

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

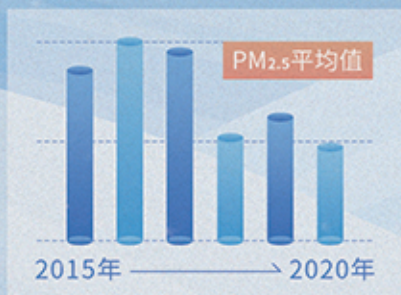
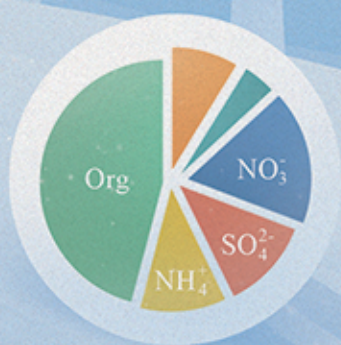
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

北京冬季奥运会历史同期大气PM_{2.5}污染特征分析

刘玥晨, 满睿琪, 裴彦挺, 杨佳炜, 王均睿, 谭瑞, 汤丽姿, 俞颖, 宋锴, 郭松, 陈仕意,
曾立民, 吴志军, 胡敏



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2022年8月

第43卷 第8期
Vol.43 No.8

目次

北京冬季奥运会历史同期大气 PM _{2.5} 污染特征分析·····	刘玥晨, 满睿琪, 袁彦挺, 杨佳炜, 王均睿, 谭瑞, 汤丽姿, 俞颖, 宋锴, 郭松, 陈仕意, 曾立民, 吴志军, 胡敏 (3895)
天津城区 2019 年 2~3 月气溶胶粒径分布特征观测分析·····	郝团, 蔡子颖, 刘敬乐, 王晓佳, 姚青 (3903)
长江中游地区 PM _{2.5} 重污染过程的典型天气环流分型及区域传输影响·····	王莹, 智协飞, 白永清, 董甫, 张玲 (3913)
滇中典型工矿城市大气干湿沉降重金属等元素特征及健康风险评价·····	范晨子, 刘永兵, 袁继海, 郭威, 孙冬阳, 刘成海 (3923)
典型工业城市夏季 VOCs 污染特征及反应活性·····	秦涛, 李丽明, 王信梧, 杨文, 王晓丽, 徐勃, 耿春梅 (3934)
大连市夏季 VOCs 化学反应活性及来源·····	朱轲欣, 刘立忠, 刘焕武, 罗静期, 高冉冉 (3944)
河南省 18 个城市大气污染物分布特征、区域来源和传输路径·····	刘光瑾, 苏方成, 徐起翔, 张瑞芹, 王克 (3953)
京津冀臭氧污染特征、气象影响及基于神经网络的预报效果评估·····	朱媛媛, 刘冰, 桂海林, 李健军, 汪巍 (3966)
2006~2020 年中国大气本底站 BC 气溶胶的时空分布特征·····	王红磊, 颜雪, 沈利娟, 柳竞先, 赵天良, 管小彬, 赵德龙 (3977)
钢铁生产行业二噁英污染特征变化及其排放因子·····	杨艳艳, 谢丹平, 付建平, 陈晓燕, 尹文华, 韩静磊, 张素坤, 张璐, 肖滔 (3990)
长江流域着生藻类群落结构的格局及其生态评价·····	胡愈忻, 曹亮, 屈仁超, 黄杰, 胡圣, 周正, 王英才, 张静 (3998)
基于蒙特卡洛模拟与 PMF 模型的黄河流域沉积物重金属污染评价及源解析·····	庞阔, 李敏, 刘璐, 杨璐, 赵洪军 (4008)
梯级拦河堰对典型山地城市河流重金属元素的滞留效应: 以重庆市梁滩河为例·····	王超, 贾伯阳, 潘成勇, 何文战, 叶秋, 罗杉山, 张夏武 (4018)
基于土壤流失的农业面源 TN 和 TP 排海系数估算·····	王有霄, 黄翀, 刘高焕, 赵忠贺, 李贺, 刘庆生 (4032)
河湟谷地不同时空尺度下土地利用及空间格局对水质的影响·····	李好好, 黄懿梅, 郭威, 侯宏洋, 范梦苑, 齐照平, 贾鹏辉, 郭庆波 (4042)
联合 PMF 模型与稳定同位素的地下水污染溯源·····	张涵, 杜昕宇, 高菲, 曾卓, 程思茜, 许懿 (4054)
江西锦江流域抗生素污染特征与生态风险评价·····	李佳乐, 王萌, 胡发旺, 董一慧, 孙占学, 王瑶, 卫承芳, 燕雯 (4064)
天津市地表水中新型优先污染物筛选与管控对策·····	吴颜岐, 宋帅, 史雅娟, 刘莹, 杨胜杰 (4074)
宁夏第三排水沟中药物和个人护理品 (PPCPs) 的污染特征与生态风险评估·····	李富娟, 高礼, 李凌云, 郑兰香, 马兰, 杨桂钦 (4087)
再生水河道浮游生物多样性季节变化分析: 以北运河为例·····	袁训超, 王敏, 郭道宇, 吴东丽 (4097)
太湖草、藻湖区沉积物 WSOM 组成和分子结构分析·····	杜瑛珣, 戴家如, 张巧颖, 刘静静, 黄秀琳, 安世林, 文帅龙 (4108)
太湖氧化亚氮 (N ₂ O) 排放特征及潜在驱动因素·····	刘朝荣, 朱俊羽, 李宇阳, 俞晓琴, 陈慧敏, 杨艳, 周永强 (4118)
海绵城市生物滞留带重金属污染特征及风险评价·····	雷晓玲, 邱丽娜, 魏泽军, 杨程, 何博 (4127)
玉米芯和稻草秸秆强化潜流人工湿地对低 C/N 污水的处理效果·····	胡曼利, 郝庆菊, 马容真, 陈柯沁, 罗师旭, 江长胜 (4136)
环境 pH 条件下 Fe ²⁺ 活化过二硫酸盐降解有机污染物的效能与影响因素·····	刘颖, 郭依玮, 乔俊莲, 孙远奎 (4146)
新疆沙雅县不同植物类型农田环境中典型农药残留及其风险评价·····	谢宣宣, 艾力江·努尔拉, 买合木提·巴拉提, 仲乃福, 李南鑫 (4154)
宁夏养鸡场粪污和周边土壤中抗生素及抗生素抗性基因分布特征·····	沈聪, 张俊华, 刘吉利, 韩新宁, 尚天浩, 代金霞 (4166)
宁夏石嘴山市农用地土壤硒的富集因素·····	王莹, 刘海燕, 王泽晶, 张晓东, 王登红 (4179)
地块尺度重金属污染风险耕地安全利用区划方法·····	王锐, 余京, 李瑜, 周蛟, 贾中民, 余飞, 张云逸, 蒋玉莲 (4190)
姜湖贡米产地土壤重金属空间分布、源解析及生态风险评价·····	于林松, 万方, 范海印, 康桂玲, 刘辉, 王东平, 徐佳 (4199)
基于特定源风险评估模型的小麦籽粒铅超标风险预测·····	杨阳, 李艳玲, 牛硕, 陈卫平, 王天齐, 王美娥 (4212)
柳州地源性镉异常区稻米重金属累积效应与健康风险·····	朱亮亮, 王佛鹏, 唐乐斌, 肖乃川, 董心月, 韦美溜, 宋波 (4219)
不同玉米品种 Cd、Pb、Zn 和 As 积累与转运特性·····	任超, 肖建辉, 李竞天, 杜倩倩, 朱利文, 王浩, 朱瑞颖, 赵海洋 (4232)
橡胶草 (TKS) 对铅镉污染农田土壤的修复潜力·····	张恒, 熊明彪, 王乾鑫, 孙博文, 饶逸驰, 程章, 徐小逊, 杨占彪, 鲜骏仁, 朱雪梅, 杨绍平, 杨远祥 (4253)
3 种地被竹对重金属复合污染农田土壤的修复潜力·····	张颖, 赵欣, 张圣虎, 漆丹, 王博, 陈引, 陆建刚 (4262)
连续施肥对双季稻镉硅累积效应的影响·····	彭华, 邓凯, 石宇, 魏维, 柳赛花, 纪雄辉 (4271)
改性壳聚糖负载氧化硅调控水稻对砷吸收与转运的影响·····	杨嘉仪, 孙梦强, 肖羽堂, 韦行, 张建强, 陈志良 (4282)
不同螯合剂和有机酸对苍耳修复镉复合污染土壤的影响·····	张雅睿, 黄益宗, 保琼莉, 魏祥东, 铁柏清, 张盛楠, 韩甘, 黄永春 (4292)
水分管理对稻田土壤铁氧化物形态转化的影响及其与酶活性变化的耦合关系·····	李明远, 张小婷, 刘汉斌, 魏世强 (4301)
外源 Fe 调控根系微生物群落结构和功能对水稻 Cd 积累的影响·····	郑沈, 黄道友, 李波, 马天池, 许超, 朱奇宏, 朱捍华, 张泉 (4313)
不同降水下覆盖与缓释肥减量对油菜土壤微生物群落结构的影响·····	冯军, 石超, Hafiz Athar Hussain, 刘永波, 刘天朋, 李永洪, 刘俊峰, 王龙昌 (4322)
基于高通量测序和代谢组学解析重金属污染对农田微生物群落组成和功能的影响·····	庞发虎, 李晓琦, 段莉阳, 陈彦, 姬明飞, 张浩, 韩辉, 陈兆进 (4333)
汞矿区周边农田土壤微生物群落结构特征及其环境驱动因子·····	陈芬, 余高, 孙约兵, 张红丽, 田霞, 夏蓓 (4342)
岩溶湿地与稻田土壤团聚体细菌群落结构的比较·····	冷蒙, 靳振江, 肖筱怡, 熊丽媛, 李雪松 (4353)
戴云山土壤微生物碳源利用效率的海拔变异规律及影响因素·····	吕坤, 王晶晶, 吴国朋, 林思诺, 苏延桂, 黄刚 (4364)
长期秸秆还田对水稻根系碳矿化与激发效应的影响·····	刘峰, 王云秋, 张昀, 祝贞科, 吴金水, 葛体达, 李宇虹 (4372)
秸秆还田配施生物炭对关中平原夏玉米产量和土壤 N ₂ O 排放的影响·····	白金泽, 刘镇远, 宋佳杰, 李娜, 于琦, 郝嘉琪, 许宏伟, 程博豪, 王兴, 冯永忠 (4379)
聚苯乙烯纳米塑料对大蒜生长生理的影响·····	邱陈陈, 李国新, 李青松, 颜昌宙 (4387)
微塑料对土壤水分入渗和蒸发的影响·····	王志超, 张博文, 倪嘉轩, 杨文焕, 李卫平 (4394)
氢燃料电池汽车动力系统生命周期评价及关键参数对比·····	陈轶嵩, 兰利波, 郝卓, 付佩 (4402)
《环境科学》征订启事 (4211) 《环境科学》征稿简则 (4312) 信息 (3922, 4031, 4107)	

2006 ~ 2020 年中国大气本底站 BC 气溶胶的时空分布特征

王红磊^{1,2}, 颜雪¹, 沈利娟^{1,2}, 柳竞先², 赵天良¹, 管小彬³, 赵德龙⁴

(1. 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; 2. 多伦多大学地理与规划系, 多伦多 M5S3G3; 3. 武汉大学资源与环境学院, 武汉 430079; 4. 北京市人工影响天气办公室, 北京 100089)

摘要: 黑碳 (BC) 气溶胶来源复杂且具有特殊环境和气象影响效应. 我国不同大气环境下的 BC 时空分布特征亟待全面认识. 使用 2006 ~ 2020 年中国 7 个大气本底站长期 BC 观测数据, 结合气象数据、排放源、增强植被指数 (EVI) 和气溶胶光学厚度 (AOD) 数据, 综合分析了 BC 的时空分布特征、长期演化趋势及其影响因素. 结果表明, 中国不同地区的 BC 浓度和 AOD 差异较大, BC 对 AOD 多为正贡献. 受排放源和气象条件等因素的影响, BC 浓度和 AOD 空间分布为东高西低, “胡焕庸线”以东的龙凤山、上甸子、临安和金沙的浓度较高, $\rho(\text{BC})$ 和 AOD 平均值分别为 $(1\,699 \pm 2\,213) \sim (3\,392 \pm 2\,131) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $0.36 \pm 0.32 \sim 0.72 \pm 0.37$; “胡焕庸线”以西的阿克达拉、瓦里关和香格里拉的浓度较低, $\rho(\text{BC})$ 和 AOD 平均值分别为 $(287 \pm 226) \sim (398 \pm 308) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $0.20 \pm 0.13 \sim 0.22 \pm 0.19$. 不同大气本底站 BC 的年际变化可分为 4 类: 年际变化较小型, 主要为阿克达拉站; 先增后减然后稳定型, 主要为瓦里关站; 先降低后稳定类, 主要为香格里拉站; 先稳定后降低型, 主要为龙凤山、上甸子、金沙和临安. 不同大气本底站 BC 的季节变化具有差异. “胡焕庸线”以西地区秋季 BC 浓度最低, 冬季和春季 BC 浓度较高; “胡焕庸线”以东地区冬季 BC 浓度最高, 夏季 BC 浓度最低. BC 对 AOD 的影响在“胡焕庸线”东西部站点的春季和夏季均较大, 在“胡焕庸线”以西站点的秋季较小, 在“胡焕庸线”以东站点的冬季较小. 大气本底站 BC 的日变化多为双峰型分布, 但是峰值时间存在显著地区和季节差异.

关键词: 黑碳 (BC); 气溶胶光学厚度 (AOD); 时空分布; 气溶胶; 大气本底站

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)08-3977-13 DOI: 10.13227/j.hjxx.202111106

Temporal and Spatial Variations in Black Carbon Aerosol in Different Atmospheric Background Stations in China from 2006 to 2020

WANG Hong-lei^{1,2}, YAN Xue¹, SHEN Li-juan^{1,2}, LIU Jane², ZHAO Tian-liang¹, GUAN Xiao-bin³, ZHAO De-long⁴

(1. Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Department of Geography and Planning, University of Toronto, Toronto M5S3G, Canada; 3. School of Resource and Environmental Science, Wuhan University, Wuhan 430079, China; 4. Beijing Weather Modification Office, Beijing 100089, China)

Abstract: Black carbon (BC) aerosol emissions are complex and have important environmental and meteorological effects. In China, the temporal and spatial variations in BC in different atmospheric environmental conditions need to be fully understood. Based on the long-term observational BC data in seven atmospheric background stations in China from 2006 to 2020, combined with meteorological data, emission source data, enhanced vegetation index (EVI) data, and aerosol optical depth (AOD) data, we comprehensively analyzed the characteristics of temporal and spatial variations, long-term evolution, and influencing factors of BC in China. The results showed that the BC and AOD values of different atmospheric environments in China were quite different, and BC positively contributed to AOD. The spatial distribution was high in the east and low in the west owing to the differences in emission sources and meteorological conditions. The $\rho(\text{BC})$ and AOD values were higher to the east of the “Hu Huanyong” line, such as at the Mt. Longfeng, Shangdianzi, Lin'an, and Jinsha stations, where the average values were $(1\,699 \pm 2\,213) \sim (3\,392 \pm 2\,131) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ and $0.36 \pm 0.32 \sim 0.72 \pm 0.37$, respectively. These values were lower to the west of the “Hu Huanyong” line, such as at the Ake-dala, Mt. Waliguan, and Shangri-La stations, where the average values were $(287 \pm 226) \sim (398 \pm 308) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ and $0.20 \pm 0.13 \sim 0.22 \pm 0.19$, respectively. The interannual variability in BC included differences between different atmospheric background stations, which could be divided into four categories: low interannual variability, such as at the Ake-dala station; an initial increase followed by a decrease and subsequent stabilization, such as at the Mt. Waliguan station; an initial decrease followed by stabilization, such as at the Shangri-La station; and an initial stabilization followed by a decrease, such as at the Mt. Longfeng, Shangdianzi, Jinsha, and Lin'an stations. Seasonal variations in BC included differences in different atmospheric background stations. The BC mass concentrations were lowest in autumn and higher in winter and spring west of the “Hu Huanyong” line and were highest in winter and lowest in summer east of the “Hu Huanyong” line. BC contributed to the AOD being larger in all stations in the spring and summer and contributed less at the stations west of the “Hu Huanyong” line in autumn and the stations east of the “Hu Huanyong” line in winter. The diurnal variations in BC were mainly bimodally distributed in the different atmospheric background stations, but the peak times varied in different stations and seasons.

Key words: black carbon (BC); aerosol optical depth (AOD); temporal and spatial variations; aerosol; atmospheric background station

气溶胶作为大气中重要的组成成分,可以通过影响大气辐射收支改变全球气候,在城市区域环境中降低能见度形成霾污染,还能携带有毒有害物质进而危害人体健康^[1~6]. 随着我国经济的快速发展,

收稿日期: 2021-11-11; 修订日期: 2021-12-19

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41830965, 41805096); 国家重点研发计划项目 (2016YFA0602003)

作者简介: 王红磊 (1988 ~), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为大气环境、大气化学和气溶胶, E-mail: hongleiwang@nuist.edu.cn

工业化和城市化进程加快,但能源利用率仍然较低,因此工业、民用和汽车尾气等人为大气污染物排放有增无减,导致城市、城市群和区域空气质量严重恶化^[7~9].近年来,气溶胶已成为导致我国城市空气质量恶化的首要污染物,我国区域霾污染问题受到了国内外的广泛关注^[1,2,10~12].2013年9月10日,国务院印发《大气污染防治行动计划》,此后我国PM_{2.5}浓度迅速降低,空气质量得到显著改善^[13~17].

黑碳(black carbon, BC)气溶胶作为最重要的吸收性气溶胶,虽然仅占气溶胶质量浓度的5%~15%^[18,19],但其辐射特性会显著影响全球辐射平衡^[20~23]和城市边界层的演变发展^[24,25].BC主要来自化石燃料和生物质的不完全燃烧^[26,27],因此其浓度空间分布极不均匀,在城市污染地区质量浓度可高达几十 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.这种时空分布的不一致性,导致BC引起的区域性辐射强迫高于CO₂和CH₄^[28].BC还可通过改变边界层结构和影响O₃前体物的光解速率,影响城市地面O₃浓度^[29~31].此外,BC独特的多孔结构的表面特性,可为很多半挥发性物质提供一个好的吸收点,促进催化过程的发生.Lei等^[32]的研究发现在污染的城市环境中,BC表面NO₂转化生成HONO这一反应可促进早晨O₃生成,进而导致日间O₃浓度的显著增加.

目前,我国大气污染相关防治措施主要关注PM_{2.5}和O₃,对于BC的关注较少.我国幅员辽阔,BC的来源复杂,在城市地区机动车尾气、工业废气和居民生活源等是BC的重要来源^[27,33~37];而在乡村地区来源更加复杂,除了上述来源,生物质燃烧、散煤和薪柴燃烧等均是不可忽视的来源^[27,34,36~38];在一些地区森林和草原火灾也释放了大量的BC^[39~40].此外,我国气候复杂多样,涵盖了热带季风气候、亚热带季风气候、温带季风气候、温带大陆性气候、高山高寒气候和大陆半干旱气候.不同的气候类型下气象条件存在较大差异,使得大气的扩散条件显著不同,对大气污染物的浓度分布造成较大影响^[41,42].

中国是全球BC的主要排放国之一,约占全球BC人为源的25%^[27,33,34].但是,我国含碳气溶胶的外场观测试验和数值模拟均起步较晚,主要涉及不同地区或城市的污染特征、粒径分布和时空变化等方面,且主要集中在京津冀、长三角和珠三角等城市群地区^[22~25,43~45].目前,我国BC的研究在时间尺度上,大多以短时间观测和个例分析为主,连续多年的长期观测较少;空间尺度上,多是单一城市或者某一气候区大气环境下的多点研究,针对不同气候区的对比研究较少.由于BC在大气中停留时间

较短,因此其时空分布特征变化迅速,若要全面了解BC的时空分布特征、源排放以及气候效应影响并进行系统性研究需要长时间的多点连续观测.本研究利用中国气象局黑碳观测网络2006~2020年7个大气本底站的长期观测数据,结合气象数据、排放源、增强植被指数(enhanced vegetation index, EVI)和气溶胶光学厚度(aerosol optical depth, AOD)数据,综合分析了我 国BC的时空分布特征、长期演化趋势及其影响因素,以期为我国BC气溶胶治理提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 观测站点介绍

本研究使用2006年1月~2020年12月全国7个大气本底站BC浓度和气象要素地面观测资料,图1给出了7个站点的地理分布,表1给出了站点的经纬度、海拔高度、平均浓度、所处区域及站点气候类型等详细资料.7个大气本底站均是按照WMO对大气本底站选址标准建立,详细描述参见文献[46].BC浓度数据来自中国气象局大气成分监测网,此数据集已有较多应用^[47,48],本文选取了其中7个大气本底站观测数据,气象数据使用中国气象数据网提供的日均值数据(<http://data.cma.cn/>).

这7个大气本底站可较好代表我国重要区域的大气本底观测要求,其中阿克达拉和瓦里关站为半干旱气候,分别代表了北疆经济区和欧亚大陆腹地大气环境(表1).由图1可知这两个站点植被较少,阿克达拉所处地理位置更偏向于干旱气候,而瓦里关则位于我国东西部植被交接线附近.阿克达拉位于新疆阿勒泰地区,夏季炎热少雨,冬季寒冷干燥,春秋季节时间较短且多大风天,测站周边50 km范围内为平地 and 戈壁,下垫面属于荒漠草原植被.瓦里关是北半球大陆腹地唯一的大气本底站,位于瓦里关山顶,周边为高原草原、苔原、沙漠和盐湖等,站点东北和东南方向为西宁和兰州等大城市,人为源的远距离输送不可忽略.

香格里拉站位于青藏高原东南边缘,为典型的高原湿润气候,可代表我国云贵高原及西南经济区,周边人为源较少,由图1可知植被覆盖率较高,但是靠近边境,受境外远距离输送的影响较大.龙凤山位于长白山脉边缘,是中温带大陆性季风气候,为我国东北生态屏障与粮食生产基地,工业源较少,周边多为森林和农村,但是距离哈尔滨等城市较近.

上甸子、临安和金沙这3个大气本底站分别位于京津冀经济圈、长三角经济圈和长江中游两湖平

原区,人口密集、城市集中,人为源较多. 上甸子位于北京城区东北方向,距城区大约 150 km,位于华北平原的东北角,三面环山,地形平坦,下垫面以灌木和农田为主,为温带季风性气候,四季分明. 临安与杭州和上海分别相距 53 km 和 210 km,周边以农

田、林地和丘陵为主,为典型的亚热带季风气候. 金沙位于长江中游的两湖平原区,周边以山地丘陵为主,距离武汉约 105 km,是典型的亚热带大陆性季风气候. 金沙和临安纬度相近,但是人为源类型和气象条件存在较大差异.

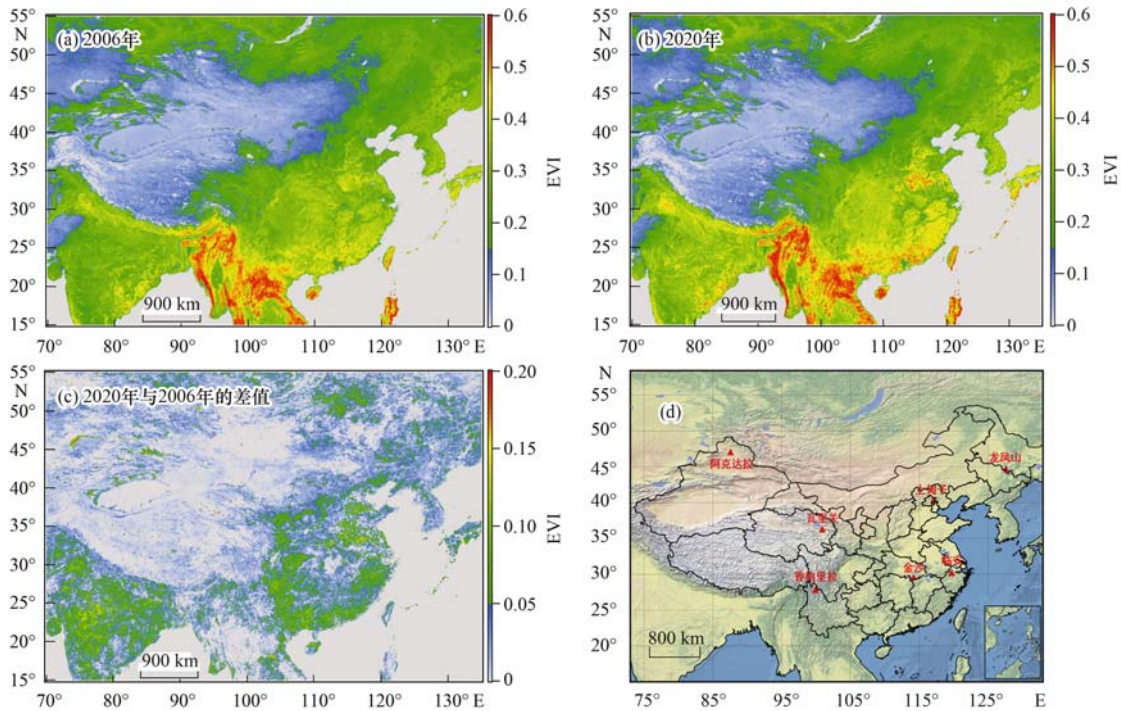


图1 增强植被指数和站点分布示意

Fig. 1 Spatial of the enhanced vegetation index and location of the sampling sites

表1 我国大气本底观测站地理信息、代表性和BC浓度和AOD的平均值

Table 1 Descriptions of atmospheric background stations and their representativeness and the average values of BC and AOD							
站点	经度(E) /(°)	纬度(N) /(°)	海拔高度 /m	代表区域	气候类型	$\rho(\text{BC})$ / $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$	AOD
阿克苏	87.93	47.06	563	北疆经济区	寒温带大陆半干旱气候	338 ± 280	0.20 ± 0.13
瓦里关	100.89	36.28	3816	欧亚大陆腹地	大陆性高原半干旱气候	398 ± 308	0.22 ± 0.19
香格里拉	99.73	28.01	3580	云贵高原及西南经济区	高原湿润气候	287 ± 226	0.21 ± 0.17
龙凤山	127.60	44.73	331	东北生态屏障与粮食生产基地	中温带大陆性季风气候	$1\,877 \pm 2\,312$	0.36 ± 0.32
上甸子	117.12	40.65	293.3	京津冀经济圈	温带季风性气候	$1\,885 \pm 1\,874$	0.59 ± 0.46
临安	119.75	30.28	138.6	长三角经济圈	亚热带季风性气候	$3\,392 \pm 2\,131$	0.63 ± 0.35
金沙	114.19	29.63	751	长江中游、两湖平原区	亚热带大陆性季风气候	$1\,699 \pm 2\,213$	0.72 ± 0.37

1.2 观测仪器

BC 浓度使用 Aethalometer (美国 Magee Scientific 的 AE-31 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-31 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 的质量浓度. 该仪器的采样流量为 $5.0\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$,配备 $\text{PM}_{2.5}$ 的进样切割头,观测精度为 $1\text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$,每隔 5 min 获取一次数据,黑碳仪定期进行采样流量检验和零位调整. 针对仪器的具体介绍见文献[49,50].

使用黑碳仪对大气中的 BC 进行观测时,一般会在以下 3 个方面的误差:①大气中其他吸收性组分的影响. 除去一些特殊天气状况(如沙尘),大气中 BC 对总的气溶胶吸收性消光系数的贡献在 90% 以上,因此用黑碳仪收集的气溶胶粒子,可近似地认为全部是 BC 粒子,对其他成分的气溶胶忽略不计. ②采样过程中气溶胶形态的变化影响. 当黑碳仪把大气中的 BC 粒子收集到滤膜上时,BC 粒子则会由悬浮态转变为压缩态,其形貌特征发生了较大的改变,这可导致 BC 粒子的光散射效应发生变化. 因此需要对其进行计算校正,将气溶胶在滤膜上的光衰减系数 σ_{atm} 转变为在大气中的吸收系数 σ_{abs} .

③“负载效应”的影响. 黑碳仪在进行连续监测时, 由于滤带上负载物质逐渐增加, 沉积在滤膜上的 BC 粒子会前后遮挡, 这可造成仪器对光透射信号的非线性响应, 随着采样点处“负载效应”的增加, 仪器测得的数据会显示出系统性的减少. 因此在分析仪器读出的数据时, 要对其存在的误差进行校正. 具体的校正方法见文献[42], 对黑碳仪所得到的数据进行质量控制, 小时样本个数小于总数目的 60% 剔除的年份剔除, 并对得到的 BC 小时数据使用 3 σ 方法检验进行质量控制.

1.3 排放源数据

本文所用 BC 排放源为 2010 年 MIX 排放源数据和 2008 年与 2017 年 MEIC 排放源数据, 空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$. MIX 排放清单是为东亚模式比较计划第三期 (MICS-Asia III) 和联合国半球大气污染传输计划 (HTAP) 开发的 2008 年和 2010 年亚洲人为源排放清单, 具体介绍见文献[51]. 中国多尺度排放清单模型 (multi-resolution emission inventory for China, MEIC) 由清华大学自 2010 年起开发并维护, 旨在构建高分辨率的中国人为源大气污染物及二氧化碳排放清单, 并通过云计算平台向科学界共享数据产品, 进而为相关科学研究、政策评估和空气质量管理工作提供基础排放数据支持, 具体介绍参见文献[52,53].

1.4 卫星数据

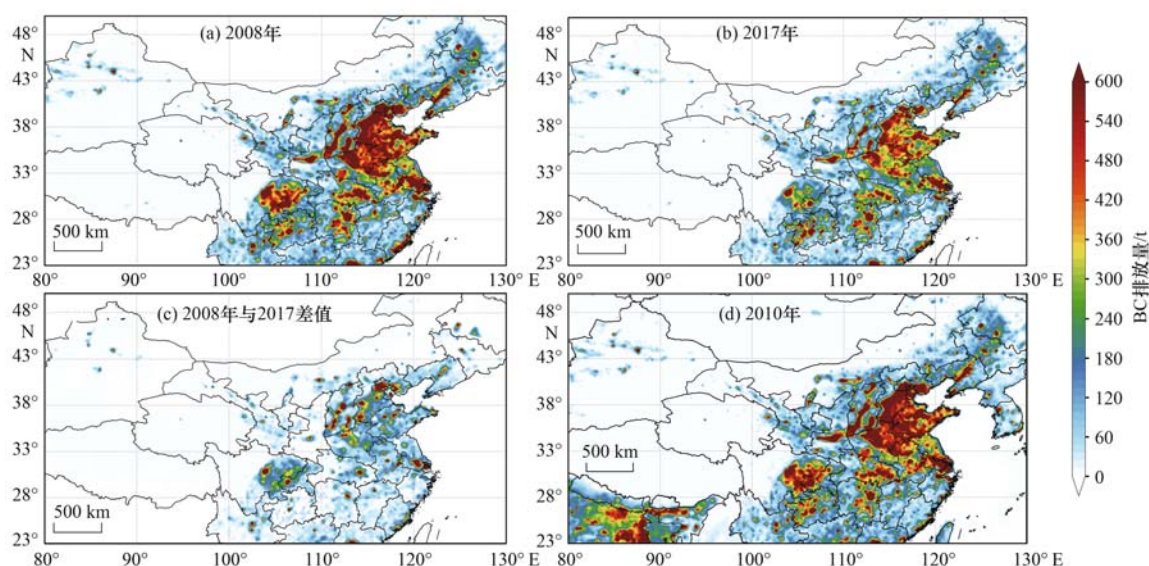
卫星数据使用的是 MODIS 的增强植被指数 (EVI) 和光学厚度 AOD, 空间分辨率分别为 $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$ 和 $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$, 时间分辨率分别为 1 月和 1

d, EVI 利用了 MODIS 新的测量方法和更强的测量能力, 可以同时减少来自大气和土壤噪声的影响, 稳定地反映了所测地区植被的情况, 详细介绍参见文献[54]. 气溶胶光学厚度 (AOD) 数据由 NASA 的中分辨率成像分光光度计 (MODIS) 仪器观测获得, 本研究使用的是 NASA 提供的 3 级产品, 数据详细介绍参见文献[55]. 所用站点 AOD 数据为以站点为中心的 2° 范围区域的平均值.

2 结果与讨论

2.1 不同大气本底站 BC 年变化特征

由表 1 可知中国不同地区的 BC 浓度和 AOD 差异较大, 空间分布为东高西低, “胡焕庸线”以东的龙凤山、上甸子、临安和金沙的 BC 浓度和 AOD 较高, “胡焕庸线”以西的阿克达拉、瓦里关和香格里拉的 BC 浓度和 AOD 较低, 这主要是由排放源和气象条件等因素的空间差异造成. BC 主要来自含碳物质的燃烧, 例如燃煤、交通尾气、烹饪和野火等^[26,34,36], 其中人为源是其主要来源, 我国东部地区人口密集、经济发达、工业和交通源较多^[36], BC 源主要集中在该地区 (图 2), 因此浓度较高. 例如长三角地区的南京、上海和杭州 2020 年常住人口分别为 931.47、2 487.09 和 1 193.60 万人, GDP 分别为 14 817.95、38 700.58 和 16 106 亿元, 汽车保有量分别为 291.35、470.43 和 311.9 万辆. 而位于西北地区的西宁、兰州和乌鲁木齐 2020 年常住人口分别为 246.79、435.94 和 405.44 万人, GDP 分别为 1 372.98、2 886.74 和 3 337.32 亿元, 汽车保有量分别为 76.1 (截至 2021 年 5 月 31



(a) 2008 年 MEIC 的 BC 排放源空间分布, (b) 2017 年 MEIC 的 BC 排放源空间分布, (c) 2008 年与 2017 年 MEIC 的 BC 排放源差值空间分布, (d) 2010 年 MIX 的 BC 排放源空间分布

图 2 MEIC 和 MIX 的 BC 排放源分布

Fig. 2 Spatial distributions of emission sources of BC from the MEIC and MIX emission inventory

日)、114.49 和 134.69 万辆。

由表 1 可知香格里拉 $\rho(\text{BC})$ 最低, 为 $(287 \pm 226) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$; 临安 $\rho(\text{BC})$ 最高, 为 $(3\,392 \pm 2\,131) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$. 阿克达拉的 AOD 最低, 为 0.20 ± 0.13 ; 金沙的 AOD 最高, 为 0.72 ± 0.37 . 有研究表明, AOD 除了和颗粒物浓度有关外, 还受到水汽等其他因素的影响^[57], 因此 BC 与 AOD 的分布并不一致. AOD

反映了整层大气气溶胶的消光特性, BC 作为最重要的吸收性气溶胶, 是气溶胶吸收性消光系数的主要贡献者. 由表 2 可知大气本底站 BC 与 AOD 均为正相关关系, 相关系数差异不大, 即 BC 均对 AOD 起到正贡献.

由图 3 可知不同大气本底站 BC 浓度的年际变化不同, 可分为 4 类. 第 1 类为年际变化较小型, 主

表 2 AOD 和 BC 相关性¹⁾

Table 2 Relationship between AOD and BC							
	阿克达拉	瓦里关	香格里拉	龙凤山	上甸子	临安	金沙
总体	0.29**	0.32**	0.36**	0.10*	0.28**	0.38**	0.23*
春	0.20*	0.43**	0.59**	0.23*	0.59**	0.55**	0.38*
夏	0.32*	0.47**	0.48**	0.18*	0.58**	0.60**	0.71**
秋	0.06	0.14	0.10	0.47**	0.45**	0.67**	0.38*
冬	-0.06	0.23*	0.32*	-0.22	0.48**	0.19*	-0.09

1) ** 表示 0.01 水平显著相关, * 表示 0.05 水平显著相关

要为阿克达拉站. 由图 2(a) 可知 2009 ~ 2020 年阿克达拉站 $\rho(\text{BC})$ 除 2012 年达到 $(566 \pm 574) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ 外, 其余年份为 $(262 \pm 226) \sim (355 \pm 258) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$. 第 2 类为先增后减然后稳定型, 主要为瓦里关站. 由图 3 可知瓦里关 $\rho(\text{BC})$ 在 2007 ~ 2009 年逐年增加, 2009 年达到最大值, 为 $(804 \pm 668) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$, 此后开始逐年下降, 2014 年达到最低值, 为 $(247 \pm 173) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$. 2014 年之后 $\rho(\text{BC})$ 波动较小, 为 $(263 \pm 189) \sim (328 \pm 202) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$. 第 3 类为先降低后稳定类, 主要为香格里拉站. 由图 3 可知香格里拉 2007 年 $\rho(\text{BC})$ 最高, 为 $(597 \pm 377) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$, 此后逐年降低, 2012 年达到最低值, 为 $(129 \pm 143) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$, 2013 年之后浓度相对比较稳定.

这 3 个站点位于“胡焕庸线”以西, 人为源相对较少(图 2), BC 浓度较低. 由图 4 可知这 3 个站点的气象条件年际变化相对比较稳定. 由图 4(a) 可知, 阿克达拉和香格里拉站在 2016 年之后风速显著增大, 这主要是因为站点观测仪器更新升级造成. 阿克达拉和瓦里关为典型的半干旱气候, 降水较少, 风速较低. 阿克达拉所在的北疆经济区地广人稀, 人为源较少, 由图 2 可知 2008 年和 2017 年的人为源变化较小, 对 BC 年际变化影响较小. 虽然瓦里关气象条件波动较小, 但是所处区域人为源相对较多(图 2), 因此 BC 浓度年际波动较大. 香格里拉站虽然位于我国西南部, 为典型的高原湿润气候, 但是海拔较高, 且位于我国西南边境位置, 上游地区的印度和孟加拉国一带 BC 源较高(图 2), 境外输送的影响较大. 此外, 其东部的四川和重庆一带 BC 源也较高, 因此局地排放源的变化对其 BC 浓度的影响也较大.

第 4 类为先稳定后降低类, 主要为龙凤山、上

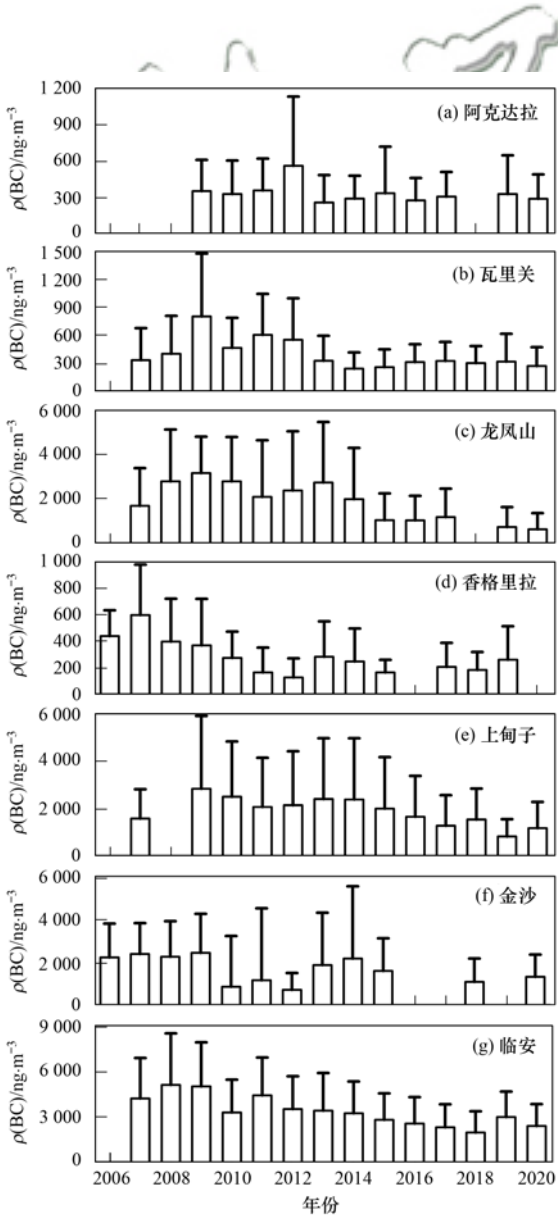


图 3 不同大气本底站 BC 年变化
Fig. 3 Annual variation in BC mass concentration in different atmospheric background stations

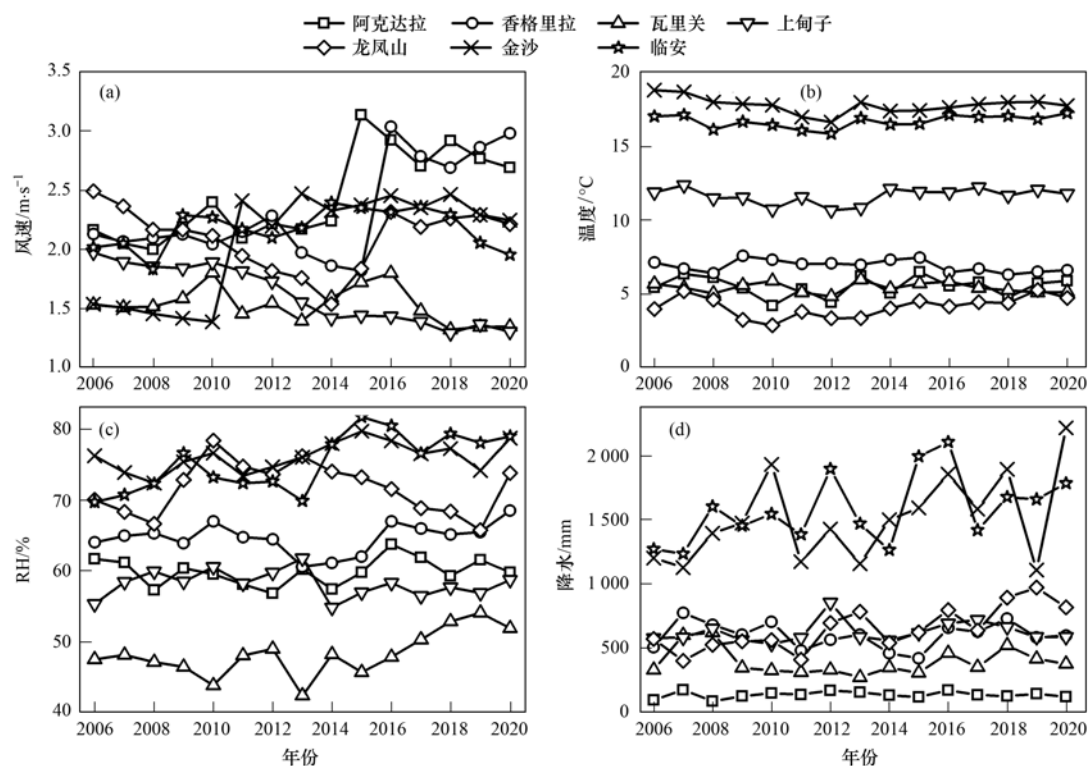


图4 不同大气本底站气象要素年变化

Fig. 4 Annual variation in meteorological elements in different atmospheric background stations

甸子、金沙和临安. 这4个站点为典型的季风性气候, 四季分明, 此外人口密集, BC的排放源较多(图2), 受到人为源的影响较大.

龙凤山代表东北生态屏障与粮食生产基地, 但是靠近哈尔滨等城市地区, 人为源较多(图2), 冬季取暖季较长, 因此BC浓度较高. $\rho(\text{BC})$ 在2009年达到最大值, 为 $(3\,169 \pm 1\,637) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$, 此后浓度开始下降, 到2011年为 $(2\,102 \pm 2\,541) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$. 但是在2011年之后 $\rho(\text{BC})$ 又开始回升, 2013年达到 $(2\,749 \pm 2\,714) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$, 此后 $\rho(\text{BC})$ 快速降低, 2015年达到 $(1\,057 \pm 1\,201) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$. 上甸子BC的年际变化与龙凤山类似, 上甸子位于京津冀经济圈, 人为源集中(图2), 也存在冬季取暖季. 但是由图4可知上甸子风速变化与其他站点显著不同, 上甸子风速逐年降低, 这主要是受到城市化的影响. 虽然京津冀地区BC人为源降幅较大, 但是人为源排放量仍然较高(图2), 且2014年之后上甸子风速与龙凤山风速相差较大, 因此上甸子后期BC质量浓度的降低幅度并不显著.

临安和金沙代表长江中下游大气环境, 由图4可知两地的气象条件类似, 但是长三角地区BC源强较高(图2). 由图3可知两地 $\rho(\text{BC})$ 年变化差异较大, 临安在2008~2009年相对比较稳定, 平均值分别为 $(5\,127 \pm 3\,392) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $(5\,031 \pm 2\,889) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$, 此后逐年下降, 到2018年为 $(1\,988 \pm$

$1\,393) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$; 而金沙在2006~2009年比较稳定, 多在 $(2\,200 \sim 2\,400) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$; 2010~2012年较低, 2012年开始增加, 2014年达到峰值, 此后变化较小. 但是金沙数据缺测较多, 因此BC年际变化特征并不显著.

由图5可知不同本底站AOD的年际变化要远小于BC的年际变化. 主要是因为卫星观测的AOD为整层大气气溶胶的值, 因此受到局地气象条件和排放源的影响较小, 反映的是区域大气状况. 由图5可知不同大气本底站AOD值在2013年之前相对比较稳定, 年际变化较小, 而2013年之后存在不同程度的降低, 2017年之后又趋于稳定. 这种变化趋势在人为源较多的龙凤山、上甸子、金沙和临安更加明显, 由图4可知本底站的气象条件变化较小, 因此这种变化主要是由于人为源变化造成. 文献[58]显示, 2017年全国地级及以上城市可 PM_{10} 浓度平均值比2013年下降22.7%; 京津冀、长三角和珠三角等重点区域 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度平均值分别比2013年下降39.6%、34.3%和27.7%; 北京市 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 年均值降至 $58 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ [58]. 由图5可知不同本底站的AOD特征不同, 阿克达拉、瓦里关和香格里拉的AOD浓度最低, 分别为0.18~0.22、0.17~0.26和0.17~0.23; 其次是龙凤山, 为0.30~0.41; 上甸子、金沙和临安的AOD值较高, 分别为0.45~0.69、0.52~0.86和0.50~0.74. 这主要是由人为源分布差异造成,

人为源较少的地区 AOD 值较小,反之人为源较多的地区 AOD 值较高。

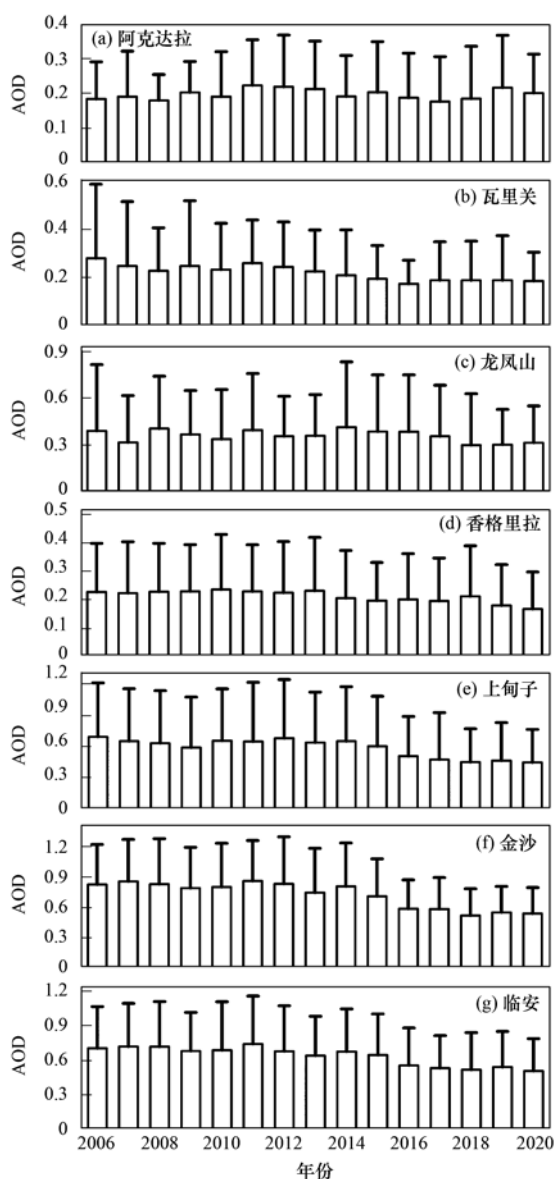


图 5 不同大气本底站 AOD 年变化

Fig. 5 Annual variation in AOD in different atmospheric background stations

2.2 不同大气本底站 BC 季节变化特征

由图 6 可知在不同季节中 $\rho(\text{BC})$ 和 AOD 的分布均呈现明显的东高西低的特征,在“胡焕庸线”以西的 $\rho(\text{BC})$ 和 AOD 较低,分别为 $(272 \pm 230) \sim (390 \pm 311) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $0.15 \pm 0.08 \sim 0.28 \pm 0.18$; 以东的 $\rho(\text{BC})$ 和 AOD 较高,分别为 $(1489 \pm 1253) \sim (3014 \pm 2694) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $0.46 \pm 0.26 \sim 0.67 \pm 0.36$ 。由图 2 排放源的分布也可显著观测到东西部的差异,BC 的源主要集中在“胡焕庸线”以东,虽然近 10 年来东部 BC 源显著降低,但仍是 BC 的主要源区。由图 6(c) 可知“胡焕庸线”东西部风速差异较小,均在 $1.8 \sim 2.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,这表明东西部的水平扩

散条件类似。由图 6 可知“胡焕庸线”以东温度和 RH 较高,分别比西部高 $5.5 \sim 7.8^\circ\text{C}$ 和 $11\% \sim 16\%$ 。温度可反映太阳辐射对地面的加热效应,为边界层发展提供热力条件,温度越高,表明近地面对流越旺盛,越有利于边界层的发展。RH 的变化与 EVI 的分布一致,由图 1 可知东西部 EVI 的差异较大,在“胡焕庸线”以东,多以平原为主, EVI 指数较高;而以西海拔较高,多以高原、山地和荒漠为主, EVI 指数较低。RH 对 BC 的影响较小,对 AOD 的影响较大。此外,由图 6(f) 可知“胡焕庸线”以东的降水要远高于西部,是西部的 $2.4 \sim 4.5$ 倍。东部平缓的地形、高温高湿的大气环境,使得近地面的人为源排放的污染物得以向高空传输,进而在大气中停留时间更长,造成 BC 和 AOD 的值远大于西部。

由图 6 可知东西部 BC 浓度和 AOD 的差异存在显著的季节特征。BC 浓度和 AOD 在秋季差异最大,在“胡焕庸线”以东分别是以西的 9.2 和 3.1 倍。从中可知秋季风速较低,且东西部风速差异最小,即东西部的水平传输最弱; RH 较高,与夏季类似;降水较少,湿清除作用较弱。因此,在排放源不变的情况下,“胡焕庸线”以东地区在秋季低风速、高湿和弱降水的情况下,污染物更容易在局地积累。此外,我国产粮区多位于“胡焕庸线”以东地区,秋收季节秸秆燃烧频发,排放大量 BC 气溶胶。由表 1 可知我国多为季风气候,秋季为夏季风向冬季风转换过程,叠加西高东低的地形特征,使得东部地区污染物往西部地区的输送减弱。因此造成在秋季东西部地区 BC 浓度和 AOD 的差异最大。在春季东西部 AOD 的差异最小,东部是西部的 2.4 倍。由图 6 可知在春季西部风速最大,为 $(2.6 \pm 0.5) \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; RH 最低,为 $(51 \pm 5.5)\%$;降水较低,为 $(60.9 \pm 36.6) \text{ mm}$ 。由图 1 可知西部地区 EVI 较低,即植被覆盖率较低,春季风沙较多,为我国沙尘频发季节。沙尘对 AOD 的影响较大,因此西部春季 AOD 的值较高,可达 0.28 ± 0.18 。在夏季东西部 BC 的差异最小,东部是西部的 4.6 倍。由图 6(f) 可知夏季降水较多,东部降水量可达 $(511 \pm 275) \text{ mm}$,是西部的 2.4 倍,东部地区湿清除作用较强。夏季温度最高,边界层发展最旺盛,边界层高度较高,有利于地面的污染物扩散。此外,夏季盛行东南风,有利于东部污染物向西部输送。

由表 2 可知不同季节 BC 与 AOD 的相关性存在显著差异。春季和夏季“胡焕庸线”东西部站点 BC 与 AOD 均为显著的正相关关系,相关性较高,说明 BC 对 AOD 的贡献较大。在秋季“胡焕庸线”以西站点 BC 与 AOD 的相关性较弱,且均未通过显著性

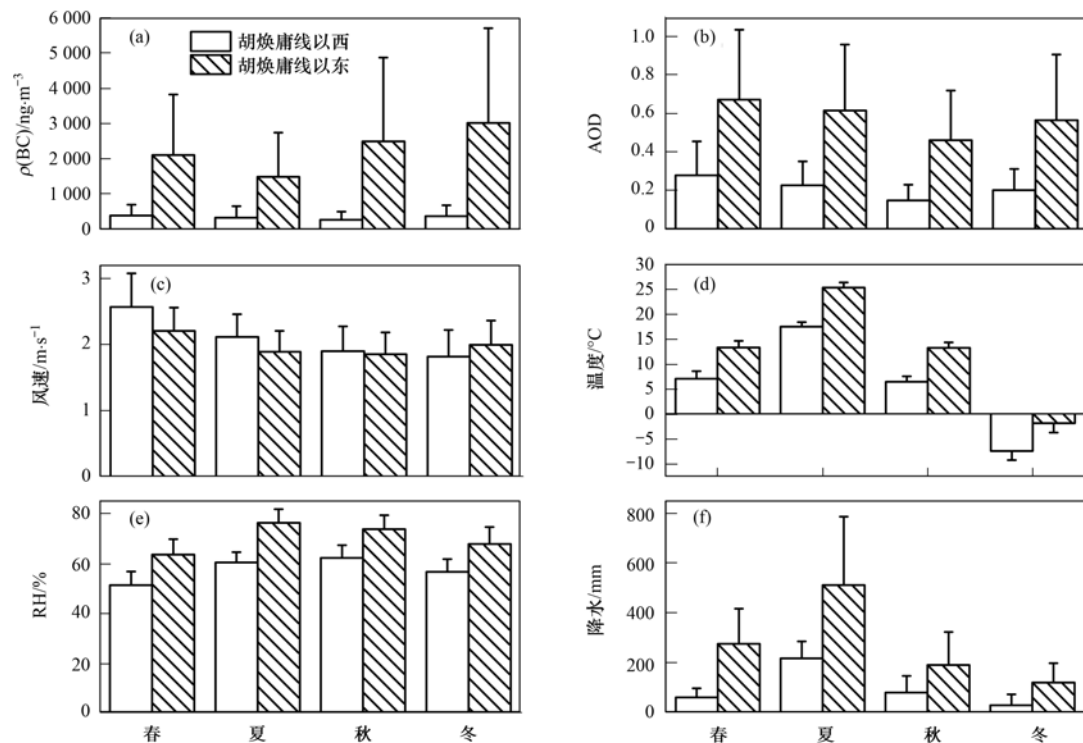


图6 胡焕庸线东西部 BC、AOD 和气象要素季节变化

Fig. 6 Seasonal variation in BC, AOD, and meteorological elements in the stations east and west of "Hu Huanyong" line

检验. 由图6可知秋季“胡焕庸线”以西 $\rho(\text{BC})$ 和 AOD 最低, 分别为 $(272 \pm 230) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 0.15 ± 0.08 . BC 气溶胶贡献的吸收性消光系数较小, 且秋季 RH 较高, 大气中的水汽对 AOD 的影响较大, 因此造成西部 BC 与 AOD 的相关性较弱. 在冬季“胡焕庸线”以东站点 BC 与 AOD 的相关性较弱, 其中龙凤山和金沙为负相关. 由图6可知在冬季“胡焕庸线”东部站点 $\rho(\text{BC})$ 最高, 为 $(3014 \pm 2694) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$, 但是 AOD 的值仅高于秋季, 为 0.57 ± 0.34 . 东部地区冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 污染严重, 虽然 BC 浓度较大, 但是 BC 占 $\text{PM}_{2.5}$ 的比重较低^[43,56], 加之冬季温度较低, RH 较高, 边界层高度较低, BC 主要集中在近地面, 因而 BC 与 AOD 的相关性较弱.

由图7可知在不同季节 BC 和 AOD 的空间分布存在差异. BC 的分布在春季为: 临安 > 上甸子 > 金沙 > 龙凤山 > 瓦里关 > 香格里拉 > 阿克达拉; 夏季为: 临安 > 上甸子 > 金沙 > 龙凤山 > 瓦里关 > 阿克达拉 > 香格里拉; 秋季为: 临安 > 龙凤山 > 上甸子 > 金沙 > 瓦里关 > 阿克达拉 > 香格里拉; 冬季为: 临安 > 龙凤山 > 金沙 > 上甸子 > 瓦里关 > 阿克达拉 > 香格里拉. AOD 的分布在春季为: 金沙 > 临安 > 上甸子 > 龙凤山 > 瓦里关 > 香格里拉 > 阿克达拉; 夏季为: 上甸子 > 金沙 > 临安 > 龙凤山 > 香格里拉 > 瓦里关 > 阿克达拉; 秋季为: 金沙 > 临安 > 上甸子 > 龙凤山 > 阿克达拉 > 瓦里关 = 香格里拉;

冬季为: 金沙 > 临安 > 上甸子 > 龙凤山 > 阿克达拉 > 瓦里关 > 香格里拉.

4 个季节中 BC 浓度均是临安最高, 临安位于长三角经济圈, 城市群中城市密集, 大城市较多, 如上海、苏州、杭州和南京等, BC 的人为源排放较多. 金沙和上甸子分别位于长江中游和京津冀地区, 这两地所处城市群人为源排放也较多, 但是与长三角城市群存在显著差异, 这两个城市群中大城市相对较少, 长江中游城市群主要是以武汉为中心, 京津冀地区大城市主要是北京和天津, 城市群中 BC 的人为源相对较少, 因此 BC 浓度低于临安. 在冬季, 盛行偏北风, 上甸子位于北京东北部, 为上风向, 受城市地区的影响反而较小, 因此 BC 平均浓度反而低于金沙, 但是波动较大. 龙凤山为东北产粮区, 秋收后秸秆燃烧较多^[59], 因此秋季 BC 浓度较高. 在冬季龙凤山温度较低, 供暖季人为源排放较多, 而东北地区城市化较低, 农村地区取暖季排放的 BC 浓度较多, 因此龙凤山冬季 BC 浓度较高. 瓦里关、阿克达拉和香格里拉这 3 个站点 BC 浓度较低, BC 浓度大小排序变化较大. 如在冬季瓦里关和阿克达拉地区受到取暖季的影响, 浓度要高于香格里拉. AOD 的大小除了和大气中的颗粒物浓度有关外, 还和水汽等条件有关^[57], 由图7可知金沙的 RH 要高于临安, 即长江中游两湖地区的水汽相对更充足, 因此金沙的 AOD 要高于临安.

针对某一地区而言, 排放源的季节变化较小, 除

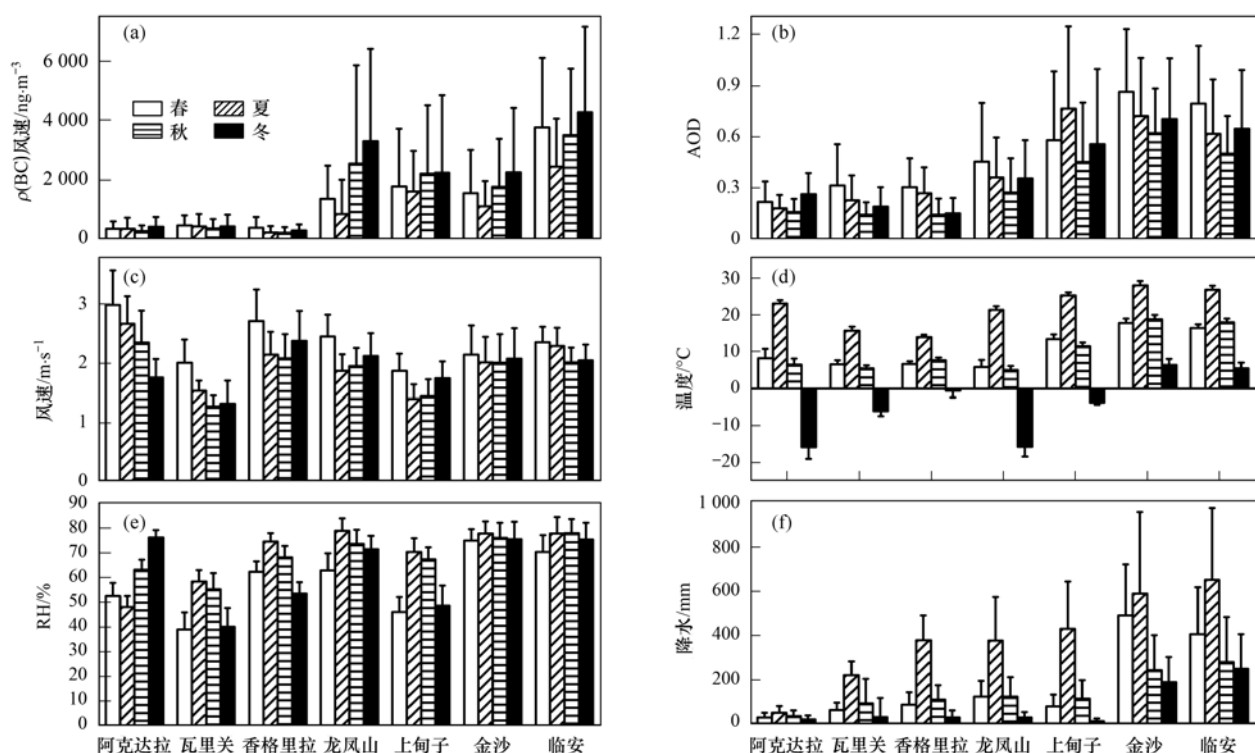


图 7 不同大气本底站 BC、AOD 和气象要素季节变化

Fig. 7 Seasonal variation in BC, AOD, and meteorological elements in different atmospheric background stations

了冬季取暖季、森林或草原火灾等特殊排放源外,不同地区的排放源季节变化可以近似认为不变,因此,不同地区 BC 的季节变化差异主要是由于气象条件差异造成。

由图 7 可知阿克达拉 BC 季节分布为冬季 > 春季 > 夏季 > 秋季。阿克达拉春季风速最大,为 $3.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; 冬季风速和温度最低,分别为 $1.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 -15.9°C 。冬季大气扩散条件较差,叠加取暖季影响,因此 BC 浓度最高,达到 $406 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ 。春季虽然风速较高,但是温度仍较低,北疆供暖季基本要持续到 4 月中下旬,因此春季 BC 浓度仅次于冬季。夏季虽然降水较多,但是大气环流以偏南风为主,气团主要来自乌鲁木齐、兰州和西宁等内陆地区,BC 浓度较高。秋季又开始转换为偏北风为主,大气扩散条件较好,因此 BC 浓度最低。AOD 的季节分布与 BC 一致,冬季最高为 0.26,秋季最低为 0.16。

瓦里关作为全球大气本底站,选址要求严格,周边人为源影响较小,BC 浓度分布为:春季 > 夏季 > 冬季 > 秋季。瓦里关春季风速最大,为 $2.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,温度为 6.6°C ,降水较少,为 64.3 mm ,但是 $\rho(\text{BC})$ 最高,达到 $453 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ 。值得注意的是,瓦里关 BC 的季节差异较小,夏季和冬季 $\rho(\text{BC})$ 分别为 $420 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $417 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ 。瓦里关 BC 代表欧亚大陆腹地背景大气浓度,反映了欧亚大陆人为源的影响,由图 7 可知瓦里关 BC 浓度除了冬季外均比阿克达拉

高,冬季由于其海拔较高,因此周边地区取暖季的影响反而会比阿克达拉小,造成 BC 浓度低于阿克达拉。夏季瓦里关虽然降水较多,为 220 mm ,但是夏季多为偏东风,来自内陆的气团 BC 浓度较高,因此其夏季 BC 浓度较高。Dai 等^[48]详细讨论了东、西风下瓦里关 BC 的浓度变化,证实偏东风下远距离输送是造成瓦里关夏季 BC 高浓度的主要原因。AOD 的季节分布与 BC 一致,春季最大,为 0.31,秋季最低,为 0.14。由图 7 可知瓦里关春季和夏季 AOD 的值高于阿克达拉,而秋季和冬季的值低于阿克达拉。冬季阿克达拉的 RH 高达 76%,远高于瓦里关(40%),水汽对 AOD 的影响较大,因此阿克达拉 AOD 较高。春季瓦里关 RH 为 39%,多沙尘暴,瓦里关正好位于我国沙尘源区下风向,而阿克达拉位于沙尘源区的上风向,因此春季瓦里关的 AOD 值远高于阿克达拉。

香格里拉的海拔高度与瓦里关类似,因此 $\rho(\text{BC})$ 季节变化也主要受到区域输送的影响,春季最高,为 $377 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$; 秋季最低,为 $207 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ 。其冬季和春季盛行偏西风,受印度等境外输送的影响较大(图 2)。香格里拉虽然位于我国西南部,但是春季和冬季温度较低,分别为 6.6°C 和 -0.5°C ,春季和冬季也存在供暖季,因此春季和冬季局地源排放的影响较大,这与瓦里关不同。香格里拉四季风速差异较小,春季最大,为 $2.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,夏季和秋季最低,

为 $2.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 因此春季受到外来输送的影响最大; 夏季降水较多, 为 378.7 mm , 湿清除较强; AOD 季节分布为: 春 > 夏 > 冬 > 秋, 春夏季 AOD 远高于秋冬季, 夏季 RH 高达 75%, 与金沙和临安接近, 水汽对 AOD 的影响较大, 因此夏季的 AOD 较高。

龙凤山、上甸子、金沙和临安均位于人为源密集的地区, 这 4 个站点的气候特征和排放源存在较大差异. 龙凤山、上甸子和金沙的 BC 浓度大小为: 冬季 > 秋季 > 春季 > 夏季, 临安的 BC 浓度大小为: 冬季 > 春季 > 秋季 > 夏季. 龙凤山和上甸子冬季温度较低, 分别为 -15.8°C 和 -3.8°C (图 7), 存在冬季供暖季, BC 排放源较多, 冬季 $\rho(\text{BC})$ 分别为 $3300 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $2233 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$, 分别是夏季的 4.0 和 1.4 倍. 由图 7 可知龙凤山和上甸子四季风速差异较小, 分别为 $1.9 \sim 2.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $1.4 \sim 1.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 即近地面的大气扩散条件季节差异较小. 龙凤山和上甸子降水主要集中在夏季, 夏季湿清除作用较强. 综上造成这两个站点冬季 BC 浓度较高, 夏季 BC 浓度最低。

临安和金沙位于长江中下游地区, 冬季温度较高, 分别为 5.4°C 和 6.3°C , 虽然不存在冬季集中供暖, 但是在这些地区冬季城市空调取暖和农村地区散煤等取暖比较普遍, 因此冬季 BC 排放源仍然较高. 冬季温度较低, 大气边界层高度较低, 大气环境容量较小; 降水较少, 湿清除较弱. 此外, 在冬季以偏北风为主, 还会受到北方供暖区远距离输送的影

响^[60]. 因此, 这两个站点冬季 BC 浓度也较高。

龙凤山 AOD 为: 春 > 夏 = 冬 > 秋, 上甸子为: 夏 > 春 > 冬 > 秋, 金沙为: 春 > 夏 > 冬 > 秋, 临安区为: 春 > 冬 > 夏 > 秋. 这 4 个站点人为源排放对 AOD 的贡献较高, 值得注意的是, 这 4 个站点夏季的 RH 较高, 分别为 79%、70%、78% 和 78%, 夏季较高的水汽使得 AOD 的值较高, 甚至会高于人为污染严重的冬季. Shen 等^[57] 使用 2000 ~ 2018 年 AOD 数据在两湖地区也得到类似的结论, 并有详细解释。

2.3 不同大气本底站 BC 日变化特征

由图 8 可发现在春季, 临安、上甸子和龙凤山 BC 浓度日变化的峰值位于 06:00 ~ 8:00 和 19:00 ~ 21:00, 金沙和香格里拉位于 09:00 ~ 10:00 和 20:00 ~ 21:00, 阿克达拉位于 08:00 和 23:00, 瓦里关位于 12:00 和 23:00. 其中阿克达拉与瓦里关由于使用北京时间, 因此峰值出现时间会滞后 2 ~ 3 h. BC 的日变化主要是由于边界层日变化特征和人类活动造成. 在夜间, 为稳定边界层, 边界层高度较低, 且人类活动也较弱, 因此夜间 BC 浓度变化较小. 日出后, 太阳加热大地, 近地面对流活动开始加强, 但是近地面逆温层仍然存在, 边界层内扩散条件较弱, 叠加上班高峰期人为源排放较多, 因此容易出现 BC 浓度峰值. 而到中午, 随着太阳辐射的加强, 逆温层消失, 此时以对流边界层为主, 大气扩散条件较好, 因此 BC 浓度开始下降. 午后随着太阳辐射的减弱, 对流减弱, 逆温层开始形成, 大气扩散条件变差, 此

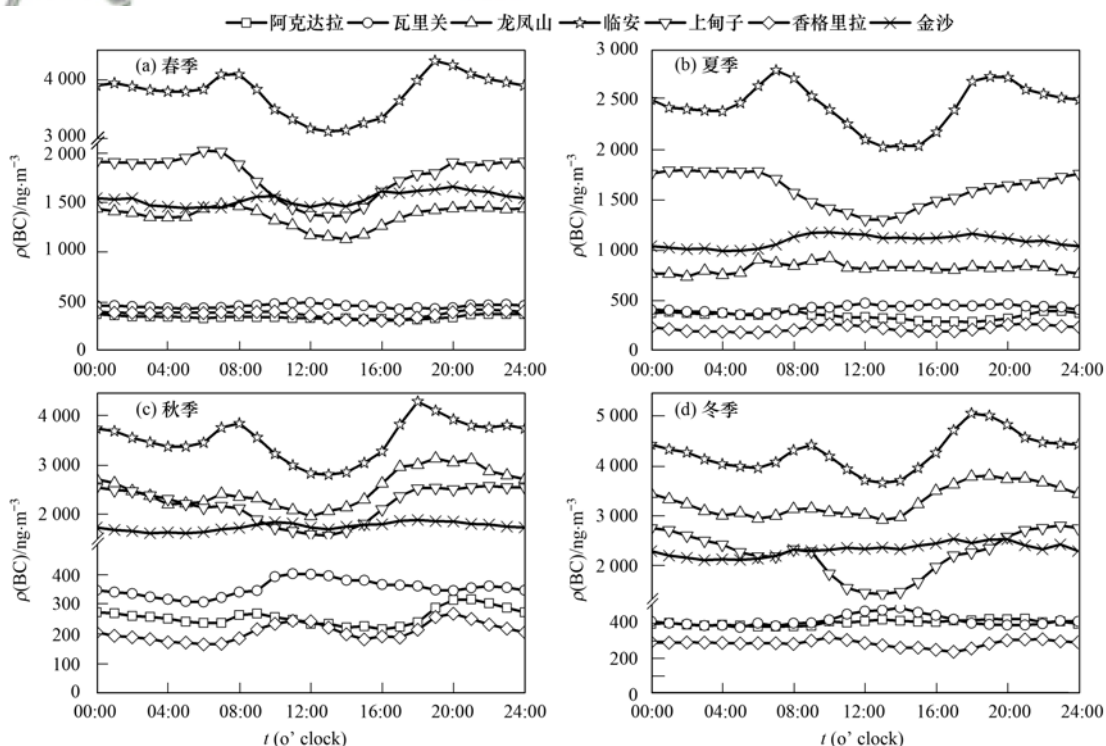


图 8 不同大气本底站日变化

Fig. 8 Diurnal variation in BC mass concentration in different atmospheric background stations

时叠加下班高峰期, BC 又出现峰值。

在夏季各个站点 BC 浓度日变化峰值出现时间与春季类似。临安、香格里拉和阿克达拉为典型的双峰型分布; 龙凤山、金沙和瓦里关的日变化特征减弱, 均为白天高夜间低; 上甸子则为白天低夜间高, 全天观测不到显著的峰值。

秋季临安、上甸子、龙凤山、香格里拉和阿克达拉为典型的双峰型分布, 金沙为弱的双峰型分布, 瓦里关为单峰型分布。瓦里关 BC 浓度主要受到周边地区传输的影响, 在白天随着边界层高度的抬升, 近地面 BC 会输送到瓦里关站, 因此在白天 BC 浓度最高, 上下班高峰期峰值不是特别明显。香格里拉虽然海拔也较高, 但是由于局地人为源的影响, 因此 BC 浓度的日变化与其他站点类似, 均为双峰型分布。

冬季不同站点的 BC 日变化与其他季节类似, 但是峰值时间发生了变化。临安、龙凤山和上甸子 BC 浓度的早高峰出现在 08:00~09:00, 比其他季节有所滞后, 这主要是因为冬季边界层日变化的滞后导致。此外, 阿克达拉、香格里拉和瓦里关的日变化减弱, 一方面是由于冬季边界层日变化相对较弱, 另一方面是由于在冬季人为源的日变化差异也相对减弱造成。

此外, 由图 8 还可发现不同季节中 BC 浓度日变化的早晚峰值浓度高低存在差异。例如在夏季临安 BC 早高峰浓度要大于晚高峰浓度, 而在其他季节正好相反。上甸子在春季和夏季早高峰浓度大于晚高峰浓度, 在秋季和冬季为晚高峰浓度大于早高峰浓度。

3 结论

(1) 中国不同地区的 BC 浓度和 AOD 差异较大, 受排放源和气象条件等因素的影响空间分布为东高西低。“胡焕庸线”以东的龙凤山、上甸子、临安和金沙的 $\rho(\text{BC})$ 和 AOD 较高, 分别为 $(1\,699 \pm 2\,213) \sim (3\,392 \pm 2\,131) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $0.36 \pm 0.32 \sim 0.72 \pm 0.37$; “胡焕庸线”以西的阿克达拉、瓦里关和香格里拉的 $\rho(\text{BC})$ 和 AOD 较低, 平均浓度为 $(287 \pm 226) \sim (398 \pm 308) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $0.20 \pm 0.13 \sim 0.22 \pm 0.19$ 。不同大气本底站 BC 与 AOD 多为正相关关系, BC 均对 AOD 起到正贡献。

(2) 不同大气本底站 BC 浓度的年际变化不同, 可分为 4 类。第 1 类为年际变化较小型, 主要为阿克达拉站; 第 2 类为先增后减然后稳定型, 主要为瓦里关站。第 3 类为先降低后稳定类, 主要为香格里拉站。第 4 类为先稳定后降低类, 主要为龙凤山、上甸

子、金沙和临安。不同本底站 AOD 的年际变化要远小于 BC 的年际变化, 在 2013 年之前年际变化较小, 2013 年之后存在不同程度的降低, 2017 年之后又趋于稳定。

(3) 不同大气本底站 BC 浓度的季节变化不同。“胡焕庸线”以西秋季 BC 浓度最低, 冬季和春季 BC 浓度较高; 以东冬季 BC 浓度最高, 夏季 BC 浓度最低。阿克达拉 BC 浓度季节分布为: 冬季 > 春季 > 夏季 > 秋季; 瓦里关为: 春季 > 夏季 > 冬季 > 秋季; 香格里拉为: 春季 > 冬季 > 夏季 > 秋季; 龙凤山、上甸子和金沙为: 冬季 > 秋季 > 春季 > 夏季; 临安为冬季 > 春季 > 秋季 > 夏季。AOD 均是秋季最低, 春夏季较高。春季和夏季“胡焕庸线”东西部站点 BC 对 AOD 的贡献均较大, 在秋季“胡焕庸线”以西站点 BC 对 AOD 的贡献较小, 在冬季“胡焕庸线”以东站点 BC 对 AOD 的贡献较小。

(4) 不同大气本底站 BC 浓度的日变化多为双峰型分布, 但是峰值时间在不同地区和季节存在显著差异。夏季龙凤山、金沙和瓦里关的日变化特征减弱, 均为白天高夜间低; 上甸子则为白天低夜间高, 全天观测不到显著的峰值。秋季瓦里关为单峰型分布。冬季阿克达拉、香格里拉和瓦里关的日变化减弱。

参考文献:

- [1] Huang R J, Zhang Y L, Bozzetti C, *et al.* High secondary aerosol contribution to particulate pollution during haze events in China[J]. *Nature*, 2014, **514**(7521): 218-222.
- [2] Huang X, Ding A J, Wang Z L, *et al.* Amplified transboundary transport of haze by aerosol-boundary layer interaction in China[J]. *Nature Geoscience*, 2020, **13**(6): 428-434.
- [3] 钱永甫, 黄媛媛. 臭氧、云和气溶胶对纬带平均气候的影响[J]. *地理学报*, 1994, **49**(3): 266-274.
- [4] Qian Y F, Huang Y Y. The effects of ozone, clouds and aerosols on the zonally averaged climate[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1994, **49**(3): 266-274.
- [5] Shiraiwa M, Ueda K, Pozzer A, *et al.* Aerosol health effects from molecular to global scales[J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **51**(23): 13545-13567.
- [6] Bellouin N, Quaas J, Gryspeerdt E, *et al.* Bounding global aerosol radiative forcing of climate change[J]. *Reviews of Geophysics*, 2020, **58**(1), doi: 10.1029/2019RG000660.
- [7] 蔡瑞婷, 肖舜, 董治宝, 等. 汾渭平原典型城乡 PM_{2.5} 中多环芳烃特征与健康风险[J]. *地理学报*, 2021, **76**(3): 740-752.
- [8] Cai R T, Xiao S, Dong Z B, *et al.* Characteristics and health risk of polycyclic aromatic hydrocarbons in PM_{2.5} in the typical urban and rural areas of the Fenwei Plain[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, **76**(3): 740-752.
- [9] An Z S, Huang R J, Zhang R Y, *et al.* Severe haze in northern China: a synergy of anthropogenic emissions and atmospheric processes[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, **116**(18): 8657-8666.
- [10] Tie X X, Cao J J. Aerosol pollution in China: present and future

- impact on environment[J]. *Particuology*, 2009, **7**(6): 426-431.
- [9] Lei Y, Zhang Q, He K B, *et al.* Primary anthropogenic aerosol emission trends for China, 1990- 2005 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, **11**(3): 931-954.
- [10] Shen L J, Wang H L, Cheng M T, *et al.* Chemical composition, water content and size distribution of aerosols during different development stages of regional haze episodes over the North China Plain [J]. *Atmospheric Environment*, 2021, **245**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.118020.
- [11] Zheng H, Kong S F, Wu F Q, *et al.* Intra-regional transport of black carbon between the south edge of the North China Plain and central China during winter haze episodes [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, **19**(7): 4499-4516.
- [12] 丁新航, 梁越, 肖化云, 等. 长沙市秋季 PM_{2.5} 中水溶性离子特征及其来源解析[J]. *地球与环境*, 2019, **47**(2): 186-193.
- Ding X H, Liang Y, Xiao H Y, *et al.* Characteristics and sources of water soluble inorganic ions in fine particulate matter during autumn in Changsha[J]. *Earth and Environment*, 2019, **47**(2): 186-193.
- [13] 刘海猛, 方创琳, 黄解军, 等. 京津冀城市群大气污染的时空特征与影响因素解析[J]. *地理学报*, 2018, **73**(1): 177-191.
- Liu H M, Fang C L, Huang J J, *et al.* The spatial-temporal characteristics and influencing factors of air pollution in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, **73**(1): 177-191.
- [14] 彭妍君, 张鑫, 张强. “大气十条”实施对 2013-2017 年大气气溶胶-辐射相互作用的影响[J]. *环境科学学报*, 2021, **41**(2): 311-320.
- Peng Y J, Zhang X, Zhang Q. Impact of the implementation of the “Ten Statements of Atmosphere” on the atmospheric aerosol-radiation interaction during 2013- 2017 [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, **41**(2): 311-320.
- [15] Wang Y H, Gao W K, Wang S, *et al.* Contrasting trends of PM_{2.5} and surface-ozone concentrations in China from 2013 to 2017[J]. *National Science Review*, 2020, **7**(8): 1331-1339.
- [16] Li M G, Wang L L, Liu J D, *et al.* Exploring the regional pollution characteristics and meteorological formation mechanism of PM_{2.5} in North China during 2013-2017 [J]. *Environment International*, 2020, **134**, doi: 10.1016/j.envint.2019.105283.
- [17] 陈菁, 彭金龙, 徐彦森. 北京市 2014~2020 年 PM_{2.5} 和 O₃ 时空分布与健康效应评估[J]. *环境科学*, 2021, **42**(9): 4071-4082.
- Chen J, Peng J L, Xu Y S. Spatiotemporal distribution and health impacts of PM_{2.5} and O₃ in Beijing, from 2014 to 2020 [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(9): 4071-4082.
- [18] 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.
- [19] Tiwari S, Srivastava A K, Bisht D S, *et al.* Diurnal and seasonal variations of black carbon and PM_{2.5} over New Delhi, India: influence of meteorology[J]. *Atmospheric Research*, 2013, **125**: 50-62.
- [20] 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.
- [21] Ramanathan V, Carmichael G. Global and regional climate changes due to black carbon[J]. *Nature Geoscience*, 2008, **1**(4): 221-227.
- [22] 唐杨, 韩贵琳, 徐志方. 黑碳研究进展[J]. *地球与环境*, 2010, **38**(1): 98-108.
- Tang Y, Han G L, Xu Z F. Black carbon: a review of recent research[J]. *Earth and Environment*, 2010, **38**(1): 98-108.
- [23] 黄聪聪, 马嫣, 郑军. 南京冬季气溶胶光学特性及黑碳光吸收增强效应[J]. *环境科学*, 2018, **39**(7): 3057-3066.
- Huang C C, Ma Y, Zheng J. Aerosol optical properties and light absorption enhancement of EC during wintertime in Nanjing [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(7): 3057-3066.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] Wang R, Tao S, Shen H Z, *et al.* Trend in global black carbon emissions from 1960 to 2007 [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **48**(12): 6780-6787.
- [28] Chung C E, Ramanathan V, Carmichael G, *et al.* Anthropogenic aerosol radiative forcing in Asia derived from regional models with atmospheric and aerosol data assimilation [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, **10**(13): 6007-6024.
- [29] Gao J H, Zhu B, Xiao H, *et al.* Effects of black carbon and boundary layer interaction on surface ozone in Nanjing, China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, **18**(10): 7081-7094.
- [30] Putero D, Cristofanelli P, Marinoni A, *et al.* Seasonal variation of ozone and black carbon observed at Paknajok, an urban site in the Kathmandu Valley, Nepal[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, **15**(24): 13957-13971.
- [31] 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.
- [32] Lei W F, Zhang R Y, Tie X X, *et al.* Chemical characterization of ozone formation in the Houston-Galveston area: a chemical transport model study [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2004, **109**(D12), doi: 10.1029/2003JD004219.
- [33] Wang R, Tao S, Shen H Z, *et al.* Global emission of black carbon from motor vehicles from 1960 to 2006 [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46**(2): 1278-1284.
- [34] Wang R, Tao S, Wang W T, *et al.* Black carbon emissions in China from 1949 to 2050 [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46**(14): 7595-7603.
- [35] 赵晓亮, 刘云滨, 韩方伟, 等. 阜新市化石燃料燃烧源大气污染物排放清单及特征分析[J]. *地球与环境*, 2020, **48**(4): 480-488.
- Zhao X L, Liu Y B, Han F W, *et al.* Source inventory and characteristics of air pollutants from fossil fuel combustion sources in Fuxin city[J]. *Earth and Environment*, 2020, **48**(4): 480-

- 488.
- [36] Cao G L, Zhang X Y, Zheng F C. Inventory of black carbon and organic carbon emissions from China [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(34): 6516-6527.
- [37] 徐晨曦, 陈军辉, 李媛, 等. 四川省基于第二次污染源普查数据的人为源大气污染源排放清单及特征[J]. *环境科学*, 2020, **41**(10): 4482-4494.
- Xu C X, Chen J H, Li Y, *et al.* Emission inventory and characteristics of anthropogenic air pollution sources based on second pollution source census data in Sichuan province [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(10): 4482-4494.
- [38] 刘玺, 孔少飞, 郑淑睿, 等. 春节前后华北平原农村地区黑碳浓度及来源[J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(8): 3169-3177.
- Liu X, Kong S F, Zeng S R, *et al.* Levels and sources of black carbon around the spring festival at a rural site of the North China Plain [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(8): 3169-3177.
- [39] Badarinath K V S, Kharol S K, Chand T R K, *et al.* Variations in black carbon aerosol, carbon monoxide and ozone over an urban area of Hyderabad, India, during the forest fire season [J]. *Atmospheric Research*, 2007, **85**(1): 18-26.
- [40] Weise D R, Wright C S. Wildland fire emissions, carbon and climate: characterizing wildland fuels [J]. *Forest Ecology and Management*, 2014, **317**: 26-40.
- [41] He J J, Gong S L, Yu Y, *et al.* Air pollution characteristics and their relation to meteorological conditions during 2014-2015 in major Chinese cities [J]. *Environmental Pollution*, 2017, **223**: 484-496.
- [42] 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.
- [43] 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.
- [44] 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.
- [45] Zheng H, Kong S F, Zheng M M, *et al.* A 5.5-year observations of black carbon aerosol at a megacity in Central China: levels, sources, and variation trends [J]. *Atmospheric Environment*, 2020, **232**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.117581.
- [46] 权维俊, 姚波, 刘伟东, 等. 我国大气本底观测站创新发展的思考和建议[J]. *科学通报*, 2021, **66**(19): 2367-2377.
- Quan W J, Yao B, Liu W D, *et al.* The innovative development of atmospheric background stations in China: thoughts and recommendations [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2021, **66**(19): 2367-2377.
- [47] Zhang Y, Li Y N, Guo J P, *et al.* The climatology and trend of black carbon in China from 12-year ground observations [J]. *Climate Dynamics*, 2019, **53**(9): 5881-5892.
- [48] Dai M M, Zhu B, Fang C W, *et al.* Long-term variation and source apportionment of black carbon at Mt. Waliguan, China [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2021, **126**(21), doi: 10.1029/2021JD035273.
- [49] Verma R L, Sahu L K, Kondo Y, *et al.* Temporal variations of black carbon in Guangzhou, China, in summer 2006 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, **10**(14): 6471-6485.
- [50] Wang H L, Miao Q, Shen L J, *et al.* Air pollutant variations in Suzhou during the 2019 novel coronavirus (COVID-19) lockdown of 2020: high time-resolution measurements of aerosol chemical compositions and source apportionment [J]. *Environmental Pollution*, 2021, **271**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.116298.
- [51] Li M, Zhang Q, Kurokawa J I, *et al.* MIX: a mosaic Asian anthropogenic emission inventory under the international collaboration framework of the MICS-Asia and HTAP [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, **17**(2): 935-963.
- [52] Li M, Liu H, Geng G N, *et al.* Anthropogenic emission inventories in China: a review [J]. *National Science Review*, 2017, **4**(6): 834-866.
- [53] Zheng B, Tong D, Li M, *et al.* Trends in China's anthropogenic emissions since 2010 as the consequence of clean air actions [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, **18**(19): 14095-14111.
- [54] Jiang Z Y, Huete A R, Didan K, *et al.* Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, **112**(10): 3833-3845.
- [55] Levy R C, Mattoo S, Munchak L A, *et al.* The Collection 6 MODIS aerosol products over land and ocean [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2013, **6**(11): 2989-3034.
- [56] 丁金宏, 程晨, 张伟佳, 等. 胡焕庸线的学术思想源流与地理分界意义[J]. *地理学报*, 2021, **76**(6): 1317-1333.
- Ding J H, Cheng C, Zhang W J, *et al.* The ideological origins and geographical demarcation significance of Hu Huanyong Line [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, **76**(6): 1317-1333.
- [57] Shen L J, Wang H L, Zhao T L, *et al.* Characterizing regional aerosol pollution in central China based on 19 years of MODIS data: spatiotemporal variation and aerosol type discrimination [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **263**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114556.
- [58] 生态环境部办公厅. 关于《大气污染防治行动计划》实施情况终期考核结果的通报[EB/OL]. https://www.mee.gov.cn/gkml/sthjbgw/stbgh/201806/t20180601_442262.htm, 2021-12-25.
- [59] Wang L L, Xin J Y, Li X R, *et al.* The variability of biomass burning and its influence on regional aerosol properties during the wheat harvest season in North China [J]. *Atmospheric Research*, 2015, **157**: 153-163.
- [60] Shen L J, Wang H L, Kong X C, *et al.* Characterization of black carbon aerosol at the summit of Mount Tai (1534 m) in central east China: Temporal variation, source appointment and transport [J]. *Atmospheric Environment*, 2021, **246**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.118152.

CONTENTS

Characteristics of PM _{2.5} Pollution in Beijing During the Historical Period of the 2022 Olympic Winter Games	LIU Yue-chen, MAN Rui-qi, QIU Yan-ting, <i>et al.</i>	(3895)
Observation Analyses of Aerosol Size Distribution Properties from February to March, 2019 in Tianjin Urban Area	HAO Jian, CAI Zi-ying, LIU Jing-le, <i>et al.</i>	(3903)
Analysis of Typical Weather Circulation Patterns of Heavy PM _{2.5} Pollution and the Transport Pattern in the Yangtze River Middle Basin	WANG Ying, ZHI Xie-fei, BAI Yong-qing, <i>et al.</i>	(3913)
Characteristics of Heavy Metals and Other Elements in Atmospheric Dry and Wet Deposition and Health Risk Assessment of a Typical Industrial and Mining City in Central Yunnan	FAN Chen-zi, LIU Yong-bing, YUAN Ji-hai, <i>et al.</i>	(3923)
Characteristics and Reactivity of VOCs in a Typical Industrial City in Summer	QIN Tao, LI Li-ming, WANG Xin-wu, <i>et al.</i>	(3934)
Chemical Reaction Activity and Source Apportionment of Atmospheric VOCs in Summer in Dalian	ZHU Ke-xin, LIU Li-zhong, LIU Huan-wu, <i>et al.</i>	(3944)
One-year Simulation of Air Pollution in Central China, Characteristics, Distribution, Inner Region Cross-transmission, and Pathway Research in 18 Cities	LIU Guang-jin, SU Fang-cheng, XU Qi-xiang, <i>et al.</i>	(3953)
Characteristics of Ozone Pollution, Meteorological Impact, and Evaluation of Forecasting Results Based on a Neural Network Model in Beijing-Tianjin-Hebei Region	ZHU Yuan-yuan, LIU Bing, GUI Hai-lin, <i>et al.</i>	(3966)
Temporal and Spatial Variations in Black Carbon Aerosol in Different Atmospheric Background Stations in China from 2006 to 2020	WANG Hong-lei, YAN Xue, SHEN Li-juan, <i>et al.</i>	(3977)
Pollution Characteristics and Emission Factors of PCDD/Fs from Iron and Steel Industry	YANG Yan-yan, XIE Dan-ping, FU Jian-ping, <i>et al.</i>	(3990)
Community Composition and Assessment of the Aquatic Ecosystem of Periphytic Algae in the Yangtze River Basin	HU Yu-xin, CAO Liang, QU Ren-chao, <i>et al.</i>	(3998)
Evaluation and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Sediments of the Yellow River Basin Based on Monte Carlo Simulation and PMF Model	PANG Kuo, LI Min, LIU Lu, <i>et al.</i>	(4008)
Retention Effect of Heavy Metals in Rivers of a Typical Mountainous City by Cascade Weirs; A Case Study of Liangtan River in Chongqing	WANG Chao, JIA Bo-yang, PAN Cheng-yong, <i>et al.</i>	(4018)
Estimation of Agricultural Non-point Source TN and TP Export Coefficients Based on Soil Loss	WANG You-xiao, HUANG Chong, LIU Gao-huan, <i>et al.</i>	(4032)
Influence of Land Use and Land Cover Patterns on Water Quality at Different Spatio-temporal Scales in Hehuang Valley	LI Hao-hao, HUANG Yi-mei, GUO Wei, <i>et al.</i>	(4042)
Groundwater Pollution Source Identification by Combination of PMF Model and Stable Isotope Technology	ZHANG Han, DU Xin-yu, GAO Fei, <i>et al.</i>	(4054)
Antibiotic Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment in Jinjiang River Basin, Jiangxi Province	LI Jia-le, WANG Meng, HU Fa-wang, <i>et al.</i>	(4064)
Screening and Control Measures for New Priority Pollutants in Surface Water of Tianjin	WU Yan-qi, SONG Shuai, SHI Ya-juan, <i>et al.</i>	(4074)
Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Pharmaceuticals and Personal Care Products (PPCPs) in the Third Drain of Ningxia	LI Fu-juan, GAO Li, LI Ling-yun, <i>et al.</i>	(4087)
Analysis of the Seasonal Changes in Planktonic Microbial Diversity in Urban River Supplied with Reclaimed Water: A Case Study of the North Canal River	YUAN Xun-chao, WANG Min, GUO Xiao-yu, <i>et al.</i>	(4097)
Spectroscopic and Molecular Characterization of Water Soluble Organic Matter from Sediments in the Macrophyte-dominated and Algae-dominated Zones of Taihu Lake	DU Ying-xun, DAI Jia-ru, ZHANG Qiao-ying, <i>et al.</i>	(4108)
Emission of Nitrous Oxide (N ₂ O) from Lake Taihu and the Corresponding Potential Driving Factors	LIU Chao-rong, ZHU Jun-yu, LI Yu-yang, <i>et al.</i>	(4118)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in the Bioretention Systems of Sponge Cities	LEI Xiao-ling, QIU Li-na, WEI Ze-jun, <i>et al.</i>	(4127)
Treatment Effect of Corncob and Rice Straw Enhanced Subsurface Flow Constructed Wetland on Low C/N Ratio Wastewater	HU Man-li, HAO Qing-ju, MA Rong-zhen, <i>et al.</i>	(4136)
Investigation of the Performance of Organic Contaminant Degradation by Fe ²⁺ /PDS Under Environmentally Relevant pH Conditions	LIU Ying, GUO Yi-wei, QIAO Jun-lian, <i>et al.</i>	(4146)
Typical Pesticide Residues and Their Risk Assessment in Farmland Environment of Different Plant Types in Shayu County, Xinjiang	XIE Xuan-xuan, NUERLA Ailijiang, BALATI Maihemuti, <i>et al.</i>	(4154)
Distribution Characteristics of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Manure and Surrounding Soil of Poultry Farm in Ningxia	SHEN Cong, ZHANG Jun-hua, LIU Ji-li, <i>et al.</i>	(4166)
Enrichment Factors of Soil-Se in the Farmland in Shizuishan City, Ningxia	WANG Ying, LIU Hai-yan, WANG Ze-jing, <i>et al.</i>	(4179)
Zoning and Safe Utilization Method of Heavy Metal Contaminated Cultivated Land at Block Scale	WANG Rui, YU Jing, LI Yu, <i>et al.</i>	(4190)
Spatial Distribution, Source Apportionment, and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Jianghugongmi Producing Area, Shandong Province	YU Lin-song, WAN Fang, FAN Hai-yin, <i>et al.</i>	(4199)
Assessing the Lead Accumulation Risks of Wheat Grain by Developing a Source-Specific Accumulation Risk Assessment Model	YANG Yang, LI Yan-ling, NIU Shuo, <i>et al.</i>	(4212)
Accumulation Effects and Health Risks of Heavy Metals in Rice in Location-based Cadmium Anomaly Area in Liuzhou	ZHU Liang-liang, WANG Fu-peng, TANG Le-bin, <i>et al.</i>	(4219)
Accumulation and Transport Characteristics of Cd, Pb, Zn, and As in Different Maize Varieties	REN Chao, XIAO Jian-hui, LI Jing-tian, <i>et al.</i>	(4232)
Remediation Potential of <i>Taraxacum kok-saghyz</i> Rodin on Lead and Cadmium Contaminated Farmland Soil	ZHANG Heng, XIONG Ming-biao, WANG Qian-xin, <i>et al.</i>	(4253)
Remediation Potential of Three Dwarf Bamboos on Farmland Soils Contaminated with Mixed Heavy Metals	ZHANG Ying, ZHAO Xin, ZHANG Sheng-hu, <i>et al.</i>	(4262)
Impacts of Uptake and Accumulation of Cd on Double Rice-Paddy Soil by Silicon Fertilizer Continuous Application	PENG Hua, DENG Kai, SHI Yu, <i>et al.</i>	(4271)
Effect of Modified Chitosan Loaded with Silica on Arsenic Uptake and Transport in Rice	YANG Jia-yi, SUN Meng-qiang, XIAO Yu-tang, <i>et al.</i>	(4282)
Effect of Chelating Agents and Organic Acids on Remediation of Cadmium and Arsenic Complex Contaminated Soil Using <i>Xanthium sibiricum</i>	ZHANG Ya-rui, HUANG Yi-zong, BAO Qiong-li, <i>et al.</i>	(4292)
Effects of Water Management on the Transformation of Iron Oxide Forms in Paddy Soils and Its Coupling with Changes in Cadmium Activity	LI Ming-yuan, ZHANG Xiao-ting, LIU Han-yi, <i>et al.</i>	(4301)
Effects of Iron Intensity-regulated Root Microbial Community Structure and Function on Cadmium Accumulation in Rice	ZHENG Shen, HUANG Dao-you, LI Bo, <i>et al.</i>	(4313)
Effects of Mulching and Slow-release Fertilizer Application Reduction on Soil Microbial Community Structure in Rapeseed Field Under Two Different Rainfall Conditions	FENG Jun, SHI Chao, Hafiz Athar Hussain, <i>et al.</i>	(4322)
High-Throughput Sequencing Combined with Metabonomics to Analyze the Effect of Heavy Metal Contamination on Farmland Soil Microbial Community and Function	PANG Fa-hu, LI Xiao-qi, DUAN Li-yang, <i>et al.</i>	(4333)
Characteristics of Microbial Community Structure in the Surrounding Farmlands of a Mercury Mining Area and Its Environmental Driving Factors	CHEN Fen, YU Gao, SUN Yue-bing, <i>et al.</i>	(4342)
Comparison of Bacterial Community Structure in Soil Aggregates Between Natural Karst Wetland and Paddy Field	LENG Meng, JIN Zhen-jiang, XIAO Xiao-yi, <i>et al.</i>	(4353)
Elevational Pattern and Control Factors of Soil Microbial Carbon Use Efficiency in the Daiyun Mountain	LÜ Kun, WANG Jing-jing, WU Guo-peng, <i>et al.</i>	(4364)
Effect of Long-term Straw Returning on the Mineralization and Priming Effect of Rice Root-carbon	LIU Feng, WANG Yun-qiu, ZHANG Yun, <i>et al.</i>	(4372)
Effects of Straw Returning and Biochar Application on Summer Maize Yield and Soil N ₂ O Emission in Guanzhong Plain	BAI Jin-ze, LIU Zhen-yuan, SONG Jia-jie, <i>et al.</i>	(4379)
Effects of Polystyrene Nanoplastics (PS-NPs) on the Physiology of <i>Allium sativum</i> L.	QIU Chen-chen, LI Guo-xin, LI Qing-song, <i>et al.</i>	(4387)
Effect of Microplastics on Soil Water Infiltration and Evaporation	WANG Zhi-chao, ZHANG Bo-wen, NI Jia-xuan, <i>et al.</i>	(4394)
Life Cycle Assessment and Key Parameter Comparison of Hydrogen Fuel Cell Vehicles Power Systems	CHEN Yi-song, LAN Li-bo, HAO Zhuo, <i>et al.</i>	(4402)