

2013 年 12 月石家庄一次霾天气过程中的黑炭浓度特征

胡明玉^{1,2}, 秦凯^{1,2*}, 白杨^{1,2}, 王润峰³, 周阳³ (1. 中国矿业大学国土环境与灾害观测国家测绘地理信息局重点实验室, 江苏徐州 221116; 2. 中国矿业大学环境与测绘学院, 江苏徐州 221116; 3. 河北省第二测绘院, 河北石家庄 050031)

摘要: 2013 年 12 月 5 日~27 日石家庄地区连续出现霾天气, 大气日均能见度为 0.2~8km, 其中大约 89.53% 的时间大气能见度不足 5km. 分析 12 月 10~27 日期间的黑炭固定观测数据表明: 1) 黑炭浓度均值为 39.84 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 日变化具有明显的双峰结构, 第 1 个峰值在上午 9:00 左右, 第 2 个峰值在夜晚 21:00~24:00; 2) 黑炭浓度小时均值与大气能见度小时均值之间呈负相关关系, 当黑炭浓度大于固定观测期间的均值时, 重度霾发生的概率为 97.78%. 此外, 通过在车辆上安装黑炭分析仪和 GPS 接收机对石家庄市主干道进行了多天的移动观测, 结果表明: 黑炭浓度与交通密度和街道特点(道路类型、交通密度)直接相关; 市区二环的黑炭浓度较高, 大约是二环内黑炭浓度均值的 1.48 倍; 市中心区的黑炭浓度相对较低, 且呈现明显的东西-南北向差异性.

关键词: 霾; 石家庄; 黑炭气溶胶; 移动观测

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2015)09-2585-09

Characteristics of black carbon concentration in Shijiazhuang under haze weather conditions during December, 2013. HU Ming-yu^{1,2}, QIN Kai^{1,2*}, BAI Yang¹, WANG Run-feng³, ZHOU Yang³ (1. National Administration of Surveying, Mapping and Geoinformation Key Laboratory of Land Environment and Disaster Monitoring, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. School of Environment Science and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 3. The 2nd Institute of Surveying and Mapping of Hebei Province, Shijiazhuang 050031, China). *China Environmental Science*, 2015, 35(9): 2585~2593

Abstract: A prolonged heavy haze event occurred in Shijiazhuang, Hebei province, China, from December 5th to 27th, 2013. The visibilities variates from 0.2 to 8 km and there are approximately 89.53% days with visibility lower 5 km during this period. The aethalometer for measuring black carbon was deployed in the 2nd Institute of Surveying and Mapping of Hebei Province, and the data showed that, 1) the averaged black carbon mass concentration (C_{BC}) was 39.84 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; 2) the diurnal variation presented a bimodal distribution with the first peak at 01:00 (UTC Time) and the second peak at 13:00~16:00; (UTC Time) 3) a negative correlation can be observed between hourly averaged C_{BC} and hourly averaged visibility; 4) the probability of occurrence of serve haze hours was 97.78% when the C_{BC} was higher than the averaged C_{BC} . In addition to the fixed station measurements, mobile measurements were conducted on the main roads in Shijiazhuang downtown for several days, using a car which was equipped with an aethalometer and a GPS receiver. The results showed that the C_{BC} was obviously related to the traffic density and street characteristics (road type and traffic density). The C_{BC} over the 2nd ring road was 1.48 times higher than that within the 2nd ring road. The C_{BC} over downtown areas was lower and presented a significance difference between south, north direction.

Key words: haze; Shijiazhuang; black carbon aerosol; mobile measurement

黑炭(BC)气溶胶是大气气溶胶的重要组成部分, 主要由含碳物质的不完全燃烧造成, 例如汽车尾气、燃煤发电等^[1]. 黑炭气溶胶粒子对人体健康产生极大危害, 因其具有很强的吸附性, 表面能够吸附其它污染物(如多环芳烃类、重金属等), 这些污染物粒子可以通过呼吸作用进入人体, 从

而引起呼吸系统疾病、心血管疾病、癌症等^[2-4]. 霾天气下, BC 气溶胶在各种大气的化学、光化学反应、异构反应以及大气颗粒物的转化过程中起

收稿日期: 2015-01-08

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助(2014QNA32)

* 责任作者, 副教授, qinkai20071014@163.com

着重要的作用^[5-6]。此外,黑炭气溶胶对太阳辐射有强烈的吸收作用,其浓度变化将改变大气浑浊度、能见度。因此,黑炭气溶胶相关研究引起了国内外学者的广泛关注^[7-14]。多数研究集中在通过一个或几个固定站点的长期观测分析比较 BC 浓度变化特征及理化特性^[12-14]。例如,Wang 等^[12]、Aruna 等^[13]、Huseyin 等^[14]均对 BC 气溶胶进行了长期连续观测,发现 BC 浓度变化具有明显的时序特性即,日特征和季节特征等。然而,仅仅依靠一个或几个固定站点无法全面获取城市街道 BC 浓度的详细空间分布情况。近年来,一些学者利用移动平台对影响城市环境与居民健康的颗粒污染物进行了实时动态观测^[15-23]。例如,Peters 等^[15]对比利时安特卫普地区的空气质量进行移动制图,发现不同地点、同一日内以及不同日间的超细颗粒物的浓度差异性较大,而 PM₁₀ 浓度的时间差异性要大于空间差异性;在一个移动平台上整合多种观测技术来描述超细颗粒物以及相关污染物的分布特征,并且应用该移动平台研究洛杉矶地区超细颗粒物的浓度及其粒径大小的分布;Gustavo 等^[22]在 2007 年冬季观测了新西兰亚历山德拉镇的 PM₁₀、PM_{2.5}、PM₁ 和 BC 的浓度,并对这些变量进行移动制图,为复杂城市环境观测中采用移动平台快速获取高时间分辨率的空气质量数据提供了重要参考。本文作者所在研究小组开展了徐州市区主干道路 BC 浓度移动观测实验,取得了较好的效果^[23]。

作者在 2013 年冬季连续霾天气期间使用黑炭分析仪在河北省第二测绘院进行了 18d 的连续固定观测,并使用车载黑炭观测系统对石家庄市主干道进行了为期 4d 的移动观测,基于此分析了冬季霾天气下石家庄市 BC 浓度的时空变化特征。

1 研究方法

1.1 研究区域 石家庄地处河北省中南部,属环渤海湾经济区,位于北纬 37°27'~38°47',东经 113°30'~115°20'之间,西依太行山脉,东、南、北均为辽阔的华北平原,总面积 15848km²,总人口 845 万。石家庄属温带大陆性季风气候,冬季受西伯利亚冷高压的影响,盛行西北风,气候寒冷干燥,

降水少。此外,石家庄交通发达,京广、石太、石德铁路和京深、石港、石太高速公路交汇于此。截至 2012 年底,市区(二环内)机动车保有量为 593745 辆(河北省公安交通网:<http://www.hbgajg.com/news/14/49/9836.html>)。这些特定的地理、气候以及交通因素,使石家庄的大气污染治理面临严峻的挑战。

1.2 测试方法 本研究中采用 Magee 公司生产的 AE-42 便携式黑炭仪,该仪器利用黑炭气溶胶对光的吸收衰减特性,通过连续测量透过滤膜的光衰减的变化计算出黑炭的浓度,其 1min 测量精度达到 0.1μg/m³。本实验为调查市区主干道 BC 空间特征,开展了移动观测,为了研究霾天的 BC 时间变化,开展了固定观测。移动观测选取的市区主干道包括:二环,以及二环内南北走向的友谊大街、中华大街、建设大街、建华大街、谈固大街,二环内东西走向的和平路、中山路、裕华路、槐安路。于 12 月 5~7 日及 9 日进行了 4d 的观测。采用 AE-42 便携式黑炭仪和 GPS 组合成移动车载平台,AE-42 便携式黑炭仪观测 BC 气溶胶质量浓度,时间分辨率为 1s。同时,利用手持 GPS 接收机同步获取研究区域的实时位置信息,采样间隔也调整为 1s。移动观测中车辆尽量保持匀速行驶以避免因车速不同而造成的风速不同对于观测结果的影响。固定观测中也采用 AE-42 便携式黑炭仪,时间分辨率为 5min。从 12 月 10~27 日在河北省第二测绘院进行了 18d 的观测。河北省第二测绘院地处东岗路与谈固西街交叉处,该处无电厂、工厂等污染企业,BC 的主要贡献源为交通排放,故该处能够很好的反应由于交通情况而造成的石家庄地区 BC 浓度的时间分布特征。此外,还从 WeatherSpark 网站下载了 2013 年 12 月 5~27 日石家庄市区的能见度、相对湿度、风速等气象数据(<https://weatherspark.com/>),从石家庄市环境监测中心获取了 PM_{2.5} 数据。根据 2010 年 6 月 1 日起新颁布的《中华人民共和国气象标准》^[24](QX/T113-2010)霾观测的判识条件,并结合相关学者研究结果,本文中定义:当研究时段 1h 内平均能见度小于 10.0km,平均相对湿度小于 95%,并排除该时段内出现降水、沙尘暴、扬沙、

扬尘、烟幕、吹雪、雪暴等天气现象,则定义该时段为霾时;平均相对湿度小于 80%的霾定义为干霾,平均相对湿度 80%~95%的霾则定义为湿霾^[25-27].霾的预报等级如表 1 所示.

表 1 霾预报等级
Table 1 Haze forecast level

能见度(km)	等级
$5.0 \leq V < 10.0$	轻微
$3.0 \leq V < 5.0$	轻度
$2.0 \leq V < 3.0$	中度
$V < 2.0$	重度

2 结果与讨论

2.1 固定观测

2.1.1 霾日统计 本文首先对固定观测期间霾日发生情况进行了统计分析,霾日判别采用如下标准:日均能见度小于 10km 且日均相对湿度小于 90%

为霾日^[25-26,28-30],统计结果表明(图 1):观测期间除 12 月 26 日未能获得能见度数据外,其余 16d 均为霾日.其中重度、中度、轻度、轻微霾日分别为 10,1,3,2d,分别占固定观测期总天数的 58.82%,5.88%,17.65%,11.76%,据此,可以看出,石家庄地区受霾天气影响十分严重,特别是重度霾的影响.

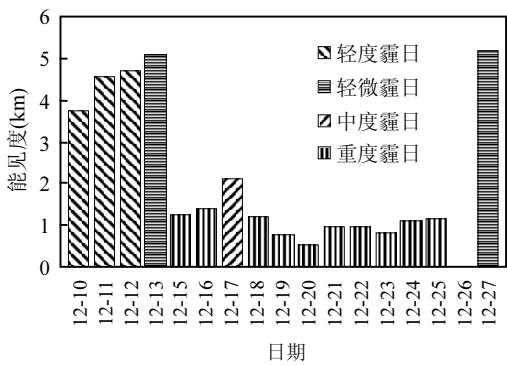


图 1 黑炭固定观测期间能见度日均值
Fig.1 Daily average visibility by fixed observation

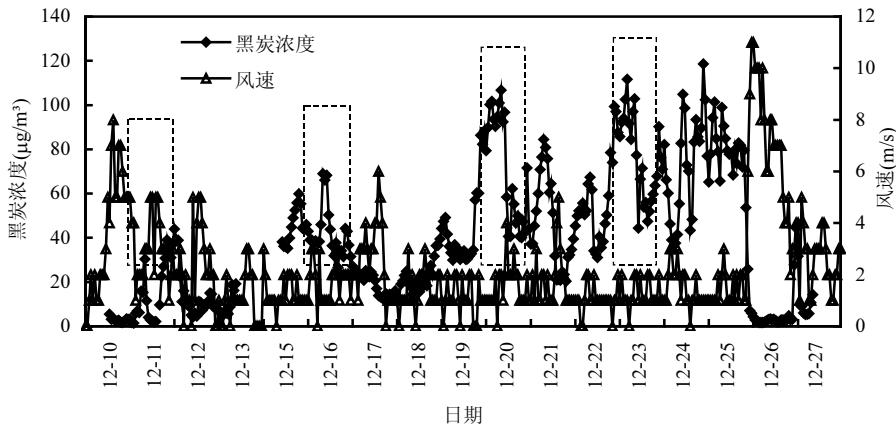
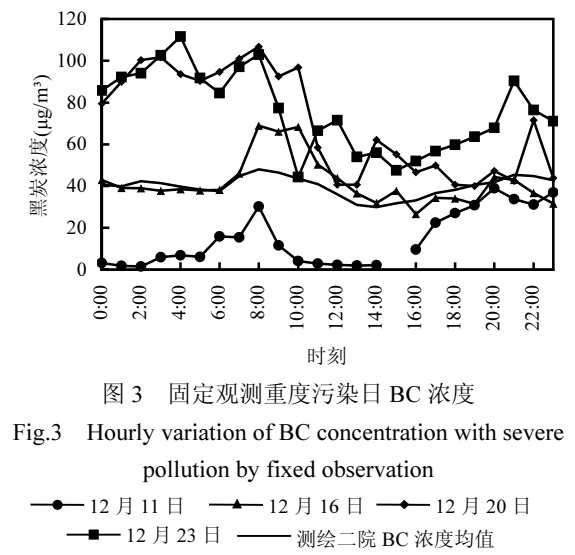


图 2 固定观测 BC 浓度和风速逐时变化
Fig.2 Hourly variation of BC concentration and wind speed by fixed observation

2.1.2 黑炭固定观测 固定观测期间中共获取了 17d 的有效 BC 数据,将原始数据处理为每小时 BC 浓度均值.从图 2 可以看出:在二院观测的 BC 浓度的最高值为 $120\mu\text{g}/\text{m}^3$; 12 月 16 日、20 日、23 日、24 日和 25 日这几天的 BC 浓度普遍偏高,且在 24 日夜晩与 25 日凌晨之间出现了最高值,出现这一现象的主要原因应该是:从 24 日下午 18:00 至次日凌晨 4:00 连续 11h 风速持续在 $1\text{m}/\text{s}$,导致污染物在水平方向得不到正常的扩散,BC 浓

度明显增高;12 月 25 日晚间 21:00 至次日凌晨黑炭物质浓度骤降,26 日全天 BC 浓度为观测期间最低,12 月 25 日晚间 21:00 风速骤升至 $6\text{m}/\text{s}$ 至次日凌晨升至 $11\text{m}/\text{s}$ (强风)且在 26 日全天风速都相对较高,由此可见,大风等气象条件对于 BC 浓度有显著的影响;12 月 11 日、12 月 16 日、12 月 20 日、12 月 23~25 日的 BC 浓度均为观测期 BC 浓度高峰值日,属于重度污染.为进一步研究重度污染日 BC 浓度在一天内的规律性,由于 12 月 24 日

和 12 月 25 日圣诞节两天居民外出活动增多,故本文将其排除,选取 12 月 11 日、12 月 16 日、12 月 20 日、12 月 23 日 4 个重度污染日进一步研究,其 BC 浓度逐小时日变化如图 3 所示。



从图 3 中可以看出,BC 浓度日变化具有较明显的双峰结构特征,即上午 9:00 与晚上 21:00~24:00 分别出现一个峰值。人类活动主要集中在白天,而夜间较少,因此,排放主要集中在从清晨到晚间的时段。受太阳辐射控制的垂直湍流扩散在正午~下午时段最旺盛,而夜间大气层常处于稳定状态,湍流扩散能力弱。受垂直湍流扩散和人类活动 2 个控制因素的共同作用结果,造成在清晨和晚间 BC 浓度达到峰值;在正午及午后,由于太阳辐射较强、热对流旺盛,大气湍流扩散能力增强,BC 比较容易随大气对流扩散出去,因此出现 BC 浓度低值;在夜间人类活动相对减弱,排放减少,但是扩散能力也明显减弱,因此,BC 浓度相对稳定在较高水平。本研究所观测到的重度污染日 BC 浓度在一天中的走势与众多研究者的研究结果吻合较好^[11-12,22,31-33]。张磊等^[31]对兰州远郊区黑炭气溶胶浓度特征进行分析发现,黑炭浓度日变化具有明显的双峰结构,最大值出现在 09:00,最小值出现在 17:00;WANG 等^[12]对北京城市黑炭气溶胶浓度研究发现,在上午 7:00~10:00 以及晚上 20:00~24:00 黑炭浓度较高,在下

午 13:00~16:00 浓度较低;王扬锋等^[33]对沈阳地区的黑炭浓度特征进行分析也发现类似的双峰特征,最高值一般出现在 7:00~9:00 和 18:00~20:00,低值出现在 2:00~4:00 和 13:00~15:00。这些研究说明本文的观测结果符合常规观测。

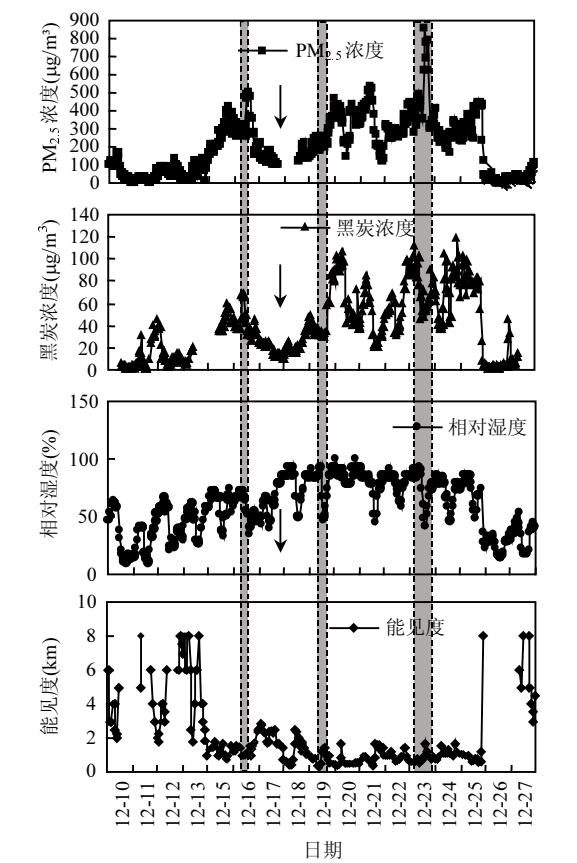


图 4 相对湿度、BC 浓度、PM_{2.5}与能见度之间的对比
Fig.4 Comparison between the RH、BC concentration、PM_{2.5} and visibility

2.1.3 黑炭与霾的相关关系 在城市地区气溶胶的消光系数贡献占总消光系数的 80%以上^[34],其中黑炭气溶胶对可见光有很强的吸收作用,它对可见光的吸收比其他气溶胶高出 2 到 3 倍,因此,黑炭气溶胶能够大大的降低能见度并且影响霾的产生^[35-36]。统计结果显示:石家庄地区 PM_{2.5} 中的 BC 物质浓度比例高达 21.02%,远远大于嘉兴(7.1%)^[37]、广州(8.1%)、深圳(10.5%)及珠海(8.7%)^[38]。12 月 10~27 日期间的能见度逐小时均值如图 4 所示。观测期共 408h,能获取的能见度数

据为 335h,其中 333h 为霾时,同时轻微、轻度、中度、重度霾对于整个霾时的贡献为 73.27%, 8.4%, 7.5%,10.81%,图 4 结果显示,逐小时的能见度与 BC 浓度、PM_{2.5} 浓度以及相对湿度之间均呈现负相关关系,BC 与 PM_{2.5} 的变化规律基本一致,但能见度与 BC 的负相关性要高于 PM_{2.5},这表明颗粒物中 BC 对于能见度的变化具有较大的影响.

统计结果显示:当 BC 浓度大于固定观测期间的平均值 39.84μg/m³时,重度霾发生的概率为 97.78%.运用 SPSS 软件对能见度小时均值与黑炭浓度小时均值进行回归发现,二者之间的相关系数高达 0.88,两者很好的满足如公式 1 所示的倒数关系:

$$V_{\text{能见度}}=44.067/C_{\text{黑炭}}+0.184,R^2=0.77 \quad (1)$$

其中: $V_{\text{能见度}}$ 为大气能见度(km), $C_{\text{黑炭}}$ 为黑炭质量浓度(μg/m³), R 为相关系数.

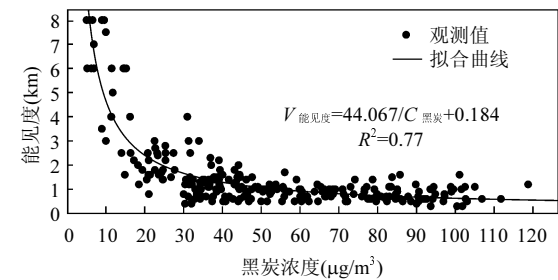


图 5 能见度与 BC 浓度的关系

Fig.5 Relationship between visibility and BC

重度、中度、轻度、轻微霾日能见度的平均

值分别是 1.02,2.12,4.32,5.14km,其对应的黑炭浓度均值分别为 54.55,19.21,10.65,10.43μg/m³,即随着能见度的降低,黑炭浓度迅速升高.为了更加详细的说明黑炭浓度与发生霾的等级情况之间的关系,如表 2 将黑炭浓度划分为 4 个范围,统计分析各个范围中不同等级霾发生的概率.表 2 显示,随着黑炭浓度的增大发生重度霾现象的概率越来越大,当 $C_{\text{黑炭}} < 10.43 \mu\text{g/m}^3$ 时主要是轻微或轻度霾,当 $C_{\text{黑炭}} \geq 54.55 \mu\text{g/m}^3$ 时基本上都是重度霾.

表 2 不同黑炭浓度范围下各等级霾发生概率(%)

Table 2 Hour percentage of haze of the different intensities for different ranges of C_{BC} (%)

霾等级	黑炭质量浓度(μg/m³)			
	$C_{\text{黑炭}} < 10.43$	$10.43 \leq C_{\text{黑炭}} < 19.21$	$19.21 \leq C_{\text{黑炭}} < 54.55$	$54.55 \leq C_{\text{黑炭}}$
轻微霾天	84.62	20.69	1.48	0
轻度霾天	15.38	10.34	2.96	0
中度霾天	0	24.14	12.95	0
重度霾天	0	44.83	82.96	98.04

2.2 移动观测

2.2.1 移动观测期间天气概况 12 月 5~7 日及 9 日移动观测期间分别为轻度、中度、重度、轻微霾天,其对应的日均能见度为 4.5,2.02,0.61,7.4km,日均 PM_{2.5} 为 116.5,199.74,387.91,27.58μg/m³,平均风速为 2.38,1.42,1.21,4.75m/s.

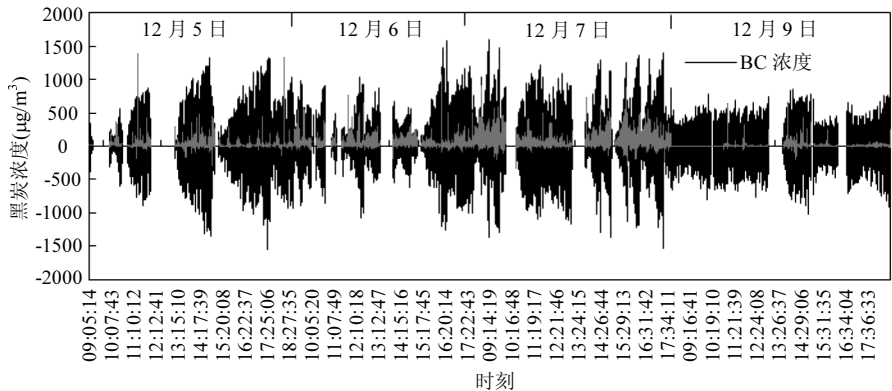


图 6 BC 浓度 ONA 算法降噪结果

Fig.6 Post-processed results of BC data using ONA approach

2.2.2 时间序列降噪处理 由于利用便携式黑炭仪 AE-42 获取的高时间分辨率移动测量值,在时间分辨率较高或 BC 浓度较低的情况下会受到光学和电子噪声的影响,可导致在某一时刻产

生一个错误的低值随之产生一个错误的高值,这里采用 Optimized Noise-reduction Averaging (ONA)算法^[39]对实时量测的黑炭气溶胶浓度值进行系统噪声的去除.12月5~7日和9日的BC移动测量值的ONA降噪结果如图6所示,可以看出降噪前的黑炭浓度上下波动比较大,ONA算法能够有效地去除原始BC中出现的负值.

2.2.3 黑炭气溶胶分布特征及影响因素 降噪后,取每个平均窗口内中间时刻的BC浓度值(中值),然后将每个中值与同时刻获取的GPS经纬度信息一一对应,并利用ArcGIS软件将多天同一地理位置上的观测点进行均值处理,对石家庄市主干道路BC气溶胶的空间分布进行移动制图,并得到相应的时空分布结果,该观测期间除了12月9日上午11:00~13:00风速为7~8m/s,其余观测时间风速均 $\leq 4\text{m/s}$ 且87%以上的观测时间

风速 $\leq 3\text{m/s}$,64%以上的观测时间风速 $\leq 2\text{m/s}$,从固定观测(图2)可以看出4m/s以上的风速对于黑炭浓度变化的影响较为显著,故除12月9日上午其余时间由于风速这一气象因素对于空间分布结果造成的影响相对较低.

从石家庄空间分布(图7)可以看出:二环的BC浓度明显高于二环内的主干道,原因主要是二环外环城道路没有对大型卡车实行限行政策,路面行驶的柴油发动机货车较多,造成碳排放量的明显增加;而二环以内载客汽车(公共交通工具及长途客运车辆除外)及轻型、微型货车,在中华大街(槐安路至和平路)、平安大街(槐安路至和平路)、建设大街(槐安路至和平路)、中山路(友谊大街至体育大街)、裕华路(东二环至苑东街)等路段限制通行,排放量相对较少,从而使得市内主干道BC浓度低于二环路.

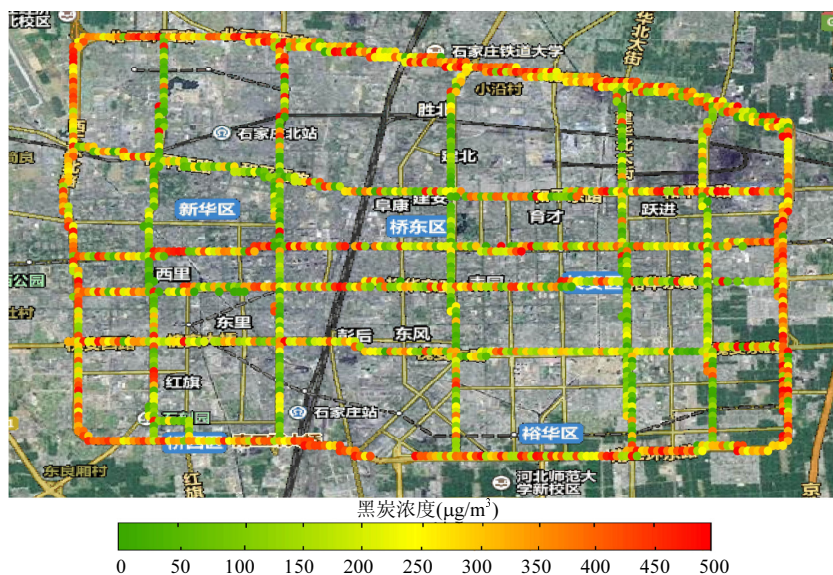


图7 石家庄市移动BC测量值的空间分布

Fig.7 Spatial maps of mobile BC measurements in Shijiazhuang

BC浓度具有明显的东西-南北向差异性,即和平路等4条东西向道路的BC浓度高于谈固大街等5条南北向道路.南北向的观测时间大致都在10:00~13:00,东西向的观测时间大致都在15:00~18:00,虽然12月9日上午11:00~13:00风速为7~8m/s对于BC浓度的影响较为显著,但是

12月7日全天风速 $\leq 3\text{m/s}$ 其时间序列(图8)显示,东西向的浓度显著高于南北向,并且由固定观测分析可知:10:00~13:00的黑炭浓度略高于15:00~18:00,故气象因素以及时间差异性对于这一空间差异性的影响较小.因此,可能的原因是东西向的商业网点较南北向稍多,人们东西向出行

的频率较高。

二环与多条主干道的交叉路口处通常是 BC 浓度高值区,因为这些路口连接京珠高速、张石高速、黄石高速、西柏坡高速、省道等重要外联交通干道;二环拐弯处、西二环、南二环与金利街交叉路口等处 BC 浓度异常高,经实地调查发现这些路段附近有许多工厂、物流中心、大量汽配店、汽修厂。

分析时间序列(图 8)可知:4d 的移动观测中,BC 浓度最高值均大于 $400\mu\text{g}/\text{m}^3$,远远大于固定观测;12 月 7 日(重度霾天)的 BC 浓度普遍较高,12 月 9 日(轻微霾天)的 BC 浓度普遍偏低,这一现象再次表明 BC 浓度与能见度、风速等关系较为显著;每天上午 9:00 左右出现一个峰值,这一规律与固定观测的每天上午出现一个峰值的现象吻合较好,可能与人们的出行习惯和混合层高度的变化有关。为了进一步定量分析图 7 中对应的各路段和交叉路口之间的 BC 浓度关系,提取出各路段 BC 浓度均值以及交叉路口与其所属路段比值并进行统计分析,结果如表 3、表 4 所示。

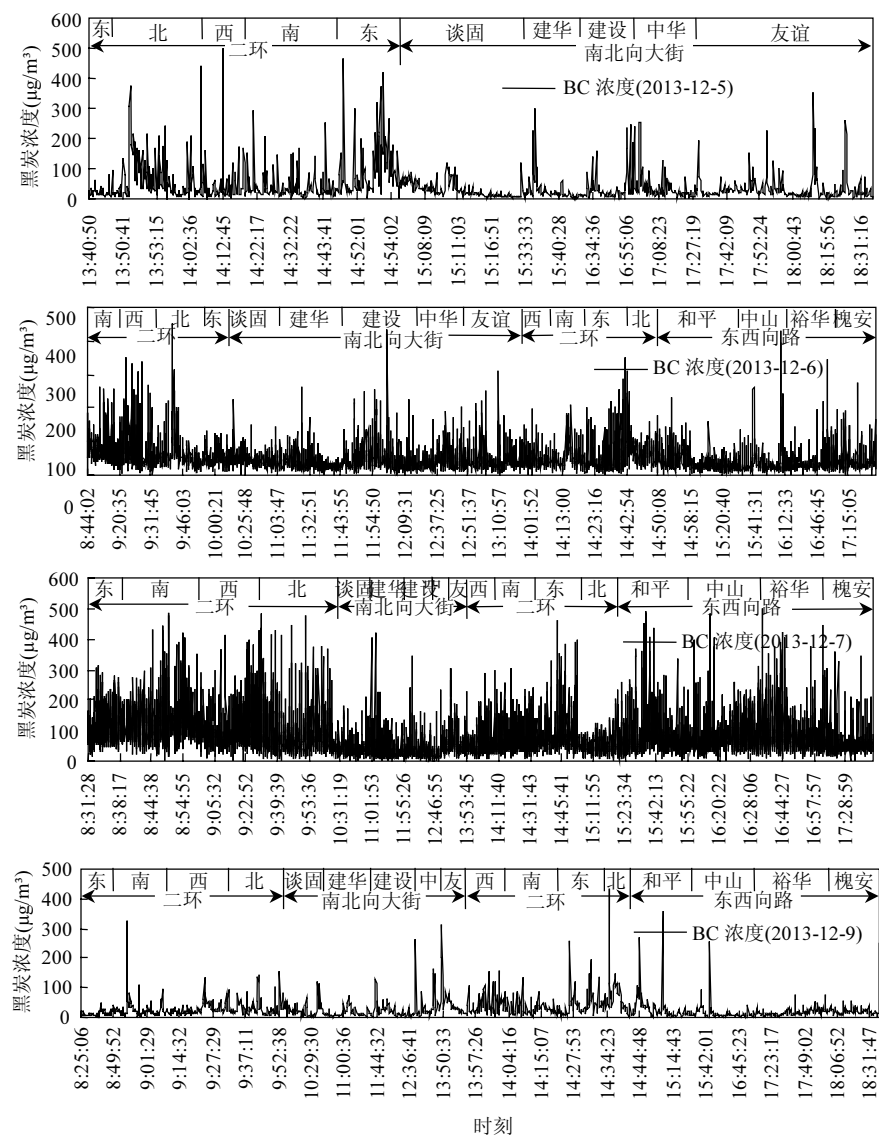


图 8 石家庄市黑炭气溶胶移动观测的时间分布

Fig.8 Temporal maps of mobile BC measurements in Shijiazhuang

从表3与表4分析可知:二环路的BC浓度均值大约是二环内主干道浓度均值的1.48倍;二环的东南方向高于西北方向,这主要是因为石家庄冬季受西伯利亚冷高压的影响,盛行西北风;二环路 with 内环多条主干道的交叉路口处BC浓度较高,约是所有被观测主干道BC浓度的2.01倍;二环路十字路口的BC浓度均值是二环路(除二环路十字路口的BC浓度均值是二环路(除十字路口)的1.80倍,而二环内的十字路口浓度均值是二环内浓度均值(除十字路口)的2.05倍.原因是二环内受工业的影响较小,BC浓度主要与交通量有关,所以其比值与理论上的十字路口与主干道浓度均值的比值(大约为2倍)更接近,而二环上工厂等交通外因素对BC浓度的贡献率相对较高.

表 3 石家庄市市区主干道各路段 BC 浓度
Table 3 Concentration of BC of urban main road in Shijiazhuang

路段	浓度均值($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	路段	浓度均值($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
东二环	81.33	谈固大街	41.32
北二环	72.53	建华大街	38.77
西二环	69.60	胜利大街	46.03
南二环	84.17	中华大街	38.84
和平路	56.84	友谊大街	38.91
中山路	70.25	二环上	76.99
裕华路	63.00	四条路	61.90
槐安路	49.16	五条街	40.51

表 4 交叉路口与其所属路段 BC 比值
Table 4 The ratio of BC of intersection and the stretch

比值	
二环上(路口)/二环(除路口)	1.80
二环内(路口)/二环内(除路口)	2.05
交叉路口/主干道	2.00

2.3 讨论

固定观测可以提供BC浓度在霾天气过程中的整体时间变化特征,移动观测可以便捷地获取城市内部BC浓度的空间差异特征,两者结合可作为我国城市霾天气情况下BC浓度特征综合观测的有效手段.论文不足在于,移动观测中未能获取交通流量、车辆类型、大气成分等数据,

且观测时间有限,结果可能存在一定的偶然性.后续研究中,将根据不同的天气条件设计多个观测实验,并改进数据分析方法以便进一步降低时间变化对于移动观测的影响,更详细准确地揭示冬季霾天气下石家庄市BC气溶胶的浓度特征及其空间分布差异.

3 结论

- 3.1 石家庄市区的BC浓度的日变化具有明显的双峰现象,第1个峰值在上午9:00左右,第2个峰值在夜晚.
- 3.2 整个观测期间67.93%的时间天气处于重度霾的状态.
- 3.3 BC浓度与大气能见度之间呈现明显的负相关关系.
- 3.4 不受交通管制的二环外,BC浓度明显高于受交通管制二环内(前者是后者的1.48倍).

参考文献:

[1] 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.

[2] Janssen N A H, Hoek G, Simic-Lawson M, et al. Black carbon as an additional indicator of the adverse health effects of airborne particles compared with PM₁₀ and PM_{2.5} [J]. Environmental Health Perspectives, 2011,119(12):1691-1699.

[3] Galdos M, Cavalett O, Seabra J E A, et al. Trends in global warming and human health impacts related to Brazilian sugarcane ethanol production considering black carbon emissions [J]. Applied Energy, 2013,104:576-582.

[4] WHO, 2012. Health Effects of Black Carbon [EB/OL]. <http://www.euro.who.int>, ISBN:9789289002653, Copenhagen, Denmark.

[5] Chughtai A R, Brooks M E, Smith D M. Hydration of black carbon [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1996, 101(D14):19505-19514.

[6] Decesari S, Facchini M C, Matta E, et al. Water soluble organic compounds formed by oxidation of soot [J]. Atmospheric Environment, 2002,36(11):1827-1832.

[7] 许黎,王亚强,陈振林,等.黑碳气溶胶研究进展 I :排放、清除和浓度 [J]. 地球科学进展, 2006,21(4):352-359.

[8] Babu S S, Moorthy K K. Aerosol black carbon over a tropical coastal station in India [J]. Geophysical Research Letters, 2002,29(23):2098,doi:10.1029/2002GL015662.

[9] 孙天乐,何凌燕,曾立武,等.2008 北京残奥会期间大气黑碳气溶

- 胶污染特征 [J]. 中国环境科学, 2012, 32(12): 2123–2127.
- [10] Saha A, Desplan S. Seasonal and diurnal variations of black carbon aerosols over a Mediterranean coastal zone [J]. *Atmospheric Research*, 2009, 92(1): 27–41.
- [11] Verma S, Pani S K, Bhanja S N. Sources and radiative effects of wintertime black carbon aerosols in an urban atmosphere in east India [J]. *Chemosphere*, 2013, 90: 260–269.
- [12] Wang G C, Bai J H, Kong Q X, et al. Black Carbon Particles in the Urban Atmosphere in Beijing [J]. *Advances in atmospheric sciences*, 2005, 22(5): 640–646.
- [13] Aruna K, Lakshmi Kumar T V, Narayana Rao D, et al. Black carbon aerosols in a tropical semi-urban coastal environment: Effects of boundary layer dynamics and long range transport [J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2013, 104: 116–125.
- [14] Ozdemir H, Pozzoli L, Kindap T, et al. Spatial and temporal analysis of black carbon aerosols in Istanbul megacity [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 104: 451–458.
- [15] Peters J, Theunis J, Poppel M V, et al. Monitoring PM₁₀ and ultrafine particles in urban environments using mobile measurements [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2013, 13: 509–522.
- [16] Poppel M V, Peters J, Blenxi N. Methodology for setup and data processing of mobile air quality measurements to assess the spatial variability of concentrations in urban environments [J]. *Environmental Pollution*, 2013, 183: 224–233.
- [17] Dons E, Panis L I, Poppel M V, et al. Personal exposure to Black Carbon in transport microenvironments [J]. *Atmospheric Environment*, 2012, 55: 392–398.
- [18] Dons E, Temmerman P, Poppel M V, et al. Street characteristics and traffic factors determining road users' exposure to black carbon [J]. *Science of the Total Environment*, 2013, 447: 72–79.
- [19] Westerdahl D, Fruin S, Sax T, et al. Mobile platform measurements of ultrafine particles and associated pollutant concentrations on freeways and residential streets in Los Angeles [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, 39(20): 3597–3610.
- [20] Fruin S A, Winer A M, Rhodes C E. Black carbon concentrations in California vehicles and estimation of in-vehicle diesel exhaust particulate matter exposures [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, 38(25): 4123–4133.
- [21] Oliveira C, Pio C, Caseiro A, et al. Road traffic impact on urban atmospheric aerosol loading at Oporto, Portugal [J]. *Atmospheric Environment*, 2010, 44: 3147–3158.
- [22] Olivares G, Smith J, Bluett J, et al. Spatial variation and characterisation of ambient aerosols from domestic solid fuel burning in a New Zealand town [J]. *Chemical Engineering Transactions*, 2008, 16: 201–206.
- [23] 白 杨, 秦 凯, 吴立新, 等. 徐州市区主干道路黑炭气溶胶浓度移动观测实验 [J]. *地理与地理信息科学*, 2014, 1(30): 45–49.
- [24] QX/T 113–2010 中华人民共和国气象行业标准, 霾的观测和预报等级 [S].
- [25] 吴 兑, 陈慧忠, 吴 蒙, 等. 三种霾日统计方法的比较分析—以环首都圈京津冀晋为例 [J]. *中国环境科学*, 2014, 34(3): 545–554.
- [26] 吴 兑. 关于霾与雾的区别和灰霾天气预警的讨论 [J]. *气象*, 2005, 31(4): 3–7.
- [27] 王 苑, 耿福海, 陈勇航, 等. 基于微脉冲激光雷达的上海浦东地区不同强度霾研究 [J]. *中国环境科学*, 2013, 33(1): 21–29.
- [28] 吴 兑, 毕雪岩, 邓雪娇, 等. 珠江三角洲大气灰霾导致能见度下降问题研究 [J]. *气象学报*, 2006, 64(4): 510–516.
- [29] 赵普生, 张小玲, 徐晓峰, 等. 利用日均及 14 时气象数据进行霾日判定的比较分析 [J]. *环境科学学报*, 2011, 31(4): 704–708.
- [30] 赵普生, 徐晓峰, 孟 伟, 等. 京津冀区域霾天气特征 [J]. *中国环境科学*, 2012, 32 (1): 31–36.
- [31] 张 磊, 张 镭, 张丁玲, 等. 兰州远郊区黑碳气溶胶浓度特征 [J]. *中国环境科学*, 2011, 31(8): 1248–1255.
- [32] Cao J J, Zhu C S, Chow J C, et al. Black carbon relationships with emissions and meteorology in Xi'an, China [J]. *Atmospheric Research*, 2009, 94(2): 194–202.
- [33] 王扬锋, 马雁军, 陆忠艳, 等. 沈阳黑炭气溶胶浓度的观测研究分析 [J]. *安全与环境学报*, 2011, 11(3): 124–127.
- [34] Bergin M H, Xu J, Fang C. Measurement of aerosol light scattering and absorption coefficient in Beijing during June, 1999 [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106(16): 17969–17980.
- [35] Derwent R G, Ryall D B, Jennings S G, et al. Black carbon aerosol and carbon monoxide in European regionally polluted air masses at Mace Head, Ireland during 1995–1998 [J]. *Atmospheric Environment*, 2001, 35(36): 6371–6378.
- [36] Petzold A, Ogren J A, Fiebig M, et al. Recommendations for reporting “black carbon” measurements [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, 13: 8365–8379.
- [37] Shen L J, Li L, Lu S, et al. Characterization of black carbon aerosol in Jiaying, China during autumn 2013 [J]. *Particuology* (2014), <http://dx.doi.org/10.1016/j.partic.2014.08.002>.
- [38] Cao J J, Lee S C, Ho K F, et al. Characteristics of carbonaceous aerosol in Pearl River Delta Region, China during 2001 winter period [J]. *Atmospheric Environment*, 2003, 37(11): 1451–1460.
- [39] Hagler G S W, Yelverton T L B, Vedantham R, et al. Post-processing method to reduce noise while preserving high time resolution in aethalometer real-time black carbon data [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2011, 11(5): 539–546.

作者简介: 胡明玉(1991–), 女, 河南信阳人, 中国矿业大学环境与测绘学院硕士研究生, 主要从事大气环境遥感研究。