

贵阳市秋冬季 PM_{2.5} 与 PM₁₀ 中黑碳浓度特征及来源分析*

敖 娅¹ 董 娴^{1,2} 范雪璐¹ 金 倩¹ 陈 卓^{1,2#}

(1. 贵州师范大学化学与材料科学学院, 贵州 贵阳 550001;

2. 贵阳市大气细粒子和大气污染化学重点实验室, 贵州 贵阳 550001)

摘要 于 2017 年 9 月至 2018 年 2 月, 昼夜连续采集贵阳市大气 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 样品, 利用黑碳仪对样品中的黑碳浓度进行连续监测, 探讨气象参数对黑碳浓度的影响, 并利用混合单粒子拉格朗日综合轨迹(HYSPLIT)模型分析其来源。结果表明, 贵阳市秋冬季 PM_{2.5} 中黑碳昼、夜质量浓度分别为 1.27~6.87、1.28~10.17 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 平均值分别为 3.21、3.78 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; PM₁₀ 中黑碳昼、夜质量浓度分别为 1.62~8.92、1.73~11.94 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 平均值分别为 3.97、4.50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 表明夜间变化范围较昼间大, 且平均浓度高于昼间。秋季 PM_{2.5}、PM₁₀ 中黑碳平均质量浓度分别为 3.40、3.56 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 占比(质量分数)分别为 6.18% 和 5.60%, 冬季 PM_{2.5}、PM₁₀ 中黑碳平均质量浓度分别为 3.56、5.20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 占比分别为 5.29% 和 4.59%。黑碳主要富集在 PM_{2.5} 中, 且呈冬季高、秋季低的季节变化特征。黑碳浓度与大气 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 浓度呈较好正相关关系, R 分别为 0.850 和 0.870 ($P < 0.01$), 其变化趋势明显受气压、风速和相对湿度等的影响。后向轨迹分析表明, 贵州省本地及重庆市东南部气流对贵阳市秋冬季黑碳浓度贡献较大。

关键词 PM_{2.5} PM₁₀ 黑碳 污染特征 来源

DOI: 10.15985/j.cnki.1001-3865.2020.11.007

Characteristics and source analysis of black carbon in PM_{2.5} and PM₁₀ of Guiyang City, China during autumn-winter period AO Ya¹, DONG Xian^{1,2}, FAN Xuelu¹, JIN Qian¹, CHEN Zhuo^{1,2}. (1. School of Chemistry and Material Science, Guizhou Normal University, Guiyang Guizhou 550001; 2. Guiyang Key Laboratory of Atmospheric Fine Particles and Air Pollution Chemistry, Guiyang Guizhou 550001)

Abstract: By using aethalometer, the concentration of black carbon in PM_{2.5} and PM₁₀ was continuously detected in Guiyang City, from September 2017 to February 2018. The effects of meteorological parameters on black carbon mass concentration were explored, and the source was analyzed by the HYSPLIT model. Results showed that the daytime and nighttime black carbon concentration in PM_{2.5} during the detection period was mainly range in 1.27-6.87 and 1.28-10.17 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, and the average concentration was 3.21, 3.78 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectively. For black carbon mass concentration in PM₁₀, its daytime variation range was 1.62-8.92 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, with a mean value of 3.97 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, and its nighttime variation range was 1.73-11.94 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, with a mean value of 4.50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, indicating that the nighttime variation range was larger than daytime, and the average concentration of daytime black carbon was slightly below night time black carbon. In autumn, the average mass concentration of black carbon in PM_{2.5} and PM₁₀ were 3.40, 3.56 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, and the proportion (mass fraction) of black carbon in PM_{2.5} and PM₁₀ were 6.18% and 5.60%, respectively. However, in winter, the average mass concentration of black carbon in PM_{2.5} and PM₁₀ was 3.56, 5.20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, and the proportion of black carbon in PM_{2.5} and PM₁₀ was 5.29% and 4.59%, indicating that black carbon was mainly concentrated in PM_{2.5} with high in winter and low in autumn. The black carbon concentration had a good positive correlation with PM_{2.5} and PM₁₀ concentrations, with R of 0.850 and 0.870 ($P < 0.01$), respectively. Moreover, the variation trend of black carbon concentration was also affected by pressure, wind speed, relative humidity and so on. Backward trajectory analysis results showed that the black carbon concentration of Guiyang City was mainly affected by air masses from Guizhou Province and Southeast Chongqing City in autumn and winter.

Keywords: PM_{2.5}; PM₁₀; black carbon; pollution characteristics; source

黑碳是大气气溶胶重要组成部分, 主要来源于 居民燃煤、森林火灾、秸秆及落叶等生物燃烧都会产生化石燃料和生物质的不完全燃烧, 工业活动、交通、 生黑碳^[1]。黑碳作为大气气溶胶中光学吸收系数贡

第一作者: 敖 娅, 女, 1992 年生, 硕士研究生, 研究方向为环境分析化学。* 通讯作者。

* 国家自然科学基金资助项目(No.21767007); 贵州省科学技术基金资助项目(黔科合基础[2018]1111); 贵州师范大学 2017 年度学术新苗培养及创新探索专项(黔科合平台人才[2017]5726)。

献率达90%的最主要吸光物质,显著影响了大气环境质量,是仅次于CO₂的温室效应第二影响因子^{[2]190-192}。黑碳粒径为0.001~1.000 μm,主要吸附在PM_{2.5}中,可直接进入呼吸道并在肺泡沉积,最后到达血液,对人体健康产生危害^[3]。1989年,黑碳被全球大气监测网(GAW)列为气溶胶研究的一个重要观测指标^[4]。

中国区域黑碳排放量约占全球的1/4,高浓度黑碳是中国南涝北旱趋势的重要驱动因子^[5]。20世纪90年代起,中国相继开展了不同城市黑碳气溶胶的观测分析,取得了显著成果^[6-11]。贵阳市地处云贵高原东部,作为全国生态文明建设试点城市,空气质量监测尤为重要。本研究在贵阳市秋冬季开展大气PM_{2.5}与PM₁₀中黑碳观测与分析,并探讨气象参数对黑碳浓度的影响,利用混合单粒子拉格朗日综合轨迹(HYSPLIT)模型系统分析其可能来源,研究结果能为有效防控大气颗粒物和黑碳污染提供参考。

1 材料与方法

1.1 样品采集

采样地点选择贵阳市云岩区某大楼(26.35°N, 106.42°E)楼顶,距地垂直高度为20 m,周围是居民区、文教区、商业区,附近8 km范围内无工业污染源。

采用中流量颗粒物采样器采集样品,流量为100 L/min,采样滤膜为90 mm的石英滤膜(英国Whatman),于2017年9月至2018年2月按昼间(8:00—19:00)和夜间(19:00至次日8:00)分别同时采集PM_{2.5}和PM₁₀,滤膜在采样前后分别称重,计算PM_{2.5}和PM₁₀。气温、气压等气象参数用HOBO-U30型气象参数仪采集,共得PM_{2.5}和PM₁₀有效样品各117组,共计468个样品。

1.2 样品处理与分析

滤膜采样前后均置于恒温恒湿箱中48 h,气温保持(25±2)℃,相对湿度保持50%±5%。PM_{2.5}和PM₁₀采集后,采用SootScanTM Model OT21型黑碳仪(美国Magge科学公司)测定黑碳,以880

nm红外光作为黑碳检测光,黑碳质量衰减系数取16.6。利用HYSPLIT模型计算2017年9月至2018年2月以采样点为起点的后向轨迹并进行聚类分析,研究不同来源区域对黑碳浓度的影响,数据来源于美国国家环境预报中心(NCEP)提供的全球资料同化系统(GDAS)。

1.3 质量控制与保证

以空白、平行样的测定结果来控制实验数据质量,分析所用的数据均是扣除空白的结果,每隔10个样品进行1次平行检测,前后误差控制在10%内可再进行后续样品分析。

2 结果与讨论

2.1 黑碳浓度变化特征

采样期间,秋冬季PM_{2.5}的24 h质量浓度为17.50~112.05 μg/m³,平均值(60.25 μg/m³)是《环境空气质量标准》(GB 3095—2012)一级标准(35 μg/m³)的1.72倍,与GB 3095—2012二级标准(75 μg/m³)相比,超标率为24.78%。PM₁₀的24 h平均质量浓度为21.14~185.45 μg/m³,平均值(88.69 μg/m³)是GB 3095—2012一级标准(50 μg/m³)的1.77倍,与GB 3095—2012二级标准(150 μg/m³)相比,超标率为7.69%,说明贵阳市大气PM_{2.5}、PM₁₀有一定程度的污染。

秋冬季PM_{2.5}中黑碳24 h质量浓度为1.48~8.49 μg/m³,平均值为3.49 μg/m³;PM₁₀中黑碳24 h质量浓度为1.80~9.38 μg/m³,平均值为4.29 μg/m³。采样期间PM_{2.5}和PM₁₀中黑碳的昼夜平均质量浓度见表1。由表1可知,黑碳浓度夜间变化范围较昼间大,且夜间黑碳平均浓度稍高于昼间,这可能与夜间气温低,大气平均混合层的高度低于昼间,限制了大气垂直扩散有关。

黑碳与大气颗粒物月均质量浓度变化如图1所示。PM_{2.5}、PM₁₀及黑碳月均浓度变化趋势较为一致,均呈现出波动,PM_{2.5}和PM₁₀中黑碳月均浓度最大值出现在12月,最小值出现在9月。12月低温、风速小,逆温效应促进了颗粒物的积聚,期间东北风向上的乌当区污染气团也可能随时影响采样点,加

表1 PM_{2.5}和PM₁₀中黑碳昼夜质量浓度
Table 1 Mass concentration of black carbon in PM_{2.5} and PM₁₀ between daytime and nighttime μg/m³

时段	PM _{2.5} 中黑碳			PM ₁₀ 中黑碳		
	范围	平均值	标准偏差	范围	平均值	标准偏差
昼间	1.27~6.87	3.21	1.31	1.62~8.92	3.97	1.70
夜间	1.28~10.17	3.78	1.92	1.73~11.94	4.50	2.29

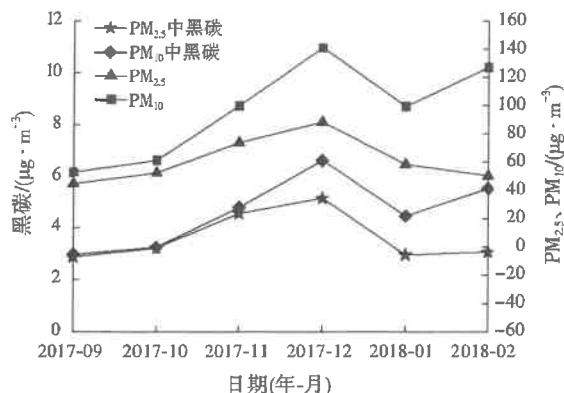


图1 贵阳市黑碳与大气颗粒物月均质量浓度变化
Fig.1 Changes of monthly average mass concentrations of black carbon and atmospheric particles in Guiyang City

之采暖季燃煤量增加,导致颗粒物及黑碳浓度相对较高;9月降雨量少,但平均气温高,风速相对较强,促进空气对流,利于颗粒物的扩散,颗粒物及黑碳浓度相对较低。

秋季 PM_{2.5} 中黑碳平均值为 3.40 μg/m³,在 PM_{2.5} 中的平均占比(以质量分数计)为 6.18%;PM₁₀ 中黑碳平均值为 3.56 μg/m³,在 PM₁₀ 中的平均占比为 5.60%。冬季 PM_{2.5} 中黑碳平均值为 3.56 μg/m³,在 PM_{2.5} 中的平均占比为 5.29%;PM₁₀ 中黑碳平均值为 5.20 μg/m³,在 PM₁₀ 中的平均占比为 4.59%。采用 Mann-Whitney 检验分析秋冬季 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 中黑碳浓度差异显著性,结果表明,冬季 PM_{2.5} 中黑碳浓度平均值略高于秋季,但秋季与冬季黑碳浓度平均值差异不显著($P=0.55$);秋季与冬季 PM₁₀ 中黑碳浓度平均值差异显著($P<0.01$)。粒径 2.5~10.0 μm 的颗粒物(PM_{2.5-10})中黑碳主要源于不同污染源排放的 PM_{2.5} 间的聚合凝结及其黑碳的吸湿性增长,由于季节源的差异,再加上贵阳市冬季分散燃煤采暖过程及扩散条件的共同作用,使得 PM_{2.5} 的碰并、积聚等过程增强,进而导致 PM_{2.5-10} 中黑碳浓度相比秋季增加^[12-13],因此冬季 PM₁₀ 中黑碳浓度相比秋季显著提升。

黑碳浓度呈冬季高、秋季低的季节变化特征,且秋季与冬季黑碳在 PM_{2.5} 中的占比均高于 PM₁₀,说明贵阳市秋冬季 PM_{2.5} 中黑碳的占比更高,更需要关注。通常黑碳浓度季节变化是气象因素和污染源

排放综合影响结果,贵阳市冬季气温低、风速小、空气潮湿,逆温易出现,不利于污染物的稀释扩散;此外,冬季存在分散燃煤生活供暖,同时较频繁的垃圾和植被露天燃烧也会直接导致空气中的颗粒物增加^[14],造成黑碳浓度偏高。

2.2 黑碳来源分析

2.2.1 PM_{2.5}、PM₁₀ 与黑碳浓度相关性分析

采样期间,随着 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 浓度升高,黑碳浓度也增加,黑碳与 PM_{2.5} 浓度呈正相关($R=0.850, P<0.01$),与 PM₁₀ 浓度则表现出更强的正相关($R=0.870, P<0.01$)。黑碳浓度与 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 浓度之间的正相关性暗示了两者的具有相同的污染源。通常大气黑碳多来源于工业用煤、机动车尾气排放和生物质燃烧等^{[2]199-203},本研究采样点位于主城区,居民燃煤和城市交通对黑碳浓度影响的可能性更大。

2.2.2 气象参数对黑碳浓度的影响

气象参数对黑碳浓度和迁移会有一定影响。采样期间,气温在 -1.80~26.58℃,相对湿度在 57.15%~100.00%,降雨总量 58.6 mm,平均风速 0.15 m/s,平均气压 89.23 kPa。采样期间黑碳浓度与气象参数的相关系数见表 2。PM_{2.5} 和 PM₁₀ 中黑碳浓度均与气温、相对湿度、风速呈显著负相关,与气压均呈现显著正相关,与降雨量的负相关相对较弱,这可能与采样期间日均降雨量总体偏少、变化不大有关。

不同风向造成污染气团向采样点的传输路径不同,进而对黑碳浓度分布产生影响。贵阳市秋冬季的高频风向均为东北风。秋季风向集中在东北、东南,其中东北风向上 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 中黑碳质量浓度分别集中在 2~7、2~8 μg/m³,东南风向上则分别在 2~6、2~5 μg/m³;冬季风向主要集中在东北,东北风向上 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 中黑碳质量浓度分别分布在 2~8、2~10 μg/m³。此外,在东北风向上,秋冬季 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 中黑碳浓度均较高,该风向上乌当区大型垃圾厂、水泥厂、造纸厂、玻璃厂所排放的部分污染被带至城区,加之冬季降雨量少、不利于污染物洗脱,使得污染加重。

表 2 大气黑碳浓度与气象参数的相关系数¹⁾

Table 2 Correlation coefficient between black carbon concentration and meteorological parameters

参数	气温	相对湿度	降雨量	风速	气压
PM _{2.5} 中黑碳	-0.330 **	-0.428 **	-0.218 *	-0.464 **	0.524 **
PM ₁₀ 中黑碳	-0.313 **	-0.545 **	-0.216 *	-0.426 **	0.512 **

注:1) ** 表示相关性在 0.01 水平上显著; * 表示相关性在 0.05 水平上显著。

2.2.3 黑碳后向轨迹分析

为了进一步了解外来运输气团对贵阳市秋冬季黑碳浓度的影响,以采样点为起点,运用 HYSPLIT 模型对距地面 1 000 m 高度的 72 h 后向轨迹进行聚类分析。根据气流轨迹的起源和传输路径等因素,将计算得到的所有轨迹聚类为 4 类,结果如图 2 所示。由图 2 可知,不同季节气流聚类分布结果有所差异。秋季来自贵州省本地的气流占 41%;其次是来自湖北省西南部、湖南省西北部的气流,占 23%;途经重庆市东南部、四川省东南部的气流占 19%;来自广西壮族自治区东北方向的气流最少,占 17%。冬季来自贵州省本地的气流最多,占 58%;其次是来自重庆市东南部的气流,占 26%;少量气流来自云南省东北部和湖北省西南部,分别占 9% 和 7%。此外,从秋季到冬季,东北方向气流减少,西南方向气流增加。

基于后向轨迹聚类分析结果,对每类轨迹对应的黑碳、PM_{2.5} 及 PM₁₀ 浓度的算术平均值进行统计分析,以表征该轨迹来源方向的气流对黑碳及颗粒

物质量浓度水平的影响,结果见表 3。由表 3 可知,秋季各类轨迹对应的 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 中黑碳浓度大致为轨迹 2>轨迹 3>轨迹 4>轨迹 1。其中,第 2 类气流轨迹对应的 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 中黑碳质量浓度最高,分别为 4.02、4.18 μg/m³;第 3 类气流轨迹对应的黑碳质量浓度也较高,分别为 3.74、3.86 μg/m³;第 1、4 类气流轨迹对应的黑碳浓度则相对较低。冬季各类轨迹对应的 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 中黑碳浓度为轨迹 1>轨迹 2>轨迹 3>轨迹 4。第 1 类气流轨迹对应的 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 中黑碳质量浓度最高,分别为 3.54、5.62 μg/m³;第 2 类气流轨迹对应的黑碳质量浓度也较高,分别为 3.53、4.98 μg/m³;第 3、4 类气流轨迹对应的黑碳浓度相对较低。此外,秋冬季各类气流轨迹对应的 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 浓度特征与黑碳较为相似。

可见,来自贵州省本地及重庆市东南部的气流对贵阳市秋冬季黑碳及颗粒物浓度的贡献最大,在这两类气流影响下,气流轨迹长度较短,对应的地面风速较小,利于污染物累积,导致黑碳浓度较高。

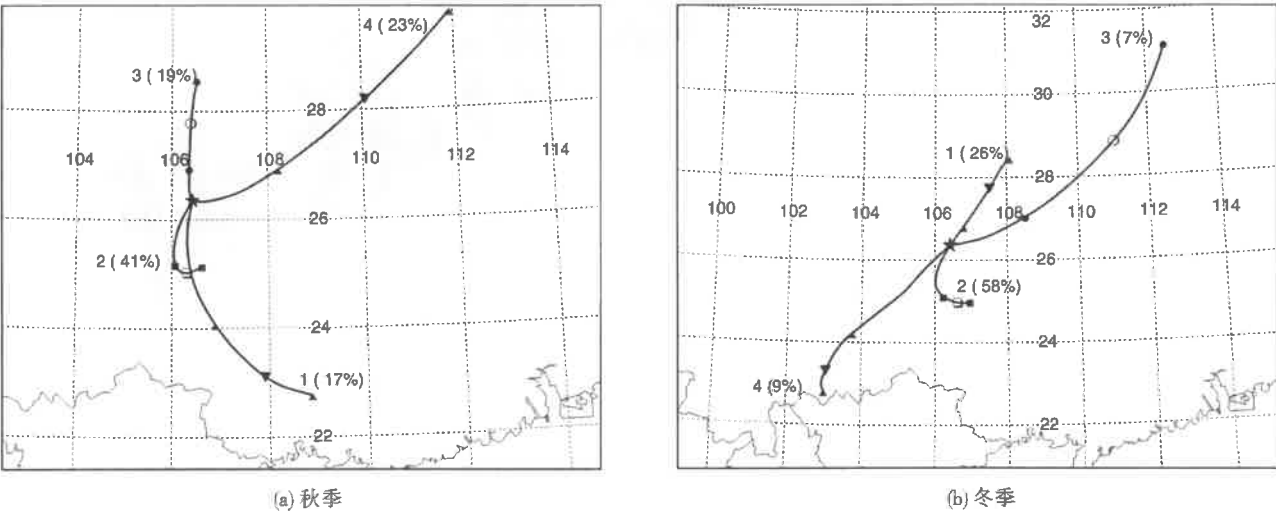


图 2 贵阳市秋冬季后向轨迹聚类分布
Fig.2 Backward trajectory clustering analysis of Guiyang City in autumn and winter

表 3 不同季节各类轨迹的分布特征及对应的黑碳和颗粒物质量浓度
Table 3 Distribution characteristics and black carbon and particulates mass concentration of backward trajectories in different seasons

季节	轨迹类型	出现概率/%	途径区域	平均质量浓度/(μg·m ⁻³)			
				PM _{2.5} 中黑碳	PM ₁₀ 中黑碳	PM _{2.5}	PM ₁₀
秋	1	17	广西壮族自治区	2.43	2.47	37.37	43.01
	2	41	贵州省本地	4.02	4.18	67.60	82.45
	3	19	重庆市、四川省、贵州省遵义市	3.74	3.86	59.98	73.62
	4	23	湖北省、湖南省	3.41	3.50	62.55	68.06
冬	1	26	重庆市、贵州省遵义市	3.54	5.62	66.50	127.40
	2	58	贵州省本地	3.53	4.98	64.12	113.60
	3	7	湖北省、湖南省	3.10	4.48	62.65	109.39
	4	9	云南省、贵州省六盘水市	2.92	4.22	56.81	84.96

表 4 贵阳市与国内其他地区秋冬季 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 中黑碳质量浓度比较
Table 4 Comparison of black carbon in PM_{2.5} and PM₁₀ in autumn and winter between Guiyang City and other areas in China

采样点	采样时间	颗粒物载体	黑碳平均值/($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	数据来源
北京市	2011 年 12 月至 2012 年 2 月	PM _{2.5}	5.03	文献[15]
广西壮族自治区	2015 年 9 月至 2016 年 2 月	PM _{2.5}	4.70~9.72	文献[16]
天津市	2010 年 9 月至 2011 年 1 月	PM _{2.5}	4.70~9.10	文献[17]
西安市	2003 年 9 月至 2004 年 2 月	PM _{2.5}	11.3~12.3	文献[18]
西宁市	2014 年 11 月至 2015 年 1 月	PM _{2.5}	8.76	文献[9]
瓦里关	1994 年 7 月至 1995 年 12 月	PM _{2.5}	0.05~0.13	文献[19]
贵阳市	2017 年 9 月至 2018 年 2 月	PM _{2.5}	2.95~5.15	本研究
北京市	2002 年 9—11 月	PM ₁₀	7.0	文献[20]
广西壮族自治区	2015 年 9 月至 2016 年 2 月	PM ₁₀	4.19~9.77	文献[16]
西安市	2006 年 12 月至 2007 年 1 月	PM ₁₀	5.0	文献[21]
天津市	2008 年 1 月	PM ₁₀	11.8	文献[22]
西宁市	2014 年 11 月至 2015 年 1 月	PM ₁₀	10.80	文献[9]
贵阳市	2017 年 9 月至 2018 年 2 月	PM ₁₀	3.26~6.61	本研究

2.3 黑碳浓度与国内其他城市对比

表 4 为贵阳市与国内其他地区秋冬季 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 中黑碳浓度(取月均值)的比较。从表 4 可看出,贵阳市秋冬季 PM_{2.5} 中黑碳浓度低于西安市和西宁市,但高于瓦里关大气本底观测点;PM₁₀ 中黑碳浓度低于北京市、西宁市、天津市。贵阳市黑碳主要来源于机动车尾气排放、冬季采暖和工业用煤等人为活动,相对于其他经济发达城市黑碳排放总量较少;此外,贵阳市大气相对湿度较高且降雨频率较大,也可能是导致贵阳市黑碳浓度偏低的另一个原因。

3 结 论

(1) 贵阳市大气 PM_{2.5} 与 PM₁₀ 中黑碳 24 h 质量浓度分别为 1.48~8.49、1.80~9.38 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,平均值为 3.49、4.29 $\mu\text{g}/\text{m}^3$;夜间变化范围较昼间大,昼间黑碳平均浓度稍低于夜间。

(2) 秋季 PM_{2.5} 中黑碳平均值为 3.40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,在 PM_{2.5} 中的平均占比为 6.18%;PM₁₀ 中黑碳平均值为 3.56 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,在 PM₁₀ 中的平均占比为 5.60%。冬季 PM_{2.5} 中黑碳平均值为 3.56 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,在 PM_{2.5} 中的平均占比为 5.29%;PM₁₀ 中黑碳平均值为 5.20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,在 PM₁₀ 中的平均占比为 4.59%。黑碳呈冬季高、秋季低的季节变化特征,且黑碳在 PM_{2.5} 中占比高于 PM₁₀。

(3) 贵阳市黑碳浓度与 PM_{2.5}、PM₁₀ 浓度变化趋势一致,呈正相关;与气温、相对湿度、风速和降雨量呈负相关,与气压呈正相关。风向对黑碳浓度也有影响,秋冬季高频风向均为东北风,该风向上 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 中黑碳浓度均较高。

(4) 后向轨迹分析结果表明,贵州省本地及重

庆市东南部的气流对贵阳市秋冬季黑碳浓度贡献较大,气流轨迹对应的黑碳浓度较高;相比于国内其他地区,贵阳市秋冬季大气黑碳月平均浓度相对偏低。

参考文献:

- [1] KUHLEBUSCH T J. Black carbon and the carbon cycle[J]. Science, 1998, 280(5371): 1903-1904.
- [2] 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).
- [3] 丁晴, 刘建国, 陆亦怀, 等. 广州亚运期间鹤山大气颗粒物及碳组分的分析[J]. 环境科学与技术, 2012, 35(7): 43-49.
- [4] WMO. Global atmosphere watch guide[R]. Geneva: WMO, 1993.
- [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] 仇广乐, 刘娜, 冯新斌, 等. 贵阳市大气黑碳污染特征[J]. 生态学杂志, 2011, 30(5): 1018-1022.
- [7] 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.
- [8] GONG W, ZHANG T H, ZHU Z M, et al. Characteristics of PM_{1.0}, PM_{2.5}, and PM₁₀, and their relation to black carbon in Wuhan, Central China[J]. Atmosphere, 2015, 6(9): 1377-1387.
- [9] 窦筱艳, 徐珣, 刘宇, 等. 西宁市城区冬季 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 中有机碳、元素碳污染特征[J]. 中国环境监测, 2016, 32(2): 44-48.
- [10] 史国良, 陈刚, 田瑛泽, 等. 天津大气 PM_{2.5} 中碳组分特征和来源分析[J]. 环境污染与防治, 2016, 38(1): 14-20.
- [11] 程丁, 吴晨, 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.
- [12] 吴梦龙, 郭照冰, 刘凤玲, 等. 南京市大气颗粒物中有机碳和元素碳粒径分布特征[J]. 环境科学, 2014, 35(2): 451-457.
- [13] 郭育红, 辛金元, 王跃思, 等. 保定市大气颗粒物中含碳组分粒径分布[J]. 气候与环境研究, 2014, 19(2): 185-192.
- [14] 梁隆超, 仇广乐, 陈卓. 贵阳市城区大气颗粒物 PM_{2.5} 的污染特征与季节变化规律[J]. 地球与环境, 2015, 43(3): 290-295.

(下转第 1354 页)

