

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

南京北郊大气降水中水溶性无机氮和有机氮沉降特征

张佳颖, 于兴娜, 张毓秀, 丁铎, 侯思宇



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年7月

第43卷 第7期
Vol.43 No.7

目次

两种模式下中国未来发电行业发展情景及其环境效益分析	刘春景, 吕建毅, 赵汶畅, 徐卿, 金玉佳 (3375)
基于 LEAP 模型的兰州市道路交通温室气体与污染物协同减排情景模拟	庞可, 张芊, 马彩云, 祝禄祺, 陈恒葵, 孔祥如, 潘峰, 杨宏 (3386)
基于半级别的城市空气质量预报评估方法探讨	王晓彦, 朱莉莉, 许荣, 高愈霄, 朱媛媛, 汪巍, 刘冰 (3396)
厦门港大气 PM _{2.5} 中重金属污染特征及健康风险评价	肖思晗, 蔡美君, 李香, 黄屋, 王坚, 朱清墩, 吴水平 (3404)
南京北郊大气降水中水溶性无机氮和有机氮沉降特征	张佳颖, 于兴娜, 张毓秀, 丁铖, 侯思宇 (3416)
晋中盆地主要城市冬季 PM _{2.5} 传输特征分析	王小兰, 王雁, 闫世明, 岳江, 郭伟, 郝振荣 (3423)
鄂尔多斯市夏秋季黑碳气溶胶时间演变特征及其来源解析	孔祥晨, 张连霞, 张彩云, 王红磊, 许晶, 郑佳峰 (3439)
济源冬季 VOCs 污染特征、来源和 SOAP	王芳, 李利霞, 王红果, 赵宗生, 张建平, 张栋 (3451)
长株潭城区 8 月 VOCs 污染特征及来源分析	罗达通, 张青梅, 刘湛, 尤翔宇, 黄杰, 宋云飞, 张敬巧 (3463)
2019 年 7 月石家庄市 O ₃ 生成敏感性控制策略解析	朱家贤, 王晓琦, 欧盛菊, 张新宇 (3473)
华北平原 AOD 时空演化与影响因素	郭霖, 孟飞, 马明亮 (3483)
基于地基太阳光度计观测的长安区气溶胶光学特性变化及其与颗粒物浓度的关系	郑玉蓉, 王旭红, 崔思颖, 冯子豪, 张秀, 刘康 (3494)
基于长时序“地-星”数据的京津冀大气污染时空分布及演变特征	王耀庭, 殷振平, 郑祚芳, 李炬, 李青春, 孟春雷, 李威 (3508)
近十年洪泽湖富营养化状态变化趋势及原因分析	陈天宇, 刘常清, 史小丽, 李云, 范子武, 贾本有, 廖轶鹏 (3523)
高原湖泊周边浅层地下水: 磷素时空分布及驱动因素	杨恒, 李桂芳, 叶远行, 陈清飞, 崔荣阳, 张丹, 陈安强 (3532)
三峡水库不同支流库湾蓄水区溶解氧分层特性及差异性	纪道斌, 方娇, 龙良红, 杨正健, 赵星星, 杨霞, 郭亚丽 (3543)
典型喀斯特城市湖泊溶解性有机质成分特征及来源解析	倪茂飞, 周慧, 马永梅, 苏印, 王晓丹, 王志康 (3552)
骆马湖表层水和沉积物中全氟化合物赋存特征、来源及健康风险评估	黄家浩, 吴玮, 黄天寅, 陈书琴, 项颂, 庞燕 (3562)
千岛湖浮游植物群落结构的垂向分布特征及其影响因素	王吉毅, 霍翟, 国超旋, 朱广伟, 龚志军, 范亚文, 王建军 (3575)
泗河水系沉积物磷的存在形态及其空间分布特征	张子涵, 张鑫茹, 贾传兴, 甘延东, 王世亮 (3587)
降雨径流过程中土地利用优化配置对磷流失的影响	周豪, 陈方鑫, 罗义峰, 龙翼, 周继, 王小燕, 李丹丹, 陈晓燕 (3597)
典型生物滞留设施重金属累积分布特征与风险评价	储杨阳, 杨龙, 周媛, 王喜龙, 王嗣禹, 张敏 (3608)
筑坝蓄水对不同水深浮游微生物群落结构和种间互作模式的影响	王洵, 张佳佳, 袁秋生, 胡斌, 刘胜 (3623)
天津独流减河流域不同等级河流沉积物细菌区系及功能辨识	刘嘉元, 丰玥, 杨雪纯, 张彦, 李德生, 刘福德 (3635)
地表水悬浮态多环芳烃时空变化特征及主要输入源响应机制	彭珂醒, 李瑞飞, 周亦辰, 卓泽铭, 张晋, 李梅, 李雪 (3645)
北京市通州区河流中微塑料组成的空间分布及潜在来源解析	门聪, 李頔, 左剑恶, 邢薇, 刘梦瑶, 魏凡钦, 胡嘉敏, 谢珍雯, 邢鑫, 沈杨贵 (3656)
微塑料对鲫鱼生长、肝脏损伤和肠道微生物组成的影响	胡嘉敏, 左剑恶, 李金波, 张艳艳, 艾翔, 龚大惠, 张继文, 孙丁明 (3664)
不同类型脱水药剂对底泥固化效果和理化性质的影响	任俊, 殷鹏, 王威振, 唐婉莹, 尹洪斌, 朱丽娟 (3672)
微纳米粒径生物炭的结构特征及其对 Cd ²⁺ 吸附机制	马文艳, 裴鹏刚, 高歌, 孙约兵 (3682)
不同生物炭对磷的吸附特征及其影响因素	连宁海, 张树楠, 刘锋, 邢宏霖, 吴金水 (3692)
Mg-La-Fe/沸石复合材料的制备及其处理低浓度含磷废水的性能	印学杰, 宋小宝, 丁陈蔓, 冯彦房, 杨根, 何世颖, 薛利红 (3699)
一体式部分亚硝化-厌氧氨氧化工艺污泥膨胀发生和恢复过程中微生物群落演替及 PICRUS2 功能预测分析	李亚男, 闫冰, 郑蕊, 姚丽, 隋倩雯, 魏源送 (3708)
丝状菌膨胀污泥好氧颗粒化稳定性及微生物多样性	高春娣, 杨箫阳, 欧家丽, 韩颖璐, 程阳阳, 彭永臻 (3718)
2000~2020 年长江流域植被 NDVI 动态变化及影响因素探测	徐勇, 郑志威, 郭振东, 宴世卿, 黄雯婷 (3730)
近 40 年来福建省水稻土有效磷富集效应及潜在生态风险评估	陈中星, 邱龙霞, 陈瀚闾, 范协裕, 毋亭, 沈金泉, 邢世和, 张黎明 (3741)
土地利用变化对西南喀斯特土壤团聚体组成、稳定性以及 C、N、P 化学计量特征的影响	何宇, 盛茂根, 王轲, 王霖娇 (3752)
长江经济带矿山土壤重金属污染及健康风险评价	张浙, 卢然, 伍思扬, 贾智彬, 王宁 (3763)
煤矸石堆积区周边土壤重金属污染特征与植物毒性	尚誉, 桑楠 (3773)
燃煤工业区不同土地利用类型土壤汞含量污染评价	李强, 姚万程, 赵龙, 张朝, 张恩月, 苏迎庆, 刘庚 (3781)
广州市南沙区第四剖面镉富集特征及生物有效性	王芳婷, 包科, 黄长生, 赵信文, 顾涛, 曾敏 (3789)
黔西北山区耕地重金属健康风险评价及环境基准	徐梦琪, 杨文毅, 杨利玉, 陈勇林, 景灏楠, 吴攀 (3799)
土壤重金属生物可利用性影响因素及模型预测	张加文, 田彪, 罗晶晶, 吴凡, 张聪, 刘征涛, 王晓南 (3811)
添加有机物料对豫中烟田土壤呼吸的影响	鲁琪飞, 叶协锋, 韩金, 潘昊东, 张明杰, 王晶, 杨佳豪, 姚鹏伟, 李雪利 (3825)
不同稻作系统土壤的 CH ₄ 产生潜力与产生途径	沈皖豫, 黄琼, 马静, 张广斌, 徐华 (3835)
东部平原矿区复垦土壤微生物群落特征及其组装过程	马静, 董文雪, 朱燕峰, 肖栋, 陈浮 (3844)
同质环境下不同锦鸡儿属植物根际土壤细菌群落结构差异及其影响因素	李媛媛, 徐婷婷, 艾喆, 魏庐潞, 马飞 (3854)
岩溶与非岩溶区水稻土团聚体细菌群落结构和功能类群比较	肖筱怡, 靳振江, 冷蒙, 李雪松, 熊丽媛 (3865)
紫色土中微生物群落结构及功能特征对土壤 pH 的差异响应	王智慧, 蒋先军 (3876)
有机物料还田对稻田土壤 DOM 碳源代谢能力的影响	肖怡, 李峥, 黄容, 汤奥涵, 李冰, 王昌全 (3884)
《环境科学》征订启事 (3403) 《环境科学》征稿简则 (3462) 信息 (3493, 3655, 3834)	

鄂尔多斯市夏秋季黑碳气溶胶时间演变特征及其来源解析

孔祥晨^{1,2,3}, 张连霞¹, 张彩云¹, 王红磊^{3*}, 许晶¹, 郑佳锋²

(1. 鄂尔多斯市气象局, 鄂尔多斯 017010; 2. 成都信息工程大学大气科学学院, 成都 610000; 3. 南京信息工程大学中国气象局气溶胶-云-降水重点开放实验室, 南京 210044)

摘要: 使用 AE-33 于 2019 年 8 月 12 日至 10 月 4 日观测了黑碳(BC)浓度, 结合 PM、污染气体和气象要素数据、HYSPLIT 模式、PSCF 和 CWT 模式, 分析了 BC 的时间演变特征、潜在来源及其主要影响区域。结果表明, $\rho(\text{BC})$ 平均值为 $882 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$, 占 $\text{PM}_{2.5}$ 的质量分数为 6.08%。 $\rho(\text{BC})$ 主要集中在 $200 \sim 1\,000 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$, 占总样本数的 55.9%。在不同 BC 浓度范围内, 均是以 $\text{BC}_{\text{液态}}$ 为主, 平均占比为 86%。BC 和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的日变化均为单峰型分布, 峰值分别位于 08:00 和 10:00, 峰值浓度分别增加了 24.3% 和 47.2%。 $\text{BC}_{\text{固态}}$ 的日变化为双峰型分布, 峰值分别位于 08:00 和 20:00, $\text{BC}_{\text{液态}}$ 的日变化为单峰型分布, 峰值位于 08:00。BC 与 NO_2 的相关性较好, 与 SO_2 的相关性较弱, 说明 BC 受交通源的影响较大, 受工业源的影响较小。影响鄂尔多斯市的主导气团可分为 4 类, 南部气团(35.6%)、局地气团(26.9%)、西北气团(18.8%)和东北气团(18.7%)。鄂尔多斯市对下游地区的影响主要分为东北气团(40.9%)、西北气团(30.4%)和东南气团(28.7%)。BC 的 CWT 高值区主要位于南部的延安-铜川-宝鸡-汉中一带和吕梁-临汾-三门峡-南阳一带, 为两条狭长的传输带, 权重浓度超过 $1\,400 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ 。BC 的 CWT 高值影响区主要集中在乌海-巴彦淖尔-包头-呼和浩特一带, 权重浓度超过 $900 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ 。BC 的远距离输送影响范围可至南部的榆林-延安-铜川-宝鸡一带, 东部的朔州-大同-北京一带和东北部的锡林郭勒盟-兴安盟-呼伦贝尔一带。

关键词: 鄂尔多斯; 黑碳(BC); 气溶胶; 潜在来源; 日变化

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)07-3439-12 DOI: 10.13227/j.hjxx.202110073

Temporal Evolution and Source Appointment of Black Carbon Aerosol in Ordos During Summer and Autumn 2019

KONG Xiang-chen^{1,2,3}, ZHANG Lian-xia¹, ZHANG Cai-yun¹, WANG Hong-lei^{3*}, XU Jing¹, ZHENG Jia-feng²

(1. Ordos Meteorological Bureau of Inner Mongolia, Ordos 017010, China; 2. School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610000, China; 3. Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: In this study, black carbon (BC) aerosols were continuously observed using a seven-channel aethalometer (AE-33) in Ordos from August 12 to October 4, 2019; using this data combined with article matter (PM), pollutant gas, and meteorological element data; a HYSPLIT model; and potential source contribution function (PSCF) and concentration-weighted trajectory (CWT) models, we analyzed the temporal evolution and potential source appointment and main influence areas of BC. The results showed that the average of $\rho(\text{BC})$ was $882 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$, accounting for 6.08% of $\text{PM}_{2.5}$. The $\rho(\text{BC})$ was mainly concentrated at $200 \sim 1\,000 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$, accounting for 55.9% of the total samples. In different BC mass concentration ranges, $\text{BC}_{\text{liquid}}$ was the mainstay, with an average proportion of 86%. The diurnal variations in BC and $\text{PM}_{2.5}$ showed unimodal distributions, with peaks at 08:00 and 10:00, respectively, and peak concentrations increased by 24.3% and 47.2%, respectively. The diurnal variation in BC_{solid} showed a bimodal distribution, with peaks at 08:00 and 20:00, respectively. The diurnal variation in the $\text{BC}_{\text{liquid}}$ showed a unimodal distribution with a peak at 08:00. The strong correlation between BC and NO_2 indicated a greater impact of vehicle emissions on BC concentration, whereas the weak correlation between BC and SO_2 indicated a lower impact of industrial emissions on BC concentration. The dominant air masses affecting the Ordos could be divided into four categories. The southern air masses (35.6%) had the highest mass concentration of atmospheric pollutants, followed by the local air masses (26.9%) and the northwest air masses (18.8%), and the northeast air masses (18.7%) had the lowest mass concentration of pollutants. The influence of the Ordos on the downstream areas was mainly divided into the northeast air masses (40.9%), the northwest air masses (30.4%), and the southeast air masses (28.7%). High CWT value areas of BC were mainly located in the southern Yan'an-Tongchuan-Baoji-Hanzhong areas and Lvliang-Linfen-Sanmenxia-Nanyang areas. They were two long and narrow transmission belts with a weight mass concentration exceeding $1\,400 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$. High CWT value areas of BC had the greatest impact on the Wuhai-Bayannaoer-Baotou-Hohhot regions, with a weight concentration exceeding $900 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$. The long-range transportation of BC could reach the Yulin-Yan'an-Tongchuan-Baoji areas in the south, the Shuozhou-Datong-Beijing areas in the east, and the Xilin Gol League-Xing'an League-Hulunbuir areas in the northeast.

Key words: Ordos; black carbon (BC); aerosol; potential source appointment; diurnal variation

黑碳气溶胶(black carbon, BC)作为大气气溶胶中最重要的吸收性组分,虽然仅占气溶胶质量分数的 5%~15%^[1,2],但其辐射特性会显著影响全球辐射平衡^[3~5]和城市边界层的演变发展特征^[6~9]。BC 可通过吸收太阳辐射加热大气,使得全球温度升

收稿日期: 2021-10-11; 修订日期: 2021-11-16

基金项目: 江苏省自然科学基金项目(BK20180801); 国家自然科学基金项目(41805096)

作者简介: 孔祥晨(1987~),男,硕士研究生,工程师,主要研究方向为黑碳气溶胶和大气污染, E-mail: 15147736650m@sina.cn

* 通信作者, E-mail: hongleiwang@nuist.edu.cn

高,加剧全球变暖^[10,11].但是在不同高度的 BC 加热作用对边界层结构的影响不同^[7~9].如果近地面 BC 浓度增加,加热底层大气,则会使得边界层内对流加强,形成“火炉效应”,有利于近地面大气污染物扩散^[8].而如果 BC 在边界层上部增多,则可加热上层大气,并会使得到达地面的太阳辐射减少,降低地面温度,使得边界层变得更加稳定,形成“穹顶效应”,不利于近地面大气污染物的扩散^[6,7,12].此外,虽然 BC 作为一次气溶胶本身并没有毒性,但是其疏松多孔的结构,可以为大气化学反应提供反应界面,BC 还在某些化学反应中起到催化作用,因此在 BC 表面可形成较多的二次气溶胶,这些气溶胶组分对人体健康可产生较大危害^[13~17].

BC 主要来自化石燃料和生物质等含碳物质的不完全燃烧过程^[18],因此其空间分布极不均匀.在不同地区,由于排放源和气象条件的差异,BC 的时间演变特征、传输机制和转化过程存在较大差异^[19~23].我国 BC 的外场观测研究起步较晚,最早是汤洁等^[24]在瓦里关开展了比较长期的观测研究.最近几年在京津冀、长三角和珠三角等地,相继开展了大量的 BC 观测研究^[25~31].赵德龙等^[27]的研究利用飞机观测资料发现在 1 500 m 以下,BC 气溶胶浓度变化梯度均较大,霾条件下的 BC 气溶胶浓度约为非霾条件下的 4.3 倍;在 1 500 m 以上,BC 气溶胶浓度变化梯度均较小,霾条件下的 BC 气溶胶浓度约为非霾条件下的 2.5 倍.Ji 等^[28]的研究表明北京市 BC 存在显著的日变化、季节变化和周末效应,并对能见度存在较大影响.谢锋等^[29]的研究表明南京 BC 排放源以机动车排放为主,污染天机动车排放源占比为 68%~87%.姜淑娟等^[31]的研究于 2005 年观测发现北京冬季 90% 的 BC 存在于 PM₁₀ 中,82.6% 的 BC 存在于 PM_{2.5} 中.荆俊山等^[32]的研究发现北京地区受到山谷风的影响,来自观测点东南方的城区的气流使 PM_{2.5} 和 BC 浓度升高,来自观测点西北方向的风则使 PM_{2.5} 和 BC 浓度降低.杨晓旻等^[33]的研究表明南京市 4 个季节 BC 日变化均为双峰型分布,峰值分别位于 06:00~08:00 和 21:00~23:00. Jia 等^[34]的研究也发现上海城区 AAE 的值与交通源的类似,交通源是上海 BC 的主要来源.Wu 等^[35]的研究使用无人机对深圳市夏季和冬季的 BC 与 O₃ 观测表明,BC 浓度随高度逐渐降低,而 AAE 和 O₃ 则随高度增加.

鄂尔多斯市位于内蒙古自治区西南部,为典型的北部有植被的荒漠与沙漠下垫面,地处蒙古高原和黄土高原中间位置,为典型的北温带半干旱大陆性气候区,全年多盛行西风及北偏西风,为华北平原

的上风向.王跃思等^[36]的研究表明该地区气溶胶光学厚度相对较小,空气清洁,气溶胶排放源较少.申彦波等^[37]的研究表明 1961~2006 年期间鄂尔多斯高原的地面太阳辐射量和直射比均呈总体减少的趋势,但在 1992 年以后略微增加.近年来,针对鄂尔多斯地区气溶胶化学组成、时空分布和污染形成机制方面有较多研究^[38~41].但是针对 BC 气溶胶的研究鲜见报道,鉴于 BC 在大气环境和全球气候变化中的重要作用,针对该地区 BC 的时空分布和来源特征的研究十分必要.本研究使用 AE-33 于 2019 年 8 月 12 日~10 月 4 日观测了鄂尔多斯市 BC 浓度,结合 PM、污染气体和气象要素数据,分析了 BC 的时间演变特征及其主要影响因素;此外使用 HYSPLIT 模式、PSCF 和 CWT 模式,考察了该地区不同主导气团下的大气污染物分布特征,探讨了 BC 和 PM_{2.5} 的潜在来源和可能的影响区域,以期为我国西北部城市群地区大气污染特征提供科学的信息.

1 材料与方法

1.1 观测站点介绍

观测点位于鄂尔多斯气象局(39.37°N, 109.49°E; 1 300 m),位于鄂尔多斯市中南部的康巴什区,地处鄂尔多斯高原腹地,距东胜区 25 km、阿勒腾席热镇 3 km.康巴什区是全国首个以城市景观命名的 4A 级旅游景区,观测点北部紧邻考考什纳滨湖公园,南部紧邻康巴什新区第一小学,西部为康巴什第一中学,东部为居民区,周边无明显排放源.具体介绍参见文献[42].

1.2 观测数据介绍

BC 浓度使用 Aethalometer (美国 Magee Scientific 的 AE-33 型)观测,该仪器有 370、470、525、590、660、880 和 940 nm 共 7 个测量通道,本研究使用波长 880 nm 处测得的 BC 浓度数据. AE-33 的工作原理是基于光的 Lambert-Beer 定律,运用光学衰减测量方法,通过测定石英滤膜上 BC 对光的衰减量来计算 BC 的浓度.该仪器的采样流量为 5.0 L·min⁻¹,配备 PM_{2.5} 的进样切割头,观测精度为 1 ng·m⁻³.针对仪器的具体介绍参见文献[33].观测时间为 2019 年 8 月 12 日至 10 月 4 日,观测时间分辨率设置为 5 min.

气象数据(温度、气压、风速、风向、RH、降水量和能见度)来自鄂尔多斯市康巴什气象观测场,数据质量控制参照中国气象局气象数据观测标准,时间分辨率为 1 h. PM_{2.5}、PM₁₀、O₃、SO₂、CO 和 NO₂ 数据来自中国环境监测总站全国城市空气质量实时

发布平台 (<http://106.37.208.233:20035/>) 公布的数据, 时间分辨率为 1 h. 选取距离观测点最近的康泽苑国控点数据, 距离鄂尔多斯市气象局约 5.8 km.

1.3 黑碳仪模型

黑碳仪模型是基于 Sandradewi 等^[43] 的研究工作, 主要用于分析化石燃料和生物质燃烧两种主要排放源对 BC 的贡献大小以及相应 BC 的变化特征. 气溶胶对光的吸收特性与波长之间联系的幂律关系式可以表示为:

$$b_{\text{吸收系数}}(\lambda) = K\lambda^{-AAE} \quad (1)$$

式中, $b_{\text{吸收系数}}$ 为吸收系数; K 为常数; AAE 为吸收系数的 Ångström 指数, 它反映了气溶胶颗粒物的形状大小, 化学成分以及混合状态.

可由以下公式来计算液体燃料源和固体燃料源来源的 BC:

$$b_{\text{吸收系数}} = b_{\text{吸收系数}}(\text{BC}_{\text{液态}}) + b_{\text{吸收系数}}(\text{BC}_{\text{固态}}) \quad (2)$$

$$\frac{b_{\text{吸收系数}}(370 \text{ nm})_{\text{液态}}}{b_{\text{吸收系数}}(880 \text{ nm})_{\text{液态}}} = \left(\frac{370}{880}\right)^{-AAE_{\text{液态}}} \quad (3)$$

$$\frac{b_{\text{吸收系数}}(370 \text{ nm})_{\text{固态}}}{b_{\text{吸收系数}}(880 \text{ nm})_{\text{固态}}} = \left(\frac{370}{880}\right)^{-AAE_{\text{固态}}} \quad (4)$$

$$\text{BC}_{\text{源}} = \frac{b_{\text{吸收系数}}(880 \text{ nm})_{\text{源}}}{\text{MAC}(880 \text{ nm})} \quad (5)$$

$$P = \frac{b_{\text{吸收系数}}(880 \text{ nm})_{\text{液态}}}{b_{\text{吸收系数}}(880 \text{ nm})} = \frac{\text{BC}_{\text{液态}}}{\text{BC}} \quad (6)$$

式中, $AAE_{\text{液态}}$ 和 $AAE_{\text{固态}}$ 分别为液体燃料和固体燃料产生的 BC 的光学吸收 Ångström 指数; $\text{BC}_{\text{源}}$ 为不同源的 BC, 包括液体燃料源和固体燃料源; P 为液体燃料源对 BC 贡献率.

有研究表明, $AAE \approx 1$, 表明 BC 是由交通源(液体燃料)为主导; $AAE \approx 2$ 表明 BC 主要来源于生物质燃烧^[44]. 交通排放(液体燃料)和生物质是如今黑碳仪模型中两个主要的来源, 尤其是在国外地区使用广泛^[45]. 然而, 在中国煤和生物质都是重要的固体燃料源. Liu 等^[46] 的研究表明北京地区煤和生物质的 AAE 值是相同的. 因此在国内相关研究中往往把煤和生物质燃烧的 BC 作为固态燃料源. 为了确定鄂尔多斯市液体和固体燃料不同的 AAE 值, 本文讨论了 AAE 和贡献率的线性拟合关系. 由图 1 可知观测期间 AAE 和 P 的小时值显示了明显的负相关关系, 相关系数 R 为 -0.96 . 经计算可得 $AAE = 2.28(P=0)$ 和 $AAE = 1.06(P=1)$. 因此, 在本文中使用 $AAE_{\text{液态}} = 1.06$ 和 $AAE_{\text{固态}} = 2.28$ 展开研究.

1.4 HYSPLIT 模式

本文所采用的后向轨迹模式是由美国国家海洋

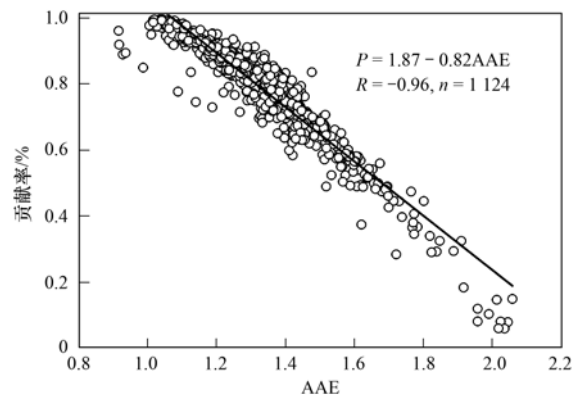


图1 AAE 和贡献率(P)相关性

Fig. 1 Relationship between AAE and contribution rate values during the observation period

及大气管理局(NOAA)开发的轨迹计算模式 HYSPLIT (<http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>). 该模式目前已在大气污染物输送研究中得到了广泛的应用^[47]. 利用 HYSPLIT 模式计算了观测期间每小时距地 500 m 高度的 48 h 后向轨迹和前向轨迹, 分别用于讨论周边地区对鄂尔多斯市的影响以及鄂尔多斯市对其他地区的影响. 模式采用的气象场为美国国家环境预报中心(NECP)的再分析资料, 水平分辨率为 $1.0^\circ \times 1.0^\circ$.

1.5 潜在源区贡献(PSCF)函数

潜在源区贡献(PSCF)函数由 Ashbaugh 等^[48] 开发的, 是一种根据气团轨迹分析辨别污染潜在源区的方法, 在多个领域中都得到了广泛应用^[49,50]. PSCF 值的计算是通过将研究区域划分为空间网格(本研究中将区域划分为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 的 $i \times j$ 个网格)来进行的, 其结果代表了研究区域内经过格点 ij 的污染轨迹数出现的频次, 如公式(7)所示.

$$\text{PSCF}_{ij} = m_{ij}/n_{ij} \quad (7)$$

式中, m_{ij} 为污染轨迹数, 即经过格点的对应的气溶胶或 CCN 数浓度超过设定的阈值的轨迹数, n_{ij} 为该网格上经过的所有轨迹数.

PSCF 方法也存在一定缺陷, 当网格中的气团轨迹数较少时, PSCF 值的波动较大, 增加了计算结果的不确定性. 由此引入经验权重函数 W_{ij} 减小计算误差, 计算方法见公式(8):

$$W(n_{ij}) = \begin{cases} 1.0, & 3n_{\text{ave}} < n_{ij}, \\ 0.7, & 1.5n_{\text{ave}} < n_{ij} \leq 3n_{\text{ave}}, \\ 0.4, & n_{\text{ave}} < n_{ij} \leq 1.5n_{\text{ave}}, \\ 0.2, & n_{ij} \leq n_{\text{ave}}. \end{cases} \quad (8)$$

式中, n_{ij} 为格点中的轨迹数, n_{ave} 为格点内的平均轨迹端点数.

最终得到的 PSCF 值的计算方法如公式(9)

所示:

$$\text{PSCF}_{ij} = \frac{m_{ij}}{n_{ij}} \cdot W(n_{ij}) \quad (9)$$

1.6 浓度权重轨迹(CWT)分析法

CWT 是一种网格化识别源区的方法^[51],通过计算源区格网 ij 的平均权重浓度 C_{ij} 来分析其对目标格网的污染贡献:

$$C_{ij} = \left(\sum_{k=1}^M \tau_{ijk} \right)^{-1} \cdot \sum_{k=1}^M C_k \tau_{ijk} \quad (10)$$

式中, C_{ij} 为网格 ij 上的平均权重浓度, k 为气团轨迹, M 为气团轨迹总数, C_k 为轨迹 k 经过网格 ij 时对应的要素值, τ_{ijk} 为轨迹 k 在网格 ij 停留的时间.

因为 CWT 是一种条件概率函数,当各网格内气流滞留时间较短时(n_{ij} 值较小),CWT 值的不确定性就会较大.因此,需要引入经验权重函数 $W(n_{ij})$ 对其进行区间化赋权和降误差处理^[46],权重函数 $W(n_{ij})$ 定义为:

$$W(n_{ij}) = \begin{cases} 1.0, & 120 < n_{ij} \\ 0.8, & 40 < n_{ij} \leq 120 \\ 0.4, & 20 < n_{ij} \leq 40 \\ 0.2, & n_{ij} \leq 20 \end{cases} \quad (11)$$

进而,可以对 CWT 进行加权计算:

$$\text{WCWT}_{ij} = C_{ij} \times W(n_{ij}) \quad (12)$$

2 结果与讨论

2.1 观测概述

观测期间 $\rho(\text{BC})$ 平均值为 $882 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$,占 $\text{PM}_{2.5}$ 的质量分数为 6.08%.由表 1 可知鄂尔多斯市 BC 的浓度远大于瓦里关站,但是远小于上海、深圳、北京和南京等人为污染较多的地区. $\rho(\text{PM}_{10})$ 、 $\rho(\text{SO}_2)$ 、 $\rho(\text{NO}_2)$ 、 $\rho(\text{O}_3)$ 和 $\rho(\text{CO})$ 的平均值分别为 $35.2 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $8.8 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $17.9 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $86.1 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $0.703 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$.鄂尔多斯夏秋季节 PM 浓度较低,但是 O_3 对较高.观测期间平均温度为 17°C ,风速为 $2.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,RH 为 60.8%.由图 2 可知观测期间温度、RH 和风速的昼夜变化较大.如在 8 月 15 日白天温度最高可达 32°C ,而在夜间温度仅为 12°C ,强烈的温度变化使得边界层内湍流旺盛,风速在白天可达 $9.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,有利于污染物的扩散,因此 PM 浓度较低.在白天 RH 较低,太阳辐射较强,因此有利于 O_3 的生成,因此虽然 NO_2 较低,但是观测期间 O_3 仍然较高.

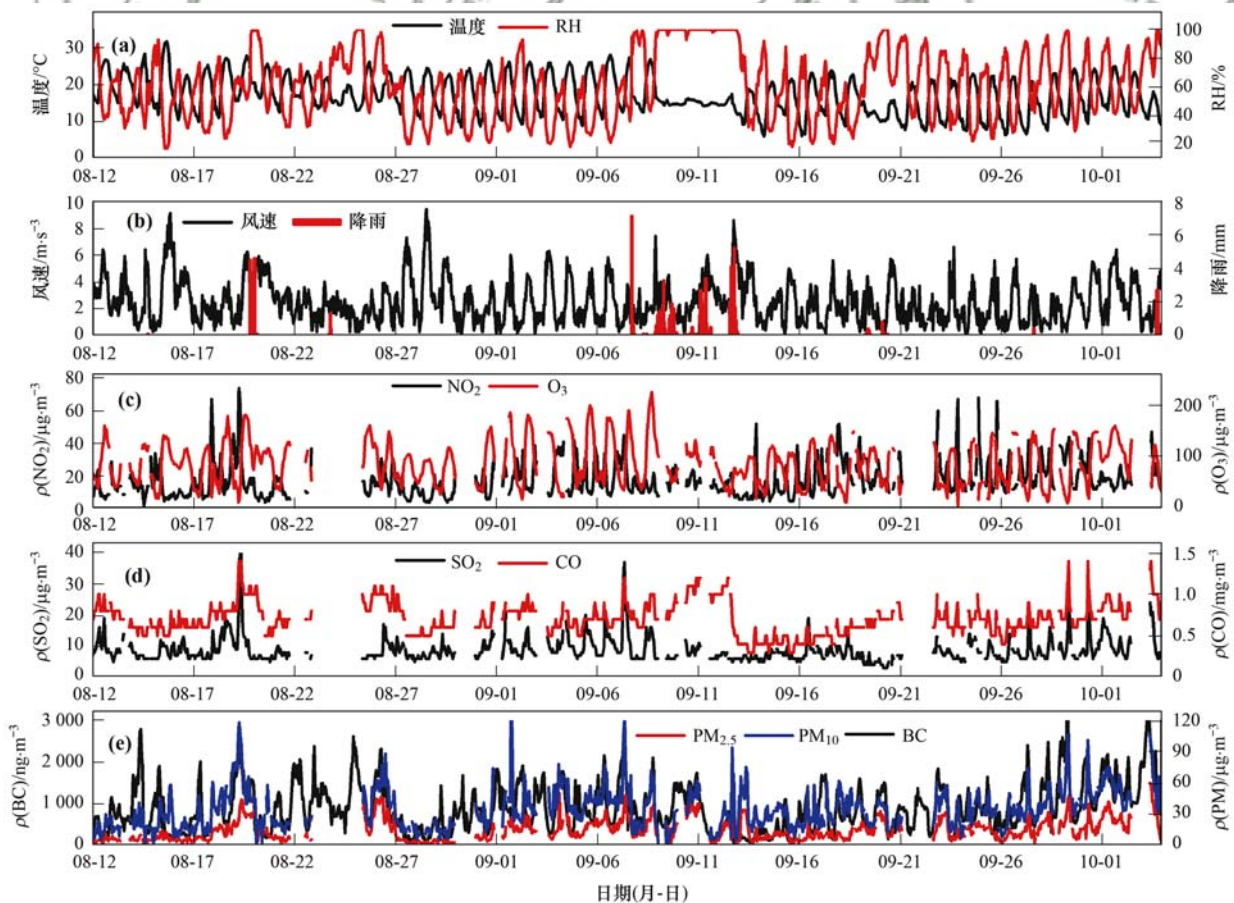


图 2 2019 年大气污染物和气象要素时间变化

Fig. 2 Time series of atmospheric pollutants and meteorological elements in 2019

表 1 与其他城市对比

Table 1 Observational result of BC concentration in some cities of China				
地点	观测日期(年-月)	仪器型号	$\rho(\text{BC})/\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$	文献
鄂尔多斯	2019-08 ~ 2019-10	AE-33	882	本研究
瓦里关	1994-07 ~ 1995-12	AE-10	130 ~ 300	[24]
上海	2008-01 ~ 2012-12	AE-31	2 766.2 ~ 4 045.3	[25]
深圳	2014-01 ~ 2015-06	AE-31	2 580	[26]
北京	2014-01 ~ 2014-12	AE-31	4 400	[28]
南京	2018-07	AE-33	2 632	[33]
南京	2018-10	AE-33	3 064	[33]

由图 2 可知不同雨强对大气污染物的影响不同.较强的降水有利于大气污染物的清除,如 8 月 19 日和 9 月 7 ~ 12 日降水过程.较弱的降水对于大气污染物的清除作用较弱,如 9 月 19 ~ 20 日和 9 月 27 日降水过程.

由图 3(a)可知 $\rho(\text{BC})$ 主要集中在 $200 \sim 1\,000\text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$, 占总样本数的 55.9%, 其中在 $200 \sim 400\text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ 占比最高为 16.1%, 随着浓度的增加 BC 样本数呈现指数下降的趋势.当 $\rho(\text{BC})$ 超过 $2\,200\text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ 时, 样本数较少, 占比均低于 1%. 随着 BC 浓度的增加, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度也逐渐增加.在 $\rho(\text{BC})$ 比较集中的 $200 \sim 1\,000\text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ 范围内, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 浓度较低, 为 $8 \sim 15\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. $\text{BC}/\text{PM}_{2.5}$ 也随着 BC 的增加而增加, 可大概分为 3 个阶段, 先显著增加, 然后增速放缓, 之后增速又开始显著增加.当 $\rho(\text{BC}) < 1\,200\text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ 时, $\text{BC}/\text{PM}_{2.5}$ 的增加率为 $0.42\%/(200\text{ ng}\cdot\text{m}^{-3})$;

BC 每间隔 $200\text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ 浓度变化率, 下同); $1\,200\text{ ng}\cdot\text{m}^{-3} < \rho(\text{BC}) < 2\,200\text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ 时, $\text{BC}/\text{PM}_{2.5}$ 的增加率为 $0.42\%/(200\text{ ng}\cdot\text{m}^{-3})$; $2\,200\text{ ng}\cdot\text{m}^{-3} < \rho(\text{BC}) < 2\,800\text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ 时, $\text{BC}/\text{PM}_{2.5}$ 的增加率为 $1.08\%/(200\text{ ng}\cdot\text{m}^{-3})$.

观测期间, BC 与风速成负相关关系, 相关系数为 -0.5 ; BC 与 RH 为正相关关系, 相关系数为 0.4 .由图 3(c)可发现风速随着 BC 浓度的增加而逐渐降低, 风速主要决定大气的水平扩散能力, 风速越大, 大气扩散条件越好, 因此 BC 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的值越低. RH 的变化正好相反, RH 随着 BC 浓度的增加而增加, RH 越高, 则越有利于颗粒物的吸湿增长, 因此高 RH 条件下 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度则往往较高.此外, 由图 2 可知观测期间高 RH 多出现在夜间, 边界层高度较低, 风速较小, 大气扩散条件较弱, 因此有利于 BC 和 $\text{PM}_{2.5}$ 等大气污染物的积累.

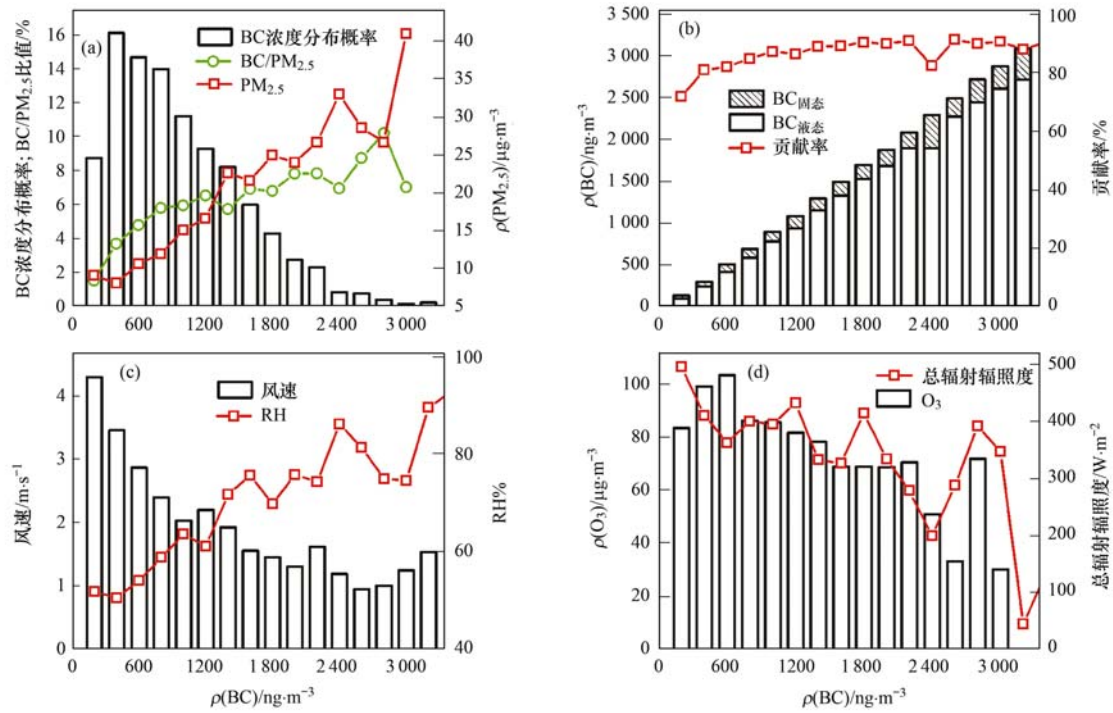


图 3 BC 浓度分布概率和不同 BC 浓度下 $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{BC}/\text{PM}_{2.5}$ 、贡献率、 O_3 、BC 来源和气象要素分布

Fig. 3 Frequency distribution of BC and the corresponding variations of $\text{PM}_{2.5}$, $\text{BC}/\text{PM}_{2.5}$, contribution rate, O_3 , BC sources, and meteorological elements

总辐射辐照度和 O_3 与 BC 均为负相关关系, 相关系数分别为 -0.1 和 -0.3 . 由图 3 可知随着 BC 浓度的增加总辐射辐照度和 O_3 的值存在不同程度的降低. BC 为大气中重要的吸收性气溶胶, BC 和 $PM_{2.5}$ 增加, 意味着大气中颗粒物的消光作用增加, 因此总辐射辐照度减小. 而太阳辐射是决定 O_3 生成量的关键因素, 太阳辐射较弱, 则意味着大气光化学反应较弱, 因此 O_3 浓度较低.

但是由图 3(b) 可发现在不同 BC 浓度范围内, 都是以液态燃料燃烧释放的 BC 为主, 占比平均值为 86%. $BC_{\text{液态}}$ 的占比随 BC 浓度的变化较小, 在 $\rho(BC) < 200 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ 时最小为 72%, 在 $2400 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3} < \rho(BC) < 2600 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ 时最大, 为 91%, 这说明鄂尔多斯市大气中 BC 的来源比较稳定. 由图 3(b) 可知当 $\rho(BC) < 1800 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ 时, $BC_{\text{液态}}$ 的占比随 BC 浓度的增加而增加; 而当 $\rho(BC) > 1800 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ 时, $BC_{\text{液态}}$ 的占比随 BC 浓度的增加变化较小.

2.2 日变化特征

由图 4(a) 可知鄂尔多斯市 BC 和 $PM_{2.5}$ 的日变化均为单峰型分布, 但是峰值时间存在显著差异. BC 日变化峰值时间要早于 $PM_{2.5}$, BC 在夜间比较稳定, 变化较少, 06:00 浓度开始增加, 08:00 达到峰值浓度 $1324 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$. $PM_{2.5}$ 在 05:00 略有下降, 降低了 $0.6 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 此后浓度开始显著增加, 10:00 达到峰值浓度 $20.1 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$. 在早高峰期间, BC 浓度峰值浓度在 3h 内增加了 24.3%, $PM_{2.5}$ 则在 6h 内增加了 47.2%. BC 主要来自一次排放过程, 早高峰

期主要由交通源贡献. BC 与 $PM_{2.5}$ 在早高峰过程中浓度变化时间比较一致, 均是在 06:00 左右开始增加, 但是 $PM_{2.5}$ 的增加幅度要远大于 BC. 由图 5 可知 RH 在 07:00 达到峰值后开始降低, 除了一次排放之外, 二次生成过程也是 $PM_{2.5}$ 的重要来源之一. 在 10:00 时为 58%, 较高的 RH 有利于颗粒物表面气-液-固非均相化学过程的发生. RH 在 11:00 降至 50%, 此后直至 19:00, RH 均低于 50%, 干燥的环境, 不利于 $PM_{2.5}$ 非均相化学过程的发生, 叠加较高的风速, 因此 $PM_{2.5}$ 浓度快速降低.

由图 4 可知不同的气体污染物的日变化特征不同. CO 和 NO_2 日变化为双峰型分布, 峰值分别出现在 08:00 和 22:00. SO_2 和 O_3 日变化均为单峰型分布, 峰值分别出现在 10:00 和 15:00. NO_2 主要来自汽车尾气排放^[52], CO 主要来自含碳物质的不完全燃烧过程^[53], 城市地区 SO_2 则主要来自工业燃煤过程排放^[54], O_3 主要来自光化学过程生成^[55]. 由图 4 可知在早高峰期间 CO 和 NO_2 浓度均是从 05:00 开始增加, 与 $PM_{2.5}$ 和 BC 的变化基本一致. 而 SO_2 浓度则是从 06:00 开始增加, 由图 5 可知, SO_2 的变化与风速的变化类似, 风速较高时, SO_2 浓度较高. 由于康巴什地区工业较少, 因此 SO_2 主要来自周边地区的输送, 当风速增加时, 外来输送增多, SO_2 浓度增加.

BC 与 $PM_{2.5}$ 和 NO_2 的相关性最高, 为 0.6, 由于本研究所观测的 BC 为 $PM_{2.5}$ 中浓度, 因此与 $PM_{2.5}$ 的相关性较高. BC 与 NO_2 相关性较高, 说明 BC 主要受到交通源的影响. BC 与 CO 和 PM_{10} 的相关系数

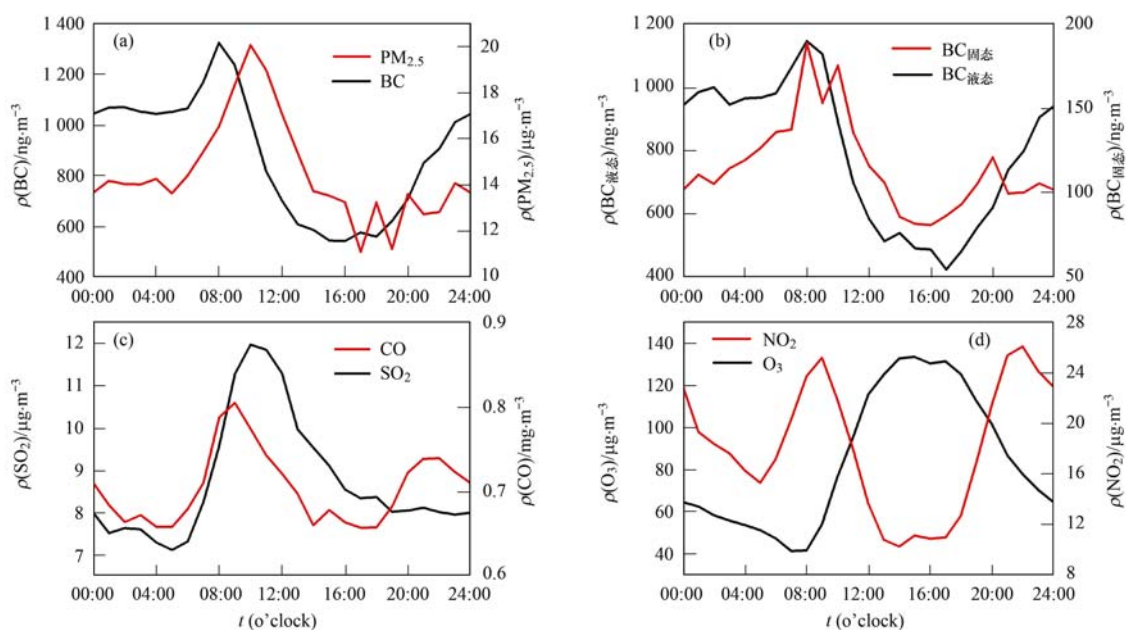


图 4 BC 和大气污染物日变化

Fig. 4 Diurnal variations in BC and other atmospheric pollutants

为 0.5,这也是由于 BC 与 CO 具有相似的来源导致,与 PM_{10} 具有较高的相关性主要是因为 PM_{10} 中包含 $PM_{2.5}$. BC 与 SO_2 的相关系数仅为 0.3,这也说明工业源对鄂尔多斯市 BC 的影响较小.这主要与 BC 的来源有关,康巴什区为鄂尔多斯市典型的旅游区,该区内工业源较少,主要为居民源和交通源为主,因此 BC 与 CO 和 NO_2 的相关性较高,与 SO_2 的相关性较弱.

边界层的日变化对大气污染物浓度日变化特征的影响较大.由图 5(a)可知风速在 08:00 之前逐渐降低,08:00 达到最低值 $1.4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,RH 在 07:00 之前逐渐增加,07:00 达到最大值 82%,温度在 06:00 达到最低值 11.3°C ,总辐射辐照度在 06:00 开始观测到数值,说明此时已经开始日出.在 06:00 之前为稳定边界层结构,气象要素变化较少,边界层扩散条件较弱,且此时认为活动较少,因此污染物浓度变化较弱.而在日出之后,随着到达地面的太阳辐射的快速增加,温度迅速增加,近地面风速快速增加,大气扩散条件增强,大气污染物浓度迅速降低.午后,太阳辐射迅速渐弱,温度降低,风速降低,大气扩散条件减弱,边界层高度降低,大气污染物开始积累,浓度开始增加.

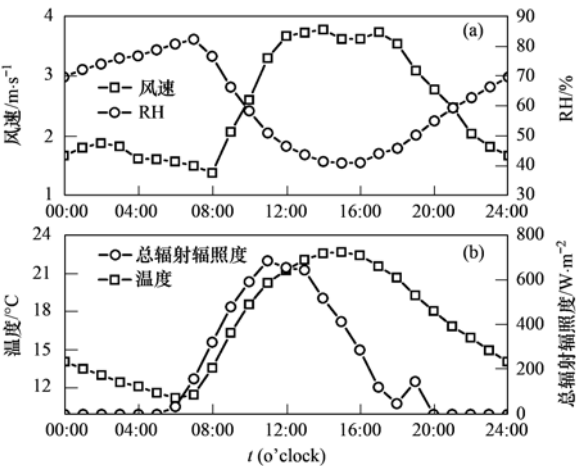


图 5 气象要素日变化

Fig. 5 Diurnal variations in meteorological elements

由图 4(b)可发现 $BC_{\text{固态}}$ 和 $BC_{\text{液态}}$ 的日变化特征不同, $BC_{\text{固态}}$ 的日变化为双峰型分布,峰值分别位于 08:00 和 20:00, $BC_{\text{液态}}$ 的日变化为单峰型分布,峰值位于 08:00. $BC_{\text{液态}}$ 的日变化与 BC 类似,06:00 浓度开始迅速增加.而 $BC_{\text{固态}}$ 则是从 07:00 浓度开始快速增加,此外 $BC_{\text{固态}}$ 在 10:00 还出现了一个弱的峰值,与 SO_2 的峰值一致,这主要是由于工业燃煤的贡献,也归为早高峰.由图 6 可知贡献率的日变化呈现出白天低夜间高的特征,白天工业源的外来输送贡献较高. AAE 的日变化与贡献率正好相反,白天

高夜间低,白天出现两个明显的峰值,分别位于 13:00 和 17:00. AAE 的值越小,则代表 BC 气溶胶粒子粒径越大^[56,57].在夜间 AAE 的值较小,夜间风速较低,RH 较高(图 5),有利于 BC 气溶胶粒子的老化,气溶胶粒子粒径较大;白天正好相反,温度较高、风速较大且 RH 较低(图 5),不利于气溶胶的老化过程,大气中的 BC 多是新鲜排放的粒子,因此粒径较小,AAE 值较高.

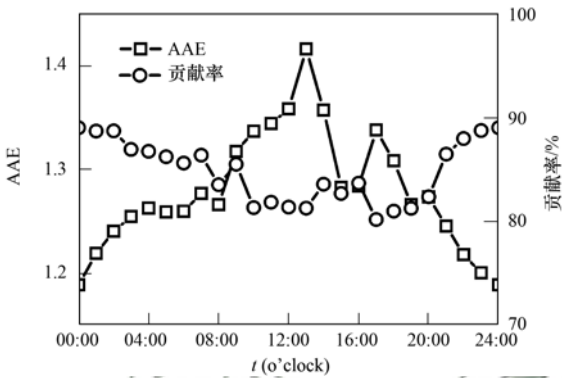


图 6 AAE 和贡献率日变化

Fig. 6 Diurnal variations in AAE and contribution rate

2.3 后向轨迹及潜在来源

由图 7 可发现影响鄂尔多斯市的主导气团可分为 4 类,其中 3 类为外来输入型气团,一类为局地气团.第一类是南部气团,可占总气团的 35.6%,主要来自陕西北部榆林-山西南部临汾-河南北部洛阳,这一带人为源较多,大气污染物浓度较高,对鄂尔多斯市本地的空气质量影响较大.由表 2 可知该类主导气团下大气污染物的浓度最高,其中 $\rho(\text{BC})$ 和 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 分别为 $1\ 156\text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $20.2\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

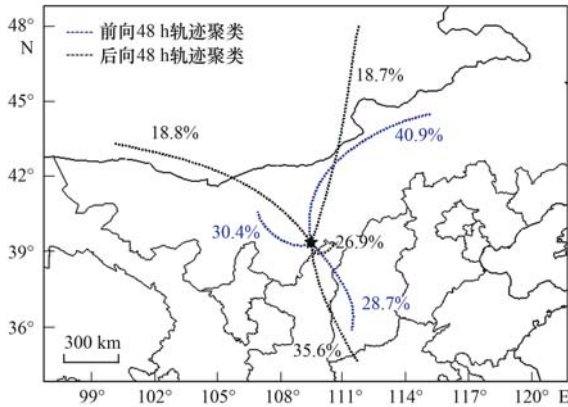


图 7 48 h 后向轨迹和前向轨迹聚类

Fig. 7 Clustering of the 48-h air mass back and forward trajectories

第二类是局地气团,可占总气团的 26.9%,主要集中在鄂尔多斯的东南部,这一类气团轨迹较短,主要体现了局地污染的影响.由表 2 可知该类主导气团下风速最低,为 $2.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,远小于其余 3 类气团.该类气团下大气污染物浓度仅次于南部气团,其中

$\rho(\text{BC})$ 和 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 分别为 $900\text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $16.3\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

表 2 不同类型气团下大气污染物和气象要素汇总

Table 2 Summary of atmospheric pollutants and meteorological elements in different air mass types				
项目	南部气团	局地气团	西北气团	东北气团
$\rho(\text{BC})/\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$	1 156	900	483	723
$\rho(\text{PM}_{2.5})/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	20.2	16.3	9.2	5.9
$\rho(\text{PM}_{10})/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	44.9	33.8	30.9	19.9
$\rho(\text{SO}_2)/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	10.0	8.4	7.5	8.3
$\rho(\text{NO}_2)/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	21.3	18.5	14.4	13.9
$\rho(\text{O}_3)/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	95.0	89.0	75.9	75.2
$\rho(\text{CO})/\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$	0.797	0.721	0.540	0.687
$\rho(\text{BC}_{\text{液态}})/\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$	1 006	783	400	586
$\rho(\text{BC}_{\text{固态}})/\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$	150	117	83	137
AAE	1.26	1.26	1.38	1.24
贡献率/%	87	87	83	81
风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	2.5	2.0	3.1	2.8
RH/%	65.5	65.2	52.0	54.4

第三类为西北气团, 占总气团的 18.8%, 主要来自西北部的巴彦淖尔-蒙古国的古尔班特斯一带. 由表 2 可知该类气团下风速最大, 可达 $3.1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, RH 最低, 仅为 52.0%, $\rho(\text{BC})$ 最低, 仅为 $483\text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$, 但是 PM 浓度较高, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 和 $\rho(\text{PM}_{10})$ 分别为 $9.2\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $30.9\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 是东北气团下的 1.6 倍. 这类气团与东北气团相比, 气团途经地的交通源较少, 因此 BC 的浓度较低. 第四类为东北气团, 占总气团的 18.7%, 主要来自东

北部的包头和呼和浩特-蒙古国的图门萨特一带. 由表 2 可知该类气团下 PM、 NO_2 和 O_3 的浓度最低, BC、 SO_2 和 CO 的浓度高于西北气团. 该类气团下 AAE 的值最小, 为 1.24, 说明在该类气团下 BC 粒子的粒径最大, 这类气团传输距离较长, 外来输送的 BC 较多, 因此 BC 粒子更加老化. 总体来说这两类偏北气团起源于境外, 气团轨迹较长, 传输速度较快, 气团相对清洁, 因此有利于鄂尔多斯市空气质量的改善.

由表 2 可发现南部气团和局地气团下贡献率较高, 为 87%, 而在西北气团和东北气团下 P 值较低, 分别为 83% 和 81%. 这说明在南部气团和局地气团影响下, BC 受到液态燃料燃烧的影响较大, 例如交通源, 这两类气团下的 NO_2 和 CO 也显著高于其余两类偏北气团.

由图 7 可知鄂尔多斯市的前向气团轨迹主要分为 3 类, 即对下游地区的影响主要分为 3 个方向. 第一个方向为东北气团, 主要影响包头-呼和浩特-锡林郭勒盟一带, 可占总气团的 40.9%, 该类气团轨迹较长, 传输速度较快, 对下游的影响的响应时间较短. 第二类为西北气团, 主要影响乌海-巴彦淖尔一带, 可占总气团的 30.4%, 该类气团的轨迹较短, 传输速度较慢, 主要是影响周边地区. 第三类为东南气团, 主要是神木-榆林-吕梁-临汾一带, 占总气团的 28.7%.

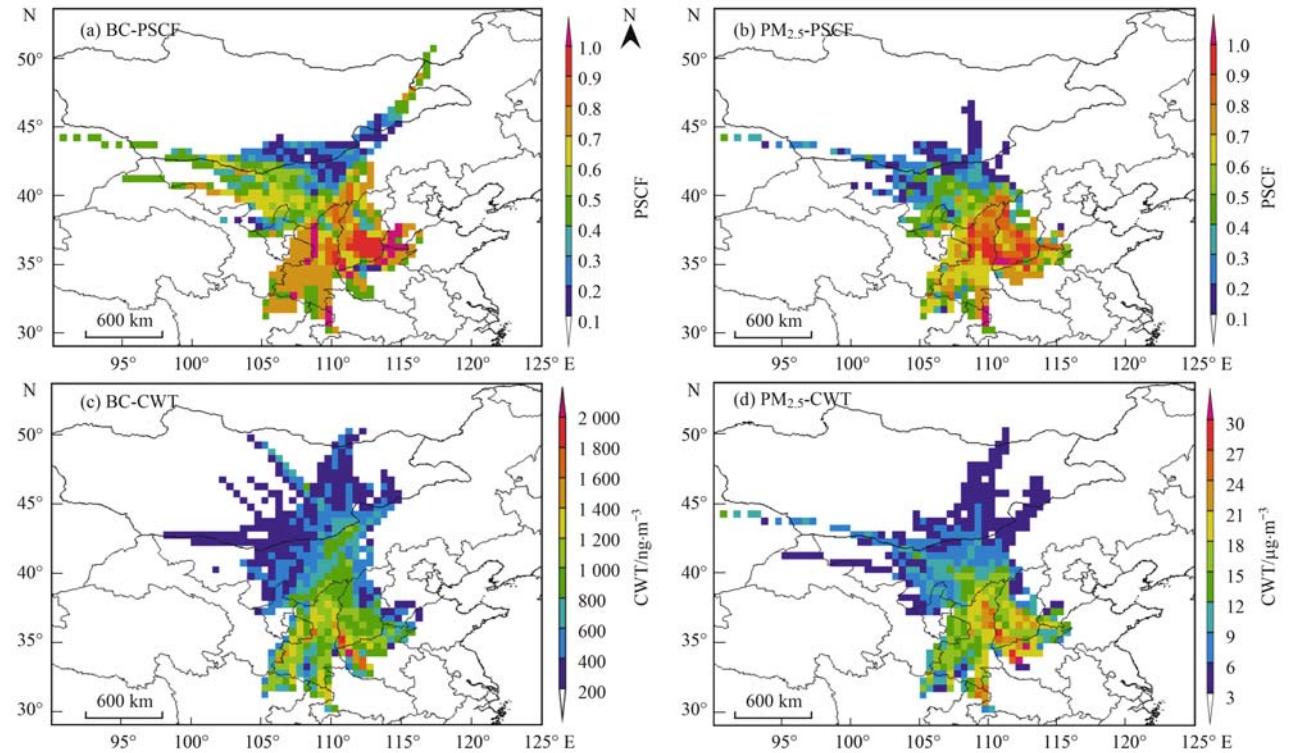


图 8 BC 和 $\text{PM}_{2.5}$ 后向 PSCF 和 CWT 分布

Fig. 8 Backward trajectories of BC and $\text{PM}_{2.5}$ by PSCF and CWT models

由图 8 可知 BC 与 $\text{PM}_{2.5}$ 的 PSCF 来源分布的高值分布类似,均是来自于其南部,太原-吕梁-临汾一带的 PSCF 值最高,超过 0.8;其次是陕西境内, PSCF 值为 0.6~0.8,在陕西北部铜川-延安-榆林一带贡献较高.西北地区对 BC 和 $\text{PM}_{2.5}$ 也有贡献,主要集中在阿拉善盟-巴彦淖尔一带, PSCF 值为 0.5~0.7.鄂尔多斯西北部的包头-呼和浩特一带的 PSCF 贡献较低,对 $\text{PM}_{2.5}$ 的贡献均低于 0.4,但是对 BC 的贡献要高一些,可达到 0.7.此外,西北的蒙古国巴彦德勒格尔-新巴尔虎右旗一带对鄂尔多斯的 BC 的贡献也较大, PSCF 值为 0.4~0.8. PSCF 的分布与图 7 的气团轨迹聚类结果基本一致,偏北气团占比较少,气团传输速度较快,比较清洁,因此对鄂尔多斯 BC 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的影响较小.

由于潜在源区贡献因子分析法只能反映潜在源区贡献率的大小,无法模拟数值的大小.为此,本研究引入浓度权重轨迹分析法(CWT)计算潜在源区的权重浓度(浓度数值),以反映潜在污染源区的污染程度.

由图 8 可知 BC 的 CWT 分布范围要大于 $\text{PM}_{2.5}$ 的分布范围,即鄂尔多斯市 BC 的来源分布要比 $\text{PM}_{2.5}$ 大. BC 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的 CWT 高值区均主要位于鄂

尔多斯市南部,但是区域分布不同. BC 的 CWT 高值区主要位于南部的延安-铜川-宝鸡-汉中一带和吕梁-临汾-三门峡和南阳一带,为两条狭长的传输带,权重浓度超过 $1\,400\text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$. $\text{PM}_{2.5}$ 的 CWT 高值区主要集中在榆林-延安-西安-临汾-三门峡-洛阳-郑州一带,形成一个高值区,权重浓度超过 $18\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. BC 在其东北方向的 CWT 贡献较大,权重浓度为 $600\sim1\,000\text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$;而 $\text{PM}_{2.5}$ 则是西北方向贡献较大,权重浓度为 $6\sim15\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.来自境外的远距离输送对 BC 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的 CWT 贡献均较小,但是影响范围较大,最远可受到俄罗斯的影响.

由图 9 可知鄂尔多斯市 BC 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的影响范围类似,主要影响其东部地区,但是影响的高值范围显著不同. BC 的 PSCF 高值影响区域范围更广,在鄂尔多斯市周边地区的贡献较高,超过 0.9. BC 的影响区主要分布在南部的榆林-延安-铜川-西安-吕梁-临汾一带,东部的朔州-大同-呼和浩特-包头-乌兰察布一带.随着距鄂尔多斯市的距离增加, PSCF 值迅速降低.而 $\text{PM}_{2.5}$ 的 PSCF 高值影响区域范围主要集中在东北部的包头-呼和浩特-乌兰察布一带, PSCF 的值超过 0.8,其次在南部的榆林-延安-吕梁一带也有范围较小的高值区.

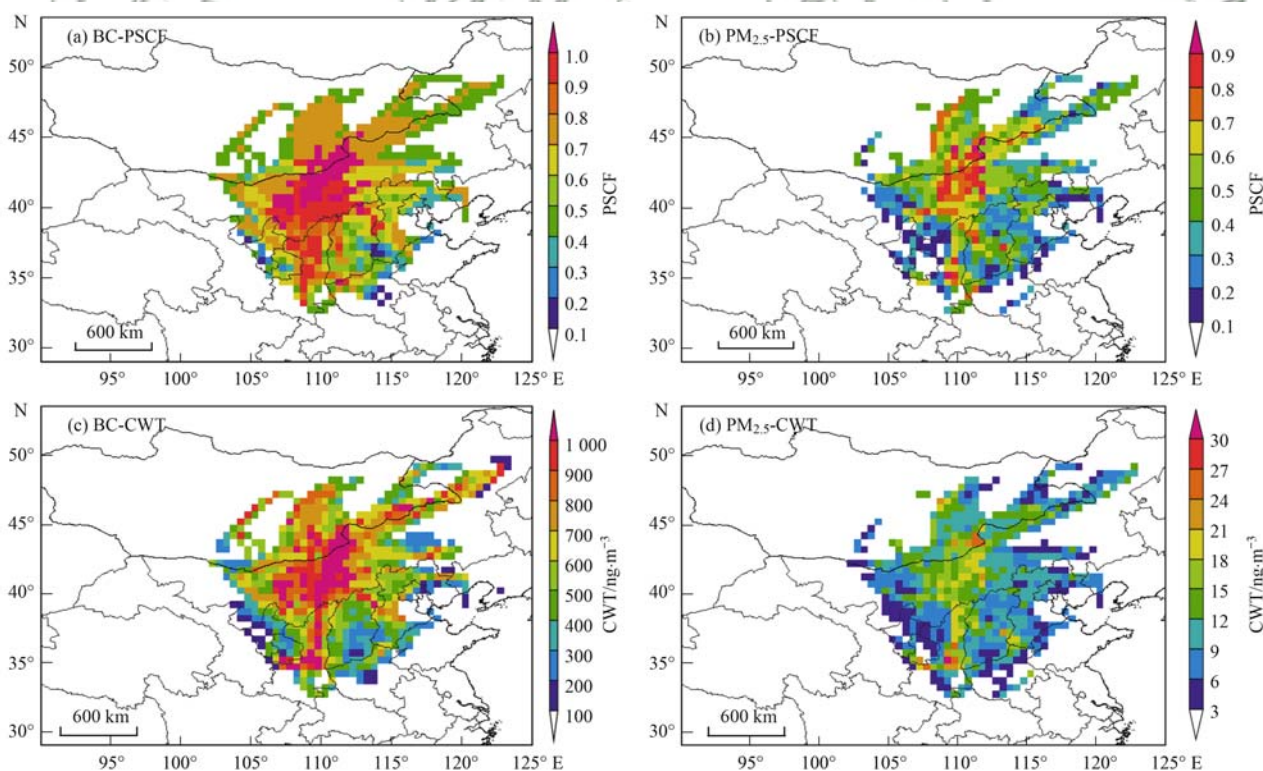


图 9 BC 和 $\text{PM}_{2.5}$ 前向 PSCF 和 CWT 分布

Fig. 9 Forward trajectories of BC and $\text{PM}_{2.5}$ by PSCF and CWT models

BC 的 CWT 高值影响区分布与 PSCF 高值区分布类似,主要集中在鄂尔多斯市周边地区乌海-巴

彦淖尔-包头-呼和浩特一带,权重浓度超过 $900\text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$.远距离输送影响可分为 3 个方向,南部的

榆林-延安-铜川-宝鸡一带, 权重浓度超过 $900 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$; 东部的朔州-大同-北京一带, 权重浓度为 $500 \sim 800 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$; 东北部的锡林郭勒盟-兴安盟-呼伦贝尔一带, 最远可抵达鄂伦春自治旗附近, 权重浓度为 $600 \sim 1\,000 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$.

$\text{PM}_{2.5}$ 的 CWT 高值区影响范围较小, 主要集中在南部的榆林-延安-铜川一带和东北部的包头-呼和浩特-扎门乌德一带, 权重浓度超过 $15 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$. 对于下游京津冀地区的影响较小, 权重浓度较低, 低于 $12 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$.

3 结论

(1) $\rho(\text{BC})$ 的平均值为 $882 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$, 占 $\text{PM}_{2.5}$ 的质量分数为 6.08%. $\rho(\text{BC})$ 主要集中在 $200 \sim 1000 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$, 占总样本数的 55.9%. 在不同 BC 浓度范围内, 均是以液态燃料燃烧释放的 BC 为主, 占比平均值为 0.86. 随着 BC 浓度的增加, $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{BC}/\text{PM}_{2.5}$ 占比和 RH 逐渐增加, 风速、总辐射辐照度和 O_3 逐渐降低. BC 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的日变化均为单峰型分布, 峰值分别位于 08:00 和 10:00, 峰值浓度分别增加了 24.3% 和 47.2%. $\text{BC}_{\text{固态}}$ 的日变化为双峰型分布, 峰值分别位于 08:00 和 20:00, $\text{BC}_{\text{液态}}$ 的日变化为单峰型分布, 峰值位于 8:00. BC 与 NO_2 的相关性较好, 与 SO_2 的相关性较弱, 说明 BC 受交通源的影响较大, 受工业源的影响较小.

(2) 影响鄂尔多斯市的主导气团可分为 4 类, 南部气团 (35.6%)、局地气团 (26.9%)、西北气团 (18.8%) 和东北气团 (18.7%). 鄂尔多斯市对下游地区的影响主要分为 3 个方向, 东北气团 (40.9%)、西北气团 (30.4%) 和东南气团 (28.7%).

(3) BC 与 $\text{PM}_{2.5}$ 的 PSCF 的高值分布类似, 南部的太原-吕梁-临汾一带的 PSCF 值最高; 其次是陕西北部铜川-延安-榆林一带. BC 的 CWT 高值区主要位于南部的延安-铜川-宝鸡-汉中一带和吕梁-临汾-三门峡和南阳一带, 权重浓度超过 $1\,400 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$. BC 在其东北方向的 CWT 贡献较大, 权重浓度为 $600 \sim 1\,000 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$; 而 $\text{PM}_{2.5}$ 则是西北方向贡献较大, 权重浓度为 $6 \sim 15 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$.

(4) BC 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的影响范围类似, 主要影响其东部地区, BC 的高值影响区域范围更广. BC 的 CWT 高值影响区主要集中在乌海-巴彦淖尔-包头-呼和浩特一带, 权重浓度超过 $900 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$. 远距离输送影响可分为 3 个方向, 南部的榆林-延安-铜川-宝鸡一带, 权重浓度超过 $900 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$; 东部的朔州-大同-北京一带, 权重浓度为 $500 \sim 800 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$; 东

北部的锡林郭勒盟-兴安盟-呼伦贝尔一带, 最远可抵达鄂伦春自治旗附近, 权重浓度为 $600 \sim 1\,000 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$.

参考文献:

- [1] Yang F, Tan J, Zhao Q, *et al.* Characteristics of $\text{PM}_{2.5}$ speciation in representative megacities and across China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, **11** (11): 5207-5219.
- [2] Schauer J J, Mader B T, Deminter J T, *et al.* ACE-Asia intercomparison of a thermal-optical method for the determination of particle-phase organic and elemental carbon [J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, **37** (5): 993-1001.
- [3] Panicker A S, Sandeep K, Gautam A S, *et al.* Black carbon over a central Himalayan Glacier (Satopanth): pathways and direct radiative impacts [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **766**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.144242.
- [4] Zarzycki C M, Bond T C. How much can the vertical distribution of black carbon affect its global direct radiative forcing? [J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, **37** (20), doi: 10.1029/2010GL044555.
- [5] 曹闪闪, 段玉森, 高婵婵, 等. 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 [J]. *环境科学*, 2021, **42** (6): 2668-2678.
Cao S S, Duan Y S, Gao C C, *et al.* Changes and potential sources of atmospheric black carbon concentration in Shanghai over the past 40 years based on MERRA-2 reanalysis data [J]. *Environmental Science*, 2021, **42** (6): 2668-2678.
- [6] Ding A J, Huang X, Nie W, *et al.* Enhanced haze pollution by black carbon in megacities in China [J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, **43** (6): 2873-2879.
- [7] Huang X, Wang Z L, Ding A J. Impact of aerosol - PBL interaction on haze pollution: Multiyear observational evidences in North China [J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, **45** (16): 8596-8603.
- [8] Ma Y J, Ye J H, Xin J Y, *et al.* The stove, dome, and umbrella effects of atmospheric aerosol on the development of the planetary boundary layer in hazy regions [J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, **47** (13), doi: 10.1029/2020GL087373.
- [9] Zhao D L, Huang M Y, Tian P, *et al.* Vertical characteristics of black carbon physical properties over Beijing region in warm and cold seasons [J]. *Atmospheric Environment*, 2019, **213**: 296-310.
- [10] Jacobson M Z. Control of fossil-fuel particulate black carbon and organic matter, possibly the most effective method of slowing global warming [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2002, **107** (D19), doi: 10.1029/2001JD001376.
- [11] Ramana M V, Ramanathan V, Feng Y, *et al.* Warming influenced by the ratio of black carbon to sulphate and the black-carbon source [J]. *Nature Geoscience*, 2010, **3** (8): 542-545.
- [12] Wang Z L, Huang X, Ding A J. Dome effect of black carbon and its key influencing factors: a one-dimensional modelling study [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, **18** (4): 2821-2834.
- [13] 马庆鑫, 马金珠, 楚碧武, 等. 矿质和黑碳颗粒物表面大气非均相反应研究进展 [J]. *科学通报*, 2015, **60** (2): 122-136.
Ma Q X, Ma J Z, Chu B W, *et al.* Current progress towards the heterogeneous reactions on mineral dust and soot [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2015, **60** (2): 122-136.

- [14] 沈利娟, 张泽峰. NO₂ 在黑碳表面的非均相反应[J]. 化学进展, 2013, **25**(1): 28-35.
Shen L J, Zhang Z F. Heterogeneous reactions of NO₂ on the surface of black carbon[J]. Progress in Chemistry, 2013, **25**(1): 28-35.
- [15] Cheng C H, Lehmann J, Thies J E, *et al.* Oxidation of black carbon by biotic and abiotic processes [J]. Organic Geochemistry, 2006, **37**(11): 1477-1488.
- [16] Pun V C, Ho K F. Blood pressure and pulmonary health effects of ozone and black carbon exposure in young adult runners[J]. Science of the Total Environment, 2019, **657**: 1-6.
- [17] Gu Y F, Zhang W S, Yang Y J, *et al.* Assessing outdoor air quality and public health impact attributable to residential black carbon emissions in rural China[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2020, **159**, doi: 10.1016/j.resconrec.2020.104812.
- [18] Bond T C, Streets D G, Yarber K F, *et al.* A technology-based global inventory of black and organic carbon emissions from combustion[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2004, **109**(D14), doi: 10.1029/2003JD003697.
- [19] Tan Y, Wang H L, Shi S S, *et al.* Annual variations of black carbon over the Yangtze River Delta from 2015 to 2018 [J]. Journal of Environmental Sciences, 2020, **96**: 72-84.
- [20] Shen L J, Wang H L, Kong X C, *et al.* Characterization of black carbon aerosol in the Yangtze River Delta, China: seasonal variation and source apportionment[J]. Atmospheric Pollution Research, 2021, **12**(1): 195-209.
- [21] Sharma S, Ishizawa M, Chan D, *et al.* 16-year simulation of Arctic black carbon: Transport, source contribution, and sensitivity analysis on deposition[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2013, **118**(2): 943-964.
- [22] Forbes M S, Raison R J, Skjemstad J O. Formation, transformation and transport of black carbon (charcoal) in terrestrial and aquatic ecosystems [J]. Science of the Total Environment, 2006, **370**(1): 190-206.
- [23] 肖思晗, 于兴娜, 朱彬, 等. 南京北郊黑碳气溶胶的来源解析[J]. 环境科学, 2018, **39**(1): 9-17.
Xiao S H, Yu X N, Zhu B, *et al.* Source apportionment of black carbon aerosol in the north suburb of Nanjing[J]. Environmental Science, 2018, **39**(1): 9-17.
- [24] 汤洁, 温玉璞, 周凌晔, 等. 中国西部大气清洁地区黑碳气溶胶的观测研究[J]. 应用气象学报, 1999, **10**(2): 160-170.
Tang J, Wen Y P, Zhou L X, *et al.* Observational study of black carbon in clean air area of Western China[J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology, 1999, **10**(2): 160-170.
- [25] 王洪强, 贺千山, 陈勇航, 等. 2008~2012 年上海黑碳浓度变化特征分析[J]. 环境科学, 2014, **35**(4): 1215-1222.
Wang H Q, He Q S, Chen Y H, *et al.* Analysis of characteristics of black carbon concentration in Shanghai from 2008 to 2012[J]. Environmental Science, 2014, **35**(4): 1215-1222.
- [26] 程丁, 吴晟, 吴兑, 等. 深圳市城区和郊区黑碳气溶胶对比研究[J]. 中国环境科学, 2018, **38**(5): 1653-1662.
Cheng D, Wu C, Wu D, *et al.* Comparative study on the characteristics of black carbon aerosol in urban and suburban areas of Shenzhen[J]. China Environmental Science, 2018, **38**(5): 1653-1662.
- [27] 赵德龙, 周隗, 盛久江, 等. 基于飞机观测不同天气条件下北京地区黑碳气溶胶的垂直分布及其混合态特性[J]. 环境化学, 2021, **40**(5): 1405-1412.
Zhao D L, Zhou W, Sheng J J, *et al.* Vertical distribution and mixed state characteristics of black carbon aerosols in Beijing Area based on aircraft observation under different weather conditions[J]. Environmental Chemistry, 2021, **40**(5): 1405-1412.
- [28] Ji D S, Li L, Pang B, *et al.* Characterization of black carbon in an urban-rural fringe area of Beijing [J]. Environmental Pollution, 2017, **223**: 524-534.
- [29] 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.
- [30] Sun J Y, Wu C, Wu D, *et al.* Amplification of black carbon light absorption induced by atmospheric aging: temporal variation at seasonal and diel scales in urban Guangzhou[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2020, **20**(4): 2445-2470.
- [31] 姜淑娟, 毛节泰, 王美华. 北京地区不同尺度气溶胶中黑碳含量的观测研究[J]. 环境科学学报, 2005, **25**(1): 17-22.
Lou S J, Mao J T, Wang M H. Observational study of black carbon aerosol in Beijing [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2005, **25**(1): 17-22.
- [32] 荆俊山, 张仁健, 陶俊. 北京郊区夏季 PM_{2.5} 和黑碳气溶胶的观测资料分析[J]. 气象科学, 2011, **31**(4): 510-515.
Jing J S, Zhang R J, Tao J. Continuous observation of PM_{2.5} and black carbon aerosol during summer in Beijing suburb [J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2011, **31**(4): 510-515.
- [33] 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.
- [34] Jia H H, Pan J, Huo J T, *et al.* Atmospheric black carbon in urban and traffic areas in Shanghai: temporal variations, source characteristics, and population exposure [J]. Environmental Pollution, 2021, **289**, doi: 10.1016/j.envpol.2021.117868.
- [35] Wu C, Liu B, Wu D, *et al.* Vertical profiling of black carbon and ozone using a multicopter unmanned aerial vehicle (UAV) in urban Shenzhen of South China [J]. Science of the Total Environment, 2021, **801**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.149689.
- [36] 王跃思, 辛金元, 李占清, 等. 中国地区大气气溶胶光学厚度与 Angstrom 参数联网观测 (2004-08~2004-12) [J]. 环境科学, 2006, **27**(9): 1703-1711.
Wang Y S, Xin J Y, Li Z Q, *et al.* AOD and Angstrom parameters of aerosols observed by the Chinese sun hazemeter network from August to December 2004 [J]. Environmental Science, 2006, **27**(9): 1703-1711.
- [37] 申彦波, 赵东, 祝昌汉, 等. 近 50 年来鄂尔多斯地面太阳辐射的变化及与相关气象要素的联系[J]. 高原气象, 2009, **28**(4): 786-794.
Shen Y B, Zhao D, Zhu C H, *et al.* Variational characteristics of surface solar radiation and associated meteorological elements over Ordos plateau in recent 50 years [J]. Plateau Meteorology, 2009, **28**(4): 786-794.
- [38] Zhang W J, Wang W, Chen J H, *et al.* Pollution situation and possible markers of different sources in the Ordos Region, Inner Mongolia, China[J]. Science of the Total Environment, 2010, **408**(3): 624-635.
- [39] 李伊明, 刘佳媛, 史国良, 等. 呼包鄂地区冬季、夏季 PM_{2.5}

- 污染特征[J]. 环境科学, 2020, **41**(1): 31-38.
- Li Y M, Liu J Y, Shi G L, *et al.* PM_{2.5} pollution characteristics during winter and summer in the Hohhot-Baotou-Ordos region, China[J]. Environmental Science, 2020, **41**(1): 31-38.
- [40] Khuzestani R B, Schauer J J, Wei Y J, *et al.* Quantification of the sources of long-range transport of PM_{2.5} pollution in the Ordos region, Inner Mongolia, China [J]. Environmental Pollution, 2017, **229**: 1019-1031.
- [41] Xin J Y, Gong C S, Wang S G, *et al.* Aerosol direct radiative forcing in desert and semi-desert regions of northwestern China [J]. Atmospheric Research, 2016, **171**: 56-65.
- [42] 孔祥晨, 王红磊, 张连霞, 等. 鄂尔多斯市夏秋季气溶胶新粒子生成过程影响因素分析[J]. 环境科学, 2020, **41**(12): 5295-5305.
- Kong X C, Wang H L, Zhang L X, *et al.* Factors influencing new atmospheric particle formation in Ordos during summer and autumn 2019 [J]. Environmental Science, 2020, **41**(12): 5295-5305.
- [43] Sandradewi J, Prévôt A S H, Szidat S, *et al.* Using aerosol light absorption measurements for the quantitative determination of wood burning and traffic emission contributions to particulate matter[J]. Environmental Science & Technology, 2008, **42**(9): 3316-3323.
- [44] Olson M R, Garcia M V, Robinson M A, *et al.* Investigation of black and brown carbon multiple-wavelength-dependent light absorption from biomass and fossil fuel combustion source emissions[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2015, **120**(13): 6682-6697.
- [45] Zotter P, Herich H, Gysel M, *et al.* Evaluation of the absorption Ångström exponents for traffic and wood burning in the Aethalometer-based source apportionment using radiocarbon measurements of ambient aerosol[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2017, **17**(6): 4229-4249.
- [46] 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.
- [47] Stein A F, Draxler R R, Rolph G D, *et al.* NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2015, **96**(12): 2059-2077.
- [48] Ashbaugh L L, Malm W C, Sadeh W Z. A residence time probability analysis of sulfur concentrations at Grand Canyon National park[J]. Atmospheric Environment (1967), 1985, **19**(8): 1263-1270.
- [49] Lucey D, Hadjiiski L, Hopke P K, *et al.* Identification of sources of pollutants in precipitation measured at the mid-Atlantic US coast using potential source contribution function (PSCF) [J]. Atmospheric Environment, 2001, **35**(23): 3979-3986.
- [50] Wang Y Q, Zhang X Y, Draxler R R. TrajStat: GIS-based software that uses various trajectory statistical analysis methods to identify potential sources from long-term air pollution measurement data [J]. Environmental Modelling & Software, 2009, **24**(8): 938-939.
- [51] Hsu Y K, Holsen T M, Hopke P K. Comparison of hybrid receptor models to locate PCB sources in Chicago [J]. Atmospheric Environment, 2003, **37**(4): 545-562.
- [52] Matthaios V N, Kramer L J, Sommariva R, *et al.* Investigation of vehicle cold start primary NO₂ emissions inferred from ambient monitoring data in the UK and their implications for urban air quality[J]. Atmospheric Environment, 2019, **199**: 402-414.
- [53] Shan Y L, Huang Q, Guan D B, *et al.* China CO₂ emission accounts 2016-2017[J]. Scientific Data, 2020, **7**(1): 54.
- [54] Qu Z, Henze D K, Li C, *et al.* SO₂ emission estimates using OMI SO₂ retrievals for 2005-2017 [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2019, **124**(14): 8336-8359.
- [55] Wang N, Lyu X P, Deng X J, *et al.* Aggravating O₃ pollution due to NO_x emission control in eastern China[J]. Science of the Total Environment, 2019, **677**: 732-744.
- [56] Eck T F, Holben B N, Reid J S, *et al.* Wavelength dependence of the optical depth of biomass burning, urban, and desert dust aerosols[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1999, **104**(D24): 31333-31349.
- [57] 杨溯, 石广玉, 王标, 等. 气溶胶光学厚度谱特征判断粒子大小方法初探[J]. 应用气象学报, 2011, **22**(2): 152-157.
- Yang S, Shi G Y, Wang B, *et al.* The application of AOD's spectral curve parameter to judgment of aerosol particle size[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2011, **22**(2): 152-157.

CONTENTS

Development Scenarios and Environmental Benefits Analysis of Future Power Generation Industry Under Two Modes in China	LIU Chun-jing, LÜ Jian-yi, ZHAO Wen-chang, <i>et al.</i>	(3375)
Forecasting of Emission Co-reduction of Greenhouse Gases and Pollutants for the Road Transport Sector in Lanzhou Based on the LEAP Model	PANG Ke, ZHANG Qian, MA Cai-yun, <i>et al.</i>	(3386)
Discussion of Air Quality Forecasting Evaluation for Cities Based on Half-level Method	WANG Xiao-yan, ZHU Li-li, XU Rong, <i>et al.</i>	(3396)
Characterization and Health Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} in Xiamen Port	XIAO Si-han, CAI Mei-jun, LI Xiang, <i>et al.</i>	(3404)
Deposition Characteristics of Water-soluble Inorganic Nitrogen and Organic Nitrogen in Atmospheric Precipitation in the Northern Suburbs of Nanjing	ZHANG Jia-ying, YU Xing-na, ZHANG Yu-xiu, <i>et al.</i>	(3416)
Analysis of PM _{2.5} Transmission Characteristics in Main Cities of Jinzhong Basin in Winter	WANG Xiao-lan, WANG Yan, YAN Shi-ming, <i>et al.</i>	(3423)
Temporal Evolution and Source Apportionment of Black Carbon Aerosol in Ordos During Summer and Autumn 2019	KONG Xiang-chen, ZHANG Lian-xia, ZHANG Cai-yun, <i>et al.</i>	(3439)
Characteristics, Sources, and SOAP of VOCs During Winter in Jiyuan	WANG Fang, LI Li-xia, WANG Hong-guo, <i>et al.</i>	(3451)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in August in the Chang-Zhu-Tan Urban Area	LUO Da-tong, ZHANG Qing-mei, LIU Zhan, <i>et al.</i>	(3463)
Ozone Sensitivity Analysis and Control Strategy in Shijiazhuang City in July 2019	ZHU Jia-xian, WANG Xiao-qi, OU Sheng-ju, <i>et al.</i>	(3473)
Spatiotemporal Variation and Influencing Factors of AOD in the North China Plain	GUO Lin, MENG Fei, MA Ming-liang	(3483)
Aerosol Optical Characteristics with Ground-based Measurements via Sun Photometer and Its Relationship with PM Particle Concentration in Chang'an	ZHENG Yu-rong, WANG Xu-hong, CUI Si-ying, <i>et al.</i>	(3494)
Spatial-temporal Distribution and Evolution Characteristics of Air Pollution in Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on Long-term "Ground-Satellite" Data	WANG Yao-ting, YIN Zhen-ping, ZHENG Zuo-fang, <i>et al.</i>	(3508)
Ten-year Trend Analysis of Eutrophication Status and the Related Causes in Lake Hongze	CHEN Tian-yu, LIU Chang-qing, SHI Xiao-li, <i>et al.</i>	(3523)
Shallow Groundwater Around Plateau Lakes: Spatiotemporal Distribution of Phosphorus and Its Driving Factors	YANG Heng, LI Gui-fang, YE Yuan-hang, <i>et al.</i>	(3532)
Characteristics and Differences of Dissolved Oxygen Stratification in Different Tributaries of Three Gorges Reservoir During Impoundment Period	Ji Dao-bin, FANG Jiao, LONG Liang-hong, <i>et al.</i>	(3543)
Dissolved Organic Matter Component and Source Characteristics of the Metropolitan Lakes and Reservoirs in a Typical Karst Region	NI Mao-fei, ZHOU Hui, MA Yong-mei, <i>et al.</i>	(3552)
Characteristics, Sources, and Risk Assessment of Perfluoroalkyl Substances in Surface Water and Sediment of Luoma Lake	HUANG Jia-hao, WU Wei, HUANG Tian-yin, <i>et al.</i>	(3562)
Vertical Distribution Characteristics and Influencing Factors of Phytoplankton Community Structure in Qiandao Lake	WANG Ji-yi, HUO Di, GUO Chao-xuan, <i>et al.</i>	(3575)
Chemical Forms and Spatial Distribution of Phosphorus in the Sediment of Sihe River	ZHANG Zi-han, ZHANG Xin-ru, JIA Chuan-xing, <i>et al.</i>	(3587)
Influence of Optimal Land Use Allocation on Phosphorus Loss in the Process of Rainfall and Runoff	ZHOU Hao, CHEN Fang-xin, LUO Yi-feng, <i>et al.</i>	(3597)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Accumulated Heavy Metals in Bioretention Systems	CHU Yang-yang, YANG Long, ZHOU Yuan, <i>et al.</i>	(3608)
Effects of Damming and Impoundment on Planktonic Microbial Community Structure and Interspecific Interaction Patterns in Different Water Depths	WANG Xun, ZHANG Jia-jia, YUAN Qiu-sheng, <i>et al.</i>	(3623)
Identification of Bacterial Flora and Metabolic Function of Sediments in Different Channels of Duliujian River Basin, Tianjin	LIU Jia-yuan, FENG Yue, YANG Xue-chun, <i>et al.</i>	(3635)
Spatiotemporal Distribution and Source Apportionment of Suspended Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Water	PENG Ke-xing, LI Rui-fei, ZHOU Yi-chen, <i>et al.</i>	(3645)
Spatial Variation and Potential Sources of Microplastics in Rivers in Tongzhou District, Beijing	MEN Cong, LI Di, ZUO Jian-e, <i>et al.</i>	(3656)
Effects of Microplastic Exposure on Crucian Growth, Liver Damage, and Gut Microbiome Composition	HU Jia-min, ZUO Jian-e, LI Jin-bo, <i>et al.</i>	(3664)
Influence of Different Types of Dewatering Agents on the Solidification Effect and Physical and Chemical Properties of Sediment	REN Jun, YIN Peng, WANG Wei-zhen, <i>et al.</i>	(3672)
Structural Characteristics of Micro-nano Particle Size Biochar and Its Adsorption Mechanism for Cd ²⁺	MA Wen-yan, PEI Peng-gang, GAO Ge, <i>et al.</i>	(3682)
Phosphorus Adsorption Characteristics of Different Biochar Types and Its Influencing Factors	LIAN Shen-hai, ZHANG Shu-nan, LIU Feng, <i>et al.</i>	(3692)
Development of Zeolite Loaded Mg-La-Fe Ternary (hydr)oxides for Treatment of Low Concentration Phosphate Wastewater	YIN Xue-jie, SONG Xiao-bao, DING Chen-man, <i>et al.</i>	(3699)
Succession and PICRUS2-based Predicted Functional Analysis of Microbial Communities During the Sludge Bulking Occurrence and Restoration in One-stage Combined Partial Nitrification and ANAMMOX Process	LI Ya-nan, YAN Bing, ZHENG Rui, <i>et al.</i>	(3708)
Aerobic Granulation Stability and Microbial Diversity of Filamentous Bulking Sludge	GAO Chun-di, YANG Xiao-yang, OU Jia-li, <i>et al.</i>	(3718)
Dynamic Variation in Vegetation Cover and Its Influencing Factor Detection in the Yangtze River Basin from 2000 to 2020	XU Yong, ZHENG Zhi-wei, GUO Zhen-dong, <i>et al.</i>	(3730)
Enrichment and Ecological Risk Assessment of Available Phosphorus in Paddy Soil of Fujian Province Over Past 40 years	CHEN Zhong-xing, QIU Long-xia, CHEN Han-yue, <i>et al.</i>	(3741)
Effects of Land Use Change on Constitution, Stability, and C, N, P Stoichiometric Characteristics of Soil Aggregates in Southwest China Karst	HE Yu, SHENG Mao-yin, WANG Ke, <i>et al.</i>	(3752)
Heavy Metal Pollution and Health Risk Assessment of Mine Soil in Yangtze River Economic Belt	ZHANG Zhe, LU Ran, WU Si-yang, <i>et al.</i>	(3763)
Pollution Characteristics and Phytotoxicity of Heavy Metals in the Soil Around Coal Gangue Accumulation Area	SHANG Yu, SANG Nan	(3773)
Evaluation of Mercury Pollution in Soil of Different Land Use Types in Coal-fired Industrial Area	LI Qiang, YAO Wan-cheng, ZHAO Long, <i>et al.</i>	(3781)
Cadmium Enrichment and Bioavailability of Quaternary Profiles in Nansha District, Guangzhou, China	WANG Fang-ting, BAO Ke, HUANG Chang-sheng, <i>et al.</i>	(3789)
Health Risk Assessment and Environmental Benchmark of Heavy Metals in Cultivated Land in Mountainous Area of Northwest Guizhou Province	XU Meng-qi, YANG Wen-tao, YANG Li-yu, <i>et al.</i>	(3799)
Effect Factors and Model Prediction of Soil Heavy Metal Bioaccessibility	ZHANG Jia-wen, TIAN Biao, LUO Jing-jing, <i>et al.</i>	(3811)
Effect of Organic Material Amendments on Soil Respiration in Tobacco Fields of Central Henan	LU Qi-fei, YE Xie-feng, HAN Jin, <i>et al.</i>	(3825)
Methane Production Potential and Methanogenic Pathways in Paddy Soils Under Different Rice-based Cropping Systems	SHEN Wan-yu, HUANG Qiong, MA Jing, <i>et al.</i>	(3835)
Characteristics and Assembly Process of Reclaimed Soil Microbial Communities in Eastern Plain Mining Areas	MA Jing, DONG Wen-xue, ZHU Yan-feng, <i>et al.</i>	(3844)
Differences in Bacterial Community Structure in Rhizosphere Soil of Three <i>Caragana</i> Species and Its Driving Factors in a Common Garden Experiment	LI Yuan-yuan, XU Ting-ting, AI Zhe, <i>et al.</i>	(3854)
Comparison of Bacterial Community Structure and Functional Groups of Paddy Soil Aggregates Between Karst and Non-karst Areas	XIAO Xiao-yi, JIN Zhen-jiang, LENG Meng, <i>et al.</i>	(3865)
Contrasting Responses of the Microbial Community Structure and Functional Traits to Soil pH in Purple Soils	WANG Zhi-hui, JIANG Xian-jun	(3876)
Effects of Agricultural Organic Waste Incorporation on the Metabolic Capacity of Microbial Carbon Sources of Dissolved Organic Matter in Paddy Soil	XIAO Yi, LI Zheng, HUANG Rong, <i>et al.</i>	(3884)