

DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2019113001

周变红, 曹夏, 张容端, 等. 宝鸡高新区春节前后大气中黑碳浓度特征及来源解析[J]. 环境化学, 2020, 39(7): 1754-1762.

ZHOU Bianhong, CAO Xia, ZHANG Rongduan, et al. Characteristics and sources analysis of black carbon concentration in the atmosphere of Baoji High-tech Zone around the Spring Festival [J]. Environmental Chemistry, 2020, 39(7): 1754-1762.

宝鸡高新区春节前后大气中黑碳浓度特征及来源解析*

周变红^{1,2**} 曹 夏¹ 张容端¹ 刘雅雯¹ 刘文霞³

(1. 宝鸡文理学院地理与环境学院, 陕西省灾害监测与机理模拟重点实验室, 宝鸡, 721013;

2. 中国科学院地球环境研究所, 中国科学院气溶胶化学物理重点实验室, 西安, 710061; 3. 宝鸡市环境监测中心站, 宝鸡, 721006)

摘 要 基于春节前后(2018年1月1日—2018年3月31日)宝鸡市高新区宝鸡文理学院站点的黑碳气溶胶(BC)、浊度仪、颗粒态污染物(PM₁₀、PM_{2.5}和PM_{1.0})、气态污染物(CO、NO₂、SO₂和O₃)的逐时数据及常规气象数据,对宝鸡市高新区BC气溶胶的时间变化特征、来源及影响因素进行分析.结果表明,观测期间BC质量浓度的变化范围为0.01—5.62 μg·m⁻³,平均浓度为0.63 μg·m⁻³.BC与风速和能见度均呈负相关,观测期间BC浓度日变化呈“双峰双谷”型,峰值出现在09:00和19:00,谷值出现在05:00和16:00;寒假前BC浓度昼夜变化整体高于寒假期间和春季开学,可能与寒假前频繁的人为活动,不易扩散的气象条件有关.BC占PM_{2.5}的0.84%,其吸收作用占大气消光的2.14%.除O₃外,BC日平均浓度与PM_{2.5}、CO和NO₂呈显著相关,相关系数分别为0.626、0.623和0.473,说明BC气溶胶与之均有部分共同源.

关键词 黑碳气溶胶, 春节前后, 相关性, 宝鸡, 来源.

Characteristics and sources analysis of black carbon concentration in the atmosphere of Baoji High-tech Zone around the Spring Festival

ZHOU Bianhong^{1,2**} CAO Xia¹ ZHANG Rongduan¹
LIU Yawen¹ LIU Wenxia³

(1. Shaanxi Key Laboratory of Disaster Monitoring and Mechanism Simulation, College of Geography & Environment, Baoji University of Arts & Sciences, Baoji, 721013, China; 2. Key Laboratory of Aerosol Chemistry and Physics,

State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, 710061, China;

3. Environmental Monitoring Center Station of Baoji, Baoji, 721006, China)

Abstract: This study used the hourly concentrations of black carbon (BC) aerosol, the nephelometer, particulate pollutants (PM₁₀, PM_{2.5} and PM_{1.0}), gaseous pollutants (CO, NO₂, SO₂ and O₃) and meteorological data from the Spring Festival (2018-1-1—2018-3-31), observed at the site in Baoji University of arts and sciences located in Baoji High-tech Zone, to analyze the temporal characteristics of BC concentrations, sources and its influencing factors. The results showed that during the observation period, the mass concentration of BC varied from 0.01 to 5.62 μg·m⁻³, and the average concentration was 0.63 μg·m⁻³. BC concentration was negatively correlated with wind

2019年11月30日收稿(Received: November 30, 2019).

* 陕西省自然科学基金项目(2019JQ4041), 中国科学院气溶胶化学物理重点实验室项目(KLACP1903), 陕西省科技厅项目(2018ZDCXL-SF-02-04), 宝鸡市科技局项目(2018-JH-16), 大气重污染成因与治理攻关项目(DQGG-05-36)和宝鸡文理学院重点项目(ZK2017038, ZK2018049)资助.

Supported by Basic Research Project of Shaanxi Provincial Natural Science(2019JQ4041), Project of Key Laboratory of Aerosol Chemistry and Physics of Chinese Academy of Sciences(KLACP1903), the Science and Technology Projects of Shaanxi Province (2018ZDCXL-SF-02-04), Project of Baoji City Science and Technology Bureau(2018-JH-16), Key Projects on the Causes and Control of Heavy Atmospheric Pollution (DQGG-05-36) and Key Projects of Baoji College of Arts and Sciences(ZK2017038, ZK2018049).

** 通讯联系人, Tel: 17719516968, E-mail: bhz620@163.com

Corresponding author, Tel: 17719516968, E-mail: bhz620@163.com

speed and visibility. During the observation period, the daily variation of BC concentration showed a “double peak and double valley” structure, with peaks appearing at 09:00 and 19:00 and valley values appearing at 05:00 and 16:00. The diurnal variation of BC concentration before the winter vacation was higher than that during the winter vacation and spring school, which might be related to the frequent human activities before the winter vacation and the weather conditions that were not easy to spread. BC accounted for 0.84% of $PM_{2.5}$, and its absorption effect accounted for 2.14% of atmospheric extinction. In addition to the O_3 , the BC daily average concentration was significantly correlated with the concentrations of $PM_{2.5}$, CO and NO_2 , with correlation coefficients of 0.626, 0.623, and 0.473, respectively, indicating that BC aerosol had some common sources.

Keywords: black carbon aerosol, the Spring Festival, correlation, Baoji, sources.

黑碳(black carbon, BC)是气溶胶中的重要组成部分,主要是含碳物质(化石燃料,生物质和生物燃料等)不完全燃烧的产物^[1-2].其粒径一般分布在 0.01—1.0 μm 内,BC 对太阳辐射有强烈的吸收作用,其本身产生的直接辐射强迫的幅度超过了 CH_4 引起的辐射强迫,BC 可能是仅次于 CO_2 外全球变暖的第二增温组分^[3-4],BC 排放成为全球气候变化的一个重要的驱动因素^[5-6],同时也是使大气能见度降低和灰霾天气产生的重要因素之一^[7].黑碳能够吸附大量致癌有毒物质(如多环芳烃等),可进入人体的呼吸系统,从而对人类身体健康造成影响^[8-11].因此对 BC 气溶胶的研究已成为国内外学者研究的热点.国外学者对于 BC 的测量和研究较早,美国科学家于 20 世纪 70 年代就开始观测研究黑碳气溶胶.Hansen 等^[12]对南极海岸麦克默多站的 BC 进行测量分析,发现 BC 浓度较高与来自该站点风的方向有关;PARK 等^[13]利用 AE-33 对韩国光州 BC 气溶胶进行观测,发现 BC 可能来源于交通排放和生物质燃烧;研究德里发现夏季较低的 BC 浓度主要来自化石燃料来源,而农村地区,作物残渣/木材的大规模露天焚烧是造成冬季和秋季德里的严重雾霾污染^[14].国内对于黑碳的研究相对较晚,汤洁等^[15]通过对瓦里关本底站 1994 年 7 月至 1995 年 12 月的黑碳气溶胶进行监测,发现黑碳气溶胶浓度的变化与该地区污染气团的影响有关.随着近些年空气质量的不断恶化,针对长三角^[16-18]、珠三角^[19-20]和京津冀^[21]及其他地区^[22-23]的 BC 研究与监测逐渐增多.蒋磊等^[24]研究发现 BC 是近地源排放的新鲜粒子时为早晚机动车排放的高峰时段;徐昶等^[25]研究发现影响杭州市灰霾的发生和大气能见度下降的因素主要是 BC 的吸收消光作用;钟洁等^[26]通过重庆市核心区 BC 浓度的监测与研究,发现 BC 浓度日均值与 SO_2 、 NO_x 的日均值呈显著正相关,说明其同源性较强.

对于宝鸡周边的城市如西安^[27]于 2011 年对 BC 浓度污染特征以及与其他常规污染物的相关性进行了研究,发现 BC 气溶胶与 $PM_{1.0}$ 、 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 的相关系数分别为 0.69、0.85、0.91.Zhou 等^[28]通过对宝鸡市 2015 年 BC 浓度进行监测并研究,发现冬季 BC 的产生主要与家庭取暖燃料的增加和不利的气象条件有关.

本研究利用 2018 年 1 月 1 日—2018 年 3 月 31 日宝鸡市高新区的 BC 监测数据、光学数据、颗粒态污染物(PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 和 $PM_{1.0}$)以及气态污染物(CO、 NO_2 、 SO_2 和 O_3),对春节前后宝鸡市高新区大气中 BC 浓度特征及来源进行分析,为控制 BC 污染、开展大气污染防治工作提供基础依据.

1 数据与方法(Data and methods)

1.1 观测地点

观测站点位于宝鸡市高新区宝鸡文理学院东区明理楼楼顶(34.3°N, 107.2°E),距地面约 20 m,观测点周围没有明显的 BC 污染排放源及工业污染源,西面北面均为两车道道路,具体位置如图 1.观测时间为 2018 年 1 月 1 日—2018 年 3 月 31 日,其中 1 月 1 日—1 月 20 日为寒假前,1 月 21 日—3 月 3 日为寒假假期,3 月 4 日—3 月 31 日为春季开学.

1.2 观测仪器及数据处理

黑碳观测仪器为美国玛基科学公司(Magee Scientific Co, USA)生产的 AE-31 型黑碳仪,该仪器共有 7 个波段(370、470、520、590、660、880、950 nm)可以同时测量,测量范围为 0—1000000 $ng \cdot m^{-3}$,采样流量为

4.6—5.0 L·min⁻¹, 每 5 min 可获取一组数据.其工作原理及资料处理方法见文献[29-30]. 本文采用 880 nm波段的采样结果作为 BC 质量浓度.本文剔除了停电、仪器故障和更换滤带等产生有明显错误的数
据,然后将有效数据进行处理,得到 BC 的小时平均质量浓度值和其日均值,其数据详情处理见文献[31].

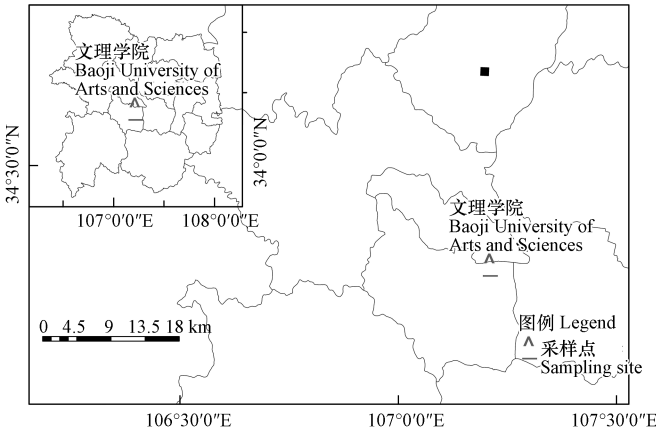


图 1 采样点位置示意
Fig.1 Location of the sampling site

测量 PM₁₀、PM_{2.5}和 PM_{1.0}的质量浓度采用的仪器为德国 Grimm 公司生产的 Grimm 180E,采样频率为每 5 min 采 1 次,利用每 5 min 的数据计算出其小时值和日均值.
采用 AURORA 1000 型浊度仪进行光学数据监测,观测波长为 525 nm,采样流速约为 5 L·min⁻¹.浊度仪的监测资料经过质量控制后统一处理为小时均值数据,每周定期仪器维护 1 次.

2 结果与讨论(Results and discussion)

2.1 气象条件和 BC 浓度基本特征

如图 2 所示,观测期间温度较低,范围为-11—30.8 ℃,相对湿度变化范围较大,为 11%—96%,风速的范围为 0—6.8 m·s⁻¹,平均值为 1.3 m·s⁻¹,风速整体处于较小水平,BC 浓度变化范围为 0.01—5.62 μg·m⁻³,平均值为 0.63 μg·m⁻³,这低于对宝鸡市 2015 年 1 月—12 月 BC 质量浓度((2.9±1.7) μg·m⁻³)的研究^[28].低温、低风速会导致形成稳定的大气层结,不利于污染物扩散^[32].研究期间,BC 浓度与风速呈显著负相关,其相关系数为-0.227(*a*=0.01),这一结果与刘玺^[33]等对春节期间华北平原 BC 的研究结果基本一致.BC 对光有很强的吸收作用,能够使能见度降低^[34],观测期间 BC 浓度和能见度 Pearson 相关系数为-0.474** (“**”表示在 0.01 水平双侧检验下显著相关),呈显著负相关,说明 BC 浓度对能见度的影响较大,宝鸡与连云港^[35]、敦煌^[36]等地区的观测基本一致.

表 1 是寒假前、寒假假期和春季开学的 3 个时期气象参数和 BC 浓度的对比.其中,寒假前、寒假假期和春季开学风速无明显区别,但寒假前 BC 浓度平均值高于寒假期间和春季开学 BC 浓度平均值,约为 2.0 倍和 2.6 倍.结合图 2e 可知,寒假前 BC 浓度明显高于寒假期间和春季开学 BC 浓度,这可能与寒假前低温高湿的天气、大气层结稳定、人为活动较多和冬季生物质燃烧增多等有关.

表 1 不同时期各气象要素和 BC 浓度比较
Table 1 Comparison of meteorological elements and BC concentrations in different periods

参数 Parameters	寒假前 Before winter vacation	寒假假期 Winter holiday	春季开学 Spring school
温度/℃	-1.3	3.2	13.1
相对湿度/%	65.7	52.5	59.8
风速/(m·s ⁻¹)	1.1	1.3	1.4
能见度/km	5.8	10.3	10.5
BC 浓度/(μg·m ⁻³)	1.09	0.54	0.42

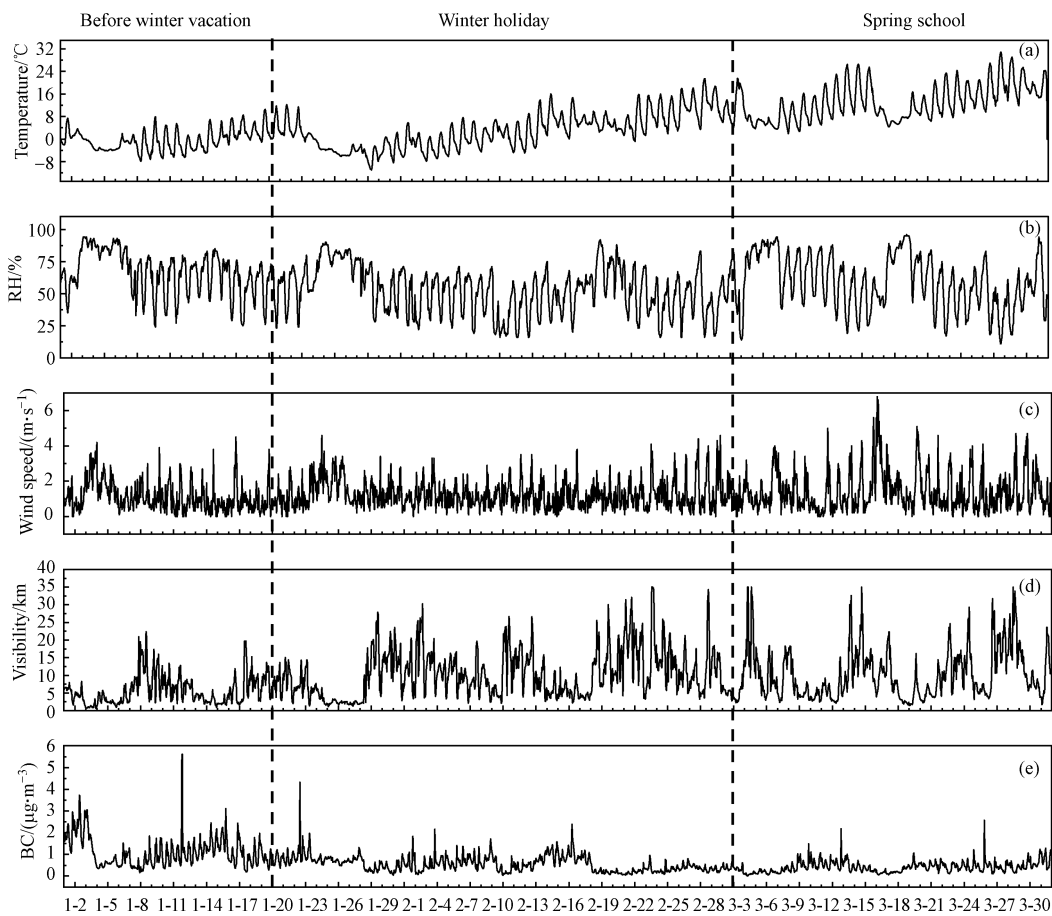


图 2 观测期间各气象要素和 BC 浓度的时间序列

Fig.2 Time series of meteorological elements and BC concentrations during the observation period

表 2 为本次观测 BC 浓度与我国部分观测站点和国外部分地区的比较结果.与敦煌^[36]、北京^[37]、广州^[38]、南京^[39]、深圳城区^[40]、墨西哥^[41]等地区相比,本站点的 BC 浓度较低,与乌鲁木齐^[42]和英国^[43]的观测值接近,高于丹麦^[44]和全球背景站青海瓦里兴^[15]的 BC 浓度.

表 2 不同地区的 BC 质量浓度的比较

Table 2 Comparison of BC mass concentrations in different regions

观测点 Observation sites	观测时间 Observation time	BC 浓度 Black carbon concentration/ ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	参考文献 References
宝鸡	2018-01—2018-03	0.63	本研究
敦煌	2012-12	3.93	[36]
北京	2013-11—2015-10	4.77±4.49	[37]
广州	2015-10—2015-11	3.75±2.55	[38]
南京	2018-12	3.23 2± 2.102	[39]
深圳城区	2014-01—2015-06	2.58±1.91	[40]
墨西哥	2013-03—2014-03	0.9—3.1	[41]
乌鲁木齐河源区	2016-08—2017-07	0.52	[42]
英国 London	2012-01—2012-02	1.3	[43]
丹麦 Northeast Greenland	2011-05—2013-08	0.09	[44]
青海瓦里关	1994-07—1995-12	0.13—0.30	[15]

2.2 观测期间大气中 BC 浓度变化特征

2.2.1 BC 小时浓度和空气质量指数 AQI 的变化特征

观测期间 BC 小时浓度的变化范围为 0.40—0.87 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 小时平均质量浓度为 0.63 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 一般来说, BC 质量浓度的小时变化特征与当地人类活动、近地层气象条件以及大气边界层的动力状况密切相关^[45-46]. 图 3 为观测期间 BC 小时平均浓度变化趋势图, 可以看出 BC 小时平均浓度变化基本一致, 呈“双峰双谷”分布. 峰值分别出现在 09:00 (0.83 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 和 19:00 (0.87 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), 谷值出现在 05:00 (0.50 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 和 16:00 (0.40 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$). 09:00 出现第一个峰值是由于清晨, 容易出现逆温现象, 污染物扩散条件相对较差, 人为活动和机动车辆增多, BC 浓度积累, 这与陈程^[35]等对连云港的研究结果基本一致; 午后由于太阳辐射不断增强, 大气边界层不断抬升, 空气对流增强, 利于污染物的扩散, 16:00 达到全天最低值; 傍晚时分, 随着晚高峰到来, 居民烹饪和取暖活动开始, 19:00 出现另一个峰值; 凌晨, 人为活动逐渐减少, BC 浓度逐渐降低, 05:00 出现另一个谷值.

观测期间 BC 小时平均浓度与环境空气质量指数 (AQI) 呈现出良好的一致性, 相关系数为 0.491 ($\alpha = 0.01$).

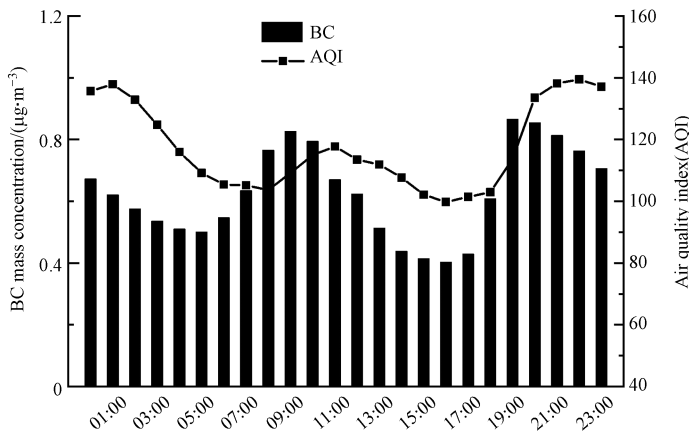


图 3 BC 小时平均浓度和 AQI 的对比
Fig.3 The comparison of BC hour average concentration and AQI

2.2.2 不同时期 BC 质量浓度的昼夜变化特征

图 4 为不同时期的 BC 浓度昼夜变化曲线. 寒假前 BC 浓度变化范围为 0.81—1.63 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化范围为 29.60—50.91 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, $\text{PM}_{1.0}$ 浓度变化范围为 28.16—48.36 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; 寒假假期 BC 浓度变化范围为 0.29—0.68 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化范围为 62.80—95.87 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, $\text{PM}_{1.0}$ 浓度变化范围为 45.05—73.57 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; 春季开学 BC、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 $\text{PM}_{1.0}$ 浓度变化范围分别为 0.25—0.68 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、52.48—85.30 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 40.85—63.13 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; 3 个不同时段 BC、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 $\text{PM}_{1.0}$ 的质量浓度昼夜变化均呈“双峰双谷型”, 但寒假前 BC 浓度整体高于寒假期间和春季开学的 BC 浓度, 出现这种原因可能是与寒假前频繁的人为活动和大气层结稳定, 污染物不易扩散有关.

2.3 BC 气溶胶的吸收系数

BC 气溶胶对光的吸收作用较强, 利用已知黑碳气溶胶质量浓度可计算出 BC 气溶胶的吸收系数, 其经验公式^[47]表达如下:

$$B_{\text{ap}532} = 8.28 [\text{BC}] + 2.23 \tag{1}$$

大气消光系数可表示为:

$$B_{\text{ext}} = B_{\text{sp}} + B_{\text{ap}} + B_{\text{sg}} + B_{\text{ag}} \tag{2}$$

式中, B_{sp} 、 B_{ap} 、 B_{sg} 、 B_{ag} 分别为气溶胶散射系数、吸收系数、干洁大气散射系数和气态污染物吸收系数^[48]. 大气瑞利散射系数 (B_{sg}) 为一常量, 一般取值为 13 Mm^{-1} ^[49].

从图 5 可以看出, B_{ext} 、 B_{ap} 、BC 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的变化趋势基本一致, 均呈现“双峰双谷”型. 观测期间 B_{ext} 的平均值为 372.41 Mm^{-1} , B_{ap} 的平均值为 7.19 Mm^{-1} , 进一步计算可知, BC 气溶胶占大气中 $\text{PM}_{2.5}$ 的 0.84%,

其吸收作用对大气消光的贡献为 2.14%.

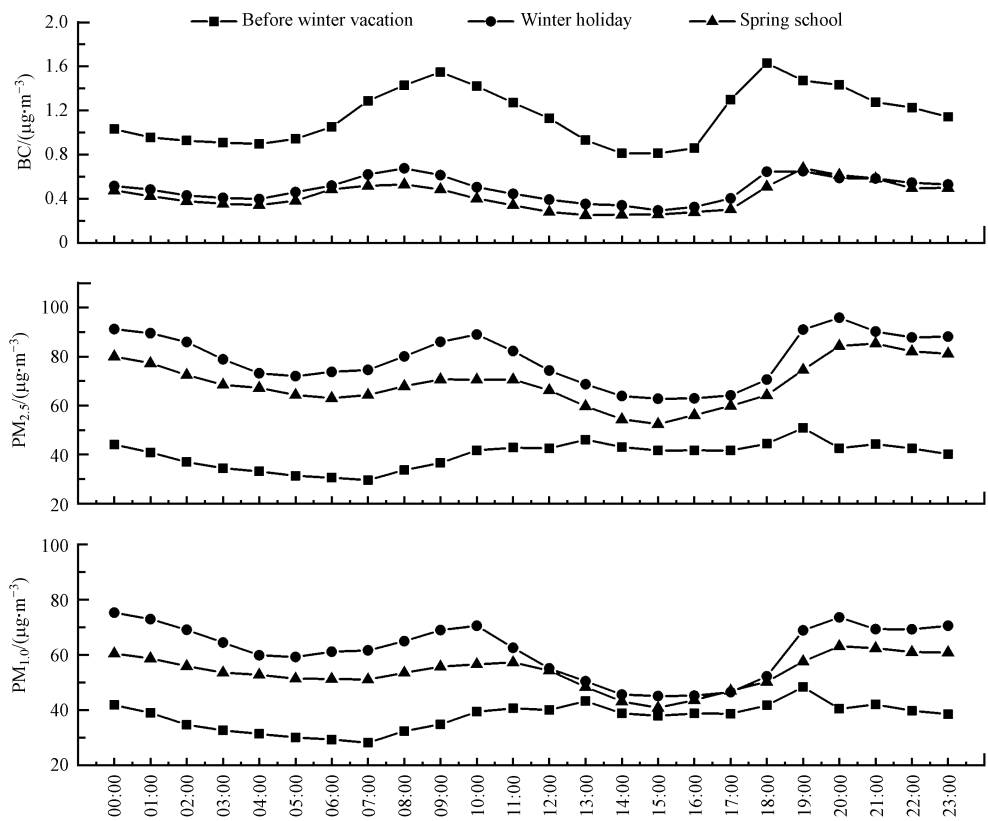


图 4 不同时期 BC、PM_{2.5} 和 PM_{1.0} 质量浓度的昼夜变化特征

Fig.4 Diurnal variation characteristics of BC, PM_{2.5} and PM_{1.0} mass concentration in different periods

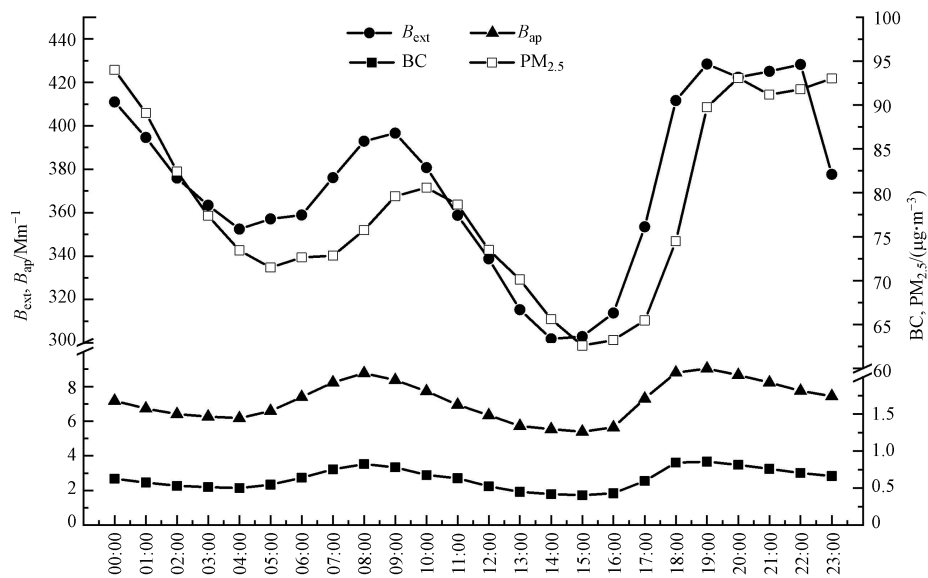


图 5 B_{ext} 、 B_{ap} 、BC 和 PM_{2.5} 的日变化

Fig.5 Daily variation of B_{ext} , B_{ap} , BC and PM_{2.5}

2.4 BC 浓度与其他空气污染物浓度相关性分析

对观测期间 BC 日平均浓度与颗粒态污染物 (PM₁₀、PM_{2.5} 和 PM_{1.0}) 和 气态污染物 (CO、NO₂、SO₂ 和 O₃) 的日平均浓度进行 Pearson 相关性分析. 研究发现大气中 BC 日平均浓度与 PM₁₀、PM_{2.5} 和 PM_{1.0} 的相

关系数分别为 0.364、0.626 和 0.489,均在 $\alpha=0.01$ 双侧检验下呈较强的正相关,相关性由高到低分别为 $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{PM}_{1.0}$ 、 PM_{10} ,其中与 $\text{PM}_{2.5}$ 的相关系数达到 0.6 以上,说明 BC 更多是以细粒子的形式存在于大气中。

通过对 BC 与气态污染物的日平均浓度相关性分析发现,除 BC 日平均浓度与 O_3 日平均浓度呈负相关外,BC 日平均浓度与 CO 、 NO_2 和 SO_2 日平均浓度在 $\alpha=0.01$ 双侧检验下呈显著正相关,这与刘立忠等^[50]研究结果基本一致。

BC 的来源可从 BC 与气态污染物的相关性进行解析,BC 与 CO 的相关系数为 0.623,说明二者存在共同的来源,可能受周边居民区含碳物质不完全燃烧所导致。BC 与 NO_2 的相关系数为 0.473,监测点西面和北面均为车道,可能受机动车尾气排放的影响。BC 与 SO_2 的相关系数为 0.321, SO_2 主要排放源为工业源,冶炼等热过程以及含碳燃料的燃烧。BC 与 NO_2 和 SO_2 的相关系数均低于 BC 与 CO 的相关系数,表明宝鸡高新区 BC 主要受含碳物质不完全燃烧的影响较大。BC 与 O_3 的相关系数为 -0.292,呈负相关,这主要是因为二者产生源不同造成的。

3 结论 (Conclusion)

(1) 研究期间,BC 的变化范围为 $0.01\text{--}5.62\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,平均浓度为 $0.63\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$;BC 与风速和能见度均呈显著负相关,其相关系数分别为 -0.227 和 -0.474;寒假前 BC 浓度约为寒假期间和春季开学 BC 浓度 2.0 倍和 2.6 倍。

(2) 研究期间 BC 小时平均浓度变化趋势呈“双峰双谷”型,峰值分别出现在 09:00 和 19:00,谷值出现在 05:00 和 16:00,峰谷值的出现主要与混合层日变化特征以及人类活动密切相关,且 BC 小时浓度与 AQI 的相关系数为 0.491,显著相关;寒假前 BC 浓度昼夜变化整体高于寒假期间和春季开学,可能与寒假前频繁的人为活动,大气层结稳定和污染物不易扩散有关。

(3) 研究期间大气消光系数均值为 $372.41\ \text{Mm}^{-1}$,BC 的吸收系数的均值为 $7.19\ \text{Mm}^{-1}$,BC 气溶胶占大气中 $\text{PM}_{2.5}$ 的 0.84%,其吸收作用占大气消光的贡献的 2.14%。

(4) BC 与颗粒态污染物 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 $\text{PM}_{1.0}$ 的相关性均显著,相关系数分别为 0.364、0.626 和 0.489,说明 BC 气溶胶和细颗粒物的来源大部分是一致的;除 O_3 外,BC 与气态污染物 CO 、 NO_2 和 SO_2 相关性均显著,分别为 0.623、0.473、0.321,说明 BC 气溶胶与之均有部分共同来源。

参考文献 (References)

- [1] 章秋英,牛生杰,沈建国,等. 半干旱区冬春季黑碳气溶胶吸收特性的观测研究[J]. 中国沙漠, 2009, 29 (1): 183-188.
ZHANG Q Y, NIU S J, SHEN J G, et al. Observational study on aerosol absorption properties in winter and spring in semiarid area[J]. Journal of Desert Research, 2009, 29 (1): 183-188(in Chinese).
- [2] WANG J, LIU D, GE X, et al. Characterization of black carbon-containing fine particles in Beijing during wintertime[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2019, 19(1): 447-458.
- [3] JACOBSON M Z. Strong radiative heating due to the mixing state of black carbon in atmospheric aerosols [J]. Nature, 2001, 409(6821): 695-697.
- [4] 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.
- [5] MENON S, HANSEN J, NAZARENKO L, et al. Climate effects of black carbon aerosols in China and India[J]. Science, 2002, 297 (5590): 2250-2253.
- [6] XIAO S, WANG Q Y, CAO J J, et al. Long-term trends in visibility and impacts of aerosol composition on visibility impairment in Baoji, China[J]. Atmospheric Research, 2014, 149: 88-95.
- [7] 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.
- [8] MA C J, KASAHARA M, HOLLER R, et al. Characteristics of single particles sampled in Japan during the Asian dust-storm period[J]. Atmospheric Environment, 2001, 35(15): 2707-2714.
- [9] 刘晓慧, 朱彬, 王红磊, 等. 长江三角洲地区 1980—2009 年灰霾分布特征及影响因子[J]. 中国环境科学, 2013, 33(11): 1926-1936.
LIU X H, ZHU B, WANG H L, et al. Haze variations over 1980—2009 and connecting factors over the Yangtze River Delta Region[J].

- China Environmental Science, 2013, 33(11): 1926-1936(in Chinese).
- [10] WONG M C S, TAM W W S, WANG H H X, et al. Exposure to air pollutants and mortality in hypertensive patients according to demography: A 10 year case-crossover study[J]. Environmental Pollution, 2014, 192: 179-185.
- [11] PIETRODANGELO A, PARETI S, PERRINO C. Improved identification of transition metals in airborne aerosols by SEM-EDX combined backscattered and secondary electron micro analysis[J]. Environment Science and Pollution Research, 2014, 21(6): 4023-4031.
- [12] HANSEN A D A, LOWENTHAL D H, CHOW J C, et al. Black carbon aerosol at McMurdo station, Antarctica[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2001, 51: 593-600.
- [13] PARK S, YU G H. Absorption properties and size distribution of aerosol particles during the fall season at an urban site of Gwangju, Korea [J]. Environmental Engineering Research, 2018, 24(1): 159-172.
- [14] BIKKINA S, ANDERSSON A, KIRILLOVA E N, et al. Air quality in megacity Delhi affected by countryside biomass burning[J]. Nature Sustainability, 2019, 2(3): 200-205.
- [15] 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(in Chinese).
- [16] ZHUANG B L, WANG T J, LIU J, et al. Continuous measurement of black carbon aerosol in urban Nanjing of Yangtze River Delta, China [J]. Atmospheric Environment, 2014, 89: 415-424.
- [17] 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(in Chinese).
- [18] SHEN L, LI L, LÜ S, et al. Characteristics of black carbon aerosol in Jiaxing, China during autumn 2013[J]. Particuology, 2015, 20: 10-15.
- [19] WU D, WU C, LIAO B, et al. Black carbon over the South China Sea and in various continental locations in South China[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2013, 13: 12257-12270.
- [20] CHEN X, ZHANG Z, ENGLING G, et al. Characterization of fine particulate black carbon in Guangzhou, a megacity of south China[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2014, 5: 361-370.
- [21] XIE C, XU W, WANG J, et al. Vertical characterization of aerosol optical properties and brown carbon in winter in urban Beijing, China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2019, 19(1): 165-179.
- [22] LIU B M, MA Y Y, GONG W, et al. The relationship between black carbon and atmospheric boundary layer height[J]. Atmospheric Pollution Research, 2019, 10(1): 65-72.
- [23] ZHANG Y, KANG S. Characteristics of carbonaceous aerosols analyzed using a multiwavelength thermal/optical carbon analyzer: A case study in Lanzhou City[J]. Science China Earth Sciences, 2018, 62(2): 389-402.
- [24] 蒋磊,汤莉莉,潘灵宝,等.南京冬季重污染过程中黑碳气溶胶的混合态及粒径分布[J].环境科学,2017,38(1):13-21.
JIANG L, TANG L L, PAN L B, et al. Size distribution and mixing state of black carbon aerosol in Nanjing during a heavy winter pollution event[J]. Environmental Science, 2017, 38(1): 13-21(in Chinese).
- [25] 徐昶,沈建东,叶辉,等.杭州黑碳气溶胶污染特性及来源研究[J].中国环境科学,2014,34(12):3026-3033.
XU C, SHEN J D, YE H, et al. Characteristics and source of black carbon aerosol pollution in Hangzhou[J]. China Environmental Science, 2014, 34(12): 3026-3033(in Chinese).
- [26] 钟杰,翟崇治,余家燕,等.重庆市核心区黑碳气溶胶浓度特征以及影响因素分析[J].环境工程学报,2016,10(2):805-810.
ZHONG J, ZHAI C Z, YU J Y, et al. Concentration characteristics of black carbon aerosol and its impact factors in Chongqing core area [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(2): 805-810(in Chinese).
- [27] 杜川利,余兴,李星敏,等.西安泾河夏季黑碳气溶胶及其吸收特性的观测研究[J].中国环境科学,2013,33(4):613-622.
DU C L, YU X, LI X M, et al. Observed summer variation and absorption characteristics of black carbon at Xi'an suburban[J]. China Environmental Science, 2013, 33(4): 613-622(in Chinese).
- [28] ZHOU B H, WANG Q Y, ZHOU Q, et al. Seasonal characteristics of black carbon aerosol and its potential source regions in Baoji, China [J]. Aerosol and Air Quality Research, 2018, 18: 397-406.
- [29] 钟玉婷,刘新春,何清,等.2009 年夏秋季乌鲁木齐黑碳气溶胶观测研究[J].沙漠与绿洲气象,2011,5(6):32-36.
ZHONG Y T, LIU X C, HE Q, et al. Observational study of black carbon in urumqi during summer and autumn of 2009[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2011, 5(6): 32-36 (in Chinese).
- [30] GAO R X, NIU S J, ZHANG H, et al. A comparative study on black carbon aerosol observations in regions of Beijing and Lhasa in 2006 [J]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2007, 6679:1-8.
- [31] WU C, WU D, YU J Z. Quantifying black carbon light absorption enhancement with a novel statistical approach[J]. Atmos Chem Phys, 2018, 18(1): 289-309.
- [32] 孙欢欢,倪长健,崔蕾.成都市黑碳气溶胶污染特征及与气象因子的关系 [J]. 环境工程, 2016,34(6):119-124.
SUN H H, LI C J, CUI L. Characteristics of black carbon aerosol pollution in Chengdu and the relationship between meteorological factors

- [J]. *Environmental Engineering*, 2016, 34(6): 119-124 (in Chinese).
- [33] 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, ZHEN 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 (in Chinese).
- [34] 王绪鑫, 马雁军, 向旬, 等. 鞍山黑碳气溶胶观测[J]. *环境化学*, 2010, 29(6): 1091-1095.
WANG X X, MA Y J, XIANG X, et al. Observational of black carbon aerosol in Anshan [J]. *Environmental Science*, 2010, 29(6): 1091-1095 (in Chinese).
- [35] 陈程, 花艳, 王瑜, 等. 连云港黑碳气溶胶污染特征研究[J]. *环境监控与预警*, 2018, 10(2): 45-48.
CHEN C, HUA Y, WANG Y, et al. The research on pollution characteristics of black carbon aerosol in Lianyungang [J]. *Environmental Monitoring and Forewarning*, 2018, 10(2): 45-48 (in Chinese).
- [36] 罗有斌, 罗汉, 杨素英, 等. 敦煌地区春冬季黑碳气溶胶观测研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2018, 32(8): 122-127.
LUO Y B, LUO H, YANG S Y, et al. Observation on black carbon aerosol in spring and winter in Dunhuang area [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2018, 32(8): 122-127 (in Chinese).
- [37] 张宸赫, 程兴宏, 赵天良, 等. 不同季节气象条件对北京城区高黑碳浓度变化的影响[J]. *环境科学学报*, 2017, 37(6): 2255-2264.
ZHANG C H, CHENG X H, ZHAO T L, et al. Impact of meteorological conditions on high black carbon concentrations in urban area of Beijing in different seasons [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, 37(6): 2255-2264 (in Chinese).
- [38] 程丁, 吴晟, 吴兑, 等. 广州市城区干湿季黑碳气溶胶污染特征及来源分析[J]. *环境科学学报*, 2018, 38(6): 2223-2232.
CHENG D, WU C, WU D, et al. Characteristics of black carbon aerosols in urban Guangzhou: Influencing factors in dry and rainy seasons [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(6): 2223-2232 (in Chinese).
- [39] 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. Time evolution characteristics and main influencing factors of black carbon aerosol in Nanjing [J]. *Environmental Science*, 2020, 41(2): 620-629 (in Chinese).
- [40] 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 (in Chinese).
- [41] RETAMA A, BAUMGARDNER D, RAGA G B, et al. Seasonal and diurnal trends in black carbon properties and co-pollutants in Mexico city [J]. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 2015, 15: 9693-9709.
- [42] 张昕, 李忠勤, 明镜, 等. 乌鲁木齐河源区黑碳气溶胶浓度特征及其来源分析[J]. *环境科学学报*, 2019, 39(1): 212-221.
ZHANG X, LI Z Q, MING J, et al. Characteristics of black carbon aerosol and source apportionment at the headwater of Urumqi River [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, 39(1): 212-221 (in Chinese).
- [43] RIVELIU D, ALLAN J D, YOUNG D E, et al. Size distribution, mixing state and source apportionment of black carbon aerosol in London during wintertime [J]. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 2014, 14(18): 10061-10084.
- [44] MASSLING A, NIELSEN I E, KRISTENSEN D, et al. Atmospheric black carbon and sulfate concentrations in Northeast Greenland [J]. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 2015, 15(16): 11465-11493.
- [45] PRASAD P, ROJA RAMAN M, VENKAT RATNAM M, et al. Characterization of atmospheric black carbon over a semi-urban site of Southeast India: Local sources and long-range transport [J]. *Atmospheric Research*, 2018, 213: 411-421.
- [46] BEGAM G R, VACHASPATHI C V, AHAMMED Y N, et al. Measurement and analysis of black carbon aerosols over a tropical semi-arid station in Kadapa, India [J]. *Atmospheric Research*, 2016, 171: 77-91.
- [47] BERGSTROM R W, RUSSELL P B, HIGNETT P. Wavelength dependence of the absorption of black carbon particles: Predictions and results from the TARFOX experiment and implications for the aerosol single scattering albedo [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2002, 59(3): 567-577.
- [48] SEINFELD J H, PANDIS S N. *Atmospheric chemistry and physics: From air pollution to climate change* [M]. New York: Wiley-Interscience Publication, 1998: 1128-1133.
- [49] PENNDORF R. Tables of the refractive index for standard air and the rayleigh scattering coefficient for the spectral region between 0.2 and 20.0 μ and their application to atmospheric optics [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1957, 47(2): 176-182.
- [50] 刘立忠, 王宇翔, 么远, 等. 西安市黑碳气溶胶浓度特征及与气象因素和常规污染物相关性[J]. *中国环境监测*, 2016, 32(5): 45-50.
LIU L Z, WANG Y X, YAO Y, et al. Concentration characteristics and the correlations of black carbon aerosols with meteorological factors and conventional pollutants in Xi'an [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2016, 32(5): 45-50 (in Chinese).