

2015 年秋冬季武汉城区黑碳气溶胶的分布及源区分析

黄超¹, 赵锦慧^{1*}, 何超², 刘玉青¹, 李小莉¹, 刘书凯³

1. 湖北大学资源环境学院, 湖北 武汉 430062; 2. 武汉大学资源与环境科学学院, 湖北 武汉 430072;

3. 西南林业大学国家高原湿地研究中心, 云南 昆明 650224

摘要: 黑碳 (Black Carbon, BC) 作为大气气溶胶的重要组成部分, 因其在太阳辐射平衡、气候变化等方面具有巨大作用, 而受到广泛的关注与研究。利用 2015 年 9 月—2016 年 2 月 10 个城区公园绿地黑碳气溶胶观测数据以及同期空气污染物数据, 运用相关性分析、多元线性回归分析、HYSPLIT4 模型等方法, 分析了武汉市黑碳气溶胶的时空分布规律及其与空气污染物的关系, 将 BC 本底浓度与各城市进行对比, 并对两次较大规模的 BC 污染事件进行后向轨迹模拟。结果如下, (1) 武汉市秋冬季 BC 质量浓度日均值为 $(5.227 \pm 3.12) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 范围为 $1.205 \sim 16.534 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。(2) BC 质量浓度在月变化上呈 1 月 > 12 月 > 2 月 > 10 月 > 9 月 > 11 月, 冬季整体高于秋季。(3) BC 质量浓度最高值出现在石门峰公园, 最低值出现在东湖风景区, 导致空间分布差异的原因是离车流较多的主路距离不同。(4) 采用最大频数法计算得到武汉市秋冬季黑碳气溶胶本底浓度为 $5.45 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 与西宁、乌鲁木齐、芝加哥等城市差异明显。(5) BC 与 PM_{10} 、CO、 O_3 、 $\text{PM}_{2.5}$ 的相关系数分别为 0.658、0.8、-0.436、0.885, 通过建立多元线性回归模型, 得到回归方程 $Y = -1136.564 + 4.216X_1 + 66.316X_2 - 7X_3 + 40.324X_4$ 。(6) 运用 HYSPLIT4 模型进行 72 h 后向轨迹模拟, 结果表明两次较大规模的 BC 污染事件污染源不同。秋冬季的轨迹分析也说明武汉受到不同起源的空气气团影响。该研究可为武汉城区黑碳气溶胶观测提供数据资料, 有助于推动中国黑碳气溶胶的系统观测研究工作。

关键词: 黑碳气溶胶; 时空分布; 相关性分析; 武汉; 多元线性回归分析; 轨迹模型

DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2018.03.019

中图分类号: X16

文献标志码: A

文章编号: 1674-5906 (2018) 03-0542-08

引用格式: 黄超, 赵锦慧, 何超, 刘玉青, 李小莉, 刘书凯. 2015 年秋冬季武汉城区黑碳气溶胶的分布及源区分析[J]. 生态环境学报, 27(3): 542-549.

HUANG Chao, ZHAO Jinhui, HE Chao, LIU Yuqing, LI Xiaoli, LIU Shukai. 2018. The analysis of distribution and source area of black carbon aerosol in Wuhan City in autumn and winter of 2015 [J]. Ecology and Environmental Sciences, 27(3): 542-549.

黑碳 (Black Carbon, BC) 是指悬浮在空气中的黑色碳质颗粒物, 它是含碳物质在不充分燃烧条件下形成的无定型碳质 (朱厚玲, 2003)。黑碳气溶胶的排放主要分为自然源和人为源, 其中自然源包括火山爆发、森林大火等; 人为源主要是化石燃料和生物燃料的燃烧。自然源具有区域性和偶然性特征, 而人为源则是长期而持续的 (娄淑娟等, 2005)。

黑碳气溶胶作为大气中最重要的气溶胶之一, 对太阳辐射具有强烈的吸收作用 (张华等, 2009), 能够影响大气环流、全球水分循环 (董俊玲等, 2010), 破坏区域大气的稳定性, 直接或间接影响区域和全球的辐射效应、气候变化等。同时它能降低大气能见度, 携带致癌物质, 对人体健康造成危害 (Kim et al., 2003), 因此关于 BC 的研究受到越来越多的关注。近几年来, Sharma et al. (2004) 研究了加拿大北极地区黑碳浓度的长期规律, Murphy

et al. (2011) 使用连续 BC 观测数据分析了美国黑碳时间变化, 发现 1994—2004 年 BC 浓度降低了超过 25%, 这些连续的 BC 观测为美国和北极地区积累了大量的科研数据。而在中国, 有关黑碳气溶胶的观测研究也取得不少进展, 2009 年刘新春等 (2011)²⁷¹⁻²⁷² 对乌鲁木齐冬季黑碳气溶胶进行观测研究, 2010 年 Verma et al. (2010) 研究了广州市黑碳气溶胶的时间变化, 2012 年姚青等 (2012) 对天津城区秋冬季黑碳气溶胶进行了观测分析, 上海、南京等城市的 BC 气溶胶观测研究也相继被开展, 这些研究揭示了不同城市黑碳气溶胶的变化特征, 阐明了黑碳气溶胶的气候效应、环境效应和生物地球化学效应。

从黑碳气溶胶的全球分布来看, 北半球的黑碳气溶胶浓度明显高于南半球, 而中国东部就是黑碳气溶胶浓度高值中心区之一 (曹军骥等, 2011)。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41401559); 湖北省教育厅项目 (D20141001)

作者简介: 黄超 (1991 年生), 男, 硕士研究生, 主要从事环境地学研究。E-mail: 1229953712@qq.com

***通信作者:** 赵锦慧 (1974 年生), 女, 副教授, 研究方向为土壤与环境科学。E-mail: zhaojh2004@hubu.edu.cn

收稿日期: 2017-09-18

武汉市是中国重要排放城市之一,颗粒物减排存在一定压力。其中,以黑碳排放量较高,对区域气候和空气质量影响很大。因此,应重点关注武汉地区黑碳气溶胶的分布及其环境效应。

目前关于武汉地区 BC 的基础观测研究较少,主要集中在 BC 与有机碳、颗粒物综合分析上。2011 年张宇尧(2017)利用气溶胶的复折射指数首次反演得到武汉冬季黑碳和有机碳柱质量浓度;Wei et al.(2015)在 2014 年分析了 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 的污染特征及其与 BC 的关系。本研究利用 2015 年秋冬季黑碳气溶胶观测数据和主要污染物数据,运用 SPSS 分析软件以及轨迹模型等方法,研究黑碳气溶胶的变化特征及其与污染物的关系等,为武汉城区黑碳气溶胶观测提供数据资料,有助于推动中国黑碳气溶胶的系统观测研究工作,为探索灰霾监测评估方法积累一定的实践经验。

1 采样和分析

选取武汉城区汉阳公园、解放公园、中山公园、硚口公园、常青公园、黄鹤楼景区、东湖风景区、沙湖公园、石门峰公园、南干渠游园共 10 个景点作为黑碳气溶胶的采样点,采样点分布如图 1 所示。

在公园绿地地势开阔的平地上,将仪器架设在距离地面 2 m 高度处进行采样。各采样点下垫面是植被覆盖率较高的公园绿地,周围紧邻交通主干道、居民楼和办公楼,周围 500 m 范围内无工厂等大气污染源。采样时间为 2015 年 9 月—2016 年 2

月。采样观测仪器为美国玛基科技公司(Magee Scientific Co, USA)生产的 AE-51 微型黑碳仪,其工作原理是利用 Aethalometer 光学吸收方法对空气中的黑碳气溶胶进行实时采样和分析,属于光学灰度测量法。此次采样以 880 nm 波长发光二极管作为光源,测量范围为 $0\sim 1\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$,测量分辨率为 $0.001\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,测量精度为 $\pm 0.100\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{min}$,仪器流量为 $50\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$,每隔 60 s 获取 1 组实时监测的武汉市各个绿地公园上空的黑碳质量浓度数据并自动保存,每次持续观测 50 min。观测期间共获得了 1 min 数据 12 202 组,保留了 11 822 组,总体数据完整率达到 96.89%(表 1)。

本文分析了 2015 年 9 月—2016 年 2 月为期 6 个月的黑碳质量浓度观测数据,同时从武汉市环保局网站(<http://www.whepb.gov.cn/>)搜集同期武汉市可吸入颗粒物(PM_{10})、细颗粒物($PM_{2.5}$)、二氧化氮(NO_2)、二氧化硫(SO_2)、一氧化碳(CO)、臭氧(O_3)实时监测的 24 h 日均值等污染物数据。观测期内,共获得 12202 组 1min 黑碳气溶胶数据,对其中因仪器断电和更换滤膜等原因产生的负值和异常数据进行剔除,数据资料完整率达到 96.89%(表 1),主要污染物数据也进行异常值剔除处理。

2 结果与讨论

2.1 BC 质量浓度时间变化规律

2.1.1 BC 质量浓度日变化规律

根据各采样点 BC 气溶胶质量浓度的连续观测

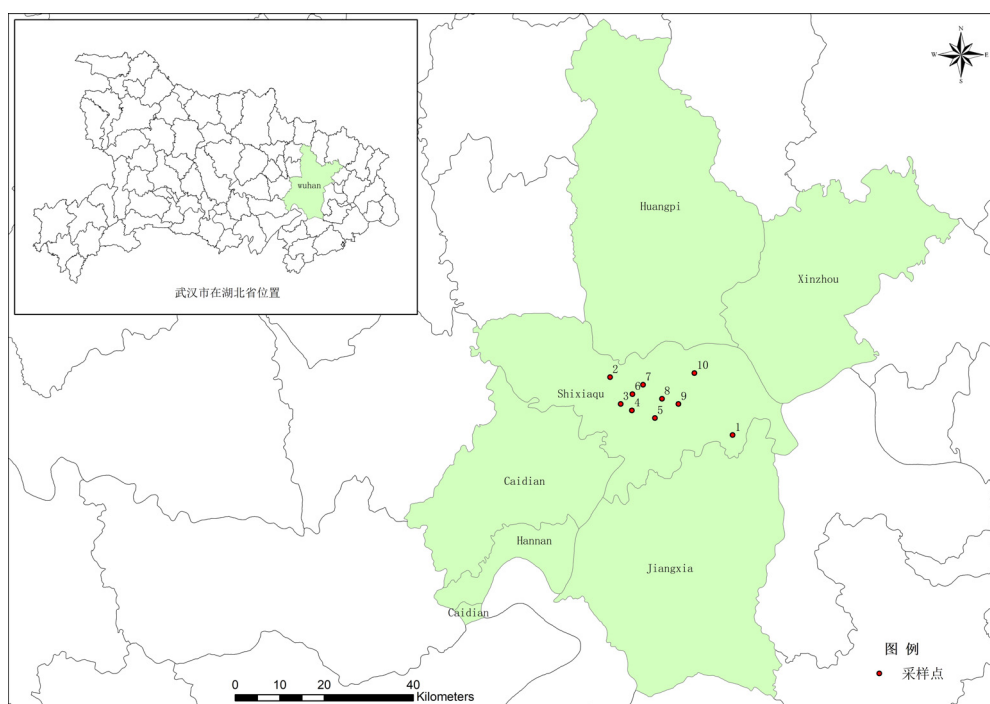


图 1 采样点位置图

Fig. 1 The location map of sampling points

表 1 数据质量控制、统计

Table 1 The control and statistics of data quality

Sampling points	Average of BC	Total data	Reserved data	Proportion/%
Hanyang park	5 007	1 294	1 239	95.75
Huanghelou park	4 534	1 291	1 250	96.82
The east lake scenic area	4 038	1 280	1 244	97.19
Jiefang park	5 210	1 300	1 264	97.23
Zhongshan park	4 139	1 215	1 187	97.7
Changqing park	4 542	1 212	1 183	97.61
Qiaokou park	5 622	1 028	1 006	97.86
Shimenfeng park	5 295	1 306	1 256	96.17
Nanganqu park	4 975	1 195	1 153	96.49
Shahu park	5 120	1 081	1 040	96.21
Total	-	12 201	11 822	96.89

数据,可以得到武汉市 2015 年 9 月—2016 年 2 月 BC 气溶胶质量浓度的日变化,如图 2 所示。结果表明:武汉市秋冬季黑碳质量浓度日均值为 $(5.227\pm3.12)\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,范围为 $1.205\sim16.534\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,约 61%的日均值浓度数据分布在 $2\sim6\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 区间范围内,具有较好的集中分布趋势,并且在月份分布上也呈现明显的分异特征,其中,2016 年 1 月 BC 质量浓度最高,为 $(7.778\pm3.12)\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$;2015 年 9 月 BC 质量浓度最低,为 $(2.767\pm3.12)\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

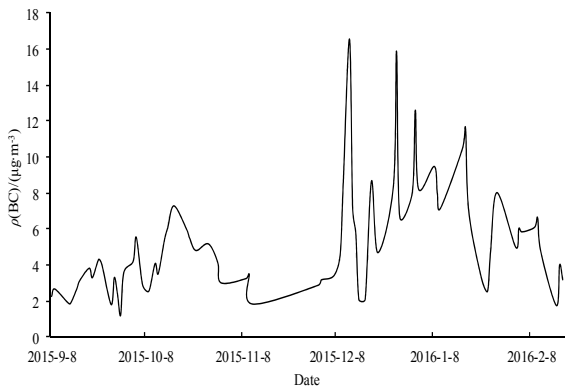


图 2 武汉市秋冬季 BC 浓度时间序列图

Fig. 2 Time series of BC in Wuhan from Sep 2015 to Feb 2016

2.1.2 BC 质量浓度月变化规律

根据 BC 观测值计算得到武汉市秋冬季各月黑碳平均质量浓度,其中 1 月最高,为 $8.052\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,11 月最低,为 $2.816\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,表现为:1 月>12 月>2 月>10 月>9 月>11 月,如图 3 所示。

这个规律与冬季大气 BC 质量浓度高于秋季的一般规律相吻合,原因包括,(1)气象因素。武汉市属亚热带季风气候,冬季气温较低,空气潮湿,

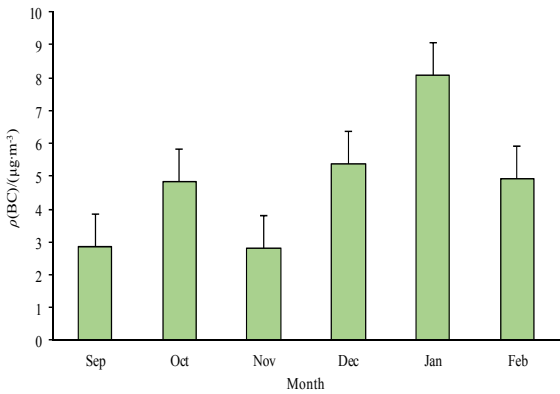


图 3 武汉秋冬季 BC 浓度月变化

Fig. 3 Monthly variations of BC concentration in Wuhan in autumn and winter

经常伴有雾产生,这种条件有利于近地面大气层保持稳定状态,使逆温强度增大,不利于气体污染物在垂直和水平方向的扩散,加重了颗粒物的积聚污染;同时秋季温度较高,空气对流运动增强,降水较多,对颗粒物的湿沉降作用大,因此相较秋季,冬季大气 BC 质量浓度较高。(2)人为因素。由于冬季是供暖季节,武汉虽然没有北方大规模的采暖供暖,但是部分地区仍然存在一定形式的燃烧取暖。另外,冬季也是工厂燃煤的高峰期,对煤炭需求量大,这两方面直接导致武汉冬季空气中的颗粒物大大增加,从而造成 BC 浓度偏高。

2.2 BC 浓度的空间分布差异

将汉阳公园、黄鹤楼景区、东湖风景区等 10 个城区公园绿地样点 BC 质量浓度数据进行处理,得到武汉秋冬季 BC 质量浓度空间分布,结果如图 4 所示。

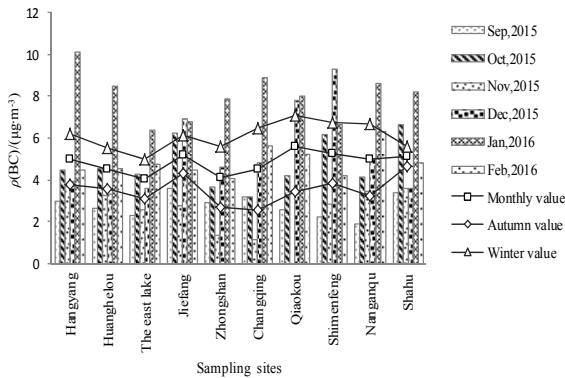


图 4 武汉秋冬季 BC 浓度空间分布

Fig. 4 The spatial distribution of BC concentration in Wuhan in autumn and winter

各采样点在秋冬季和各月份的空间分布上具有明显的一致性,总体上,武汉秋冬季大气 BC 质量

浓度最高值出现在石门峰公园(其中礄口公园 11 月 BC 数据部分缺失, 不纳入比较), 最低出现在东湖风景区, BC 质量浓度大小顺序为: 石门峰公园>解放公园>沙湖公园>汉阳公园>南干渠游园>常青公园>黄鹤楼景区>中山公园>东湖风景区。图 5 所示为各采样点秋冬季 BC 质量浓度与距主干道距离的关系, 计算得到相关系数大致都为-0.3, 说明在局部气候并且区域特征较为一致的大背景下, 导致空间分布差异的原因可能与距离车流较多的主路的相对位置有关, 距离越近, BC 质量浓度越高。同时在采样期间, 石门峰公园附近青王路改造工程正在施工, 运输车辆造成大量扬尘飞起。石门峰公园位于三环线外, 小作坊燃煤和室外秸秆焚烧等无组织排放源较多, 因此空气中扬尘、颗粒物较多, BC 浓度较高。而东湖风景区位于空气质量较好的武昌区, 环境监管较严, 燃煤和秸秆焚烧等现象基本不存在, 同时采样点附近的沿湖大道一直以来都被作为传统的骑行和观光道路, 机动车流量小, 排放尾气少。再加上广阔水体和较高的植被覆盖率, 其下垫面状况有利于空气净化, 因而 BC 质量浓度较低。

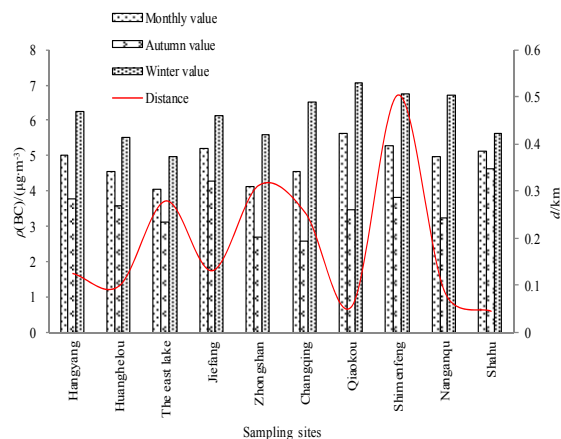


图 5 BC 浓度与距主干道距离的关系
Fig. 5 The relationship with BC concentration and the distance from the main road

2.3 武汉市 BC 浓度及与国内外各大城市的比较

大气成分的本底浓度指能够反映某一尺度区域内处于均匀混合状态的某种成分的大气浓度, 而均匀混合状态仅是一种理想状态, 因此, 一般认为所谓本底浓度也就是不受局部污染源直接影响的大气成分的浓度(赵玉成等, 2008)。采用最大频数法将 11 822 组数据进行处理, 获得了 BC 本底浓度。从图 6 可以看出, 武汉市大气 BC 浓度变化符合对数正态分布特征。最大出现频次所对应的浓度值(即对数正态分布的平均值)反映了该地区最具代表性大气状况下的 BC 浓度, 可以代表该地区 BC

浓度的本底浓度。

如图 6 所示, 最大出现频次所对应的浓度值为 5.45 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。查阅文献发现, 国内外重点针对秋冬季 BC 气溶胶质量浓度的研究并不多, 大多数关于城市 BC 观测研究的时间跨度比较长, 因此将具有一定代表性的城市黑碳观测数据进行整理, 并与武汉秋冬季 BC 本底浓度进行对比分析, 结果如表 2 所示。

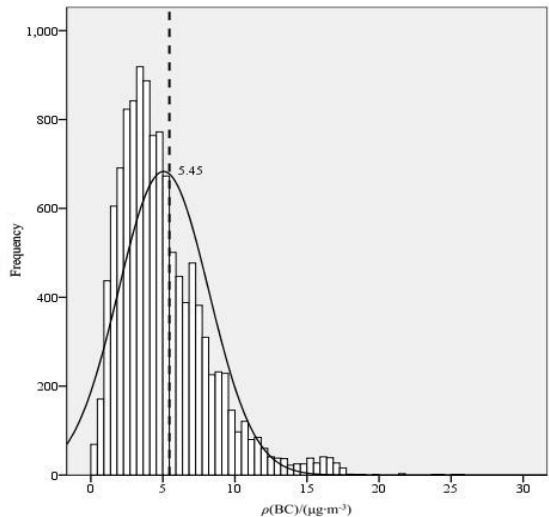


图 6 BC 浓度频数分布
Fig. 6 The frequency distribution of BC concentration

表 2 武汉秋冬季 BC 本底浓度与其它城市的对比

Table 2 Comparisons in BC background concentration between Wuhan and other cities

City	The observation time	$\rho(\text{BC})/(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$	References
Wuhan	2015.9—2016.2	5.45	This research
Urumqi	2009.11—2010.2	12.442±5.407	(刘新春等, 2011) ²⁷⁵⁻²⁷⁶
Tianjin	2010.9—2011.1	2.50	姚青等, 2012
Waliguan	2005.9—2006.2	0.04~1.18	赵玉成等, 2008
Xining	2005.9—2006.2	4.211	赵玉成等, 2008
Chicago	1997.10—1997.11	1.2	Babich et al., 2000
Seoul	1999.11—1999.12	7.0±5.2	Park et al., 2002
Vienna	1998—1999	6.58	Hitzenberger et al., 2001
Xi'an	2003.9—2003.11	10.2±5.8	李杨等, 2005
Shanghai	2006.10—2006.12	5.621±4.370	杨溯等, 2008
Antarctica	1992—1995	0.6×10 ³	Cooke et al., 2000

可以发现, 武汉秋冬季 BC 浓度在所有城市里属于中等水平, 高于西宁、南极、瓦里关等环境较好的偏远地区和天津、芝加哥等经济比较发达的城市, 低于乌鲁木齐、西安等煤炭、燃料消耗较多的城市。

2.4 BC 与 6 类污染物的同源性分析

为了证实 BC 与 SO₂、NO_x、O₃ 之类的反应性

气体是否存在同源性,本文选取 PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂、O₃、CO 等 6 种大气污染物作为研究对象,与 BC 进行对应分析。

2.4.1 相关性分析

将 2015 年 9 月—2016 年 2 月武汉秋冬季 BC 浓度观测值与同期武汉环保局发布的主要污染物数据进行相关性分析(表 3),从相关系数矩阵可以看出:BC 与 PM_{2.5}、CO 呈高度正相关,与 PM₁₀ 呈中度正相关,与 O₃ 呈中度负相关,在显著水平 0.05 上与 SO₂、NO₂ 呈正相关,相关系数分别为 0.885、0.8、0.658、-0.436、0.262、0.259。

武汉市 BC 气溶胶与 PM_{2.5}、PM₁₀、CO 的高相关性说明,BC 与三者具有同源性。主要来自化石燃料的燃烧(如机动车尾气、燃煤)、挥发性有机物(VOCs)等,污染源为工厂燃煤、汽车尾气排放、漆料喷涂行业等。

2.4.2 多元线性回归分析

由于 BC 与 PM_{2.5}、PM₁₀、CO、O₃ 具有较高的相关性,以多个自变量的最优组合预测或估计因变量,比只用 1 个自变量进行预测或估计更有效,更符合实际,因此多元线性回归的实用意义更大。本文以 BC 作为因变量,以 PM_{2.5}、PM₁₀、CO、O₃ 作为自变量,运用 SPSS 多元线性回归分析,探讨它

们之间的线性关系,建立回归方程,得到模型系数,结果如表 4 所示。

方程中的常数项为-1 136.564,偏回归系数 b_1 为 4.216, b_2 为 66.316, b_3 为-7, b_4 为 40.324,经 t 检验, b_1 、 b_2 、 b_3 、 b_4 的概率 P 值分别为 0.226、0.763、0.112、0.211。按照给定的显著性水平 0.10,均具有显著性意义。同时 VIF 值均小于 10,各自变量间的共线性不明显。经过上述检验,BC 与 PM₁₀、CO、O₃ 间关系式可以表达为:

$$Y=-1\,136.564+4.216X_1+66.316X_2-7X_3+40.324X_4 \tag{1}$$

式中, Y 为 BC 的质量浓度; X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 分别为 PM₁₀、CO、O₃、PM_{2.5} 的质量浓度。上式解释了 BC 与多个自变量之间的线性关系,为同源性分析提供统计学依据。

2.5 BC 后向轨迹分析

为了分析大气污染物输送、扩散轨迹,运用 HYSPLIT-4 模型进行后向轨迹分析。

2.5.1 秋冬季节 BC 的轨迹分析

(1) 秋季

如图 7 所示,2015 年秋季,100 m 高度上起源于美国东海岸、北大西洋附近海域的气团向东经过地中海、西亚、巴基斯坦、印度北部、西藏,到达

表 3 BC 与主要污染物之间的相关系数矩阵

Table 3 The correlation coefficient matrix between BC and the main pollutant

Index		BC	PM _{2.5}	PM ₁₀	NO ₂	SO ₂	CO	O ₃
BC	coefficient	1.000	0.885**	0.658**	0.262*	0.259*	0.800**	-0.436*
	Sig.		0.000	0.000	0.037	0.039	0.000	0.000
PM _{2.5}	coefficient		1.000	0.741**	0.255*	0.251*	0.848**	-0.425**
	Sig.			0.000	0.042	0.045	0.000	0.000
PM ₁₀	coefficient			1.000	0.619**	0.540**	0.695	-0.060
	Sig.				0.000	0.000	0.000	0.636
NO ₂	coefficient				1.000	0.657**	0.433**	0.099
	Sig.					0.000	0.000	0.499
SO ₂	coefficient					1.000	0.359**	0.046
	Sig.						0.004	0.721
CO	coefficient						1.000	-0.327**
	Sig.							0.008
O ₃	coefficient							1.000
	Sig.							

* $P<0.05$, ** $P<0.01$

表 4 模型系数统计

Table 4 The statistics of model coefficients

Model	B	Standard error	Standard coefficient	t	Sig.	Tolerance	VIF
constant	-1 136.564	929.928		-1.222	0.226		
PM ₁₀	4.216	13.944	0.030	0.302	0.763	0.361	2.773
CO	66.316	41.105	0.182	1.613	0.112	0.271	3.691
O ₃	-7.000	5.536	-0.090	-1.265	0.211	0.676	1.479
PM _{2.5}	40.324	8.078	0.670	4.992	0.000	0.190	5.250

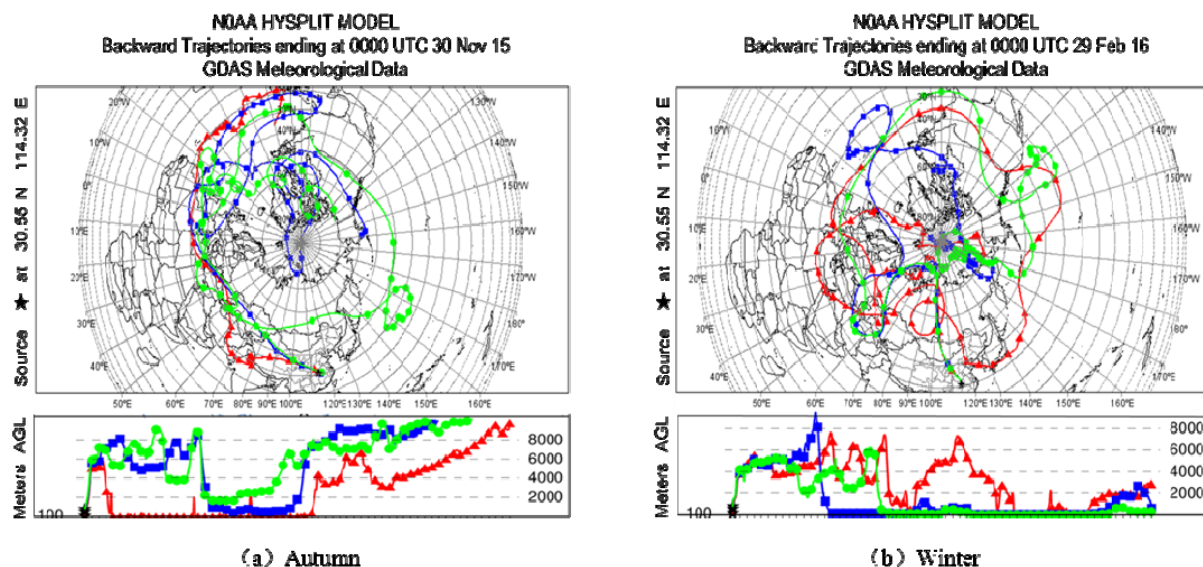


图7 武汉市秋冬季节BC的轨迹分析

Fig. 7 The back-trajectory analysis of BC for Wuhan City in autumn and winter

中国青海地区, 与 500 m 高度来自加拿大东北部、北太平洋附近海域的气团经过复杂运动后一同汇合, 而此时 750 m 高度上起源于加拿大北方、北冰洋附近海域的气团向东穿越北半球大部分区域后, 也运动至此。最后 3 股气流一起沿东南方向推进经过甘肃、陕西、河南等地到达武汉地区。

(2) 冬季

2015 年冬季, 100、500、750 m 高度上的 3 个气团均起源于俄罗斯远东和北冰洋附近地区, 并且各自大概沿着北纬 45° 纬线圈向东运动, 其中在北极地区进行多次不规则的重复运动, 最后一起在俄罗斯北部的北冰洋海域汇合, 然后一路南下, 穿越俄罗斯、蒙古中部、内蒙古、山西、河南等地, 到达武汉地区。在冬季前期, 空气质点的高度均在 2000 m 以下; 到了中期, 100 m 高度的气流的空气质点先上升到 6000 m 以上, 后下降至 2000 m 以下, 其他的两股气流则无明显变化; 而在后期, 3 股气流的空气质点高度均上升至 2000 m 以上, 变化趋势基本一致。

由此可以看出, 2015 年秋冬季武汉地区污染物主要受来自西北和北部气团影响, 经过山西、河南等传统污染较重地区, 是武汉地区大气污染物的重要来源。

2.5.2 两次 BC 污染事件的气团轨迹分析

黑碳来源一般包括局地来源 (城市机动车、居民燃煤和烹饪)、周边源 (如农村秸秆燃烧) 以及本地源, 李杨等 (2005) 在 2003 年秋冬季西安市黑碳气溶胶观测研究中发现: 农村秸秆燃烧等非局地的周边源对西安秋冬季大气中的 BC 贡献份额达

到 1/3 以上, 超过机动车尾气和居民活动等来源的贡献。因此在不讨论本地源和各种气象条件的影响下, 探讨秋冬季武汉地区两次黑碳污染事件的空气气团 72 h 后向轨迹, 以探清外来源的大致路径, 解释污染原因。观测发现, 在 BC 浓度月均值最高的 1 月, 发生了两次较大的 BC 污染事件 (2 日和 17 日), BC 日均值浓度分别达到 12.588 、 $11.581 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。利用 HYSPLIT4 后向轨迹方法模拟 2 日和 17 日在 100、500、1000 m 3 个垂直高度层的空气气团 72 h 回推轨迹, 结果如图 8 所示。

在 2 日和 17 日的 72 h 后向轨迹中, 空气气团均从较高的垂直层向低处集聚, 造成武汉局部的低空污染。不同的是: 2 日的污染源主要来自东部和南部, 途经江西、湖南等地, 气流运动垂直高度小; 17 日的污染源来自北部的河南等传统农业地区, 气流运动垂直高度大, 污染物扩散快, 因而其 BC 浓度比 2 日小。两次 BC 污染事件可能由来自不同方向的污染源导致, 农村秸秆焚烧或许是主因。

3 结论

武汉地区大气 BC 浓度存在明显的时间变化规律。2015 年武汉市秋冬季 BC 气溶胶质量浓度日均值为 $(5.227 \pm 3.12) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 范围为 $1.205 \sim 16.534 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 其中约 61% 分布在 $2 \sim 6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 并且日均值的月份分布存在明显差异, 9 月最低, 1 月最高。由于冬季相较秋季温度低, 对流运动弱, 不利于空气扩散, 加上受冬季工厂燃煤和取暖等因素影响, 故冬季 BC 浓度整体上高于秋季。

在 10 个城区公园绿地空间分布中, 石门峰公园的 BC 浓度最高, 东湖风景区最低, 导致差异的

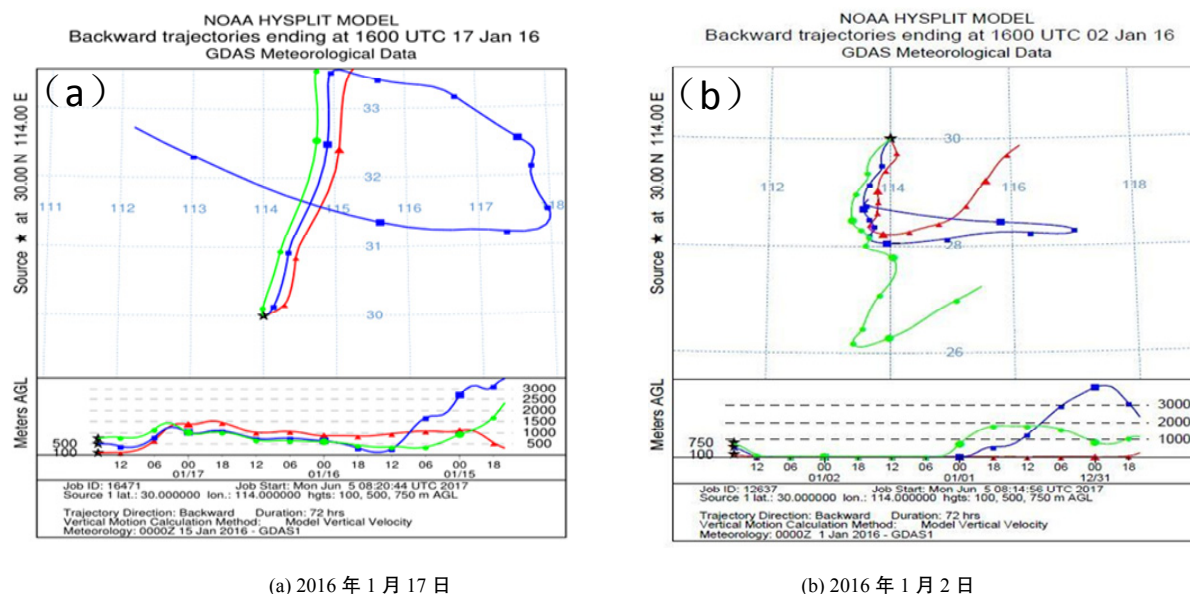


图8 武汉市72 h后向轨迹

Fig. 8 The 72 h back-trajectories for Wuhan City

原因与下垫面状况有关,与离车流较多的主路的距离等都是原因之一。武汉秋冬季BC本底浓度为 $5.45 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,与国内外主要城市相比,高于西宁、南极、瓦里关等偏远地区和天津、芝加哥等经济较发达城市,但低于乌鲁木齐、西安等城市。

BC与 O_3 呈负相关,与 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、CO呈正相关,相关系数分别为-0.436、0.885、0.658、0.8。将BC与 O_3 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、CO进行多元线性回归分析,得到回归方程: $Y=-1136.564+4.216X_1+66.316X_2-7X_3+40.324X_4$ 。

气块后向轨迹与天气形势和季节有关,秋季武汉市大气BC气溶胶主要受来自西北方向空气气团影响,而冬季主要受来自北方的空气气团影响,并且经过山西、河南等传统的北方污染通道,加重了武汉地区污染物积聚。两次BC污染事件可能都受到周边源影响,农民秸秆焚烧可能是主因。

目前,关于中国城市黑碳气溶胶的观测研究不少,大多集中于BC的时间变化特征及其与气象条件、主要污染物之间的关系研究,对BC污染源的定性研究较多,而定量研究较少,因此可以考虑运用轨迹模型、CMAQ等全球大尺度气候模型解释区域BC运动规律,对BC来源进行定量解析。

参考文献:

- BABICH PETER, DAVEY MARK, ALLEN GEORGE, et al. 2000. Method Comparisons for Particulate Nitrate, Elemental Carbon, and $\text{PM}_{2.5}$ Mass in Seven U.S. Cities [J]. Air & Waste Management Association, 50(7): 1095-1105.
- KIM H J, LIU X D, KOBAYASHI T, et al. 2003. Ultrafine carbon black

- particles inhibit human lung fibroblast mediated collagen gel contraction [J]. Cellular and molecular biology, 28(1): 111-121.
- MURPHY D M, CHOW J C, LEIBENSPERGER E M, et al. 2011. Decreases in elemental carbon and fine particle mass in the United States [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 11(10): 4679-4686.
- SHARMA S, LAVOUE D, CACHIER H, et al. 2004. Long-term trends of the black carbon concentrations in the Canadian Arctic [J]. Journal of Geophysical Research, doi: 10.1029/2003JD004331.
- VERMA R L, SAHU L K, KONDO Y, et al. 2010. Temporal variations of black carbon in Guangzhou, China, in summer 2006 [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 10: 6471-6485.
- COOKE W F, JENNINGS S G, SPAIN T G. 1997. Black carbon measurements at Mace Head, 1989 — 1996 [J]. Journal of Geophysical Research, 102: 25339-25346.
- HITZENBERGER R, TOHNO S. 2001. Comparison of Black Carbon (BC) Aerosols in Two Urban Areas-Concentrations and Size Distributions [J]. Atmosphere Environment, 35(12): 2153-2167.
- GONG W, ZHANG T H, ZHU Z M, et al. 2015. Characteristics of PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, and PM_{10} , and Their Relation to Black Carbon in Wuhan, Central China [J]. Atmosphere, 6: 1377-1387.
- PARK S S, KIM Y J, FUNG K C. 2002. $\text{PM}_{2.5}$ Carbon Measurements in Two Urban Areas: Seoul and Kwangju, Korea [J]. Atmospheric Environment, 36(8): 1287-1297.
- 曹军骥, 占长林. 2011. 黑碳在全球气候和环境系统中的作用及其在相关研究中的意义. 地球科学与环境学报, 33(2): 177-183.
- 国家统计局. 2016. 2016 武汉统计年鉴[J]. 北京: 中国统计出版社.
- 李杨, 曹军骥, 张小曳, 等. 2005. 2003 年秋季西安大气中黑碳气溶胶的演化特征及其来源解析[J]. 气候与环境研究, 10(2): 229-237.
- 刘新春, 钟玉婷, 何清, 等. 2011. 2009 年冬季乌鲁木齐大气中黑碳气溶胶观测研究[C]//中国气象学会年会. 2011 年第二十八届中国气象学会年会论文集. 厦门.

- 姜淑娟, 毛节泰, 王美华. 2005. 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, 15(1): 17-22.
- 杨溯, 张武, 韩晶晶, 等. 2008. 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), 44(4): 66-70.
- 姚青, 蔡子颖, 韩素芹, 等. 2012. 天津城区秋冬季黑碳气溶胶观测与分析[J]. 环境化学, 31(3): 324-329.
- 张华, 王立志. 2009. 黑碳气溶胶气候效应的研究进展[J]. 气候变化研究进展, 5(6): 311-317.
- 张宇尧. 2017. 基于气溶胶光学特性对武汉黑碳和有机碳的研究[J]. 测绘科学技术, 5(2): 67-75.
- 赵玉成, 德力格尔, 马元仓, 等. 2008. 2005—2006 年秋冬西宁大气中黑碳气溶胶的浓度变化特征[J]. 城市环境与城市生态, 21(2): 26-29.
- 朱厚玲. 2003. 我国地区黑碳气溶胶时空分布研究[D]. 北京: 中国气象科学研究院.
- 董俊玲, 张仁健, 符淙斌. 2010. 中国地区气溶胶气候效应研究进展[J]. 中国粉体技术, 16(1): 1-4.

The Analysis of Distribution and Source Area of Black Carbon Aerosol in Wuhan City in Autumn and Winter of 2015

HUANG Chao¹, ZHAO Jinhui^{1*}, HE Chao², LIU Yuqing¹, LI Xiaoli¹, LIU Shukai³

1. Faculty of Resources and Environmental Science Hubei University, Wuhan 430062, China;

2. School of Resource and Environmental Sciences, Wuhan 430072, China;

3. Southwest Forestry University National Plateau Wetland Research Center, Kunming 650224, China

Abstract: As an important component of atmospheric aerosol, black carbon has been widely concerned and studied due to its tremendous role in solar radiation forcing and climate change. In order to study the distribution and environmental effect of black carbon aerosol in Wuhan city, based on the data of black carbon aerosol that observed from 10 parks' green lands of Wuhan city and the data of main pollutants from September 2015 to February 2016, the temporal and spatial distribution of BC aerosol during autumn and winter in Wuhan, its relationship with main pollutants, and the backward trajectory simulation of two large BC pollution events, were analyzed mainly by using correlation analysis, multiple linear regression analysis, and HYSPLIT4 model. At the same time, the concentrations of BC in Wuhan were compared with other major cities at home and abroad during autumn and winter. The results mainly included: (1) The daily average concentration of BC was $(5.227 \pm 3.12) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, ranging from 1.205 to $16.534 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. (2) The monthly average concentration of BC had a trend, which was January > December > September > November, and the BC concentration was higher in winter. (3) Shimenfeng Park was highest in ten parks, while East Lake Scenic spot was lowest in the spatial distribution of BC concentration variation, the main reason for this diversities was the close distance from factories that emit pollutants and main road. (4) The BC background concentration of Wuhan in autumn and winter was $5.45 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ which was calculated by the maximum frequency method. It had a difference obviously with Xining, Chicago, Urumqi, etc. (5) BC had a negative correlation with O_3 and positively correlated with $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} , CO, the correlation coefficients respectively were -0.436, 0.885, 0.658, and 0.8. By using multiple linear regression model, its regression equation came as follow: $Y = -1136.564 + 4.216X_1 + 66.316X_2 - 7X_3 + 40.324X_4$. And (6) the two large BC pollution events were analyzed by back-trajectory model. It indicated that the two sources of pollution were different. And the trajectory analysis of different seasons also showed that Wuhan was affected by different air masses in the autumn and winter. The research results can provide data foundation for black carbon aerosol observation in Wuhan city, and improve the systematic observation and research of black carbon aerosol in China.

Key words: black carbon aerosol; the temporal and spatial distribution; correlation analysis; Wuhan; multiple linear regression analysis; trajectory model