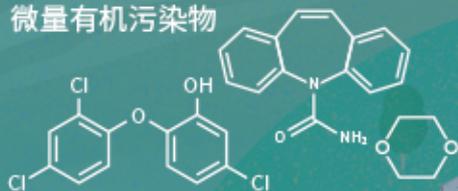


城市污水再生处理中微量有机污染物控制的关键难题与解决思路

王文龙, 吴乾元, 杜焯, 黄南, 陆韻, 魏东斌, 胡洪营

微量有机污染物



深度处理

- 污染物非靶向筛查
- 新型处理技术开发
- 处理效率替代性指标
- 工艺运行指南与排放标准

污水处理厂

深度处理

污水再生利用

湖泊湿地等

景观娱乐用水

污水达标排放

下游城市河湖

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年6月

第42卷 第6期

Vol.42 No.6

目次

综述与专论

城市环境生物安全研究的进展与挑战 苏建强, 安新丽, 胡安谊, 朱永官 (2565)
 城市污水再生处理中微量有机污染物控制的关键难题与解决思路 王文龙, 吴乾元, 杜焯, 黄南, 陆韻, 魏东斌, 胡洪莹 (2573)
 污泥 EPS 作为阻燃剂的机制归纳与潜力分析 郝晓地, 赵梓丞, 李季, 时琛, 吴远远 (2583)

研究报告

北京大气 PM_{2.5} 载体金属浓度、来源及健康风险的城郊差异 周安琪, 刘建伟, 周旭, 毕思琪, 张博哈, 高越, 曹红斌 (2595)
 京津冀及周边 MAIAC AOD 和 PM_{2.5} 质量浓度特征及相关性分析 金国因, 杨兴川, 晏星, 赵文吉 (2604)
 天津市 PM_{2.5} 中二次硝酸盐形成及防控 肖致美, 武婷, 卫昱婷, 徐虹, 李立伟, 李鹏, 陈魁, 邓小文 (2616)
 南京市大气细颗粒物 (PM_{2.5}) 中硝基多环芳烃污染特征与风险评估 傅银银, 文浩哲, 王向华, 于南洋, 李冰, 韦斯 (2626)
 汾渭平原吸收性气溶胶时空演化及潜在源区分析 刘旻霞, 李亮, 于瑞新, 宋佳颖, 张国娟, 穆若兰, 徐璐 (2634)
 西南典型区域夏季大气含氧挥发性有机化合物来源解析
 陈木兰, 王赛男, 陈天舒, 朱波, 彭超, 周佳维, 车汉雄, 黄汝辉, 杨复沫, 刘合凡, 谭钦文, 韩丽, 陈军辉, 陆克定, 陈阳 (2648)
 气溶胶中溶解性有机质 (DOM) 液相氧化 陶冶, 陈彦彤, 李楠旺, 张敬宇, 叶招莲, 盖鑫磊 (2659)
 基于 MERRA-2 再分析资料的上海市近 40 年大气黑碳浓度变化及潜在来源解析
 曹闪闪, 段玉森, 高婵婵, 苏玲, 杨怡萱, 张洋, 蔡超琳, 刘敏 (2668)
 石家庄市臭氧和二氧化氮的时空演替特征及来源解析 王帅, 聂赛赛, 冯亚平, 崔建升, 陈静, 刘大喜, 石文雅 (2679)
 基于光化学指数的邯郸市臭氧生成敏感性 牛元, 程水源, 欧盛菊, 姚诗音, 沈泽亚, 关攀博 (2691)
 基于 Landsat 数据的关中盆地腹地 AOD 时空格局及城市化对其影响 郑玉蓉, 王旭红, 张秀, 胡贵贵, 梁秀娟, 牛林芝, 韩海青 (2699)
 基于卫星遥感和地面观测的人为源 VOCs 区域清单多维校验 王玥, 魏巍, 任云婷, 王晓琦, 陈赛赛, 程水源 (2713)
 中原城市群国家干线公路 SOA 生成潜势估算 王娜萍, 李海萍, 张帆 (2721)
 北京市“大气十条”实施的空气质量改善效益 卢亚灵, 范朝阳, 蒋洪强, 牛传真, 李勃 (2730)
 工业大气污染源排放绩效定量评价及应用 李廷昆, 冯银厂, 吴建会, 毕晓辉, 张裕芬 (2740)
 基于生态风险的我国水环境高风险抗生素筛选排序 周力, 刘珊, 郭家骅, 李琦 (2748)
 基于 RDA-REM 模型的我国再生水开发利用潜力 郑锦涛, 马涛, 刘九夫, 彭安帮, 邓晰元, 郑皓 (2758)
 基于模型研究质量评价的 SWAT 模型参数取值特征分析 荣易, 秦成新, 杜鹏飞, 孙博 (2769)
 大型浅水湖泊水质模型边界负荷敏感性分析 王亚宁, 李一平, 程月, 唐春燕, 陈刚 (2778)
 不同流域水陆过渡带磷有效态的特征对比及环境意义 朱海, 袁旭音, 叶宏萌, 成瑾, 毛志强, 韩年, 周慧华 (2787)
 基于不同赋权方法的北运河上游潜在非点源污染风险时空变化特征分析
 李华林, 张建军, 张耀方, 常国梁, 时迪迪, 徐文静, 宋卓远, 于佩丹, 张守红 (2796)
 长期施肥和耕作下紫色土坡耕地径流 TN 和 TP 流失特征 吴小雨, 李天阳, 何丙辉 (2810)
 渭河和泾河流域浅层地下水水化学特征和控制因素 刘鑫, 向伟, 司炳成 (2817)
 太湖流域上游南苕溪水夏季水体溶存二氧化碳和甲烷浓度特征及影响因素
 梁佳辉, 田琳琳, 周钟昱, 张海阔, 张方方, 何圣嘉, 蔡延江 (2826)
 低温期浅水湖泊氮的分布及无机氮扩散通量: 以白洋淀为例 文艳, 单保庆, 张文强 (2839)
 覆盖条件下底泥微环境对内源磷释放的影响 陈姝彤, 李大鹏, 徐楚天, 张帅, 丁玉琴, 孙培荣, 黄勇 (2848)
 圩区河道底泥腐殖酸对重金属和抗生素的共吸附 薛向东, 杨宸豪, 于荐麟, 庄海峰, 方程冉 (2856)
 两种 PPCPs 对雅鲁藏布江沉积物硝化作用的影响 凌欣, 徐慧平, 陆光华 (2868)
 铁碳微电解及沸石组合人工湿地的废水处理效果 赵仲婧, 郝庆菊, 张尧钰, 熊维霞, 曾唯, 陈俊江, 江长胜 (2875)
 CDs-BOC 复合催化剂可见光下活化过硫酸盐降解典型 PPCPs 雷倩, 许路, 艾伟, 李志敏, 杨磊 (2885)
 pg-C₃N₄/BiOBr/Ag 复合材料的制备及其光催化降解磺胺甲噁唑 杨利伟, 刘丽君, 夏训峰, 朱建超, 高生旺, 王洪良, 王书平 (2896)
 海藻酸钠负载硫化零价铁对水体中 Cr(VI) 的还原去除 王旭, 杨欣楠, 黄币娟, 刘壮, 牟诗萌, 程敏, 谢燕华 (2908)
 超顺磁性纳米 Fe₃O₄@SiO₂ 功能化材料对镉的吸附机制 张立志, 易平, 方丹丹, 王强 (2917)
 典型药物在医院废水和城市污水处理厂中的污染特征及去除情况 叶璞, 游文丹, 杨滨, 陈阳, 汪立高, 赵建亮, 应光国 (2928)
 印染废水循环利用抗生素抗性基因丰度变化特性 徐瑶瑶, 王锐, 金鑫, 石炬, 王岩, 金鹏康 (2937)
 短程硝化反硝化除磷颗粒污泥的同步驯化 王文琪, 李冬, 高鑫, 刘博, 张杰 (2946)
 厌氧氨氧化颗粒污泥的长期保藏及快速活性恢复 李冬, 刘名扬, 张杰, 曾辉平 (2957)
 市政污泥热解过程中重金属迁移特性及环境效应评估 姜媛媛, 王彦, 段文焱, 左宁, 陈芳媛 (2966)
 不同作物农田土壤抗生素抗性基因多样性 黄福义, 周曙仝, 王佳妮, 苏建强, 李虎 (2975)
 宁夏养牛场粪污和周边土壤中抗生素及抗生素抗性基因分布特征 张俊华, 陈睿华, 刘吉利, 尚天浩, 沈聪 (2981)
 温度和搅拌对牛粪厌氧消化系统抗生素抗性基因变化和微生物群落的影响
 许继飞, 张秋萍, 朱天骄, 秦帅, 朱文博, 庞小可, 赵吉 (2992)
 小麦秸秆生物质炭施用对不同耕作措施土壤碳含量变化的影响 刘振杰, 李鹏飞, 黄世威, 金相乐, 张阿凤 (3000)
 农牧交错带典型区土壤氮磷空间分布特征及其影响因素 张燕江, 王俊鹏, 王瑜, 张兴昌, 甄庆, 李鹏飞 (3010)
 汞矿区周边土壤重金属空间分布特征、污染与生态风险评价 王锐, 邓海, 贾中民, 王佳彬, 余飞, 曾琴琴 (3018)
 调理剂对磷镉富集土壤中两种元素交互作用的影响 黄洋, 胡学玉, 曹坤坤, 张敏, 胡晓晓, 王子劲 (3028)
 S-烯丙基-L-半胱氨酸缓解水稻种子幼根和幼芽镉胁迫机制 程六龙, 黄永春, 王常荣, 刘仲齐, 黄益宗, 张长波, 王晓丽 (3037)
 连续 4 个生长季大气 CO₂ 升高与土壤铅 (Pb) 污染耦合下刺槐幼苗根际土壤微生物特征
 贾夏, Lkhagvajargal Khadkhurel, 赵永华, 张春燕, 张宁静, 高云峰, 王子威 (3046)
 嗜热脂肪地芽孢杆菌对聚苯乙烯的降解性能 邢睿智, 赵子强, 赵文琪, 陈志, 陈金凤, 周顺桂 (3056)
 冬青和女贞叶表面颗粒物微形态及叶际细菌群落结构 李慧娟, 徐爱玲, 乔凤祿, 蒋敏, 宋琪 (3063)
 罗红霉素对大型溛生殖生长及抗氧化系统的影响 张凌玉, 刘建超, 冷阳, 陆光华 (3074)
 中国粮食作物产量和木本植物生物量与地表臭氧污染响应关系 冯兆忠, 彭金龙 (3084)
 《环境科学》征订启事 (2698) 《环境科学》征稿简则 (2712) 信息 (3027, 3055, 3073)

基于 MERRA-2 再分析资料的上海市近 40 年大气黑碳浓度变化及潜在来源解析

曹闪闪¹, 段玉森², 高婵婵¹, 苏玲¹, 杨怡萱¹, 张洋¹, 蔡超琳¹, 刘敏^{1,3,*}

(1. 华东师范大学生态与环境科学学院, 上海市城市化生态过程与生态恢复重点实验室, 上海 200241; 2. 上海市环境监测中心, 上海 200235; 3. 崇明生态研究院, 上海 200241)

摘要: 黑碳(black carbon, BC)作为大气气溶胶的重要组成部分,因其粒径小、比表面积大和辐射强迫等,对区域和全球辐射平衡、气候和人体健康产生巨大影响.以高度城市化的上海市为研究区域,基于 MERRA-2 再分析数据资料和地面观测数据,利用 M-K 趋势检验、后向轨迹和潜在源贡献函数(potential source contribution function, PSCF)探究了上海市 1980~2019 年大气 BC 浓度的时空变化特征及局地排放和区域传输的影响.结果表明:①MERRA-2 大气 BC 浓度和地面观测数据具有较好的趋势一致性($R \in [0.68, 0.72]$),表明 MERRA-2 再分析资料可以用来有效揭示地面大气 BC 浓度的长期变化.②上海近 40 年大气 BC 浓度可分为 3 个阶段:缓慢增长的“低值”阶段[1980~1986 年, $(1.75 \pm 0.17) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$],相对稳定的“中值”阶段[1987~1999 年, $(2.18 \pm 0.07) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]和波动变化的“高值”阶段[2000~2019 年, $(3.07 \pm 0.31) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$];就季节变化而言,上海 BC 浓度总体呈夏季浓度低,冬季浓度高的“U”型模式;受水运货轮船舶柴油机等发动机黑碳排放的影响,7 月出现 BC 浓度小高峰.③大气污染物诊断质量比及双变量相关分析[$R(\text{BC}-\text{NO}_2) > R(\text{BC}-\text{CO}) > R(\text{BC}-\text{SO}_2)$]表明,交通排放是上海大气 BC 的主要排放源,尤其是重型柴油车的影响.④后向轨迹和 PSCF 分析发现上海夏季气团以清洁海风为主导,占 77.18%;其他季节来自北方的气团超过 50%.上海大气 BC 潜在源区主要分布在中国东部地区,以长三角为中心向外扩张,且扩张方向与后向轨迹方向一致.

关键词: 大气黑碳; 上海; 地面观测; MERRA-2; 潜在源区

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)06-2668-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202009217

Changes and Potential Sources of Atmospheric Black Carbon Concentration in Shanghai over the Past 40 Years Based on MERRA-2 Reanalysis Data

CAO Shan-shan¹, DUAN Yu-sen², GAO Chan-chan¹, SU Ling¹, YANG Yi-xuan¹, ZHANG Yang¹, CAI Chao-lin¹, LIU Min^{1,3,*}

(1. Shanghai Key Laboratory for Urban Ecological Processes and Eco-restoration, School of Ecological and Environmental Sciences, East China Normal University, Shanghai 200241, China; 2. Shanghai Environmental Monitoring Center, Shanghai 200235, China; 3. Institute of Eco-Chongming, Shanghai 200241, China)

Abstract: As an important component of atmospheric aerosols, black carbon (BC) has a great influence on the regional and global radiation balance, climate, and human health due to its small particle size, large specific surface area, and radiative forcing potential. Here, the spatio-temporal characteristics of atmospheric BC were investigated based on modern-era retrospective analysis for research and applications version 2 (MERRA-2) reanalysis data and ground observation data during 1980-2019 in Shanghai, a highly urbanized city in mainland China. The influences of local emissions and regional transmission on regional-scale BC concentrations were examined using the M-K trend test, backward trajectory analysis, and the potential source contribution function (PSCF). The results showed that: ① MERRA-2 BC and ground observation datasets showed good consistency ($R \in [0.68, 0.72]$), indicating that MERRA-2 reanalysis data can be used to reveal long-term changes in ground-level atmospheric BC concentrations; ② Atmospheric BC concentrations in Shanghai over the past 40 years can be divided into three stages: a “low value” stage of slow growth [1980-1986, $(1.75 \pm 0.17) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$], a relatively stable “median value” stage [1987-1999, $(2.18 \pm 0.07) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$], and a fluctuating “high value” stage [2000-2019, $(3.07 \pm 0.31) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]. Seasonally, Shanghai’s BC concentrations generally show a “U” pattern with low concentrations in summer and high concentrations in winter. As a result of black carbon emissions from marine diesel engines and other engines used for water transportation, a small peak also occurs in July; ③ The diagnostic quality ratio of air pollutants and the bivariate correlation analysis [$R(\text{BC}-\text{NO}_2) > R(\text{BC}-\text{CO}) > R(\text{BC}-\text{SO}_2)$] indicated that traffic emissions were the main sources of atmospheric BC in Shanghai, especially by heavy diesel vehicles; ④ The backward trajectory and PSCF analyses found that the air mass of Shanghai in summer was dominated by a clean sea breeze, accounting for 77.18%. In contrast, during the other seasons, more than 50% of the air mass came from the north. The potential source regions of atmospheric BC in Shanghai are mainly distributed in eastern China, expanding outwards and centering on the Yangtze River Delta, and the expansion direction is consistent with the directions of the

收稿日期: 2020-09-22; 修订日期: 2020-11-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(41977399); 国家重点研发计划项目(2016YFC0208700, 2016YFC0500204)

作者简介: 曹闪闪(1995~),女,硕士,主要研究方向为全球变化与大气环境,E-mail:yiyicao1111@163.com

* 通信作者,E-mail:mliu@re.ecnu.edu.cn

backward trajectories.

Key words: atmospheric black carbon; Shanghai; ground observation; MERRA-2; potential source regions

由于经济的快速发展,空气污染已成为当今突出的环境问题,细颗粒物($PM_{2.5}$)被认为是最重要的污染物之一^[1].黑碳(black carbon, BC)作为大气颗粒物的重要组成成分,是化石燃料、生物燃料和生物质不完全燃烧或热解的产物^[2,3].大气中的 BC 能直接吸收和散射太阳辐射,影响冰雪和云反照率,进而影响区域和全球辐射平衡和气候^[4].在直接辐射强迫方面,BC 高于 CH_4 强度,是继 CO_2 后全球变暖的第二重要因素^[5,6].相对于可在大气中停留时间几年甚至上百年的 CO_2 、 CH_4 等温室气体(GHG),BC 在大气中的留存时间为数日或几周^[7],可产生区域增温效应.另一方面,BC 呈现出高比表面积的无序石墨环微晶结构^[8],能够吸附大量挥发性有机物(VOCs)和多环芳烃(PAHs)等致癌物质^[9,10];且粒径在 $0.01 \sim 1 \mu m$ 间,极易渗入人体呼吸系统,从而引发哮喘、癌症和心血管病等疾病,危害人体健康^[11].Rosa 等^[12]的研究表明,BC 很可能是大气颗粒物中对肺部毒性作用的主要成分.由于 BC 对环境和人类健康的双重影响,大气 BC 浓度时空污染特征及其来源解析得到了广泛关注.

目前获取大气 BC 浓度的方法主要有地面监测、数值模拟和遥感再分析资料 3 种.地面监测主要基于光学吸收的黑碳仪或热分析方法分析样品中的碳含量,进而得到近地面的大气 BC 浓度,包括固定站点监测和移动样带监测^[13].数值模拟基于大气化学传输模式,考虑大气污染物排放来源、下垫面分布和水平输送条件等,定量描述大气污染物在大气中的扩散、传输和转化^[14,15].卫星监测通过遥感技术获取的气溶胶光学厚度(AOD)产品进而反演出 BC 组分的浓度.需要指出的是,大气 BC 浓度的地面监测受到仪器、站点空间代表性以及人工操作的限制,监测范围较小.卫星监测虽可大面积观测,但是极易受天气影响,可能会遗漏、高估或低估参数.为了弥补两者的不足,将不同类型和来源的数据同短期天气预报产品相集成的再分析数据逐渐被运用.现代研究和应用回顾分析第 2 版(modern-era retrospective analysis for research and applications, version 2, MERRA-2)是美国宇航局全球建模与同化办公室(global modeling and assimilation office, GMAO)于 2017 年发布的一项再分析数据,是一套长时间序列大气再分析资料集,包含了 1980 年以来的大气 BC 产品.Xu 等^[16]利用 MERRA-2 BC 数据研究了 2000 ~ 2016 年中国东部地区大气柱和地表

BC 浓度变化,发现年均值最高和年增长速度最快的区域均出现在京津冀地区和河南地区.Qin 等^[17]根据 MERRA-2 BC 浓度的历史趋势和典型化石燃料消耗量,表明煤和焦炭不再是影响 BC 浓度的主要因素,而汽油、煤油和柴油等液体燃料可能是近年来北京市 BC 污染的重要原因.

BC 主要来自生物质和化石燃料的不完全燃烧,包括开放式生物质燃烧、移动/运输源、发电机组和其他发电源,以及住宅供暖^[18,19].大气 BC 浓度的时空变化受到多种因素的共同影响,气象条件、地形特征和区域排放是影响 BC 分布的重要因素.风速、降水、温度、边界层高度和湿度等不同的气象因素会直接或间接影响 BC 的排放去除效率和跨区域输送^[20].一般来说,风速越高、温度越高和相对湿度越低,越有助于提高大气混合层高度和 BC 等大气污染物的扩散^[17].魏夏潞等^[21]在对冬季寿县重污染过程 BC 垂直结构分析中发现,两次重污染过程均起源于地面弱风(风速低于 $3 m \cdot s^{-1}$)和高湿(相对湿度 80% 以上)等不利扩散条件,导致污染物局地积累.南京北郊在霾污染期间 BC 高浓度过程可能与来自观测站偏西部中高空气流的输送以及低层来自北部和东南方向气团的输送有关^[22,23].交通和工业排放是南京北郊 BC 的主要来源,柴油车辆的尾气排放可能要比汽车尾气排放有着更多的贡献,而工业燃煤以及生物质燃烧来源的贡献不显著^[24].受源排放和气象条件(如混合层高度)的影响,北京市 BC 日变化呈双峰型分布^[25].以化石燃料为能源的工业源和交通源对石家庄南郊 BC 的贡献占主导地位,BC 潜在源区主要集中在河北南部、山西中部和河南北部^[26].

我国作为发展中国家,由于经济发展和化石燃料的大量使用使得 BC 排放量逐年递增,约占全球的 25% ~ 30%^[27,28].上海市作为我国的经济中心,其能源消耗量和机动车保有量随着人口密度和城市化率的升高逐年增长,对城市空气质量、气候变化和人体健康产生巨大影响.本文以高度城市化的上海市为研究区域,基于 MERRA-2 再分析数据和地面观测资料探究了上海市 1980 ~ 2019 年大气 BC 浓度的长时间变化趋势.在此基础上,利用大气 BC 浓度与主要大气污染物(CO 、 NO_2 和 SO_2)诊断质量比与双变量相关分析识别上海大气 BC 主要排放源,并采用后向轨迹模型和潜在源贡献函数定量评价局地排放和区域传输对上海大气 BC 浓度的影响,以期有效控制

上海大气污染物的排放、识别上海市的能源消费结构和改善城市空气质量提供参考。

1 材料与方法

1.1 MERRA-2 再分析资料

MERRA-2 数据基于戈达德地球观测系统模型第 5 版 (goddard earth observing system model, version 5, GEOS-5) 及其大气数据同化系统 (data assimilation system, version 5.12.4, ADAS-5.12.4) 对卫星气溶胶 (AOD) 数据集进行同化吸收。同化吸收的 AOD 包括中分辨率成像光谱仪 (MODIS) 的 AOD、超高分辨率辐射计 (AVHRR) 仪器偏差校正的 AOD、多角度成像光谱仪 (MISR) 反演的 AOD 以及地面气溶胶机器人网络 (AERONET) 直接测量的 AOD。另外 MERRA-2 还同化了若干遥感反演数据集以及来自探空仪、飞机等常规观测数据集。MERRA-2 产品包括从地表到 80 km 左右的 72 个垂直层, 涉及到多种预测和诊断领域数据集, 包括云、辐射、水文循环和臭氧, 这些数据集有助于对陆地、海洋的综合分析研究。MERRA-2 提供了 1980 年以来大气 BC 浓度的空间分布, 空间分辨率为 $0.5^\circ \times 0.625^\circ$, 时间分辨率包含 1 h、3 h 和月份这 3 个尺度, 所有产品均可通过美国宇航局地球科学数据网站 (<https://earthdata.nasa.gov/>) 访问下载。

本研究从美国宇航局获取到 BC 数据集 (M2T1NXAER 和 M2TMNXAER) 的脚本文件, 通过命令程序 (Cygwin) 批量下载小时/月的 BC 浓度数据, 数据格式为 NetCDF, 覆盖区域为全球。在 ArcGIS 10.2 完成数据格式转换、批量裁剪和区域统计等操作, 进而获取上海市 1980~2019 年大气 BC 日、月和年尺度平均浓度。

1.2 MERRA-2 的地面验证资料

本研究利用上海市环境监测中心提供的地面大气 BC 浓度观测资料开展 MERRA-2 上海区域大气 BC 的精度验证, 包括上海市浦东新区环境监测中心 ($31^\circ 13' N$, $121^\circ 32' E$, 浦东站) 和青浦区环境监测中心 ($31^\circ 08' N$, $121^\circ 05' E$, 青浦站) 两个监测站点, 数据获取时间为 2016 年 1 月 1 日至 2016 年 12 月 31 日。两个站点均利用黑碳仪 (AE-31, Magee Scientific, USA) 连续测量大气 BC 浓度。AE-31 主要原理是利用 BC 颗粒物对可见光的强吸收特性, 测量滤膜上收集的颗粒对光吸收造成的衰减。AE-31 黑碳仪可获取 370、470、520、590、660、880 和 950 nm 共 7 个波段的 BC 浓度测量数据, 本文选定 880 nm 处测得的 BC 浓度表征为站点观测浓度。仪器采样时间间隔是 5 min, 进气流量是 $5 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 。经过质量控制和统计整合后, 浦东

站和青浦站两站点的有效日均值数据样本分别为 357 和 364。考虑到 MERRA-2 BC 数据的一个网格点足以覆盖观测站点, 故选取地理位置接近观测点的 MERRA-2 网格点日均值数据作为观测的对比值, 进而验证 MERRA-2 大气 BC 产品的适用性和精度。

1.3 其它辅助数据

1.3.1 主要大气污染物浓度数据

BC、CO、NO₂ 和 SO₂ 具有相似的燃烧和排放过程, 且受相同大气传输的影响^[29], 导致 BC 浓度变化与这些大气污染物之间存在较大相关性。一般而言, 相关系数越高, 排放来源相似性就越高^[30,31]。为探究上海市局地排放对 BC 浓度的影响及 BC 与主要大气污染物的同根同源性, 本文开展了 2016~2019 年 MERRA-2 大气 BC 浓度与近地面主要大气污染物浓度 (CO、NO₂ 和 SO₂) 的诊断质量比与相关系数的分析。3 种主要大气污染物数据来源于全国城市空气质量实时发布平台 (<http://106.37.208.233:20035/>), 时间尺度为每小时。其中 CO 是煤和石油等含碳物质不完全燃烧的产物, 主要排放源为汽车废气以及煤和石油燃料燃烧; SO₂ 是化石燃料燃烧排放的产物; 大气污染物 NO_x 主要来源于机动车排放, 可作为交通源的示踪剂。

1.3.2 气象数据资料

为开展上海大气 BC 后向轨迹与潜在源区分析, 本文使用了美国气象环境预报中心 (NCEP) 和美国国家大气研究中心 (NCAR) 联合制作的 NCEP/NCAR 再分析资料。NCEP/NCAR 再分析资料水平分辨率是 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$, 垂直方向从地面到 10 hPa 共 17 层。后向轨迹采用 2016 年的气象数据, 包括: 温度 (0.1 K)、气压 (10 Pa)、相对湿度 (%)、地面降水 ($0.1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$)、纬向风速 ($0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)、经向风速 ($0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 和垂直速度 ($0.001 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$) 等。该数据集从美国国家海洋和大气管理局 (NOAA) 空气研究实验室 (ARL) 的服务器 (<https://ready.arl.noaa.gov/archives.php>) 获取。

1.4 Mann Kendall (M-K) 时间趋势检验分析

本研究利用 M-K 趋势检验法对上海市 1980~2019 年 MERRA-2 大气 BC 浓度数据进行时间变化趋势和可能突变年份分析。M-K 趋势检验法是世界气象组织 (WMO) 推荐并已经广泛应用的一种非参数统计检验方法。非参数检验方法也称为无分布检验, 其优点是不需要样本服从某种分布, 不受少数异常值的干扰, 定量化程度高, 检测范围广, 计算方便。对于样本个数为 n 的时间序列 x , 构造秩序列:

$$s_k = \sum_{i=1}^k r_i \quad (k = 2, 3, \dots, n) \quad (1)$$

式中 r_i 取值如下:

$$r_i = \begin{cases} +1 & x_i > x_j \\ +0 & x_i \leq x_j \end{cases} \quad (j = 1, 2, \dots, i) \quad (2)$$

可见秩序列 s_k 是第 i 时刻数值大于 j 时刻数值个数的累计数. 在时间序列随机独立的假定下定义统计量:

$$UF_k = \frac{|s_k - E(s_k)|}{\sqrt{\text{var}(s_k)}} \quad (k = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

式中, $UF_1 = 0$, $E(s_k)$ 和 $\text{var}(s_k)$ 是 s_k 的均值和方差. 在 x_1, x_2, \dots, x_n 相互独立, 且具有相同连续分布时, 它们可由下式计算:

$$\begin{cases} E(s_k) = \frac{k(k-1)}{4} \\ \text{var}(s_k) = \frac{k(k-1)(2k+5)}{72} \end{cases} \quad (k = 2, 3, \dots, n) \quad (4)$$

UF_k 为标准正态分布, 是按照时间序列 x_1, x_2, \dots, x_n 计算出来的统计量序列. 给定显著性水平 $\alpha = 0.05$, 则 $U_\alpha = \pm 1.96$, 如果 $|UF_k| > |U_\alpha|$, 则否定无趋势的零假设, 表明序列存在明显的趋势变化. 再按照时间逆序 x_n, x_{n-1}, \dots, x_1 , 重复上述过程, 同时使 $UB_k = -UF_k (k = n, n-1, \dots, 1)$, $UB_1 = 0$. 通过分析序列 UF_k 和 UB_k 可进一步分析序列 x 的趋势变化, 而且可以明确突变的时间, 指出突变的区域. 若 $UF_k > 0$, 则表明序列呈上升趋势, $UF_k < 0$, 则表示呈下降趋势; 当 UF_k 超过临界值时, 表明序列上升或下降趋势明显. 如果 UF_k 和 UB_k 两条曲线出现交点, 且交点在临界直线之间, 那么交点对应的时刻就是突变开始的时刻.

1.5 BC 潜在源区分析

1.5.1 后向轨迹模型

轨迹分析通过计算经过研究地点气团的前、后向轨迹, 定性地了解区域输送的潜在来源地. 后向轨迹模型 (hybrid single particle lagrangian integrated trajectory model, HYSPLIT-4, <https://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>) 是由美国国家海洋和大气管理局 (national oceanic and atmospheric administration, NOAA) 和澳大利亚气象局联合开发的基于欧拉和拉格朗日混合型的计算模式. 该模型主要用于计算和分析大气污染物输送以及扩散轨迹^[32]. 主要原理为: 假设污染物气团的移动路径取决于风场, 则气团轨迹为气团在时间和空间上的位置矢量的积分, 其速度矢量为气团在时间和空间上的线性插值. 该模型针对不同污染物排放源有着非常全面系统的输送、扩散和沉降模式, 可处理多种气象要素输入场和不同的物理过程, 已被广泛应用于各项大气污染

物的相关研究中.

为定性了解上海市大气 BC 区域传输的潜在来源区, 本文利用 Meteoinfo 软件中的 trajstat 插件分别对浦东站 2016 年 4 个季节 500 m 高度处的气团轨迹进行前 72 h 后向轨迹模拟. 根据组内轨迹差异较小, 组外差异较大的原则, 将各个季节模拟得到的气团轨迹进行欧拉聚类. 其中轨迹长度代表该气团的传输速度, 轨迹方向即气团运动的方向, 标注则表明轨迹的贡献比例.

1.5.2 潜在源贡献函数 (PSCF) 分析

潜在源贡献函数 (potential source contribution function, PSCF) 是基于条件概率函数发展而来的一种方法, 基于气流轨迹分析识别可能源区^[33]. 首先采用后向轨迹模型 (HYSPLIT) 得到 500 m 高度处前 72 h 的回归轨迹, 利用欧氏距离将所有轨迹进行聚类. 基于气团轨迹进行 PSCF 分析, 得到浦东站 2016 年 4 个季节 BC 的潜在源区. 利用 Meteoinfo 软件中 trajstat 插件将气流轨迹覆盖的地理区域划分为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 的网格, 第 ij 个网格单元的 PSCF 值可以通过以下公式计算:

$$PSCF_{ij} = m_{ij}/n_{ij} \quad (5)$$

式中, n_{ij} 代表落在第 ij 个网格单元的所有轨迹端点数, m_{ij} 代表第 ij 个网格单元内 BC 浓度高于设定阈值 (本文阈值为 2016 年浦东站地面观测的平均浓度, 即 $1.48 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) 的端点数. $PSCF_{ij}$ 值为到达第 ij 个网格单元内的气团中 BC 浓度大于设定阈值的条件概率. $PSCF$ 值越高, 说明到达该网格内的气团污染程度更高, 也就是说这些气团所在网格具有较高的概率成为 BC 的潜在源区.

为了降低由于 n_{ij} 较小导致结果偏大带来的不确定性, 引入一个权重函数 $W \left(\sum n_{ij} \right)$.

$$W_{ij} = \begin{cases} 1 & n_{ij} > 3n_{ave} \\ 0.7 & 1.5n_{ave} < n_{ij} \leq 3n_{ave} \\ 0.42 & n_{ave} < n_{ij} \leq 1.5n_{ave} \\ 0.17 & n_{ij} \leq n_{ave} \end{cases} \quad (6)$$

式中, n_{ave} 为研究区域内的平均轨迹端点数. 此时的 PSCF 值可通过以下公式计算得到:

$$PSCF_{ij} = \frac{m_{ij}}{n_{ij}} W_{ij} \quad (7)$$

2 结果与讨论

2.1 基于地面站点观测数据的 MERRA-2 BC 浓度精度评价

尽管 MERRA-2 通过同化吸收 MODIS Terra 和 Aqua 卫星上经偏差修正的 AOD 以校正总柱气溶胶

质量,但在严重污染期间,硝酸盐气溶胶的缺失无法通过同化卫星 AOD 弥补^[34],所以仍有必要利用站点实测的 AOD 产品验证 MERRA-2 AOD,对其精度进行评价.唐维尧等^[35]通过建立线性回归方程,利用 AERONET AOD 数据对北京以及周围地区的 FY-3A/MERSI AOD 产品精度进行了验证分析.基于已有的研究,本文利用上海市青浦站和浦东站 2016 年地面观测数据,通过建立线性回归模型对 MERRA-2 BC 浓度数据进行精度评价.

结果表明 MERRA-2 BC 浓度数据与青浦站

($R = 0.72$)和浦东站($R = 0.68$)BC 浓度观测数据表现较高的趋势一致性(图 1).两站点 MERRA-2 BC 浓度值大致都在 1:1 线上方,表明 MERRA-2 BC 平均浓度高于站点观测值. Qin 等^[17]对比了北京市 2015 ~ 2016 年 MERRA-2 BC 和各年观测的 12 h 平均数据,2015 年和 2016 年相关系数分别为 0.70 和 0.79,且 MERRA-2 BC 平均浓度比地面 BC 浓度高 101.60%.虽然 MERRA-2 BC 数值偏高,但比卫星数据显示出较好的精度和稳定性^[36].

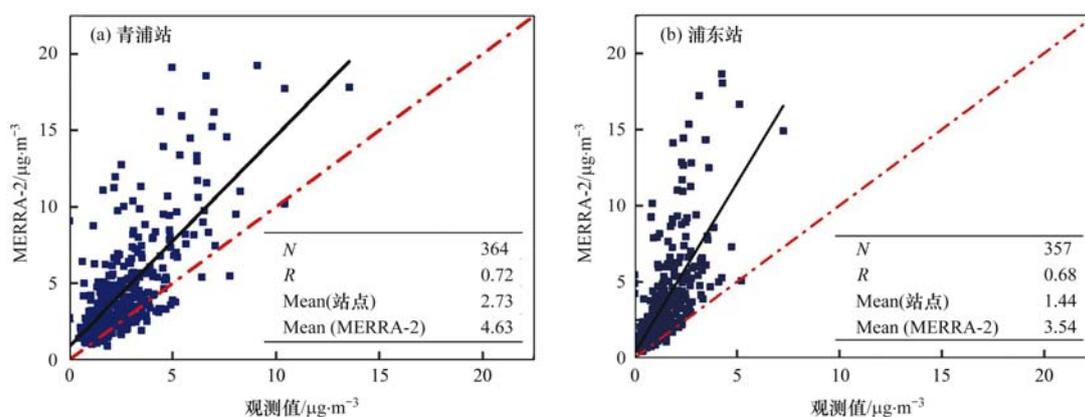


图 1 MERRA-2 与观测站点的 BC 日平均质量浓度散点图

Fig. 1 Scatter plot of BC mean daily mass concentrations observed by MERRA-2 and observation station data

虽然浦东和青浦两站点的地面观测值有所差异,但两站点地面观测数据的变化趋势和 MERRA-2 数据大致相同.需要指出的是 MERRA-2 再分析资料与

站点观测数据的差值在不同季节呈现出较大差异(图 2).青浦站 MERRA-2 与地面观测大气 BC 的差值冬季($2.82 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) > 秋季($1.56 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) > 春季

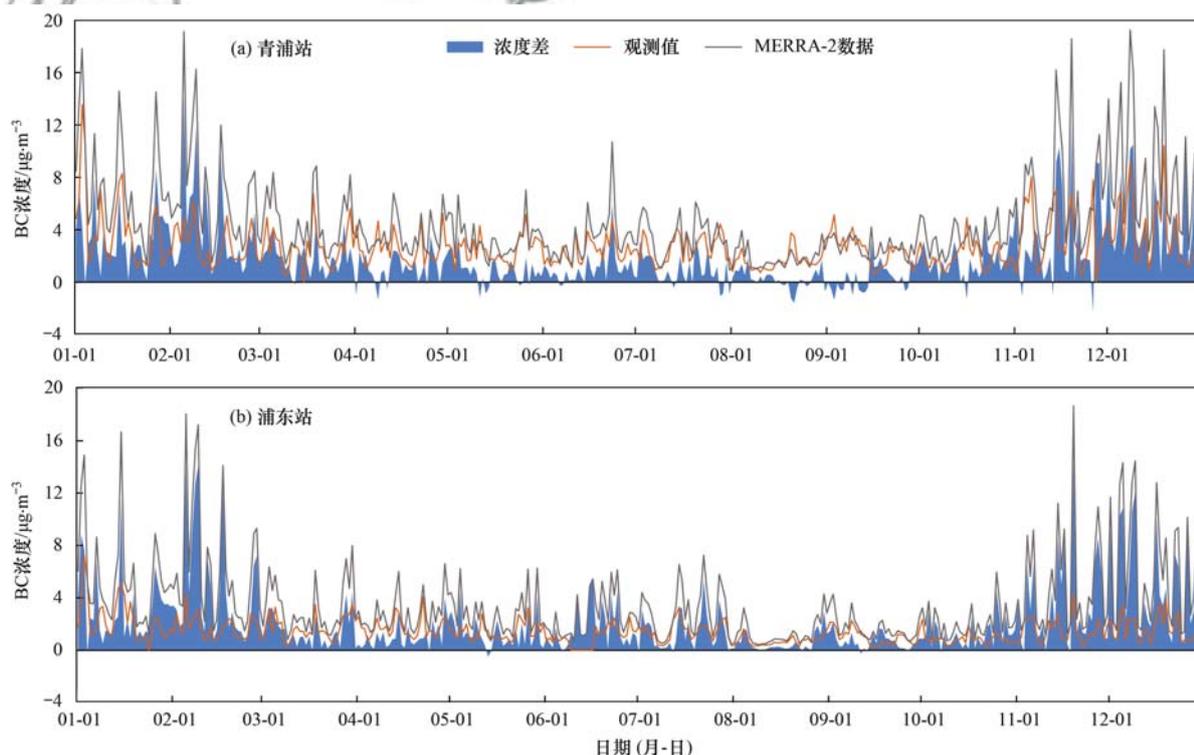


图 2 2016 年上海观测站点与 MERRA-2 大气 BC 浓度变化与浓度差

Fig. 2 Changes and differences in atmospheric BC concentration between Shanghai observation station and MERRA-2 in 2016

($1.45 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) > 夏季 ($1.16 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), 浦东站也呈现相同的季节排序结果. Song 等^[34] 指出夏季 MERRA-2 $\text{PM}_{2.5}$ 接近表面测量的 $\text{PM}_{2.5}$ (偏差 $0.4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), 最大差异出现在冬季 (偏差 $44 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), 主要是忽略了高污染期间的硝酸盐组分.

2.2 1980~2019 年上海市大气 BC 浓度时间变化趋势

近 40 年上海大气 BC 年平均浓度为 (2.55 ± 0.59) $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 与安徽 [$(2.82 \pm 1.76) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]^[37] 和浙江 [$(2.54 \pm 1.34) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]^[37] 的浓度接近, 但远低于北京 ($10.10 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)^[38] 和广州 ($6.50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)^[39]. 根据上海市大气 BC 浓度长时间变化 [图 3(a)] 以及 M-K 检验 [图 3(b)] 可将 1980~2019 年上海市近 40 年大气 BC 浓度可分为 3 个阶段: 缓慢增长的“低值”阶段 [(1980~1986 年,

$(1.75 \pm 0.17) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$], 相对稳定的“中值”阶段 [1987~1999 年, (2.18 ± 0.07) $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$] 和波动变化的“高值”阶段 [2000~2019 年, (3.07 ± 0.31) $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]. 上海自 1980 年开始大气 BC 浓度呈波动缓慢增长趋势 [图 3(a)], 1980 年上海市大气 BC 平均浓度为 $1.59 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 1984 年 BC 浓度达到 $1.60 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; 之后快速增长至 1987 年的 $2.18 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 接着的十余年大气 BC 浓度相对稳定. M-K 趋势检验统计量 UF_k 表明 [图 3(b)], 1980~1999 年, UF_k 曲线在 1987 年左右超过临界值后呈缓慢增长趋势. 但从 1999 年开始, 上海大气 BC 浓度迅速增长, 在 2008 年达到峰值 ($3.43 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 后逐渐下降至 2012 年的 $2.91 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 2013~2019 年, 上海 BC 浓度在 $3.04 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 上下波动, 至 2019 年 BC 浓度为 $2.80 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

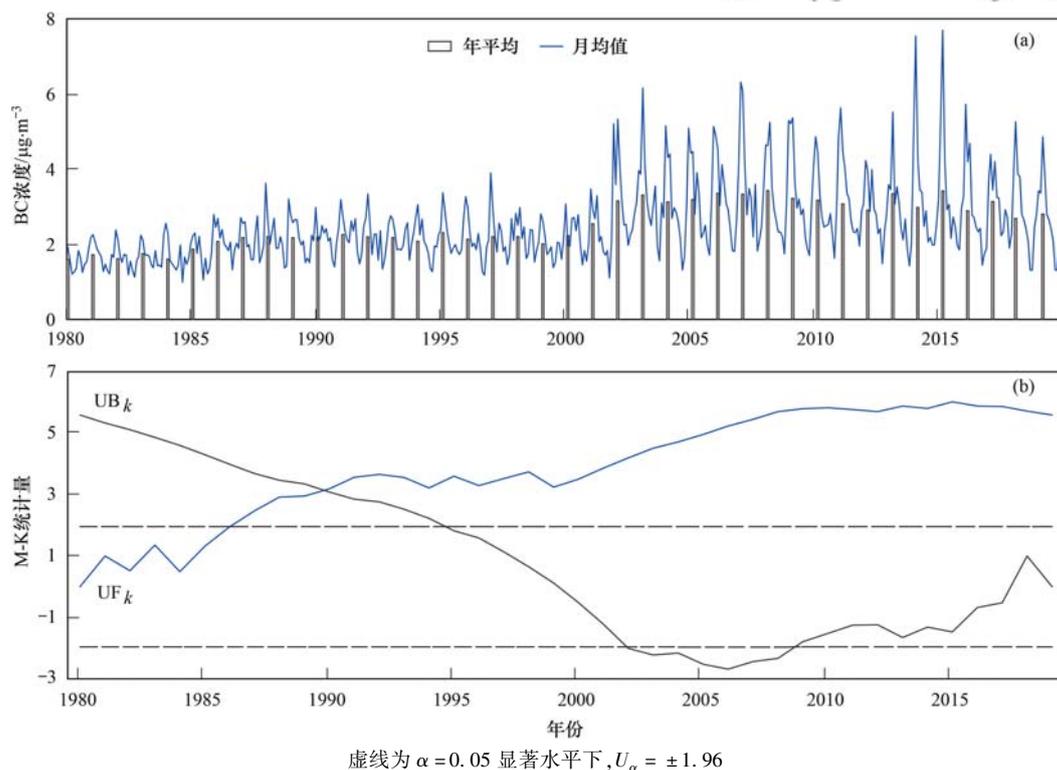


图 3 1980~2019 年上海市大气 BC 浓度变化趋势

Fig. 3 Temporal variations in atmospheric BC concentrations in Shanghai from 1980 to 2019

上海近 40 年来大气 BC 浓度的波动变化一定程度上与上海市环境政策导向有关. 上海从 1999 年开始供应天然气, 但其能源消耗比重不大, 能源消耗仍以煤炭、石油为主^[40], 所以导致 1999~2008 年上海大气 BC 浓度仍处于上升的趋势. 另外 2002 年大气 BC 浓度较高可能与 MODIS 从 2002 年开始提供气溶胶数据产品有一定的关系^[41]. 汽车尾气是上海 BC 排放的一个重要来源, 机动车辆的增加、外环线和中环线的贯通, 使得过境车辆大幅度增加, 排放大量 BC 进而影响大气 BC 浓度. 2010 年上海举办世

博会采取了机动车出行限制和燃油质量控制等一系列的环保措施, 空气质量优良率和优级天数为近十年最高^[42]. 然而上海经济持续高速发展带来了巨大的环境压力, 快速增长的机动车的数量、道路扬尘密度和尾气排放量成为上海中心地带空气主要污染物的来源^[43]. 2009 年 11 月上海提前实施车辆尾气排放国 IV 标准, 全面降低机动车排放对大气的污染. 2009~2014 年上海市能源消耗总量整体呈下降趋势. 其中工业消耗从 1 694.84 万 t 减少到 1 618.82 万 t; 交通消耗量从 910.26 万 t 明显减少到 834.13 万

t; 发电供暖行业的消耗总量从3 178.34万 t降低至3 119.69万 t,使得从2009年开始上海大气BC浓度呈现波动下降趋势。

从季节变化来看,上海大气BC浓度的季节平均值冬季($3.44 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) > 春季($2.42 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) > 秋季($2.32 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) > 夏季($2.00 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$),这一季节变化趋势与目前已发表的大多数城市观测到的BC变化基本相同^[16]。冬季采暖耗能增加,再加上相对较低的风速和边界层高度不利于BC的扩散,进

一步加剧了污染^[20]。夏季气温升高,天气扰动加剧,从而导致地表BC浓度降低。由于秸秆焚烧等生物质燃烧在秋季频繁发生,加剧了BC的积累。上海大气BC浓度频数分布总体呈现一定的偏态特征(图4)。最大频率的浓度表示在该地区大气条件下最具代表性的浓度。上海冬季BC的分布幅度比其它季节要广得多,且有较高的尾端,说明BC污染较为严重。夏季BC的分布最为集中,主要分布在[1.83, 2.48]之间。

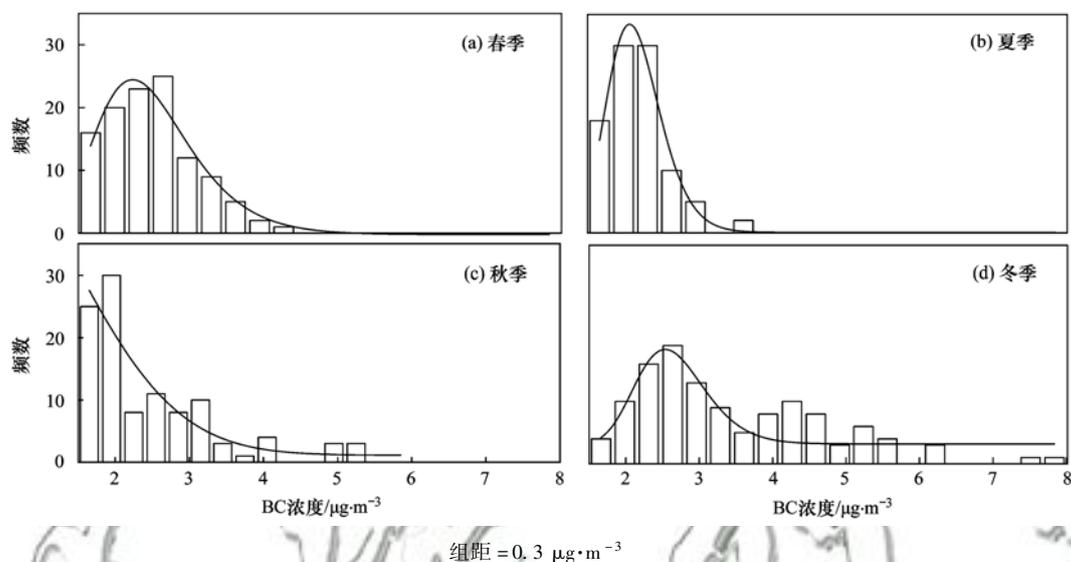


图4 上海市1980~2019不同季节平均BC浓度的频数分布

Fig. 4 Frequency distribution of average BC concentrations in different seasons from 1980 to 2019 in Shanghai

进一步分析发现上海大气BC浓度1980~1986年和1987~1999年月变幅较小,季节变化不明显(图5)。自2000年开始,BC月变化幅度显著增大,冬季(尤其是1月和12月)BC浓度明显高于其他季节。需要指出的是近40年上海每年BC最低值差别不大,维持在 $(1.49 \pm 0.26) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ [图3(a)]。一定程度上可说明上海市大气BC浓度年际变化更多是受到冬季大气BC浓度变化的影响。另外上海夏季

大气BC浓度在7月出现一个小高峰[1980~1986年: $\text{BC}_{7\text{月}}(1.74 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}) > \text{BC}_{6\text{月}}(1.43 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}) > \text{BC}_{8\text{月}}(1.26 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$; 1987~1999年: $\text{BC}_{7\text{月}}(2.05 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}) > \text{BC}_{6\text{月}}(1.88 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}) > \text{BC}_{8\text{月}}(1.84 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$; 2000~2019年: $\text{BC}_{7\text{月}}(2.40 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}) > \text{BC}_{6\text{月}}(2.36 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}) > \text{BC}_{8\text{月}}(1.90 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$]。根据中国交通运输部公布的资料(<http://www.mot.gov.cn/tongjishuju/>),上海2016和2017年7月水运、货

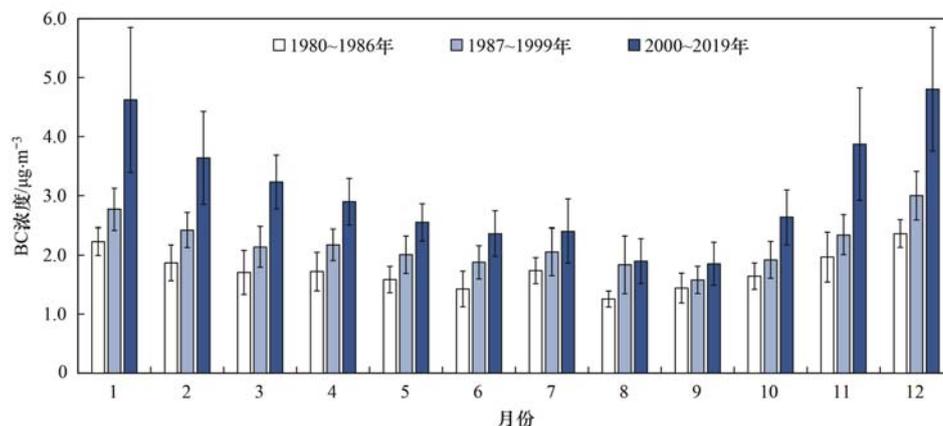


图5 上海市1980~2019平均BC浓度的月变化

Fig. 5 Average BC concentrations in different months from 1980 to 2019 in Shanghai

运周转量为 2 346.7 亿 t·km, 高于 6 月和 8 月平均值的 21% (1 936.4 亿 t·km). 由此, 可以推断上海市 7 月 BC 浓度的小高峰一定程度上与上海水运货运的船舶柴油机等发动机的 BC 排放有关.

2.3 局地排放对上海大气 BC 浓度的影响

基于 2016 ~ 2019 年上海市 MERRA-2 BC 数据, 确定了上海全年和四季平均 BC/CO 和 BC/NO₂ 的质量比及 BC-CO、BC-NO₂ 和 BC-SO₂ 的相关系数 (表 1). 依据前人提供的不同来源测定的 BC/CO 和 BC/NO₂ 的诊断质量比 (表 2)^[44], 探究上海市可能的排放源. 2016 ~ 2019 年上海年均 BC/CO 质量比为 0.005, 春、夏、秋、冬季分别为 0.005、0.004、

0.005 和 0.006, 这些比率接近交通排放的比率 (0.005 2). 王杨君等^[45] 和肖思晗等^[23] 也分别指出上海市和南京北郊地区的 BC 主要受机动车尾气的影响. 进一步分析 BC/NO₂ 发现上海全年、春、夏、秋和冬季分别为 0.068、0.060、0.069、0.061 和 0.080. 这些比值在柴油车 (0.04 ~ 0.11) 的范围内, 与汽油车 (0.01 ~ 0.03) 和开放式生物质燃烧 (0.24 ~ 0.89) 的比率相差甚远. Zhou 等^[46] 的研究发现上海市 BC 浓度比北京市高 2 倍, 主要是上海市交通运输中的柴油消耗量更大. 因此, BC/NO₂ 比值表明 BC 主要来源于柴油车, 而不是汽油车, 这与从 BC/CO 比值推断的结果基本一致.

表 1 BC/CO 和 BC/NO₂ 的质量比及 BC 与 CO、NO₂、SO₂ 相关性

Table 1 Mass ratios of BC/CO and BC/NO₂, and correlations between BC, CO, NO₂, and SO₂

统计值	指标	全年	春季	夏季	秋季	冬季
污染源比值	BC/CO	0.005	0.005	0.004	0.005	0.006
	BC/NO ₂	0.068	0.060	0.069	0.061	0.080
相关系数	BC-CO	0.776	0.605	0.701	0.472	0.377
	BC-NO ₂	0.856	0.873	0.782	0.940	0.640
	BC-SO ₂	0.533	0.051	0.390	0.304	0.253

表 2 不同来源的 BC/CO 和 BC/NO₂ 诊断质量比

Table 2 Mass ratios of BC/CO and BC/NO₂ from different sources

项目	工业排放	电力	居民生活	交通排放
BC/CO ^[47]	0.007 2	0.017 7	0.371	0.005 2
项目	汽油车	工业煤	柴油车	开放式生物质燃烧
BC/NO ₂ ^[44]	0.01 ~ 0.03	0.02 ~ 0.52	0.04 ~ 0.11	0.24 ~ 0.89

从 BC-CO、BC-NO₂ 和 BC-SO₂ 的相关系数可知 (表 1), 上海大气 BC 浓度和 CO、NO₂ 以及 SO₂ 浓度呈正相关, 且 $R(\text{BC-NO}_2) > R(\text{BC-CO}) > R(\text{BC-SO}_2)$. BC 与 CO (0.377 ~ 0.776)、NO₂ (0.640 ~ 0.940) 的相关性远大于 SO₂ 的 (0.051 ~ 0.533). 其中 SO₂ 主要来自煤炭燃烧 (大多以工业为主), 侧面印证了上海市 BC 可能主要来源于交通排放. 夏季和冬季上海市 BC-NO₂ 的相关性较小, 这主要和该地区的降水有关. 上海属温带季风性气候, 海陆热力性质差异显著, 东南季风带来丰沛的降水; 冬季暖气流登陆北上与北方南下的冷空气相遇, 形成降水. 降水量的增加使得 BC 的湿沉降增强, 从而导致两者的相关性降低.

2.4 区域传输对上海大气 BC 浓度的影响

通过分析上海浦东站 2016 年 4 个季节的气团 72 h 后向轨迹可知, 上海浦东站 4 个季节均有 6 条轨迹路径 (图 6). 夏季以东南和西南方向的轨迹为主, 其他季节来自北方的轨迹超过 50%. 春季以经过黄海的东北风和东海的东南风为主导, 贡献率为 43.48%; 内蒙古等地区占 33.69%; 海洋的长距离

运输占 3.26%; 周边省份福建和浙江占 19.57%. 夏季气团以清洁海风为主导 (77.17%), 此外, 少量来自北方途经渤海的长距离运输 (9.78%); 来自东南沿海城市的轨迹占 13.04%. 秋季西北方向的轨迹占主导 (46.15%); 来自朝鲜半岛途经黄海的气团占 36.26%; 其余少量轨迹来自于邻省 (9.89%). 冬季气团主要来自内蒙古、京津冀的长距离运输 (68.13%), 一般认为来自华北和华中地区及海岸线的气团携带污染物^[23,48,49]; 短距离运输主要是河南省 (20.88%), 小部分来自东海海域 (约 11%).

PSCF 分析结果表明上海各季节 BC 潜在源区主要分布在中国东部地区 (图 7), 以长三角为中心向外扩张, 且扩张的方向和图 6 后向轨迹方向一致. 距离上海越近的地区, PSCF 值也就越高. 长三角地区是 PSCF 高值带, 尤其杭州市的 BC 浓度及本底值在我国大部分城市中都处于较高水平^[48]. 另外长江三角洲的 BC 潜在源区主要集中在江苏、安徽和浙江^[37], 说明该区域内的浙江和安徽等周边省份对上海市 BC 浓度的影响可能性较大. 上海春季大气 BC

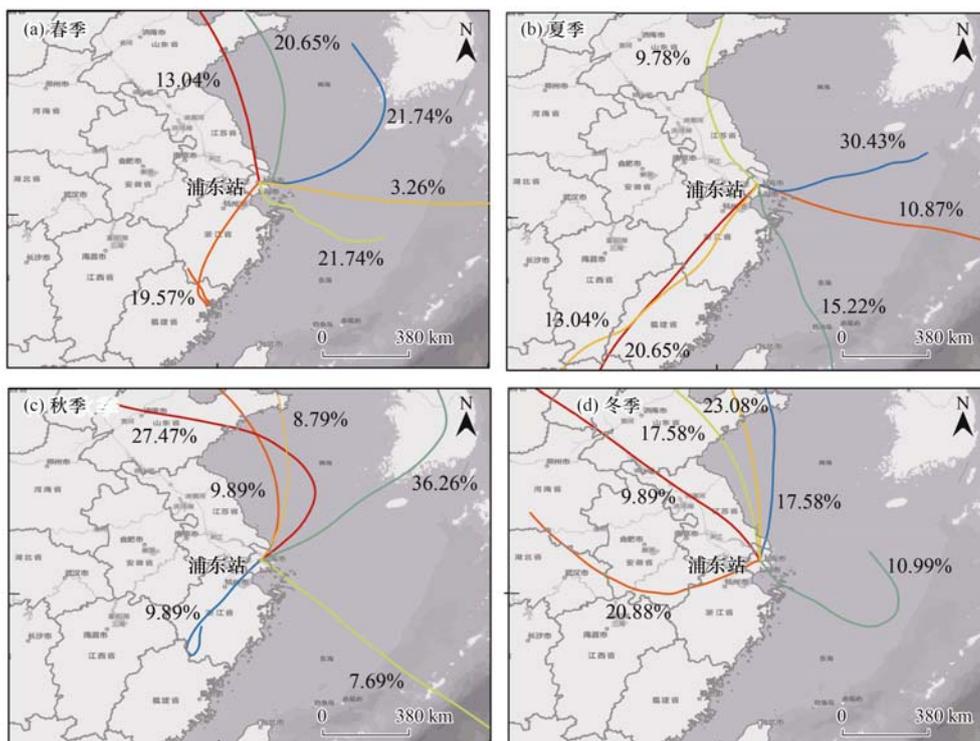


图 6 2016 年上海浦东 72 h 后向轨迹聚类图(500 m)

Fig. 6 The 72-hour backward trajectory clustering map of Shanghai Pudong station in 2016 (500 m)

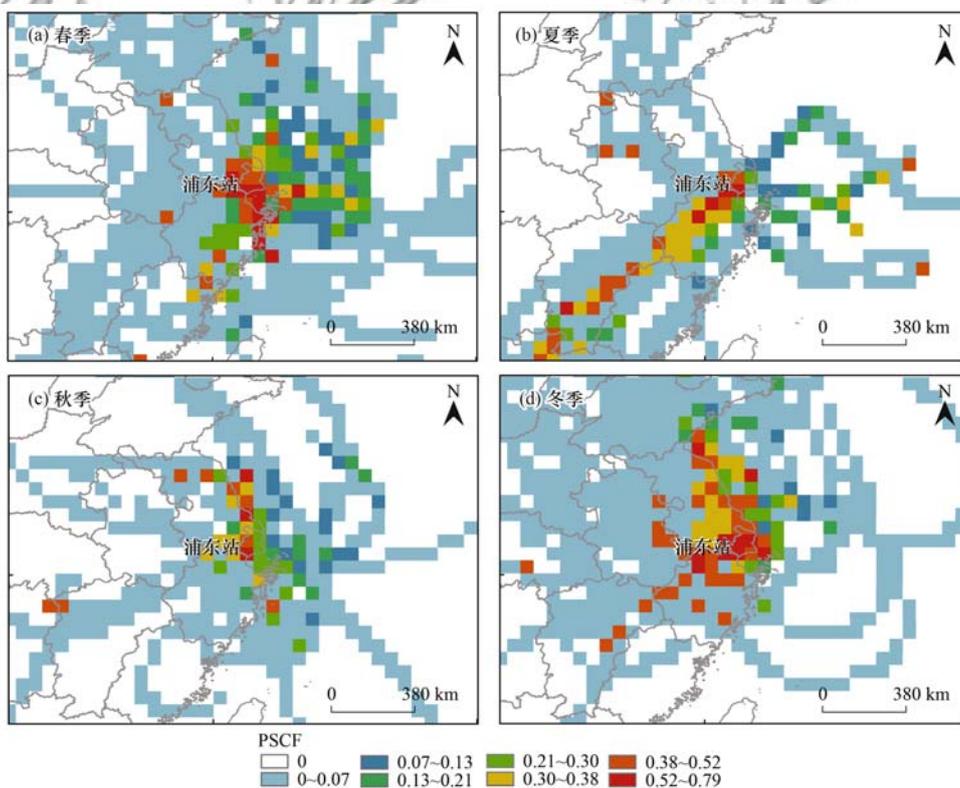


图 7 2016 年浦东站 BC 潜在源区的季节差异

Fig. 7 Seasonal differences in BC potential source areas at Pudong Station in 2016

的潜在源区分布在浙江东部、江苏南部及上海本地;此外,东海也有大量分布,这可能与来自东南方向和东北方向的气团有关.夏季 BC 的 PSCF 高值呈带状分布,且形状和来自东南沿海地区的气团轨迹

吻合,说明夏季上海 BC 受东南沿海地区的气团影响.秋季 BC 的 PSCF 高值主要分布在上海本地及其北部的周边地区,其余 PSCF 高值均分布在气团轨迹经过的地带.冬季 BC 的潜在源区分布较为集中,

PSCF 高值带主要分布在浙江北部和江苏东南沿海地区。

3 结论

(1) 上海市 MERRA-2 大气 BC 浓度数据与青浦站 ($R = 0.72$) 和浦东站 ($R = 0.68$) 近地面 BC 浓度观测数据表现出较高的一致性, 并可捕捉到两站点间的差异, 说明 MERRA-2 再分析资料可以有效地揭示地面 BC 浓度的长期变化趋势。

(2) 近 40 年上海市大气 BC 年平均浓度为 $(2.55 \pm 0.59) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 时间变化上可分为 3 个阶段: 缓慢增长的“低值”阶段 [1980 ~ 1986 年, $(1.75 \pm 0.17) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$], 相对稳定的“中值”阶段 [1987 ~ 1999 年, $(2.18 \pm 0.07) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$] 和波动变化的“高值”阶段 [2000 ~ 2019, $(3.07 \pm 0.31) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$]; 季节变化上呈现冬季高、夏季低的“U”型模式; 受水运货运船舶柴油机等发动机排放的影响, 7 月出现大气 BC 浓度的小高峰。

(3) 上海市大气 BC/CO 接近 0.0052 (交通排放), $\text{BC}/\text{NO}_2 \in [0.04, 0.11]$ (柴油车); 与 CO 、 NO_2 和 SO_2 三者的相关性大小为: $R(\text{BC}-\text{NO}_2) > R(\text{BC}-\text{CO}) > R(\text{BC}-\text{SO}_2)$, 可以推断上海 BC 可能的排放源是交通排放, 尤其是重型柴油车的影响。

(4) 上海市夏季气团以清洁海风为主导, 占 77.18%; 其他季节来自北方的气团超过 50%。各季节 BC 潜在源区主要分布在中国东部地区, 以长三角为中心向外扩张, 且扩张方向与后向轨迹方向一致。

参考文献:

- [1] Shen F Z, Ge X L, Hu J L, et al. Air pollution characteristics and health risks in Henan Province, China[J]. Environmental Research, 2017, **156**: 625-634.
- [2] Chow J C, Watson J G, Lowenthal D H, et al. $\text{PM}_{2.5}$ source profiles for black and organic carbon emission inventories[J]. Atmospheric Environment, 2011, **45**(31): 5407-5414.
- [3] Petzold A, Ogren J A, Fiebig M, et al. Recommendations for reporting "black carbon" measurements[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2013, **13**(16): 8365-8379.
- [4] Wang Q Y, Huang R J, Cao J J, et al. Mixing state of black carbon aerosol in a heavily polluted urban area of China: implications for light absorption enhancement[J]. Aerosol Science and Technology, 2014, **48**(7): 689-697.
- [5] Stocker T F, Qin D, Plattner G K, et al. Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report on the intergovernmental panel on climate change[M]. New York: Cambridge University Press, 2013. 866-871.
- [6] Gustafsson Ö, Ramanathan V. Convergence on climate warming by black carbon aerosols[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2016, **113**(16): 4243-4245.
- [7] Sasser E, Hemby J, Adler K, et al. Report to congress on black carbon[R]. Washington: US EPA, 2012.
- [8] Homann K H. Fullerenes and soot formation—new pathways to large particles in flames[J]. Angewandte Chemie International Edition, 1998, **37**(18): 2434-2451.
- [9] Yuan Y, Wu Y, Ge X L, et al. In vitro toxicity evaluation of heavy metals in urban air particulate matter on human lung epithelial cells[J]. Science of the Total Environment, 2019, **678**: 301-308.
- [10] Cui S J, Lei R Y, Wu Y Z, et al. Characteristics of black carbon particle-bound polycyclic aromatic hydrocarbons in two sites of Nanjing and Shanghai, China[J]. Atmosphere, 2020, **11**(2), doi: 10.3390/atmos11020202.
- [11] Kuang B Y, Lin P, Huang X H H, Yu, et al. Sources of humic-like substances in the Pearl River Delta, China: positive matrix factorization analysis of $\text{PM}_{2.5}$ major components and source markers[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2015, **15**(4): 1995-2008.
- [12] Rosa M J, Yan B Z, Chillrud S N, et al. Domestic airborne black carbon levels and 8-isoprostane in exhaled breath condensate among children in New York City[J]. Environmental Research, 2014, **135**: 105-110.
- [13] Liu M, Peng X, Meng Z Q, et al. Spatial characteristics and determinants of in-traffic black carbon in Shanghai, China: Combination of mobile monitoring and land use regression model[J]. Science of the Total Environment, 2019, **658**: 51-61.
- [14] Raman A, Arellano A F. Using combustion tracers to estimate surface black carbon distributions in WRF-Chem[A]. In: AGU Fall Meeting[C]. AGU, 2015.
- [15] 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.
- [16] Xu X F, Yang X Y, Zhu B, et al. Characteristics of MERRA-2 black carbon variation in east China during 2000-2016[J]. Atmospheric Environment, 2020, **222**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2019.117140.
- [17] Qin W H, Zhang Y P, Chen J, et al. Variation, sources and historical trend of black carbon in Beijing, China based on ground observation and MERRA-2 reanalysis data[J]. Environmental Pollution, 2019, **245**: 853-863.
- [18] US EPA, Office of Air and Radiation. Black carbon report to congress[R]. 2017.
- [19] Briggs N L, Long C M. Critical review of black carbon and elemental carbon source apportionment in Europe and the United States[J]. Atmospheric Environment, 2016, **144**(11): 409-427.
- [20] Ye W F, Ma Z Y, Ha X Z. Spatial-temporal patterns of $\text{PM}_{2.5}$ concentrations for 338 Chinese cities[J]. Science of the Total Environment, 2018, **631-632**: 524-533.
- [21] 魏夏璐, 王成刚. 2016 年冬季寿县重污染过程黑碳垂直结构分析[A]. 见: 第 35 届中国气象学会年会 S12 大气成分与天气, 气候变化与环境影响暨环境气象预报及影响评估[C]. 合肥: 中国气象学会, 2018.
- [22] 杨晓旻, 施双双, 张晨, 等. 南京市黑碳气溶胶时间演变特征及其主要影响因素[J]. 环境科学, 2020, **41**(2): 620-629. Yang X M, Shi S S, Zhang C, et al. Temporal evolution and main influencing factors of black carbon aerosol in Nanjing[J]. Environmental Science, 2020, **41**(2): 620-629.
- [23] 肖思哈, 于兴娜, 朱彬, 等. 南京北郊黑碳气溶胶污染特征及影响因素分析[J]. 环境科学, 2016, **37**(9): 3280-3289. Xiao S H, Yu X N, Zhu B, et al. Characteristics of black carbon aerosol and influencing factors in northern suburbs of Nanjing[J]. Environmental Science, 2016, **37**(9): 3280-3289.

- [24] 谢锋, 林煜棋, 宋文怀, 等. 南京北郊黑碳气溶胶分布特征及来源[J]. 环境科学, 2020, **41**(10): 4392-4401.
Xie F, Lin Y Q, Song W H, *et al.* Distribution characteristics and source of black carbon aerosols in the northern suburbs of Nanjing[J]. Environmental Science, 2020, **41**(10): 4392-4401.
- [25] Liu Y, Yan C Q, Zheng M. Source apportionment of black carbon during winter in Beijing [J]. Science of the Total Environment, 2018, **618**: 531-541.
- [26] 关亚楠, 卢晶晶, 张毅森, 等. 石家庄南郊黑碳气溶胶污染特征与来源分析[J]. 环境科学学报, 2020, **40**(9): 3146-3154.
Guan Y N, Lu J J, Zhang Y S, *et al.* Pollution characteristics and source apportionment of black carbon aerosol in the south suburb of Shijiazhuang city[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, **40**(9): 3146-3154.
- [27] Ni M J, Huang J X, Lu S Y, *et al.* A review on black carbon emissions, worldwide and in China [J]. Chemosphere, 2014, **107**(7): 83-93.
- [28] Mao Y H, Liao H, Han Y M, *et al.* Impacts of meteorological parameters and emissions on decadal and interannual variations of black carbon in China for 1980-2010 [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2016, **121**(4): 1822-1843.
- [29] Wang Y X, Wang X, Kondo Y, *et al.* Black carbon and its correlation with trace gases at a rural site in Beijing: Top-down constraints from ambient measurements on bottom-up emissions [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2011, **116**(D24), doi: 10.1029/2011jd016575.
- [30] Tiwari S, Dumka U C, Hopke P K, *et al.* Atmospheric heating due to black carbon aerosol during the summer monsoon period over Ballia; A rural environment over Indo-Gangetic Plain [J]. Atmospheric Research, 2016, **178-179**: 393-400.
- [31] 刘立忠, 王宇翔, 么远, 等. 西安市黑碳气溶胶浓度特征及与气象因素和常规污染物相关性[J]. 中国环境监测, 2016, **32**(5): 45-50.
Liu L Z, Wang Y X, Mo Y, *et al.* Concentration characteristics and the correlations of black carbon aerosols with meteorological factors and conventional pollutants in Xi'an [J]. Environmental Monitoring in China, 2016, **32**(5): 45-50.
- [32] 马梁臣, 刘海峰, 王宁, 等. 2011年长春市一次持续浮尘天气成因分析[J]. 气象与环境学报, 2013, **29**(6): 24-30.
Ma L C, Liu H F, Wang N, *et al.* Forming reason of a continuous floating dust event in 2011 in Changchun [J]. Journal of Meteorology and Environment, 2013, **29**(6): 24-30.
- [33] Begum B A, Kim E, Jeong C H, *et al.* Evaluation of the potential source contribution function using the 2002 Quebec forest fire episode [J]. Atmospheric Environment, 2005, **39**(20): 3719-3724.
- [34] Song Z J, Fu D S, Zhang X L, *et al.* Diurnal and seasonal variability of PM_{2.5} and AOD in North China plain: Comparison of MERRA-2 products and ground measurements [J]. Atmospheric Environment, 2018, **191**: 70-78.
- [35] 唐维尧, 鲍艳松, 马骁, 等. FY-3A/MERSI 气溶胶光学厚度资料在北京及其周围地区的精度评价[J]. 大气与环境光学学报, 2017, **12**(6): 435-445.
Tang W Y, Bao Y S, Ma X, *et al.* Accuracy evaluation of FY-3A/MERSI aerosol optical depth data in Beijing and its adjacent region [J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2017, **12**(6): 435-445.
- [36] Kuo C L. Assessments of Ali, dome A, and summit camp for mm-wave observations using MERRA-2 reanalysis [J]. The Astrophysical Journal, 2017, **848**(1), doi: 10.3847/1538-4357/aa8b74.
- [37] 井安康, 朱彬, 丁德平, 等. 中国长江三角洲地区黑碳特征和来源分析[J]. 中国环境科学, 2019, **39**(9): 3585-3594.
Jing A K, Zhu B, Ding D P, *et al.* Characteristics and source apportionment of black carbon in the Yangtze River Delta Region of China [J]. China Environmental Science, 2019, **39**(9): 3585-3594.
- [38] Song S J, Wu Y, Xu J Y, *et al.* Black carbon at a roadside site in Beijing: temporal variations and relationships with carbon monoxide and particle number size distribution [J]. Atmospheric Environment, 2013, **77**: 213-221.
- [39] Huertas J I, Huertas M E, Cervantes G, *et al.* Assessment of the natural sources of particulate matter on the opencast mines air quality [J]. Science of the Total Environment, 2014, **493**: 1047-1055.
- [40] 郑明, 马宪国. 上海能源消耗与 PM_{2.5} 排放量分析[J]. 能源研究与信息, 2015, **31**(1): 1-3.
Zheng M, Ma X G. Analysis of PM_{2.5} emission from energy consumption in Shanghai [J]. Energy Research and Information, 2015, **31**(1): 1-3.
- [41] Gelaro R, McCarty W, Suárez M J, *et al.* The modern-era retrospective analysis for research and applications, Version 2 (MERRA-2) [J]. Journal of Climate, 2017, **30**(14): 5419-5454.
- [42] 上海市环境保护局. 上海市环境质量报告书(2006-2010年) [EB/OL]. <https://max.book118.com/html/2018/0606/171074358.shtm>, 2011-05-01.
- [43] 马民涛, 韩昀峰, 宋凌艳. 上海市近年来大气环境质量变化趋势分析[J]. 四川环境, 2010, **29**(2): 61-65, 69.
Ma M T, Han Y F, Song L Y. Variation trend of atmospheric environmental quality in Shanghai in recent years [J]. Sichuan Environment, 2010, **29**(2): 61-65, 69.
- [44] Jing A K, Zhu B, Wang H L, *et al.* Source apportionment of black carbon in different seasons in the northern suburb of Nanjing, China [J]. Atmospheric Environment, 2019, **201**: 190-200.
- [45] 王杨君, 董亚萍, 冯加良, 等. 上海市 PM_{2.5} 中含碳物质的特征和影响因素分析[J]. 环境科学, 2010, **31**(8): 1755-1761.
Wang Y J, Dong Y P, Feng J L, *et al.* Characteristics and influencing factors of carbonaceous aerosols in PM_{2.5} in Shanghai, China [J]. Environmental Science, 2010, **31**(8): 1755-1761.
- [46] Zhou X H, Gao J, Wang T, *et al.* Measurement of black carbon aerosols near two Chinese megacities and the implications for improving emission inventories [J]. Atmospheric Environment, 2009, **43**(25): 3918-3924.
- [47] 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.
- [48] 徐昶, 沈建东, 叶辉, 等. 杭州黑碳气溶胶污染特性及来源研究[J]. 中国环境科学, 2014, **34**(12): 3026-3033.
Xu C, Shen J D, Ye H, *et al.* Characteristics and source of black carbon aerosol pollution in Hangzhou [J]. China Environmental Science, 2014, **34**(12): 3026-3033.
- [49] 王璐, 袁亮, 张小玲, 等. 成都地区黑碳气溶胶变化特征及其来源解析[J]. 环境科学, 2020, **41**(4): 1561-1572.
Wang L, Yuan L, Zhang X L, *et al.* Characteristics and source apportionment of black carbon in Chengdu [J]. Environmental Science, 2020, **41**(4): 1561-1572.

CONTENTS

Advances and Challenges in Biosafety Research for Urban Environments	SU Jian-qiang, AN Xin-li, HU An-yi, <i>et al.</i> (2565)
Key Problems and Novel Strategy of Controlling Emerging Trace Organic Contaminants During Municipal Wastewater Reclamation	WANG Wen-long, WU Qian-yuan, DU Ye, <i>et al.</i> (2573)
Mechanisms Summary and Potential Analysis of EPS as a Flame Retardant	HAO Xiao-di, ZHAO Zi-cheng, LI Ji, <i>et al.</i> (2583)
Concentrations, Sources, and Health Risks of PM _{2.5} Carrier Metals in the Beijing Urban Area and Suburbs	ZHOU An-qi, LIU Jian-wei, ZHOU Xu, <i>et al.</i> (2595)
MAIAC AOD and PM _{2.5} Mass Concentrations Characteristics and Correlation Analysis in Beijing-Tianjin-Hebei and Surrounding Areas	JIN Jian-nan, YANG Xing-chuan, YAN Xing, <i>et al.</i> (2604)
Formation and Prevention of Secondary Nitrate in PM _{2.5} in Tianjin	XIAO Zhi-mei, WU Ting, WEI Yu-ting, <i>et al.</i> (2616)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Nitro Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in PM _{2.5} of Nanjing, China	FU Yin-yin, WEN Hao-zhe, WANG Xiang-hua, <i>et al.</i> (2626)
Spatio-temporal Patterns and Potential Sources of Absorbing Aerosols in the Fenwei Plain	LIU Min-xia, LI Liang, YU Rui-xin, <i>et al.</i> (2634)
Sources Apportionment of Oxygenated Volatile Organic Compounds (OVOCs) in a Typical Southwestern Region in China During Summer	CHEN Mu-lan, WANG Sai-nan, CHEN Tian-shu, <i>et al.</i> (2648)
Aqueous-phase Oxidation of Dissolved Organic Matter (DOM) from Extracts of Ambient Aerosols	TAO Ye, CHEN Yan-tong, LI Nan-wang, <i>et al.</i> (2659)
Changes and Potential Sources of Atmospheric Black Carbon Concentration in Shanghai over the Past 40 Years Based on MERRA-2 Reanalysis Data	CAO Shan-shan, DUAN Yu-sen, GAO Chan-chan, <i>et al.</i> (2668)
Spatio-Temporal Evolution Characteristics and Source Apportionment of O ₃ and NO ₂ in Shijiazhuang	WANG Shuai, NIE Sai-sai, FENG Ya-ping, <i>et al.</i> (2679)
Applying Photochemical Indicators to Analyze Ozone Sensitivity in Handan	NIU Yuan, CHENG Shui-yuan, OU Sheng-ju, <i>et al.</i> (2691)
Spatiotemporal Distribution of Aerosol Optical Depth Based on Landsat Data in the Hinterland of the Guanzhong Basin and Its Relationship with Urbanization	ZHENG Yu-rong, WANG Xu-hong, ZHANG Xiu, <i>et al.</i> (2699)
Multidimensional Verification of Anthropogenic VOCs Emissions Inventory Through Satellite Retrievals and Ground Observations	WANG Yue, WEI Wei, REN Yun-ting, <i>et al.</i> (2713)
Estimation of the SOA Formation Potential of the National Trunk Highway in Central Plains Urban Agglomeration	WANG Na-ping, LI Hai-ping, ZHANG Fan (2721)
Economic Benefit of Air Quality Improvement During Implementation of the Air Pollution Prevention and Control Action Plan in Beijing	LU Ya-ling, FAN Zhao-yang, JIANG Hong-qiang, <i>et al.</i> (2730)
Emission Performance Quantitative Evaluation and Application of Industrial Air Pollution Sources	LI Ting-kun, FENG Yin-chang, WU Jian-hui, <i>et al.</i> (2740)
Screening and Sequencing High-risk Antibiotics in China's Water Environment Based on Ecological Risks	ZHOU Li, LIU Shan, GUO Jia-hua, <i>et al.</i> (2748)
China's Reuse Water Development and Utilization Potential Based on the RDA-REM Model	ZHENG Jin-tao, MA Tao, LIU Jiu-fu, <i>et al.</i> (2758)
Characteristic Analysis of SWAT Model Parameter Values Based on Assessment of Model Research Quality	RONG Yi, QIN Cheng-xin, DU Peng-fei, <i>et al.</i> (2769)
Sensitivity Analysis of Boundary Load Reduction in a Large Shallow Lake Water Quality Model	WANY Ya-ning, LI Yi-ping, CHENG Yue, <i>et al.</i> (2778)
Comparison of Available Nitrogen and Phosphorus Characteristics in the Land-Water Transition Zone of Different Watersheds and Their Environmental Significance	ZHU Hai, YUAN Xu-yin, YE Hong-meng, <i>et al.</i> (2787)
Analysis of Spatial-Temporal Variation Characteristics of Potential Non-point Source Pollution Risks in the Upper Beiyun River Basin Using Different Weighting Methods	LI Hua-lin, ZHANG Jian-jun, ZHANG Yao-fang, <i>et al.</i> (2796)
Characteristics of Runoff-related Total Nitrogen and Phosphorus Losses Under Long-term Fertilization and Cultivation on Purple Soil Sloping Croplands	WU Xiao-yu, LI Tian-yang, HE Bing-hui (2810)
Hydrochemistry and Its Controlling Factors and Water Quality Assessment of Shallow Groundwater in the Weihe and Jinghe River Catchments	LIU Xin, XIANG Wei, SI Bing-cheng (2817)
Characteristics and Drivers of Dissolved Carbon Dioxide and Methane Concentrations in the Nantiaoxi River System in the Upper Reaches of the Taihu Lake Basin During Summer-Autumn	LIANG Jia-hui, TIAN Lin-lin, ZHOU Zhong-yu, <i>et al.</i> (2826)
Nitrogen Distribution and Inorganic Nitrogen Diffusion Flux in a Shallow Lake During the Low Temperature Period: A Case Study of the Baiyangdian Lake	WEN Yan, SHAN Bao-qing, ZHANG Wen-qiang (2839)
Effects of Sediment Microenvironment on Sedimentary Phosphorus Release Under Capping	CHEN Shu-tong, LI Da-peng, XU Chu-tian, <i>et al.</i> (2848)
Coadsorption of Heavy Metal and Antibiotic onto Humic Acid from Polder River Sediment	XUE Xiang-dong, YANG Chen-hao, YU Jian-lin, <i>et al.</i> (2856)
Effects of Two PPCPs on Nitrification in Sediments in the Yarlung Zangbo River	LING Xin, XU Hui-ping, LU Guang-hua (2868)
Wastewater Treatment Effects of Ferric-carbon Micro-electrolysis and Zeolite in Constructed Wetlands	ZHAO Zhong-jing, HAO Qing-ju, ZHANG Yao-yu, <i>et al.</i> (2875)
CDS-BOC Nanophotocatalyst Activating Persulfate Under Visible Light for the Efficient Degradation of Typical PPCPs	LEI Qian, XU Lu, AI Wei, <i>et al.</i> (2885)
Preparation of pg-C ₃ N ₄ /BiOBr/Ag Composite and Photocatalytic Degradation of Sulfamethoxazole	YANG Li-wei, LIU Li-jun, XIA Xun-feng, <i>et al.</i> (2896)
Sodium Alginate Loading of Zero-Valent Iron Sulfide for the Reduction of Cr(VI) in Water	WANG Xu, YANG Xin-nan, HUANG Bi-jian, <i>et al.</i> (2908)
Adsorption Mechanism of Cadmium by Superparamagnetic Nano-Fe ₃ O ₄ @SiO ₂ Functionalized Materials	ZHANG Li-zhi, YI Ping, FANG Dan-dan, <i>et al.</i> (2917)
Pollution Characteristics and Removal of Typical Pharmaceuticals in Hospital Wastewater and Municipal Wastewater Treatment Plants	YE Pu, YOU Wen-dan, YANG Bin, <i>et al.</i> (2928)
Abundance Change of Antibiotic Resistance Genes During PDWW Recycling and Correlations with Environmental Factors	XU Yao-yao, WANG Rui, JIN Xin, <i>et al.</i> (2937)
Simultaneous Domestication of Short-cut Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Granules	WANG Wen-qi, LI Dong, GAO Xin, <i>et al.</i> (2946)
Long-term Storage and Rapid Activity Recovery of ANAMMOX Granular Sludge	LI Dong, LIU Ming-yang, ZHANG Jie, <i>et al.</i> (2957)
Migration and Environmental Effects of Heavy Metals in the Pyrolysis of Municipal Sludge	JIANG Yuan-yuan, WANG Yan, DUAN Wen-yang, <i>et al.</i> (2966)
Profiling of Antibiotic Resistance Genes in Different Croplands	HUANG Fu-yi, ZHOU Shu-yi-dan, WANG Jia-ni, <i>et al.</i> (2975)
Distribution Characteristics of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Manure and Surrounding Soil of Cattle Farms in Ningxia	ZHANG Jun-hua, CHEN Rui-hua, LIU Ji-li, <i>et al.</i> (2981)
Effects of Temperature and Stirring on the Changes of Antibiotic Resistance Genes and Microbial Communities in Anaerobic Digestion of Dairy Manure	XU Ji-fei, ZHANG Qiu-ping, ZHU Tian-jiao, <i>et al.</i> (2992)
Effects of Wheat Straw-derived Biochar Application on Soil Carbon Content Under Different Tillage Practices	LIU Zhen-jie, LI Peng-fei, HUANG Shi-wei, <i>et al.</i> (3000)
Spatial Patterns of Nitrogen and Phosphorus in Soil and Their Influencing Factors in a Typical Agro-pastoral Ecotone	ZHANG Yan-jiang, WANG Jun-peng, WANG Yu, <i>et al.</i> (3010)
Spatial Distribution Characteristics, Pollution, and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals Around Mercury Mining Areas	WANG Rui, DENG Hai, JIA Zhong-min, <i>et al.</i> (3018)
Interaction and Mechanism Between Conditioning Agents and Two Elements in the Soil Enriched with Phosphorus and Cadmium	HUANG Yang, HU Xue-yu, CAO Kun-kun, <i>et al.</i> (3028)
Mechanism of S-allyl-L-cysteine Alleviating Cadmium Stress in Seedling Roots and Buds of Rice Seedlings	CHENG Liu-long, HUANG Yong-chun, WANG Chang-rong, <i>et al.</i> (3037)
Consecutive 4-year Elevated Atmospheric CO ₂ on Shaped Microbial Communities in the Rhizosphere Soil of <i>Robinia pseudoacacia</i> L. Seedlings Grown in Pb-contaminated Soils	JIA Xia, Lkhagvajargal Khadkhurel, ZHAO Yong-hua, <i>et al.</i> (3046)
Biodegradation of Polystyrene by <i>Geobacillus stearothermophilus</i>	XING Rui-zhi, ZHAO Zi-qiang, ZHAO Wen-qi, <i>et al.</i> (3056)
Micro-morphological Characteristics of Particles on Holly and Ligustrum Leaf Surfaces and Seasonal Changes in Bacterial Communities	LI Hui-juan, XU Ai-ling, QIAO Feng-lu, <i>et al.</i> (3063)
Effects of Roxithromycin on Reproduction, Growth, and Anti-oxidation System of <i>Daphnia magna</i>	ZHANG Ling-yu, LIU Jian-chao, LENG Yang, <i>et al.</i> (3074)
Relationship Between Relative Crop Yield/Woody Plant Biomass and Ground-level Ozone Pollution in China	FENG Zhao-zhong, PENG Jin-long (3084)