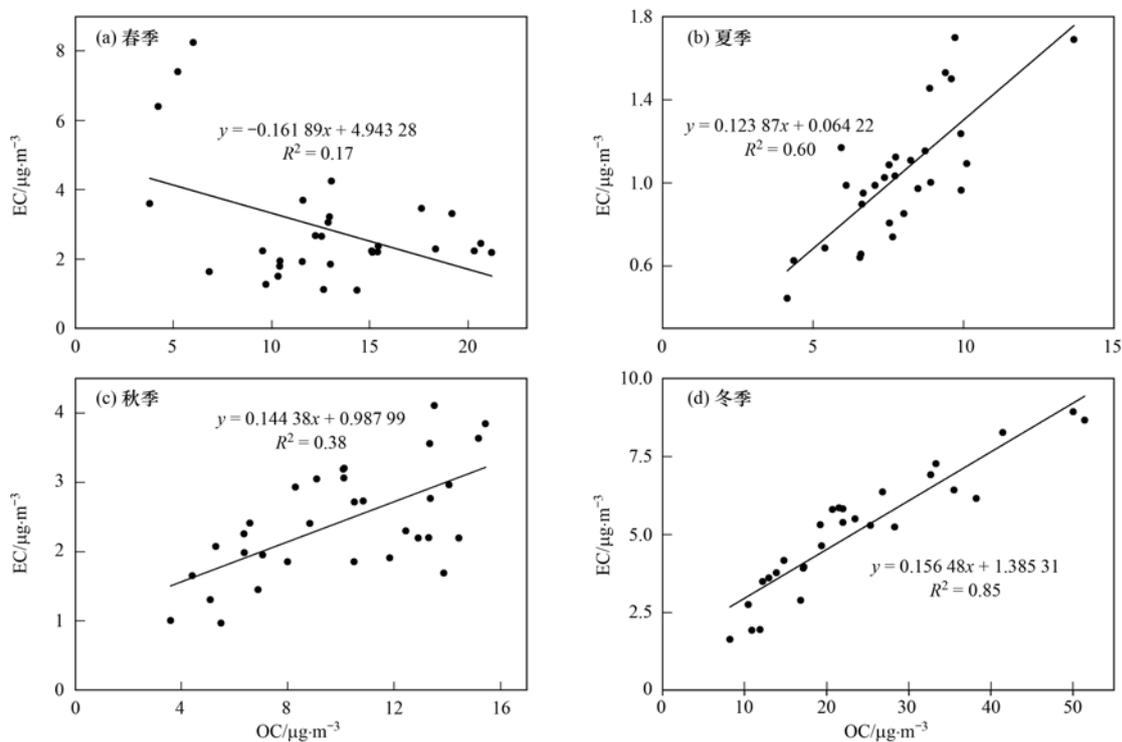


图4  $PM_{2.5}$ 中OC与EC的相关性

Fig. 4 Correlation between OC and EC in  $PM_{2.5}$

### 2.3 TCA与SOC值的估算

OA是TCA的重要组成部分,是由氢、氧和氮组成的含碳化合物.为估算TCA的浓度,需借助OC与OA的转化率.受烟气影响严重的地区气溶胶转化率为2.2~2.6,老化气溶胶转化率为1.9~2.3,而1.4是城市地区最低的合理转化率<sup>[19]</sup>.通过表2可知承德市TCA的年均浓度为(21.38±13.68) $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,占 $PM_{2.5}$ 年均值的68.39%,表明TCA占了承德市 $PM_{2.5}$ 的很大一部分.承德市TCA的浓度变化趋势为:冬季[(37.94±17.82) $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ] > 春季[(20.68±6.04) $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ] > 秋季[(16.29±5.34) $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ] > 夏季[(12.01±2.89) $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ].TCA/ $PM_{2.5}$ 呈现出冬季(79.57%) > 春季(77.78%) > 秋

季(56.72%) > 夏季(51.83%),即冬春高,夏秋低的特点.不同季节TCA/ $PM_{2.5}$ 均大于50%,反映出了机动车尾气和燃煤排放对大气污染的综合作用<sup>[36]</sup>.

OC是POC和SOC二者之和<sup>[37]</sup>,对于大气气溶胶中的SOC和POC,计算方法有数值模拟法、特定化合物法以及OC/EC比值法<sup>[38]</sup>,其中OC/EC方法被广泛应用.有研究表明,OC/EC > 2则证明有SOC的生成<sup>[39,40]</sup>,其准确度受(OC/EC)<sub>min</sub>值的影响较大,这受到气象条件和污染排放变化的综合影响<sup>[41]</sup>.

承德市春季、夏季、秋季和冬季的(OC/EC)<sub>min</sub>分别为3.07、5.07、2.55和3.50,表明各季节均有SOC生成.SOC的季节性分布特征为:春季[(6.88

$\pm 3.86) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}] > \text{冬季} [(5.97 \pm 5.76) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}] > \text{秋季} [(3.73 \pm 2.66) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}] > \text{夏季} [(2.58 \pm 1.20) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}]$ . 承德市 SOC 值呈现出春季高和夏季低的特点,是由于春季相比于夏季,其气象条件更易促使挥发性有机物的生成,进而导致 SOC 含量升高<sup>[42]</sup>. 冬季 SOC 较高有两个方面的原因,一是冬季取暖燃煤活动增加了有机气体和碳质颗粒污染物排放,二是当温度低于 15℃ 时基本不生成 SOC. 且冬季不利的气象条件导致了大气污染物质的长久停留促进了 SOC 的形成,排放条件和气象因素的协同作

用补偿了冬季生成 SOC 的不利因素.

承德市不同季节二次转化(SOC/OC)的值依次为:春季(54.09%) > 秋季(37.64%) > 夏季(32.91%) > 冬季(25.43%). 春季有利的生成条件致使二次转化显著较高,而冬季 SOC 转化较低,是由于气温较低、光照不足等条件造成了承德市冬季二次转化低于其他 3 个季节. 此外,夏季较好的扩散条件及降雨的清除作用,也降低了 SOC 的浓度<sup>[43~45]</sup>,导致夏季 SOC 不仅含量低而且二次转化也较低.

表 2 承德市 TCA 与 SOC 季节浓度

Table 2 Seasonal concentration of TCA and SOC in Chengde City

季节	TCA/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	TCA/PM <sub>2.5</sub> /%	SOC/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	SOC/OC/%
春季	20.68 ± 6.04	77.78	6.88 ± 3.86	54.09
夏季	12.01 ± 2.89	51.83	2.58 ± 1.20	32.91
秋季	16.29 ± 5.34	56.72	3.73 ± 2.66	37.64
冬季	37.94 ± 17.82	79.57	5.97 ± 5.76	25.43
平均值	21.38 ± 13.68	68.39	4.65 ± 4.05	35.04

#### 2.4 不同类型气团下碳气溶胶的污染特征

承德市 PM<sub>2.5</sub> 及其碳组分的污染特征既受到本地排放源的影响,也受到区域污染物输送的影响<sup>[46]</sup>,因此,利用后向轨迹模式解析 PM<sub>2.5</sub> 的污染来源方向,并统计了不同轨迹的污染物浓度. 不同季节的后向轨迹聚类结果如图 5 所示,通过结合表 3 可以发现,春季聚类出了 3 条轨迹,来自西北方向的气流轨迹 1 占比(43.33%)最高,此条轨迹携带的 PM<sub>2.5</sub>、OC 和 EC 的浓度均最低. 而来自西南方向

的气流轨迹 2 对应最高浓度的 PM<sub>2.5</sub> (44.75  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) 和 OC (11.14  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ),此条轨迹途经河北省和北京,有工业源存在加上气流移动速度较慢,大气环境稳定更容易积蓄污染物,从而携带较高的污染物浓度. 轨迹 3 来源于西北方向气团,比例占到了 16.67%,对应较高的 EC 浓度(2.54  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ),其移动速度较快,贯穿西伯利亚西南部、蒙古国东北部、内蒙古东北部以及河北省东北部.

表 3 不同季节气团轨迹对应的污染物和气象因子统计

Table 3 Statistics of pollutants and meteorological factors corresponding to air mass trajectories in different seasons

季节	轨迹	轨迹个数	轨迹占比/%	PM <sub>2.5</sub> / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	OC/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	EC/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	温度/℃	相对湿度/%
春	1	13	43.33	21.02	7.50	1.95	9.94	43.46
	2	12	40.00	44.75	11.14	2.07	15.07	53.00
	3	5	16.67	23.90	10.44	2.54	11.76	46.60
夏	1	6	19.35	20.21	8.52	1.23	25.03	67.50
	2	19	61.29	30.97	7.39	0.92	23.92	80.26
	3	6	19.35	28.21	8.52	1.18	26.32	77.50
秋	1	6	21.31	26.50	9.18	2.63	6.72	57.17
	2	9	31.15	51.64	11.04	2.23	9.99	74.00
	3	3	6.56	21.00	7.07	2.10	8.13	64.00
	4	9	27.87	30.39	9.67	2.32	7.99	65.89
	5	5	13.11	35.95	35.95	10.88	2.86	8.64
冬	1	10	35.48	62.73	28.40	5.37	-7.12	49.60
	2	12	38.71	39.40	17.97	4.46	-6.78	39.08
	3	5	16.13	59.45	32.16	6.55	-5.16	43.60
	4	3	9.68	21.08	15.75	4.24	-7.00	36.33

夏季来自东南方向的轨迹 2 占比高达 61.29%,其对应的 PM<sub>2.5</sub> 的浓度最高(30.97  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ),而来自西北方向的气流轨迹 3 对应的 PM<sub>2.5</sub> 浓度略低于轨迹 2; 轨迹 1 来自东北方向,其对应的 PM<sub>2.5</sub> 的浓

度最低. 3 条轨迹 OC 和 EC 的浓度相差不大,PM<sub>2.5</sub> 的浓度也均低于 GB 3095-2012 中规定的一级限值(35  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ).

秋季有 5 条不同的轨迹气流,轨迹 2 来自于西

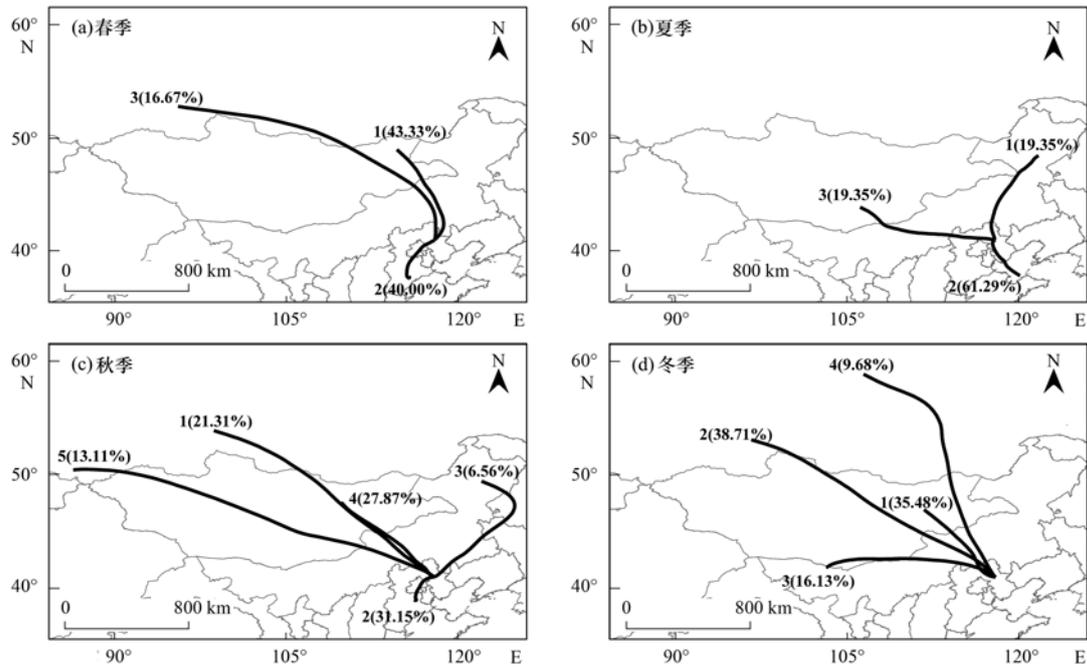


图5 承德市后向轨迹聚类分析

Fig. 5 Cluster analysis of the backward trajectory of Chengde City

南方向,途经河北省南部和北京到达承德,与春季相似,其对应的  $PM_{2.5}$  ( $51.64 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) 和 OC ( $11.04 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) 的浓度也是最高的。来自西北方向有 3 条气流,其中轨迹 3 和轨迹 1 是清洁轨迹,轨迹 5 对应的  $PM_{2.5}$  ( $35.95 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) 和 OC ( $10.88 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) 的含量要高于轨迹 3 和 1,低于轨迹 2,但是其携带的 EC ( $2.86 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) 的浓度确是最高的。轨迹 4 携带的 3 项污染物的浓度均不高。

冬季 4 条气流全部落在了西北方向的范围内,气流轨迹 1 移动速度较慢,其携带了最高浓度的  $PM_{2.5}$  ( $62.73 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) 和较高浓度的 OC ( $28.40 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ),其途经蒙古国东部、内蒙古北部以及河北省北部一些重工业城市;轨迹 3 移动速度相对较慢,其对应的  $PM_{2.5}$  ( $59.45 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) 和 OC ( $32.16 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) 的浓度是最高的, $PM_{2.5}$  的浓度也相对较高,途经蒙古国南部、内蒙古西北部以及河北省北部等重要工业城市,轨迹 1 和轨迹 3 大气稳定度高移动速度较慢,且途经工业城市,加上寒冷地区采暖季碳物质排放突出,导致其携带的污染物浓度较高;轨迹 2 和轨迹 4 移动速度较快,这两条轨迹污染较轻。

## 2.5 碳质组分含量与来源解析

根据 IMPROVE 协议:  $OC = OC1 + OC2 + OC3 + OC4 + OPC$ , 而  $EC = EC1 + EC2 + EC3 - OPC$ ,  $PM_{2.5}$  的源谱特征能够通过样品中 7 个碳组分的丰富程度来体现,因为不同的排放源能够产生不同的碳组分<sup>[47]</sup>。OC1 在生物质燃烧样品中最为丰富,OC2 是

燃煤组分的指示物,OC2、OC3、OC4 及 EC1 是机动车尾气中充裕的碳组分,其中 OC3 是汽油车排放碳组分的主要指示物,EC2 和 EC3 是柴油车尾气中复杂的碳组分<sup>[48]</sup>。如图 6 所示,承德市 4 个季节 7 种碳组分的排列顺序相同:  $EC1 > EC2 > OC3 > OC2 > OC4 > OC1 > EC3$ ,但每种组分的含量在不同的季节表现出一定的差异性。在春季和夏季,TC 中 EC2 的含量高于秋季和冬季,说明在春季和夏季受到的柴油车尾气贡献比秋季和冬季要大,EC1 在 4 个季节中所占比例最高,其在冬季 TC 中所占比例要高于其他季节,表明机动车尾气对冬季  $PM_{2.5}$  碳质组分贡献高于其他 3 个季节,在春夏秋 3 个季节机动车尾

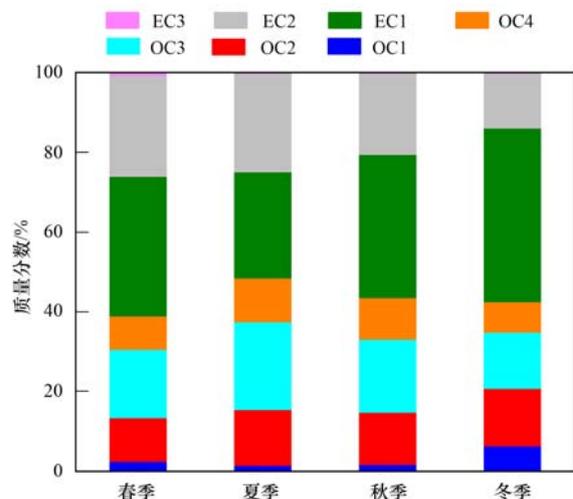


图6 不同季节的碳组分在总碳中的质量分数

Fig. 6 Mass fraction of carbon components in total carbon in different seasons

气也是碳组分排放的重要污染源。

利用 SPSS 软件的主成分分析 (PCA) 法对承德市 4 个季节的碳组分来源进行解析. 结合图 7 和表 4, 春季的因子 1 的统计结果为 OC3、OC4、EC1、EC2 和 EC3 为高载荷组分, 因子 1 指示出了汽油车尾气和柴

油车尾气为主要来源. 因子 2 的高载荷组分为 OC1 和 OC2, 分别代表了生物质燃烧和燃煤排放. 夏季因子 1 的高载荷组分为 OC2、OC3、OC4 和 EC1, 显示出了燃煤混合机动车尾气排放的特征. 因子 2 所给出高载荷组分为 OC1, 代表了生物质燃烧排放。

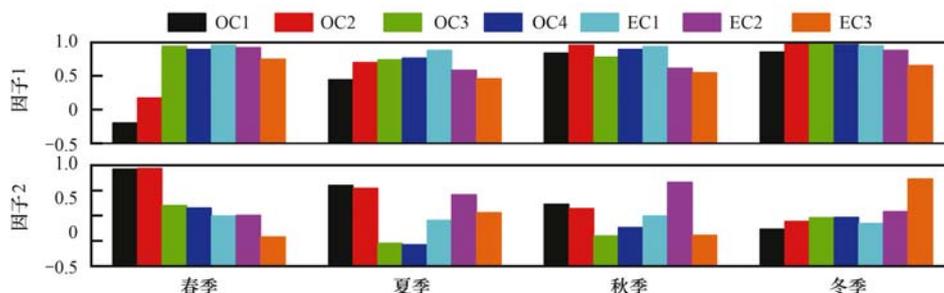


图 7 承德市不同季节的碳质组分因子分布

Fig. 7 Distribution of carbon composition factors in different seasons in Chengde City

表 4 承德市不同季节的碳质组分主成分分析结果

Table 4 Principal component analysis results of carbon components in different seasons in Chengde City

污染源	春季		夏季		秋季		冬季		
	因子 1	因子 2							
机动车尾气	汽油车	√	×	√	×	√	×	√	×
	柴油车	√	×	√	×	×	√	×	√
燃煤	×	√	√	×	√	×	√	×	
生物质燃烧	×	√	×	√	√	×	√	×	

1) √表示识别出污染源, ×表示未识别出污染源

秋季因子 1 的高载荷组分为 OC1、OC2、OC3、OC4 和 EC1 与夏季相比多出了生物质燃烧排放贡献. 因子 2 所给出的高载荷组分为 EC2, 认定为柴油车尾气排放. 冬季 OC1、OC2、OC3、OC4、EC1 和 EC2 在因子 1 中载荷较高, 因子 1 体现出了生物质燃烧、燃煤、汽油车尾气和柴油车尾气贡献, 在因子 2 中 EC3 组分相较于其他组分贡献显著, 因子 2 也指示出了柴油车尾气排放源。

### 3 结论

(1) 承德市采样期间 PM<sub>2.5</sub>、OC 和 EC 的质量浓度分别为 (31.26 ± 21.39)、(13.27 ± 8.68) 和 (2.80 ± 1.95) μg·m<sup>-3</sup>, 且 PM<sub>2.5</sub> 组分中 TC 占比 (51.41%) 超过一半. PM<sub>2.5</sub> 季节变化趋势呈: 冬季 [(47.68 ± 30.37) μg·m<sup>-3</sup>] > 秋季 [(28.72 ± 17.12) μg·m<sup>-3</sup>] > 春季 [(26.59 ± 15.32) μg·m<sup>-3</sup>] > 夏季 [(23.17 ± 8.38) μg·m<sup>-3</sup>], 与 TC、OC 和 EC 的变化趋势一致. OC 与 EC 的相关性表明, 冬季 (R<sup>2</sup> = 0.85) 二者来源较一致, 春季 (R<sup>2</sup> = 0.17)、夏季 (R<sup>2</sup> = 0.60) 和秋季 (R<sup>2</sup> = 0.38) 来源广泛, 从 OC/EC 值进一步得出 4 个季节均受到不同程度的交通排放以及燃煤源影响, 且冬季受烟煤排放影响显著。

(2) 采样期间承德市 TCA 平均浓度为 (21.38 ±

13.68) μg·m<sup>-3</sup>, 占 PM<sub>2.5</sub> 比例达 68.39%. TCA 的季节变化趋势为: 冬季 [(37.94 ± 17.82) μg·m<sup>-3</sup>] > 春季 [(20.68 ± 6.04) μg·m<sup>-3</sup>] > 秋季 [(16.29 ± 5.34) μg·m<sup>-3</sup>] > 夏季 [(12.01 ± 2.89) μg·m<sup>-3</sup>]. 承德市 SOC 在各季节均有生成, 其变化趋势为: 春季 [(6.88 ± 3.86) μg·m<sup>-3</sup>] > 冬季 [(5.97 ± 5.76) μg·m<sup>-3</sup>] > 秋季 [(3.73 ± 2.66) μg·m<sup>-3</sup>] > 夏季 [(2.58 ± 1.20) μg·m<sup>-3</sup>]. 二次转化率 (SOC/OC) 依次为: 春季 (54.09%) > 秋季 (37.64%) > 夏季 (32.91%) > 冬季 (25.43%)。

(3) 承德市 PM<sub>2.5</sub> 轨迹聚类表明, 不同季度的气团传输方向有显著差异, 春季的传输方向主要为西南 (40%), 其 PM<sub>2.5</sub> (44.75 μg·m<sup>-3</sup>) 和 OC (11.14 μg·m<sup>-3</sup>) 浓度较高; 夏季 PM<sub>2.5</sub> 轨迹浓度均低于一级限值 (35 μg·m<sup>-3</sup>), 秋季污染轨迹方向主要为西南 (31.15%), 轨迹上 PM<sub>2.5</sub> (51.64 μg·m<sup>-3</sup>) 和 OC (11.04 μg·m<sup>-3</sup>) 浓度较高; 冬季轨迹均来自于西北方向, 轨迹上 PM<sub>2.5</sub> 最高达 (62.73 μg·m<sup>-3</sup>). 不同季节 7 种碳组分的排列顺序 (EC1 > EC2 > OC3 > OC2 > OC4 > OC1 > EC3) 相同, 表明机动车尾气是 PM<sub>2.5</sub> 碳组分的重要排放源. PCA 结果显示, 机动车尾气、燃煤和生物质燃烧是承德市碳质气溶胶的主要来源。

## 参考文献:

- [ 1 ] Lu X C, Yuan D H, Chen Y, *et al.* Impacts of urbanization and long-term meteorological variations on global PM<sub>2.5</sub> and its associated health burden [J]. *Environmental Pollution*, 2021, **270**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.116003.
- [ 2 ] Lai S C, Zhao Y, Ding A J, *et al.* Characterization of PM<sub>2.5</sub> and the major chemical components during a 1-year campaign in rural Guangzhou, Southern China [J]. *Atmospheric Research*, 2016, **167**: 208-215.
- [ 3 ] Dinoli A, Cesari D, Marinoni A, *et al.* Inter-comparison of carbon content in PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> collected at five measurement sites in Southern Italy [J]. *Atmosphere*, 2017, **8**(12), doi: 10.3390/atmos8120243.
- [ 4 ] Na K, Sawant A A, Song C, *et al.* Primary and secondary carbonaceous species in the atmosphere of Western Riverside County, California [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, **38**(9): 1345-1355.
- [ 5 ] Nizkorodov S A, Laskin J, Laskin A. Molecular chemistry of organic aerosols through the application of high resolution mass spectrometry [J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2011, **13**(9): 3612-3629.
- [ 6 ] Flores R M, Mertoğlu E, Özdemir H, *et al.* A high-time resolution study of PM<sub>2.5</sub>, organic carbon, and elemental carbon at an urban traffic site in Istanbul [J]. *Atmospheric Environment*, 2020, **233**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2019.117241.
- [ 7 ] Zhou M, Qiao L P, Zhu S H, *et al.* Chemical characteristics of fine particles and their impact on visibility impairment in Shanghai based on a 1-year period observation [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2016, **48**: 151-160.
- [ 8 ] Wang H L, Qiao L P, Lou S R, *et al.* Chemical composition of PM<sub>2.5</sub> and meteorological impact among three years in urban Shanghai, China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, **112**: 1302-1311.
- [ 9 ] Tao J, Zhang L M, Zhang R J, *et al.* Uncertainty assessment of source attribution of PM<sub>2.5</sub> and its water-soluble organic carbon content using different biomass burning tracers in positive matrix factorization analysis — a case study in Beijing, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **543**: 326-335.
- [ 10 ] Xu H M, Cao J J, Chow J C, *et al.* Inter-annual variability of wintertime PM<sub>2.5</sub> chemical composition in Xi'an, China: Evidences of changing source emissions [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **545-546**: 546-555.
- [ 11 ] Wang Q Y, Huang R J, Cao J J, *et al.* Contribution of regional transport to the black carbon aerosol during winter haze period in Beijing [J]. *Atmospheric Environment*, 2016, **132**: 11-18.
- [ 12 ] Ji D, 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 ] Ding D, Xing J, Wang S X, *et al.* Estimated contributions of emissions controls, meteorological factors, population growth, and changes in baseline mortality to reductions in ambient PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>2.5</sub>-related mortality in China, 2013- 2017 [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2019, **127**(6), doi: 10.1289/EHP4157.
- [ 14 ] 朱媛媛, 高愈霄, 刘冰, 等. 京津冀秋冬季PM<sub>2.5</sub>污染概况和预报结果评估 [J]. *环境科学*, 2019, **40**(12): 5191-5201.
- Zhu Y Y, Gao Y X, Liu B, *et al.* Concentration characteristics and assessment of model-predicted results of PM<sub>2.5</sub> in the Beijing-Tianjin-Hebei region in autumn and winter [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(12): 5191-5201.
- [ 15 ] 张逸琴, 王杰, 高健, 等. 2016~2017年采暖期华北平原东部PM<sub>2.5</sub>组分特征及来源解析 [J]. *环境科学*, 2019, **40**(12): 5202-5212.
- Zhang Y Q, Wang J, Gao J, *et al.* Chemical composition characteristics and source apportionment of PM<sub>2.5</sub> during the heating period of 2016- 2017 in the eastern part of the North China plain [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(12): 5202-5212.
- [ 16 ] 尹晓梅, 乔林, 朱晓婉, 等. 北京地区偏南风 and 偏东风条件下污染特征差异 [J]. *环境科学*, 2020, **41**(11): 4844-4854.
- Yin X M, Qiao L, Zhu X W, *et al.* Differences in pollution characteristics under the southerly and easterly wind in Beijing [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(11): 4844-4854.
- [ 17 ] 周胜, 陈桐生, 黄报远, 等. 2015和2018年承德市区PM<sub>2.5</sub>排放与来源对比分析 [J]. *环境工程*, 2019, **37**(11): 125-131.
- Zhou S, Chen T S, Huang B Y, *et al.* Comparison analysis of emissions and sources of PM<sub>2.5</sub> in the urban area in Chengde in 2015 and 2018 [J]. *Environmental Engineering*, 2019, **37**(11): 125-131.
- [ 18 ] He J J, Gong S L, Ye Y, *et al.* Air pollution characteristics and their relation to meteorological conditions during 2014- 2015 in major Chinese cities [J]. *Environmental Pollution*, 2017, **223**: 484-496.
- [ 19 ] Turpin B J, Lim H J. Species contributions to PM<sub>2.5</sub> mass concentrations: revisiting common assumptions for estimating organic mass [J]. *Aerosol Science and Technology*, 2001, **35**(1): 602-610.
- [ 20 ] 王帅, 崔建升, 冯亚平, 等. 石家庄市挥发性有机物和臭氧的污染特征及源解析 [J]. *环境科学*, 2020, **41**(12): 5325-5335.
- Wang S, Cui J S, Feng Y P, *et al.* Characteristics and source apportionment of VOCs and O<sub>3</sub> in Shijiazhuang [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(12): 5325-5335.
- [ 21 ] Trusz A, Ghazal H, Piekarska K. Seasonal variability of chemical composition and mutagenic effect of organic PM<sub>2.5</sub> pollutants collected in the urban area of Wrocław (Poland) [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **733**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138911.
- [ 22 ] 刘晶晶, 胡猷舟, 黄凤莲, 等. 广州PM<sub>2.5</sub>中有机碳和元素碳的污染特征 [J]. *湖南科技大学学报(自然科学版)*, 2019, **34**(4): 111-117.
- Liu J J, Hu X Z, Huang F L, *et al.* Characteristics of organic carbon (OC) and elemental carbon (EC) in PM<sub>2.5</sub> in Guangzhou, China [J]. *Journal of Hunan University of Science & Technology (Natural Science Edition)*, 2019, **34**(4): 111-117.
- [ 23 ] Yang F, Huang L, Duan F, *et al.* Carbonaceous species in PM<sub>2.5</sub> at a pair of rural/urban sites in Beijing, 2005-2008 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, **11**(15): 7893-7903.
- [ 24 ] Seguel A R, Morales S R G E, Leiva G M A. Estimations of primary and secondary organic carbon formation in PM<sub>2.5</sub> aerosols of Santiago City, Chile [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(13): 2125-2131.
- [ 25 ] Ikemori F, Honjyo K, Yamagami M, *et al.* Influence of contemporary carbon originating from the 2003 Siberian forest fire on organic carbon in PM<sub>2.5</sub> in Nagoya, Japan [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **530-531**: 403-410.
- [ 26 ] Novakov T, Menon S, Kirchstetter T W, *et al.* Aerosol organic

- carbon to black carbon ratios: analysis of published data and implications for climate forcing [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2005, **110** (D21), doi: 10.1029/2005JD005977.
- [27] 张菊, 林瑜, 乔玉红, 等. 成都市西南郊区夏秋季 PM<sub>2.5</sub> 碳组分化学特征[J]. *环境工程*, 2017, **35**(10): 100-104.  
Zhang J, Lin Y, Qiao Y H, *et al.* Chemical characteristics of PM<sub>2.5</sub> carbon components in summer and autumn in the southwestern suburbs of Chengdu [J]. *Environmental Engineering*, 2017, **35**(10): 100-104.
- [28] Kim Y, Yi S M, Heo J. Fifteen-year trends in carbon species and PM<sub>2.5</sub> in Seoul, South Korea (2003-2017) [J]. *Chemosphere*, 2020, **261**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.127750.
- [29] Sudheer A K, Sarin M M. Carbonaceous aerosols in MABL of Bay of Bengal: influence of continental outflow [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(18): 4089-4100.
- [30] Andreae M O, Merlet P. Emission of trace gases and aerosols from biomass burning [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2001, **15**(4): 955-966.
- [31] Schauer J J, Kleeman M J, Cass G R, *et al.* Measurement of emissions from air pollution sources. 3. C<sub>1</sub>-C<sub>29</sub> organic compounds from fireplace combustion of wood [J]. *Environmental Science & Technology*, 2001, **35**(9): 1716-1728.
- [32] Schauer J J, Kleeman M J, Cass G R, *et al.* Measurement of emissions from air pollution sources. 5. C<sub>1</sub>-C<sub>32</sub> organic compounds from gasoline-powered motor vehicles [J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, **36**(6): 1169-1180.
- [33] Sandradewi J, Prévôt A S H, Weingartner E, *et al.* A study of wood burning and traffic aerosols in an Alpine valley using a multi-wavelength Aethalometer [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(1): 101-112.
- [34] 薛凡利, 牛红亚, 武振晓, 等. 邯郸市 PM<sub>2.5</sub> 中碳组分的污染特征及来源分析[J]. *中国环境科学*, 2020, **40**(5): 1885-1894.  
Xue F L, Niu H Y, Wu Z X, *et al.* Pollution characteristics and sources of carbon components in PM<sub>2.5</sub> in Handan City [J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(5): 1885-1894.
- [35] 武高峰, 王丽丽, 武志宏, 等. 石家庄市采暖季 PM<sub>2.5</sub> 碳组分昼夜污染特征及来源分析[J]. *环境科学学报*, 2020, **40**(7): 2356-2364.  
Wu G F, Wang L L, Wu Z H, *et al.* Pollution diurnal variation and source analysis of PM<sub>2.5</sub> carbon components in heating season in Shijiazhuang City [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, **40**(7): 2356-2364.
- [36] Qi M X, Jiang L, Liu Y X, *et al.* Analysis of the characteristics and sources of carbonaceous aerosols in PM<sub>2.5</sub> in the Beijing, Tianjin, and Langfang region, China [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2018, **15**(7), doi: 10.3390/ijerph15071483.
- [37] 王果, 迪丽努尔·塔力甫, 买里克扎提·买合木提, 等. 乌鲁木齐市 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>2.5-10</sub> 中碳组分季节性变化特征[J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(2): 356-362.  
Wang G, Dilnur T, Mailikezhati M, *et al.* Seasonal changes of carbonaceous species in PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>2.5-10</sub> in Urumqi [J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(2): 356-362.
- [38] Castro L M, Pio C A, Harrison R M, *et al.* Carbonaceous aerosol in urban and rural European atmospheres: estimation of secondary organic carbon concentrations [J]. *Atmospheric Environment*, 1999, **33**(17): 2771-2781.
- [39] 叶文媛, 吴琳, 冯银厂, 等. 大气中二次有机气溶胶估算方法研究进展[J]. *安全与环境学报*, 2011, **11**(1): 127-131.  
Ye W Y, Wu L, Feng Y C, *et al.* Advances in the estimation methods of secondary organic aerosol in atmospheric environment [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2011, **11**(1): 127-131.
- [40] 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.
- [41] 时宗波, 贺克斌, 陈雁菊, 等. 雾过程对北京市大气颗粒物理化特征的影响[J]. *环境科学*, 2008, **29**(3): 551-556.  
Shi Z B, He K B, Chen Y J, *et al.* Influence of fog processes on characteristics of individual particles in the urban atmosphere of Beijing [J]. *Environmental Science*, 2008, **29**(3): 551-556.
- [42] Duan J C, Tan J H, Cheng D X, *et al.* Sources and characteristics of carbonaceous aerosol in two largest cities in Pearl River Delta Region, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(14): 2895-2903.
- [43] 董群, 赵普生, 陈一娜. 降雨对不同粒径气溶胶粒子碰撞清除能力[J]. *环境科学*, 2016, **37**(10): 3686-3692.  
Dong Q, Zhao P S, Chen Y N. Impact of collision removal of rainfall on aerosol particles of different sizes [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(10): 3686-3692.
- [44] 尚可, 杨晓亮, 张叶, 等. 河北省边界层气象要素与 PM<sub>2.5</sub> 关系的统计特征[J]. *环境科学研究*, 2016, **29**(3): 323-333.  
Shang K, Yang X L, Zhang Ye, *et al.* Statistical analysis of the relationship between meteorological factors and PM<sub>2.5</sub> in the boundary layer over Hebei Province [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2016, **29**(3): 323-333.
- [45] 郑晓霞, 赵文吉, 晏星, 等. 降雨过程后北京城区 PM<sub>2.5</sub> 日时空变化研究[J]. *生态环境学报*, 2014, **23**(5): 797-805.  
Zheng X X, Zhao W J, Yan X, *et al.* Spatial and temporal variation of PM<sub>2.5</sub> in Beijing city after rain [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, **23**(5): 797-805.
- [46] 林佳梅, 易辉, 佟磊, 等. 气团来源对沿海城市 PM<sub>2.5</sub> 中二次水溶性无机离子形成特征的影响研究[J]. *生态环境学报*, 2019, **28**(4): 795-802.  
Lin J M, Yi H, Tong L, *et al.* Study on the influence of air masses on secondary water-soluble inorganic ions in PM<sub>2.5</sub> in a coastal city [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, **28**(4): 795-802.
- [47] Watson J G, Chow J C, Lowenthal D H, *et al.* Differences in the carbon composition of source profiles for diesel- and gasoline-powered vehicles [J]. *Atmospheric Environment*, 1994, **28**(15): 2493-2505.
- [48] 林孜, 姬亚芹, 林宇, 等. 鞍山市道路扬尘碳组分特征及来源解析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(9): 3918-3923.  
Lin Z, Ji Y Q, Lin Y, *et al.* Characteristics and source apportionment of carbon components in road dust in Anshan [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(9): 3918-3923.

## CONTENTS

Disinfection By-products in Drinking Water and Their Control Strategies; A Review .....	CHU Wen-hai, XIAO Rong, DING Shun-ke, <i>et al.</i>	(5059)
Advances in Mechanism and Influencing Factors Affecting Hydrogen Sulfide Adsorption by Biochar .....	XU Qi-yong, LIANG Ming-shen, XU Wen-jun, <i>et al.</i>	(5086)
Effect of Vegetation Coverage on the Temporal and Spatial Distribution of PM <sub>2.5</sub> Concentration in China's Eight Major Economic Regions from 1998 to 2016 .....	YANG Yu-lian, YANG Kun, LUO Yi, <i>et al.</i>	(5100)
Evolution and Potential Source Apportionment of Atmospheric Pollutants of Two Heavy Haze Episodes During the COVID-19 Lockdown in Beijing, China .....	ZHAO De-long, TIAN Ping, ZHOU Wei, <i>et al.</i>	(5109)
Characteristics and Origin Analysis of Air Pollution During the Spring Festival in Linfen, Fenwei Plain .....	LIU Wei-jie, HU Tian-peng, MAO Yao, <i>et al.</i>	(5122)
Spatio-Temporal Characteristics and Potential Source Areas of Seasonal Atmospheric Pollution in Shijiazhuang .....	NIE Sai-sai, WANG Shuai, CUI Jian-sheng, <i>et al.</i>	(5131)
Impact of Air Humidity on PM <sub>2.5</sub> Mass Concentration and Visibility During Winter in Tianjin .....	DING Jing, TANG Ying-xiao, HAO Tian-yi, <i>et al.</i>	(5143)
Seasonal Variation and Source Apportionment of Carbonaceous Species in PM <sub>2.5</sub> in Chengde .....	HE Bo-wen, NIE Sai-sai, WANG Shuai, <i>et al.</i>	(5152)
Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission Inventory from Domestic Sources in China .....	LIANG Xiao-ming, CHEN Lai-guo, SHEN Guo-feng, <i>et al.</i>	(5162)
Characteristics of Industrial Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission in China from 2011 to 2019 .....	LIU Rui-yuan, ZHONG Mei-fang, ZHAO Xiao-ya, <i>et al.</i>	(5169)
VOCs Emission Inventory and Uncertainty Analysis of Industry in Qingdao Based on Latin Hypercube Sampling and Monte Carlo Method .....	XU Wan-ying, FU Fei, LÜ Jian-hua, <i>et al.</i>	(5180)
Emission Characteristics and Environment Impacts of VOCs from Typical Rubber Manufacture .....	WANG Hai-lin, XIN Guo-xing, ZHU Li-min, <i>et al.</i>	(5193)
Pollution Characteristics and Ozone Formation Potential of Ambient VOCs in Different Functional Zones of Shenyang, China .....	KU Ying-ying, REN Wan-hui, SU Cong-cong, <i>et al.</i>	(5201)
Characteristics of BTEX and Health Risk Assessment During Typical Pollution Episodes in Summer and Winter in Tianjin Urban Area .....	HAN Ting-ting, LI Ying-ruo, PU Wei-wei, <i>et al.</i>	(5210)
Atmospheric NH <sub>3</sub> Emission Inventory and Analysis of the Driving Force in Zhengzhou City .....	JI Yao, WANG Chen, LU Xuan, <i>et al.</i>	(5220)
Interactive Effects of the Influencing Factors on the Changes of O <sub>3</sub> Concentrations Based on GAMs Model in Chengdu .....	ZHANG Ying, NI Chang-jian, FENG Xin-yuan, <i>et al.</i>	(5228)
Spatial Variation Characteristics and Remote Sensing Retrieval of Total Suspended Matter in Surface Water of the Yangtze River .....	LI Jian-hong, HUANG Chang-chun, ZHA Yong, <i>et al.</i>	(5239)
Spatial Distribution Characteristics of the Spectrum, Source Analysis, and Nitrogen Response of Dissolved Organic Matter in Summer Rainfall in the Hebei Province .....	ZHANG Zi-wei, ZHOU Shi-lei, CHEN Zhao-ying, <i>et al.</i>	(5250)
Distribution and Influencing Factors of DOM Components in Urban and Suburban Polluted Rivers .....	ZHU Yi, CHEN Hao, DING Guo-ping, <i>et al.</i>	(5264)
Composition and Distribution of Microplastics in the Water and Sediments of Urban Rivers in Beijing .....	HU Jia-min, ZUO Jian-e, LI Di, <i>et al.</i>	(5275)
Nontarget Screening and Ecological Risk Assessment of Polar Organic Pollutants in Surface Water on the West Bank of Taihu Lake .....	LU Xin-yan, WANG Fei, ZHANG Li-min, <i>et al.</i>	(5284)
Optimization of Extraction Methods and Distribution Characteristics of Antibiotics and Metabolites in Sediments of a River Water-Groundwater Interaction Zone .....	LI Yu-qiong, TONG Lei, YAN Han, <i>et al.</i>	(5294)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediments of Desilting Demonstration Area in Baiyangdian Lake .....	WANG Tong-fei, ZHANG Wei-jun, LI Li-qing, <i>et al.</i>	(5303)
Dynamic Mechanisms of Groundwater Quality by Residual Contaminants of the Tanghe Wastewater Reservoir in Xiong'an New Area .....	ZHANG Zhi-xiong, WANG Shi-qin, ZHANG Yi-zhang, <i>et al.</i>	(5312)
Analysis and Prediction of Health Risk from Heavy Metals in Drinking Water Sources Based on Time Series Model .....	JI Chao, HOU Da-wei, XIE Li, <i>et al.</i>	(5322)
Spatial Distribution, Risk, and Influencing Factors of River Water-Sediment Heavy Metals in the Lower Reaches of the Qianhe River .....	GAO Yu, WANG Guo-lan, JIN Zi-han, <i>et al.</i>	(5333)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of Dissolved Heavy Metals in Chaohu Lake Basin During the Wet Season .....	HE Miao, LIU Gui-jian, WU Lei, <i>et al.</i>	(5346)
Impact of Enclosure Culture on Heavy Metal Content in Surface Sediments of Hongze Lake and Ecological Risk Assessment .....	ZI Xin-yuan, ZHANG Ming, GU Xiao-hong, <i>et al.</i>	(5355)
Natural Water Chemistry Change in the Surface Water of Chengdu and Impact Factors .....	XU Qiu-jin, LAI Cheng-yue, DING Yao, <i>et al.</i>	(5364)
Hydrochemical Characteristics and Controlling Factors of Groundwater in the Leizhou Peninsula .....	PENG Hong-xia, HOU Qing-qin, ZENG Min, <i>et al.</i>	(5375)
Land-based Nitrogen Pollution Source Structure and Spatial Distribution in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area .....	DONG Si-qi, HUANG Chong, <i>et al.</i>	(5384)
Output Characteristics of Nitrogen and Phosphorus from Non-Point Source Pollution of Typical Land Use in a Micro-Watershed in Hilly Red Soil Region .....	FANG Zhi-da, SU Jing-jun, ZHAO Hong-tao, <i>et al.</i>	(5394)
Effects of Different Fertilization Patterns on Nitrogen Leaching Loss from Paddy Fields Under Reduced Nitrogen .....	JIANG Hai-bin, ZHANG Ke-qiang, ZOU Hong-tao, <i>et al.</i>	(5405)
Effects of <i>Spartina alterniflora</i> Invasion on Soil Phosphorus Forms in the Jiaozhou Bay Wetland .....	SHA Meng-qiao, CHAI Na, ZHAO Hong-tao, <i>et al.</i>	(5414)
Contrasting Analysis of Microbial Community Composition in the Water and Sediments of the North Canal Based on 16S rRNA High-Throughput Sequencing .....	PENG Ke, DONG Zhi, DI Yan-ming, <i>et al.</i>	(5424)
Characteristics of Phosphorus Adsorption in Aqueous Solution by Si-modified Peanut Shell Biochar .....	ZHAO Min, ZHANG Xiao-ping, WANG Liang-rong, <i>et al.</i>	(5433)
Adsorption Characteristics of Pb(II) on Eucalyptus Biochar Modified by Potassium Permanganate .....	MO Zhen-lin, ZENG Hong-hu, LIN Hua, <i>et al.</i>	(5440)
Preparation of Mixed Metal Oxide/Carbon Composites and Its Adsorption Performance for Pb(II) .....	LU Yu-shen, ZONG Li, YU Hui, <i>et al.</i>	(5450)
Fabrication of Supported Titanium Xerogel Adsorbent and Performance Evaluation for Arsenite Removal .....	SUN Ye-yang, ZHOU Chang, GAN Yong-hai, <i>et al.</i>	(5460)
Nitrite Regulation During Start-up of Combined Partial Nitrification and ANAMMOX Process .....	ZUO Fu-min, ZHENG Rui, SUI Qian-wen, <i>et al.</i>	(5472)
Effects of Biochar and Straw Return on Soil Aggregate and Organic Carbon on Purple Soil Dry Slope Land .....	DENG Hua, GAO Ming, LONG Yi, <i>et al.</i>	(5481)
Response of Soil Organic Carbon Content in Different Slope Positions to Fertilization Management in Purple Soil Sloping Fields .....	XU Man, YU Luo, WANG Fu-hua, <i>et al.</i>	(5491)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in the Eastern Mountainous Area of the Nanyang Basin .....	LAI Shu-ya, DONG Qiu-yao, SONG Chao, <i>et al.</i>	(5500)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Suburban Farmland Soil .....	ZHANG Xiu-xiu, LU Xiao-li, WEI Yu-chen, <i>et al.</i>	(5510)
Accumulation Characteristics and Dietary Exposure Estimation of Heavy Metals in Vegetables from the Eastern Coastal Region of China .....	SUN Shuai, GENG Ning-bo, GUO Cui-cui, <i>et al.</i>	(5519)
Security Risk and Influencing Factors of Agro-Products in Farmland Soil Around a Typical Mining Smelter .....	HUO Yan-hui, WANG Mei-e, XIE Tian, <i>et al.</i>	(5526)
Cd Pollution and Safe Planting Zoning in Paddy Soils: A Case Study in a District of Chongqing .....	CAO Shu-zhen, MU Yue, CUI Jing-xin, <i>et al.</i>	(5535)
Characteristics and Influencing Factors of Cadmium Accumulation in Different Rice Varieties Under Cadmium Contaminated Field Conditions .....	WANG Yu-hao, YANG Li, KANG Yu-chen, <i>et al.</i>	(5545)
Effects of Nano-membrane on Aerobic Composting Process and Odor Emission of Livestock Manure .....	LI Yong-shuang, SUN Bo, CHEN Ju-hong, <i>et al.</i>	(5554)