



## 郑州黑碳气溶胶质量浓度及气象要素日变化特征

郑丹<sup>1</sup>, 周顺武<sup>1\*\*</sup>, 郭建平<sup>2</sup>, 多典洛珠<sup>1</sup>, 王传辉<sup>3</sup>

(1. 南京信息工程大学 大气科学学院, 气象灾害教育部重点实验室/气象灾害预报预警与评估协同创新中心/气候与环境变化国际合作联合实验室/资料同化研究与应用中心, 江苏 南京 210044; 2. 中国气象科学研究院 灾害天气国家重点实验室, 北京 100081; 3. 安徽省气象局, 安徽 合肥 230061)

**摘要:**依据郑州大气本底站近 6 a(2006—2011 年)黑碳气溶胶(Black Carbon aerosol, BC)质量浓度观测数据, 结合地面气象观测资料, 分析了该站四季 BC 质量浓度日变化特征, 并利用谐波分析的方法, 探讨了各季 BC 质量浓度和地面主要气象要素(气温、相对湿度和风速)的日变化特征. 结果表明: ①郑州站 BC 质量浓度年平均值较高, 在 BC 质量浓度高值季节(秋冬季)其日变化呈现“双峰型”, 而在 BC 质量浓度低值季节(春夏季)则为“单峰型”; ②该站四季地面气象要素的日变化均表现为“单峰型”; BC 质量浓度高值时刻对应地面气温低值、地面相对湿度高值以及地面风速低值时刻; ③谐波分析发现, 郑州站秋冬季 BC 质量浓度日变化具有 24 h+12 h 周期, 春夏季 BC 质量浓度日变化具有明显的 24 h 循环; ④该站四季气象要素日变化 24 h 循环显著且均超前于 BC 质量浓度 1~2 h, 表明气象要素会对 BC 质量浓度产生影响.

**关键词:**黑碳气溶胶; 质量浓度; 地面; 气象要素; 谐波分析; 郑州

**中图分类号:**X513 **文献标志码:**A **文章编号:**0258-7971(2020)06-1137-10

随着经济快速发展, 大气污染问题日益严重<sup>[1-3]</sup>, 其中黑碳气溶胶(Black Carbon aerosol, BC)是一种悬浮在空气中的重要颗粒态污染物, 主要来源于生物质、石油、煤炭的不完全燃烧, 是一种对光有强烈吸收作用的含碳物质<sup>[4]</sup>. 大量研究表明, BC 是造成全球变暖的潜在因子之一<sup>[5]</sup>. 同时, 目前普遍认为 BC 质量浓度与气象要素存在非常密切的联系, 一方面 BC 质量浓度对天气、气候和大气环境等具有一定影响, 进而影响空气质量<sup>[5-9]</sup>; 另一方面气温、湿度和风等的变化影响 BC 质量浓度的分布<sup>[10-13]</sup>.

早在 20 世纪 70 年代, 国外已开始了大气中 BC 质量浓度的研究<sup>[14]</sup>, 直至 20 世纪 90 年代, 国内各地陆续开展了大气中 BC 质量浓度的观测. 基于这些观测, 近年来我国有关大气中 BC 质量浓度的研究已取得一定的进展, 针对大气中 BC 质量浓度日变化方面也有一批成果. 研究得出, 上海、苏州等地大气中 BC 质量浓度日变化呈“双峰型”分布<sup>[15-17]</sup>; 而成都、邯郸等地则以“单峰型”为主<sup>[18-19]</sup>. 同时发现一些地方大气中 BC 质量浓度的日变化存在一

定的季节差异, 如北京在秋冬季具有“双峰型”特征, 在夏季表现为“单峰型”<sup>[20]</sup>; 广州在干季(湿季)其日变化表现为“双峰型”(“单峰型”)<sup>[21]</sup>. 有研究指出在大气中 BC 质量浓度同为“双峰型”的城市中, 其峰值出现时间存在一定差异, 如上海浦东 2 个 BC 质量浓度峰值分别出现在早上 09:00—10:00(北京时间, 下同)和晚上 20:00—21:00<sup>[15]</sup>; 而苏州 BC 质量浓度 2 个峰值则出现在早上 07:00—09:00 和晚上 18:00—21:00<sup>[17]</sup>. 孙欢欢等<sup>[18]</sup>及齐孟姚等<sup>[19]</sup>进一步分析大气中 BC 质量浓度与气象要素之间的关系, 发现大气中 BC 质量浓度与地面气温存在反向变化关系, 与风速呈负相关. 可见, 大气中 BC 质量浓度与气象要素之间的关系复杂, 同一地区不同季节二者关系也存在一定的差异<sup>[22]</sup>.

河南省作为中国的重要经济大省, 是全国重要的综合交通枢纽和人流物流信息流中心, 是打好蓝天保卫战的关键区域. 当前, 对郑州大气污染的研究主要集中在各类污染物如 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 质量浓度的不同尺度时空变化特征分析, 而研究大气中

收稿日期:2019-12-16; 接受日期:2020-05-18; 网络出版日期:2020-05-22

基金项目:国家重点基础研究发展规划(2012CB9552003).

作者简介:郑丹(1994-), 女, 四川人, 硕士生, 主要研究气溶胶气候效应. E-mail: 764843539@qq.com.

\*\* 通信作者:周顺武(1968-), 男, 四川人, 博士, 教授, 主要研究气候动力学. E-mail: zhou@nuist.edu.cn.

BC 质量浓度及气象要素日变化特征的较少. 因此, 基于郑州 BC 质量浓度观测数据, 研究该站 BC 质量浓度及气象要素日变化特征, 具有重要的科学意义和社会意义. 本文依据郑州近 6 a(2006 年 1 月—2011 年 12 月)的大气中 BC 质量浓度观测数据, 在揭示该站四季 BC 质量浓度及地面气象要素的日变化特征的基础上, 利用谐波分析的方法, 将各季 BC 质量浓度及地面气温、相对湿度和风速的基本周期信号从原始波动中提取出来, 进一步分析不同季节 BC 质量浓度与上述气象要素的联系. 其结论以期为郑州市的大气污染防治工作提供必要的参考.

## 1 数据与方法

**1.1 资料介绍及处理** 文中主要使用 2006 年 1 月—2011 年 12 月的资料, 包括: ①由郑州市金水区大气成分本底站观测的逐 5 min BC 质量浓度(880 nm)资料; ②郑州站逐小时地面观测的气温、相对湿度和风速资料. 以上资料均来源于中国气象局国家气象信息中心.

由于仪器故障和停电等原因, 导致原始的 BC 质量浓度数据中存在部分不可用或具有明显错误的的数据<sup>[13]</sup>, 文中将这一部分 BC 质量浓度数据除在分析年际变化时用月平均值代替外, 其余均按缺测处理. 由于分析时段和对数据处理方法的不同, 选用的 BC 质量浓度数据缺测率不一, 介于 1.96%~5.51% 之间, 文中省略具体缺测率的统计情况.

**1.2 谐波分析** 谐波分析可从原始的不规则曲线中提取周期已知的波动, 同时以振幅和位相描绘每个波动的特征, 该方法还能反映出分析要素日变化达到峰值的时间, 便于充分揭示各种周期变化的规律<sup>[23-24]</sup>. 谐波分析可由公式(1)表示:

$$y(t) = y_0 + \sum_{k=1}^n A_k \sin(\omega_k t + \sigma_k) = y_0 + \sum_{k=1}^n (a_k \cos(\omega_k t) + b_k \sin(\omega_k t)), \quad (1)$$

式中,  $y(t)$  表示  $t$  时刻某要素值;  $y_0$  表示该要素日平均值;  $k$  表示第  $k$  个波; 文中  $n$  取 2, 分别表示 24 h 和 12 h 的谐波;  $A_k$  表示第  $k$  个波的振幅;  $\omega_k$  表示第  $k$  个波的圆频率;  $\sigma_k$  表示第  $k$  个波的位相.

## 2 BC 质量浓度月变化特征

郑州站大气中 BC 质量浓度年平均值为(9.92±2.64) $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 明显高于 2013 年 9 月—2015 年 5 月西

安的 5.15  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ <sup>[11]</sup>、2014 年武汉的 5.551  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ <sup>[25]</sup> 及 2004—2007 年广州的 8.42  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ <sup>[10]</sup> 等城市的 BC 质量浓度年平均值. 图 1 给出了郑州 2006—2011 年平均各月大气中 BC 质量浓度值及其标准差. 由各月 BC 质量浓度平均值(实线)分布可知, BC 质量浓度最大(小)月均值出现在 12(7)月, 次大(小)值出现在 11(5)月, 总体上郑州 BC 质量浓度呈现出“冬秋高、夏春低”的变化特征. 与 BC 质量浓度的月变化特征类似, 其标准差(虚线)分布也表现为秋冬高于春夏, 说明在郑州 BC 质量浓度高值期间的秋冬季, 其变化幅度也较大. 春夏季出现 BC 低质量浓度可能是由于此时排放减少、降水的湿清除作用以及强烈湍流混合引起的垂直扩散等多种因素所致<sup>[26]</sup>.

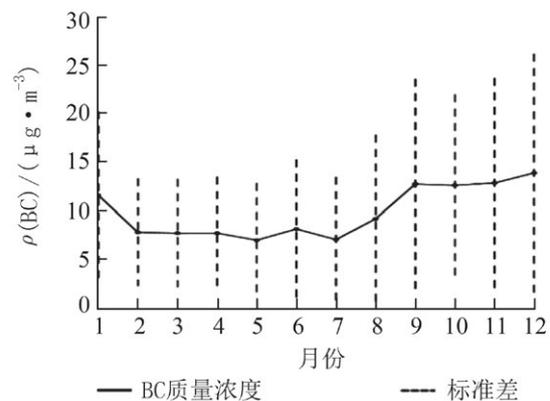
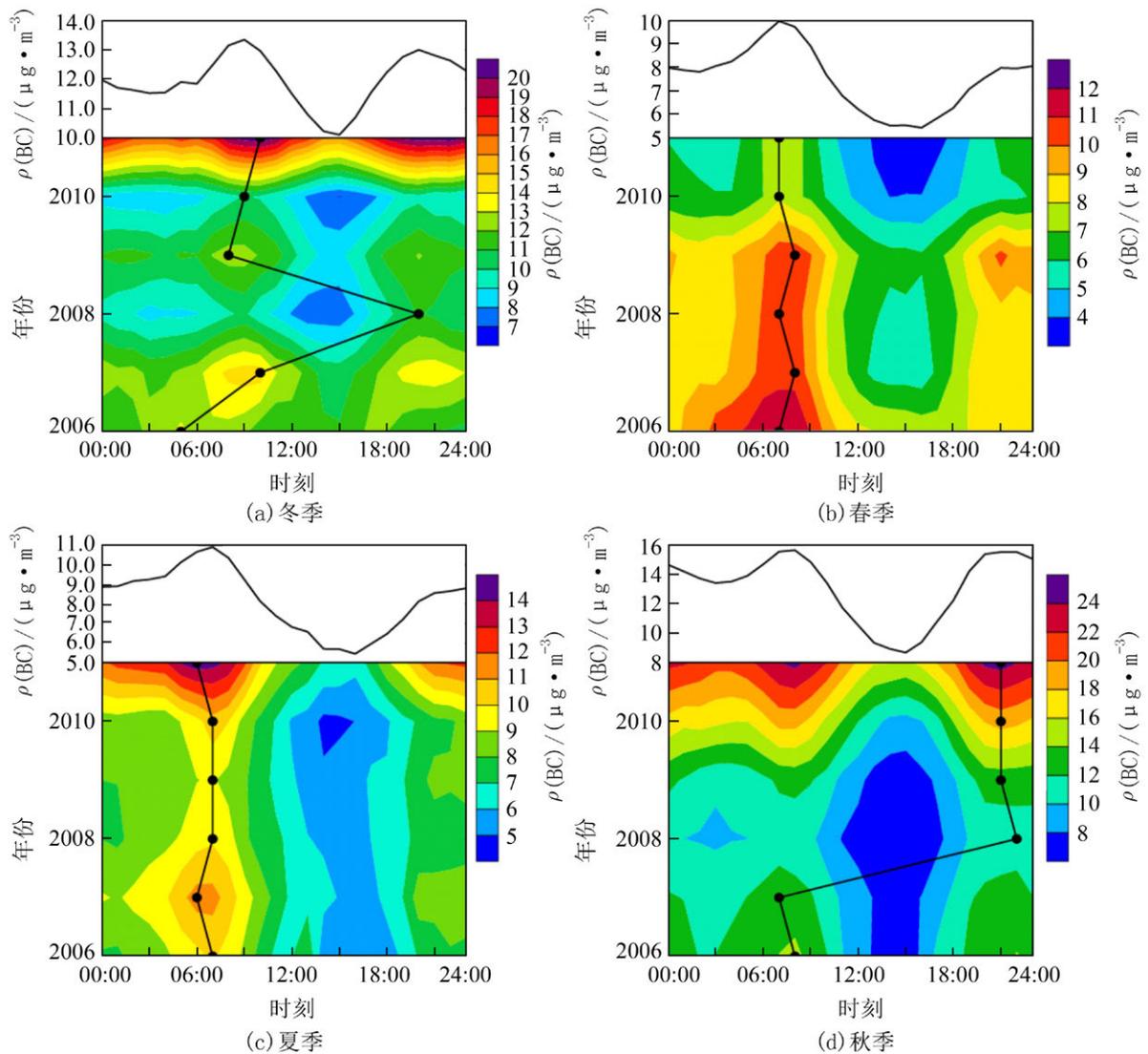


图 1 2006—2011 年多年平均的郑州各月大气中 BC 质量浓度及其标准差值  
Fig. 1 Monthly average of BC mass concentration and standard deviation in Zhengzhou from 2006 to 2011

## 3 BC 质量浓度日变化特征

为了分析四季 BC 质量浓度的日变化特征及其逐年变化, 将逐 5 min 观测数据处理后得到四季 BC 质量浓度. 图 2 是 2006—2011 年郑州四季 BC 质量浓度逐小时变化. 由图 2 可知, 秋季 BC 质量浓度最大且变化最为剧烈, 冬季次之, 春季再次, 夏季 BC 质量浓度最低且变化幅度最小. 秋冬季是 BC 质量浓度高值季节, BC 质量浓度日变化表现为明显的“双峰型”, 2 个峰值分别出现在早上 06:00—09:00 和晚上 20:00—22:00, 2 个谷值则出现在下午 12:00—17:00 和夜间 00:00—次日 06:00, 这与我国多地如北京<sup>[20]</sup>、上海<sup>[27]</sup>、广州<sup>[21]</sup>、苏州<sup>[17]</sup>等地 BC 质量浓度日变化基本一致. 春夏季是 BC 质量浓度低值季节, BC 质量浓度日变化表现为明显的“单峰型”, 峰值出现在上午 06:00—08:00, 谷值



实心圆点为最大值; 上方曲线为多年平均季节 BC 质量浓度日变化

图 2 2006—2011 年郑州四季大气中 BC 质量浓度逐小时变化

Fig. 2 The hourly variation of BC mass concentration in four seasons in Zhengzhou during 2006—2011

出现约在下午 15:00.

与四季 BC 质量浓度的逐小时变化特征类似, 其标准差分布(图 3)也表现出秋冬为“双峰型”, 春夏为“单峰型”, 且秋冬季标准差最大值多出现在 2 个峰值时刻, 说明 BC 质量浓度高值季节双峰时刻变化最为剧烈, 而春夏季标准差最大值分别出现在峰值和谷值时刻, 说明 BC 质量浓度低值季节极值时变化最为剧烈.

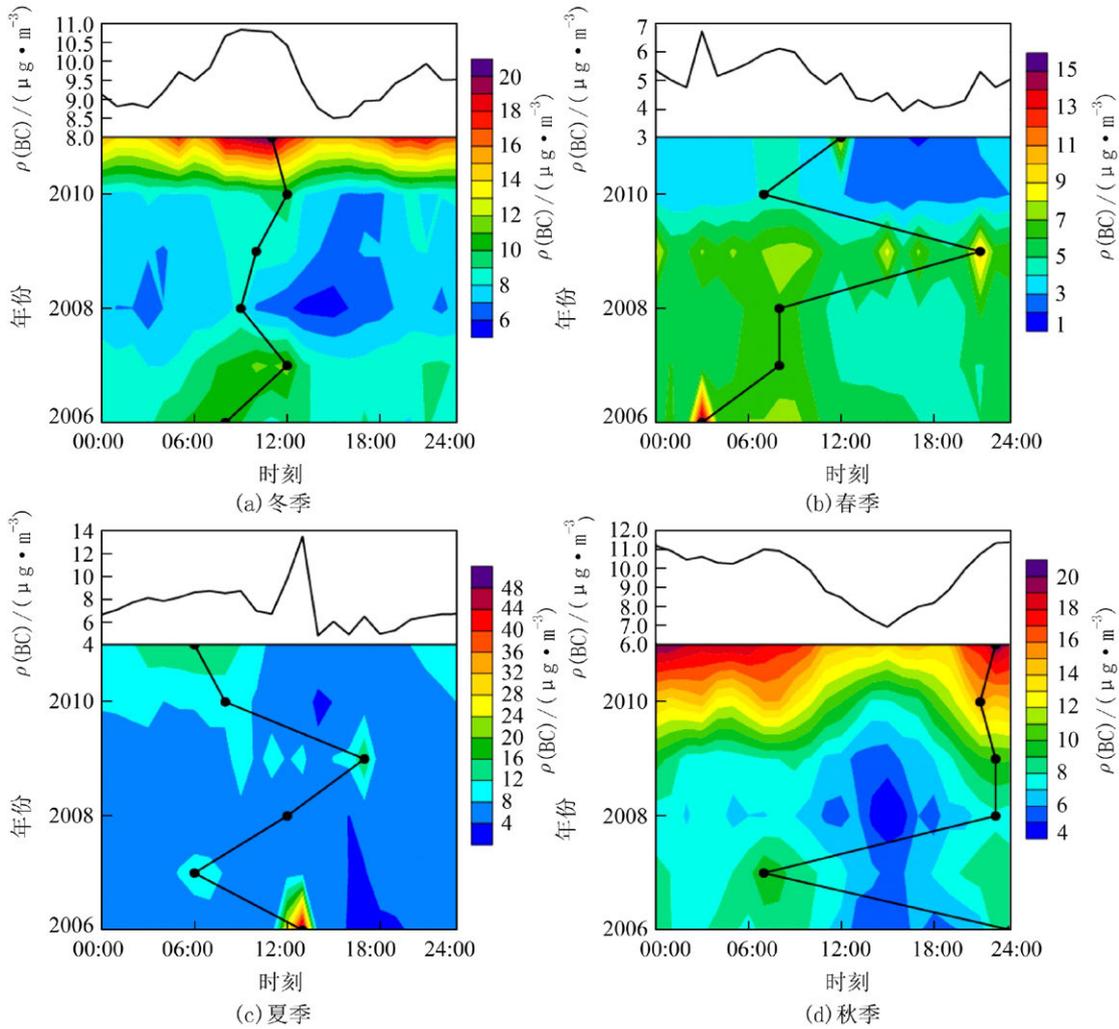
### 4 地面气象要素日变化特征

对 2006 年 1 月—2011 年 12 月郑州各月 BC 质量浓度和地面各气象要素平均后, 图 4 给出了它们的日变化曲线. 由图 4 可见, 地面气象要素日变化均表现为“单峰型”, 且白天(08:00—20:00)各气象

要素变化幅度明显大于夜间(20:00—次日 08:00). 四季地面气温和风速的谷值出现在早上 06:00—07:00 和凌晨 02:00—05:00, 地面气温的峰值均出现在约下午 15:00(需要说明的是气温与风速的纵坐标采用逆序绘制). 四季地面相对湿度的谷值则均出现在下午 15:00, 峰值出现在上午 06:00—08:00. 由此可知, 虽然 BC 质量浓度日变化在冬秋季为“双峰型”, 但基本上四季 BC 质量浓度的高(低)值出现在地面气温和风速的低(高)值时刻前后以及相对湿度的高(低)值前后. 总之, BC 质量浓度的高值时刻一般对应着地面气温的低值、相对湿度的高值以及风速的低值, 这可能是由于气温低时不利于空气中发生光化学反应, 相对湿度较高时空气中颗粒物不易扩散, 湿度大风速小时则不利于污染物

的扩散输送<sup>[28]</sup>. 城市中的 BC 质量浓度通过与 SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>x</sub> 的粒子相反应可快速形成硫酸盐, 并显著

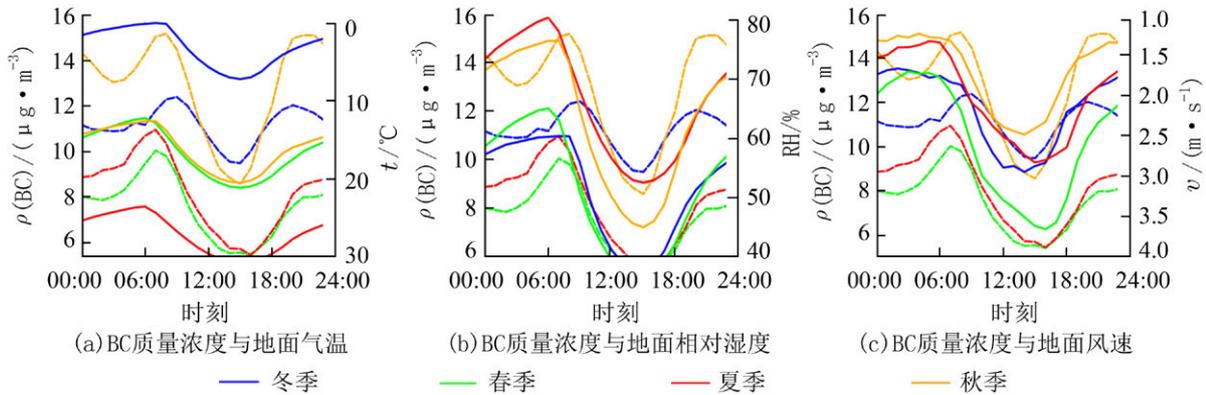
增强吸湿性<sup>[29-31]</sup>, 因此 BC 质量浓度与相对湿度呈现出同向变化关系.



实心圆点为最大值; 上方曲线为多年平均季节 BC 质量浓度日变化

图 3 2006—2011 年郑州四季大气中 BC 质量浓度标准差逐小时变化

Fig. 3 The hourly variation of BC mass concentration standard deviation in four seasons in Zhengzhou during 2006—2011



实线为 BC 质量浓度观测值; 虚线为地面气象要素观测值

图 4 2006—2011 年郑州四季大气中 BC 质量浓度与地面气象要素日变化

Fig. 4 Daily variation of BC mass concentration and surface meteorological elements in four seasons in Zhengzhou during 2006—2011

### 5 BC 质量浓度和气象要素日变化的谐波分析

为了定量刻画郑州四季 BC 质量浓度的日循环信号, 对其进行谐波分析, 当截取前 2 个波时, BC 质量浓度日变化 24 h(全日循环)和 12 h(半日循环)的累计方差贡献率均超过 91.93%, 说明 24 h 和 12 h 循环可很好地代表 BC 质量浓度的实际日变化特征. 以下重点分析前 2 个谐波, 表 1 给出郑州四季 BC 质量浓度的谐波分析结果, 由四季全日循环的贡献率可知, 夏季最大, 达到 80.92%; 春季次之; 秋季再次; 冬季最低(仅为 14.36%). 类似的, 分析四季半日循环的贡献率可知, 冬季最大, 达到 76.89%; 秋季次之; 春季再次; 夏季最低, 仅为 16.41%. 由此可知, 春夏季 BC 质量浓度日变化主要以全日循环为主, 秋季则以全日循环+半日循环共同决定, 而冬季则以半日循环为主.

表 1 2006—2011 年郑州四季 BC 质量浓度谐波分析结果  
Tab. 1 Results of BC mass concentration harmonic analysis of Zhengzhou during 2006—2011

季节	24 h 周期			12 h 周期			累计方差贡献率/%
	$\rho_A/(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$	$P/h$	$S/\%$	$\rho_A/(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$	$P/h$	$S/\%$	
冬季	0.423	3.076	14.360	0.978	8.487	76.891	91.925
春季	1.602	4.179	70.821	0.968	8.095	25.870	96.691
夏季	1.681	4.556	80.927	0.757	8.373	16.405	97.332
秋季	2.250	2.100	53.738	2.064	8.517	45.251	98.989

$\rho_A$ 表示振幅;  $P$ 表示波动首次达到峰值所需时间;  $S$ 表示方差贡献率.

对郑州四季地面气温进行谐波分析后发现(表 2), 地面气温全日循环的方差贡献率均大于 90.69%, 可见地面气温日变化以全日循环为主, 四季地面气温日变化的 24 h 循环第 1 次到达峰值出现在午后 15:00—16:00. 春季地面气温日循环振幅最大, 与图 4 所示结果一致, 其他季节振幅相当, 可见春季地面气温变化幅度较其他季节更大.

同样对地面相对湿度进行谐波分析(表略)后, 发现郑州四季地面相对湿度日变化的全日循环的方差贡献率在 90.11%~96.89%, 说明 24 h 循环可以代表郑州各季地面相对湿度的日变化为“单峰型”变化. 对比四季地面相对湿度的全日循环发现, 在凌晨 02:00—04:00 达到峰值. 由其振幅可知, 秋季

地面相对湿度变化幅度最大, 冬季最小, 春秋相当, 这与图 4 所得结论也一致, 表明秋季地面相对湿度变化最大, 冬季变化最小.

表 2 2006—2011 年郑州四季地面气温谐波分析结果  
Tab. 2 Results of surface temperature harmonic analysis of Zhengzhou during 2006—2011

季节	24 h 周期			12 h 周期			累计方差贡献率/%
	$\rho_A/(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$	$P/h$	$S/\%$	$\rho_A/(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$	$P/h$	$S/\%$	
冬季	3.319	15.573	90.686	1.024	1.933	8.631	99.317
春季	4.209	15.479	95.842	0.803	1.202	3.488	99.330
夏季	3.436	15.404	97.049	0.532	1.294	2.330	99.379
秋季	3.686	15.099	91.552	1.068	1.541	7.687	99.239

$\rho_A$ 表示振幅;  $P$ 表示波动首次达到峰值所需时间;  $S$ 表示方差贡献率.

最后对地面风速进行谐波分析(表略), 可知郑州四季地面风速日变化的全日循环的方差贡献率介于 88.10%~96.93%, 说明地面风速日变化在四季均以全日循环为主. 秋冬季地面风速在 13:00—14:00 达到峰值, 春夏季则在 14:00—16:00, 表明春夏季风速最大值较秋冬季滞后约 1 h. 春季地面风速 24 h 循环的变化幅度最大, 秋季最小, 说明春季地面风速变化较其他季节更剧烈.

进一步比较四季 BC 质量浓度与地面气象要素的不同周期现象. 由于冬季 12 h 和 24 h 循环的累计方差贡献率达到 91.90%, 故选择冬季 BC 质量浓度和地面各气象要素的前 2 个谐波并叠加(图 5(a)~(c)), 分析其对应关系. 由图 5 可知, 郑州冬季 BC 质量浓度日变化具有 24 h+12 h 周期, 气象要素日变化 24 h 循环显著, 地面气温、相对湿度、风速在夜间(00:00—08:00)超前于 BC 质量浓度约 2 h, 其余时段地面气温、相对湿度与 BC 质量浓度变化基本一致, 地面风速较 BC 质量浓度有所超前.

由于春季 BC 质量浓度和地面气象要素日变化均以 24 h 循环为主, 故选择春季 BC 质量浓度和地面各气象要素的第 1 个谐波(图 5(d)~(f)). 由图 5 可知, 春季 BC 质量浓度和地面各气象要素均具有明显的 24 h 循环, 且地面气温和风速的峰(谷)值均超前于 BC 质量浓度的谷(峰)值约为 1~2 h, 而地面相对湿度的峰(谷)值超前于 BC 质量浓度峰(谷)值大约 1~2 h.

根据以上的谐波分析结果可知, 夏季 BC 质量浓度和各气象要素的第 1 个谐波的方差贡献率均

超过 80.00%, 说明第 1 个谐波对原序列的解释程度较高, 故选择第 1 个谐波分析夏季 BC 质量浓度和地面各气象要素的 24 h 循环变化曲线. 由图 5(g) ~

(i) 可知, 夏季 BC 质量浓度和地面各气象要素均具有明显的 24 h 循环, 且地面气象要素均超前于 BC 质量浓度大约 1 ~ 2 h.

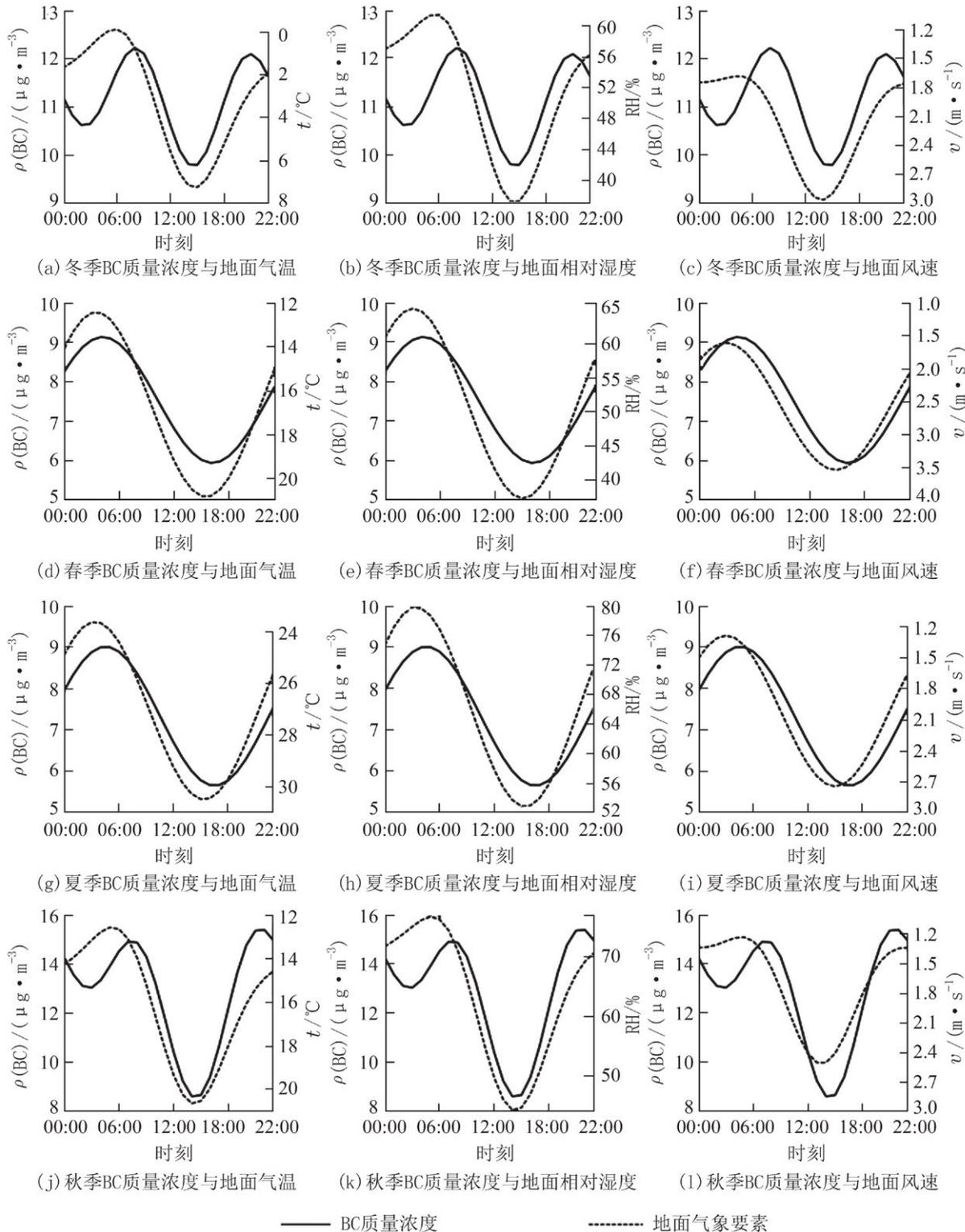


图 5 2006—2011 年郑州秋冬(春夏)季大气中 BC 质量浓度与地面气象要素 24 h+12 h(24 h) 循环变化曲线  
 Fig. 5 24 hours+12 hours (24 hours) harmonic variation of BC mass concentration and surface meteorological elements in winter and fall (spring and summer) in Zhengzhou during 2006—2011

由于秋季 BC 质量浓度前 2 个周期波的方差贡献率分别为 53.74% 和 45.25%, 而各气象要素的第 1 个周期波的方差贡献率均超过 88.00%, 说明 BC 质量浓度日变化特征需要前 2 个谐波共同解释, 图 5(j) ~ (l) 为郑州秋季 BC 质量浓度与地面风速、地面相对湿度及地面风速 24 h+12 h 循环变化曲线. 由图 5 可知, 与冬季变化类似, 秋季地面气温、相对湿度、风速在夜间(00:00—08:00)超前于 BC 质量浓度约 2 h, 其余时段地面气温、相对湿度与 BC 质量浓度变化基本一致, 地面风速较 BC 质量浓度有所超前.

综合整个图 5 的分析可知, BC 质量浓度高值季节(秋冬季)日变化以 12 h 循环为主, 低值季节(春夏季)日变化以 24 h 循环为主, 地面气象要素在 4 个季节均以 24 h 循环为主. 秋冬季地面气温、相对湿

度、风速在夜间(00:00—08:00)超前于 BC 质量浓度约 2 h, 其余时段地面气温、相对湿度与 BC 质量浓度变化基本一致, 地面风速较 BC 质量浓度有所超前; 春夏季气象要素均超前于 BC 质量浓度 1~2 h, 说明气象要素的变化会对 BC 质量浓度产生影响.

根据以上结果, 将郑州夏季 BC 质量浓度 24 h 循环序列做超前 1 h 处理后, 分别与地面气温、相对湿度、风速的 24 h 循环序列作比较(图 6). 由图 6 可知, 郑州夏季 BC 质量浓度与气象要素的 24 h 循环基本一致, 地面气象要素在夏季超前 BC 质量浓度约 1 h, 说明地面气象要素影响 BC 质量浓度变化. 类似的, 将郑州春季 BC 质量浓度 24 h 循环序列做超前 1 h 处理后, 分别与地面气温、相对湿度、风速的 24 h 循环序列进行比较(图略), 也得到同样的结论.

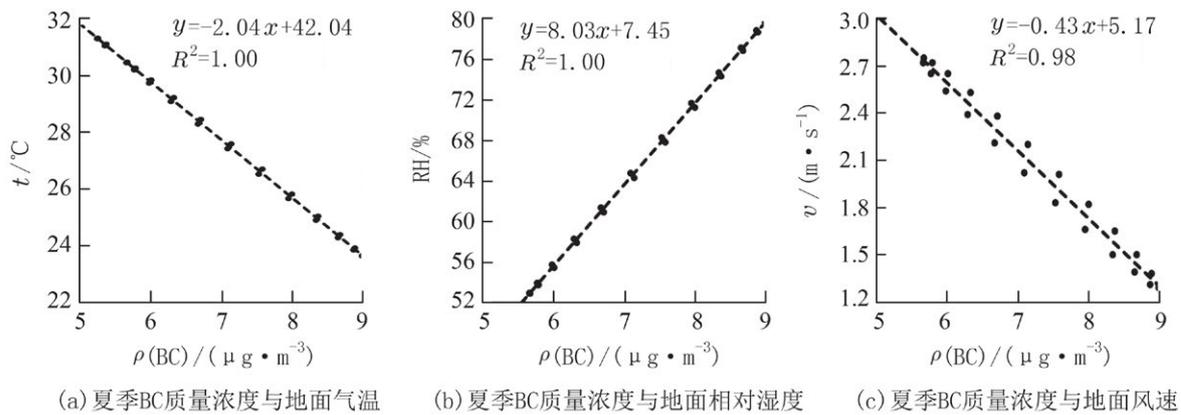


图 6 2006—2011 年郑州夏季大气中 BC 质量浓度与地面气象要素 24 h 循环散点分布

Fig. 6 BC mass concentration and surface meteorological elements 24 hours cycle scatter plots in summer in Zhengzhou during 2006—2011

## 6 结论

根据 2006—2011 年郑州站 BC 质量浓度观测数据, 结合地面气象要素观测资料, 研究了郑州四季 BC 质量浓度和地面各气象要素的日变化特征, 并利用谐波分析的方法, 讨论了四季各要素的周期变化特征. 主要结论如下:

(1) 郑州 BC 质量浓度年平均值为  $(9.92 \pm 2.64) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ , 高于西安、武汉、广州. 秋冬季明显高于春夏季, 且 BC 质量浓度在秋冬季变率较大. 秋季 BC 质量浓度最大且变化最为剧烈, 冬季次之, 春季再次, 夏季 BC 质量浓度最低且变化幅度最小. 秋冬季 BC 质量浓度日变化表现为明显的“双峰型”, 冬季 BC 质量浓度最大值多为早上的峰值, 而秋季 BC 质量浓度最大值则多为晚上的峰值. 春夏

季是 BC 质量浓度低值季节, BC 质量浓度日变化表现为明显的“单峰型”, BC 质量浓度秋冬季双峰时刻变化最为剧烈, 春夏季 BC 质量浓度低值季节极值时刻变化最为剧烈.

(2) 地面气象要素日变化均表现为“单峰型”, 且白天(08:00—20:00)各气象要素变化幅度明显大于夜间(20:00 至次日 08:00). 对比四季各气象要素可知, 春(夏)季地面气温变化幅度最大(小), 秋(冬)季地面相对湿度变化最大(小), 春(秋)季地面风速变化幅度最大(小). 总之, 各要素日变化明显, BC 质量浓度高值时刻对应着地面气温低值、地面相对湿度高值以及地面风速低值.

(3) 谐波分析发现, 郑州秋冬季 BC 质量浓度日变化具有 24 h+12 h 周期, 春夏季 BC 质量浓度日变化具有明显的 24 h 循环. 4 个季节气象要素日

变化 24 h 循环显著,秋冬季地面气温、相对湿度、风速在夜间(00:00—08:00)超前于 BC 质量浓度约 2 h,其余时段地面气温、相对湿度与 BC 质量浓度变化基本一致,地面风速较 BC 质量浓度有所超前;春夏季地面气象要素均超前于 BC 质量浓度 1~2 h,说明四季气象要素的变化会对 BC 质量浓度产生影响。

由于 BC 质量浓度与气象要素之间存在着复杂的关系,本文仅从日变化特征以及周期变化这一角度分析了它们的关系,关于 BC 质量浓度与气象要素之间的定量关系未进行讨论.最后还需要说明的是,目前仅有 BC 质量浓度观测数据,且 BC 质量浓度数据存在一定的缺测和异常值。

### 参考文献:

- [1] 黄光球,雷哲.西安市大气颗粒物 PM<sub>2.5</sub>的输送路径和潜在源分析[J].云南大学学报:自然科学版,2019,41(6):1191-1200. DOI: 10.7540/j.ynu.20190157.  
Huang G Q, Lei Z. Transport pathways and potential sources of PM<sub>2.5</sub> in Xi'an City[J]. Journal of Yunnan University: Natural Sciences Edition, 2019, 41(6): 1191-1200.
- [2] 李敏,何红弟,郝杨杨.上海市大气环境中 PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub>时空分布特征[J].云南大学学报:自然科学版,2019,41(2):323-332. DOI: 10.7540/j.ynu.20180026.  
Li M, He H D, Hao Y Y. Spatial and temporal variability of PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub> ratio in Shanghai[J]. Journal of Yunnan University: Natural Sciences Edition, 2019, 41(2): 323-332.
- [3] 张朝能,王梦华,胡振丹,等.昆明市 PM<sub>2.5</sub>浓度时空变化特征及其与气象条件的关系[J].云南大学学报:自然科学版,2016,38(1):90-98. DOI: 10.7540/j.ynu.20150467.  
Zhang C N, Wang M H, Hu Z D, et al. Temporal and spatial distribution of PM<sub>2.5</sub> concentration and the correlation of PM<sub>2.5</sub> and meteorological factors in Kunming City[J]. Journal of Yunnan University: Natural Sciences Edition, 2016, 38(1): 90-98.
- [4] Kompalli S K, Moorthy K K, Babu S S. Rapid response of atmospheric BC to anthropogenic sources observational evidence[J]. Atmospheric Science Letters, 2014, 15(3): 166-171. DOI: 10.1002/asl2.483.
- [5] 张华,王志立.黑碳气溶胶气候效应的研究进展[J].气候变化研究进展,2009,5(6):311-317.  
Zhang H, Wang Z L. Advances in studies of black carbon effects on climate[J]. Advances in Climate Change Research, 2009, 5(6): 311-317.
- [6] Li Z Q, Guo J P, Ding A J, et al. Aerosol and boundary-layer interactions and impact on air quality[J]. National Science Review, 2017, 4(6): 810-833. DOI: 10.1093/nsr/nwx117.
- [7] 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. DOI: 10.1126/science.1075159.
- [8] 秦世广,汤洁,温玉璞.黑碳气溶胶及其在气候变化研究中的意义[J].气象,2001,27(11):3-7.  
Qin S G, Tang J, Wen Y P. Black carbon and its importance in climate change studies[J]. Meteorological Monthly, 2001, 27(11): 3-7.
- [9] 张小玲,夏祥鳌,车慧正,等.区域污染对本底地区气溶胶光学特性及辐射强迫影响的地基和卫星遥感观测研究[J].环境科学,2014,35(7):2439-2448.  
Zhang X L, Xia X A, Che H Z, et al. Observation study on aerosol optical properties and radiative forcing using the ground-based and satellite remote sensing at background station during the regional pollution episodes[J]. Environmental Science, 2014, 35(7): 2439-2448.
- [10] 吴兑,毛节奏,邓雪娇,等.珠江三角洲黑碳气溶胶及其辐射特性的观测研究[J].中国科学D辑:地球科学,2009,39(11):1542-1553.  
Wu D, Mao J T, Deng X J, et al. Black carbon aerosols and their radiative properties in the Pearl River Delta Region[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2009, 39(11): 1542-1553.
- [11] 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.
- [12] 肖思晗,于兴娜,朱彬,等.南京北郊黑碳气溶胶污染特征及影响因素分析[J].环境科学,2016,37(9):3280-3289.  
Xiao S H, Yu X N, Zhu B, et al. Characteristics of black carbon aerosol and influencing factors in northern suburbs of Nanjing[J]. Environmental Science, 2016, 37(9): 3280-3289.
- [13] 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 sub-urban areas of Shenzhen[J]. China Environmental Sci-

- ence, 2018, 38(5): 1 653-1 662.
- [14] Wolff G T. Particulate elemental carbon in the atmosphere[J]. *Journal of the Air Pollution Control Association*, 1981, 31(9): 935-938. DOI: 10.1080/00022470.1981.10465298.
- [15] 肖秀珠, 刘鹏飞, 耿福海, 等. 上海市区和郊区黑碳气溶胶的观测对比 [J]. *应用气象学报*, 2011, 22(2): 158-168.  
Xiao X Z, Liu P F, Geng F H, et al. Comparison of black carbon aerosols in urban and suburban areas of Shanghai[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2011, 22(2): 158-168.
- [16] 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): 1 215-1 222.  
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): 1 215-1 222.
- [17] 丁铭, 邹强, 葛顺, 等. 苏州市黑碳气溶胶的污染特征分析 [J]. *中国环境监测*, 2014, 30(6): 67-71.  
Ding M, Zou Q, Ge S, et al. Study on atmospheric black carbon aerosols concentration in Suzhou City[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2014, 30(6): 67-71.
- [18] 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, 38(5): 55-60.  
Sun H H, Ni C J, Cui L. Characteristics of black carbon aerosol pollution in Chengdu and the relationship between meteorological factors[J]. *Air Pollution Control*, 2016, 38(5): 55-60.
- [19] 齐孟姚, 王丽涛, 张城瑜, 等. 邯郸市黑碳气溶胶浓度变化及影响因素分析 [J]. *环境科学学报*, 2018, 38(5): 1 751-1 758.  
Qi M Y, Wang L T, Zhang C Y, et al. Variation of black carbon aerosol concentration and its influencing factors in Handan City, Hebei Province[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(5): 1 751-1 758.
- [20] 娄淑娟, 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.
- [21] 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): 2 223-2 232.  
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): 2 223-2 232.
- [22] 赵锦慧, 何超, 李小莉, 等. 武汉市黑碳气溶胶质量浓度空间分布的主导因素分析 [J]. *生态环境学报*, 2018, 27(6): 1 089-1 098.  
Zhao J H, He C, Li X L, et al. Leading factor analysis of horizontal and vertical distribution of black carbon aerosol in Wuhan[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2018, 27(6): 1 089-1 098.
- [23] 马思琪, 周顺武, 王烁, 等. 基于 GPS 资料分析西藏中东部夏季可降水量日变化特征 [J]. *高原气象*, 2016, 35(2): 318-328.  
Ma S Q, Zhou S W, Wang S, et al. Diurnal variation characteristics of GPS-retrieved precipitable water vapor over Mid-east Xizang in summer[J]. *Plateau Meteorology*, 2016, 35(2): 318-328.
- [24] 丁裕国, 江志红. 气象数据时间序列信号处理 [M]. 北京: 气象出版社, 2002: 32-37.  
Ding Y G, Jiang Z H. Meteorological data time series signal processing[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2002: 32-37.
- [25] 黄超, 谢子瑞, 龙杰. 武汉市中心城区绿地上空冬季黑碳气溶胶的时空分布特征 [C]// 中国环境科学学会学术年会论文集. 北京: 中国环境科学出版社, 2016: 2 812-2 818.  
Huang C, Xie Z R, Long J. Temporal and spatial distribution characteristics of black carbon aerosol over green space in downtown area of Wuhan in winter[C]// Proceedings of the Annual Conference of the Chinese Society of Environmental Sciences. Beijing: China Environmental Science Press, 2016: 2 812-2 818.
- [26] 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: 5 881-5 892. DOI: 10.1007/s00382-019-04903-0.
- [27] 杨溯, 张武, 韩晶晶, 等. 上海市浦东新区秋冬季黑碳气溶胶特性 [J]. *兰州大学学报: 自然科学版*, 2008, 44(4): 66-70.  
Yang S, Zhang W, Han J J, et al. Characteristics of black carbon aerosol over Pudong District in Shanghai during autumn and winter[J]. *Journal of Lanzhou University: Natural Sciences*, 2008, 44(4): 66-70.
- [28] 王妮妮, 张明旭. 上海市空气质量中 NO<sub>2</sub> 与气象因子的相关性分析及其浓度预报模型的建立 [J]. *环境科学与管理*, 2010, 35(5): 51-55.  
Wang N N, Zhang M X. Correlation analysis and statistical forecasting model of NO<sub>2</sub> concentrations and meteorological factors in ambient air in Shanghai[J]. *Environmental Science and Management*, 2010, 35(5): 51-55.

- [29] Wang G, Zhang R, Gomez M E, et al. Persistent sulfate formation from London Fog to Chinese haze[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2016, 113(48): 13 630-13 635. DOI: 10.1073/pnas.1616540113.
- [30] Wang Y, Ma P L, Peng J, et al. Constraining aging processes of black carbon in the community atmosphere model using environmental chamber measurements[J]. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 2018, 10: 2514-2526. DOI: 10.1029/2018MS001387.
- [31] Wang G, Zhang F, Peng J, et al. Particle acidity and sulfate production during severe haze events in China cannot be reliably inferred by assuming a mixture of inorganic salts[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2018, 18: 10123-10132. DOI: 10.5194/acp-18-10123-2018.

## Diurnal variation characteristics of black carbon aerosol mass concentration and meteorological elements in Zhengzhou

ZHENG Dan<sup>1</sup>, ZHOU Shun-wu<sup>1\*\*</sup>, GUO Jian-ping<sup>2</sup>, Duodian Luozhu<sup>1</sup>, WANG Chuan-hui<sup>3</sup>

(1. School of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Science & Technology: Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education of the People's Republic of China; Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change; Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters; Joint Center for Data Assimilation Research and Applications, Nanjing 210044, China;

2. State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China;

3. Anhui Provincial Meteorological Bureau, Hefei 230061, China)

**Abstract:** Based on the observation data of the Black Carbon aerosol (BC) mass concentration of the Zhengzhou Atmospheric Background Station in the last 6 years (2006—2011), and combined with the surface meteorological observation data, the daily variation characteristics of the BC mass concentration of the station during the four seasons were analyzed, and harmonic analysis was used to explore the daily variation characteristics of BC mass concentration and main meteorological elements (temperature, relative humidity, and wind speed) on the ground in each season. The results show that: ① The annual average value of BC mass concentration in Zhengzhou is relatively high. The diurnal variation shows a “double-peak type” in high-BC mass concentration seasons (autumn and winter), and a “single-peak type” in low-BC mass concentration seasons (spring and summer); ② The daily variations of meteorological elements in the four seasons show a “single-peak type”, in which the moment of high BC mass concentration corresponds to the moment of low surface temperature, high surface relative humidity and low surface wind speed; ③ Harmonic analysis found that the daily variation of BC mass concentration had a period of 24 h + 12 h in autumn and winter, and an obvious 24 h cycle in spring and summer; ④ The 24 h cycle of the daily variations of meteorological elements at the station were significant and all are ahead of the BC mass concentration by 1—2 h, which suggested that meteorological elements could affect the BC mass concentration.

**Key words:** black carbon aerosol; mass concentration; surface; meteorological elements; harmonic analysis; Zhengzhou