

贵阳市大气黑碳污染特征^{*}

仇广乐¹ 刘娜¹ 冯新斌^{1**} LANDISM^{Matthew} 商立海¹ 付学吾¹

(¹中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002; ²US EPA Office of Research and Development Research Triangle Park NC 27709 USA)

摘要 利用连续颗粒物采样仪 (URG Model 2000-01 J) 和黑碳仪 (Aethalometer) 对贵阳市城区 2008 年 9—11 月大气黑碳浓度进行了连续观测, 结果表明, 贵阳市城区秋冬季大气 24 h 黑碳浓度变化范围为 1.6~12 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 平均值为 4.1 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; 12 h 黑碳浓度观测值主要分布在 2~5 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 白昼黑碳浓度变化范围介于 1.9~9.2 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 平均值 3.9 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 夜间黑碳浓度变化范围 0.48~15 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 平均值 4.3 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; 黑碳浓度与大气 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化一致, 呈正相关关系 ($r=0.84$ $P<0.0001$, $n=178$), 大气黑碳浓度的变化趋势还明显受相对湿度、温度和风速的影响。

关键词 黑碳; $\text{PM}_{2.5}$; 气象参数; 污染特征

中图分类号 S965 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2011)5-1018-05

Pollution characteristics of atmospheric black carbon in Guiyang City Southwest China
QIU Guangle, LIU Na, FENG Xinbin^{**}, LANDISM^{Matthew}, SHANG Lihai, FU Xuewu
(¹ State Key Laboratory of Environmental Geochemistry Institute of Geochemistry Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China; ² US EPA Office of Research and Development Research Triangle Park NC 27709 USA). Chinese Journal of Ecology 2011, 30(5): 1018-1022

Abstract BY using URG Model 2000-01 J and Aethalometer, the atmospheric black carbon concentration in Guiyang City was continuously detected from September to November 2008. The 24 h atmospheric black carbon concentration during the detection period was 1.6-12 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, with a mean value of 4.1 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. The 12 h atmospheric black carbon concentration was mainly in the range of 2-5 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, its daytime variation range was 1.9-9.2 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, with a mean value of 3.9 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, and its nighttime variation range was 0.48-15 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, with a mean value of 4.3 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. The atmospheric black carbon concentration had the same variation trend as atmospheric $\text{PM}_{2.5}$ concentration, and there existed a positive correlation ($r=0.84$ $P<0.0001$, $n=178$) between them. The variation trend of the atmospheric black carbon concentration was also affected by the relative humidity, temperature and wind speed.

Key words black carbon; $\text{PM}_{2.5}$; meteorological parameter; pollution characteristics

黑碳为含碳物质不完全燃烧产物, 是大气气溶胶的重要组成部分。工业活动、交通、民用燃煤、森林火灾、秸秆及落叶等生物燃烧都会产生黑碳 (Cooke & Wilson 1996; Novakov et al., 2000; 曹国良等, 2006)。黑碳对太阳辐射有强吸收特点, 可对大气环境质量产生显著影响 (Chameides & Bergin

2002; Cao et al., 2003; Hansen & Nazarenko 2004)。Jacobson (2001) 认为, 黑碳是仅次于 CO_2 导致温室效应的大气成分, 全球大气监测网 (GAW) 已将其作为对气溶胶研究的一个重要观测指标 (WMO 1993)。黑碳主要吸附于细粒子 $\text{PM}_{2.5}$ 中 (Gatari et al., 2003), 可以进入呼吸系统而对人体健康产生不良影响, 目前有关黑碳的研究受到广泛的关注。

我国是全球最大的黑碳排放国 (Streets et al., 2001), 黑碳对近年来我国南涝北旱趋势起到了加

* 国家自然科学基金项目 (40773067) 资助。

** 通讯作者 E-mail: fengxinbin@vip.sj.cn

收稿日期: 2010-11-08; 接受日期: 2011-03-13

速作用 (Menon et al., 2002)。从 20 世纪 90 年代, 我国相继开始了不同城市如北京 (王庚辰等, 2002; 娄淑娟等, 2005; 刘艳菊等, 2010)、上海 (杨溯等, 2008)、广州 (陶俊等, 2008)、西安 (李杨等, 2004; 2005; 朱崇抒等, 2006)、长春 (高枳亭等, 2009) 和西宁 (赵玉成等, 2008) 以及珠江三角洲地区 (Cao et al., 2003; 吴兑等, 2009) 和大气本底站 (汤洁等, 1999) 的黑碳气溶胶的观测与分析, 取得了显著成果。本研究选择我国西南部的贵阳市开展大气黑碳观测与分析, 以期开展我国相关城市的大气污染防治工作提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 采样地点

采样点设在贵阳市南明区市环境监测中心站综合楼顶楼 ($106^{\circ}43'03''E$ $26^{\circ}33'56''N$), 位于贵阳市老城区西南部, 贵阳电厂和贵阳水泥厂分别位于其西南 2.7 和 3.0 km 处。

1.2 样品采集

黑碳分析是基于大气颗粒物 ($PM_{2.5}$) 样品, 样品采集是采用美国 URG 公司生产的大气颗粒物自动采样仪 (URG Model 2000-01) 进行, 以微型颗粒物捕集器内装 Teflon 滤膜 ($0.45 \mu m$, Millipore), 采样流速为标准大气压条件下 $10 L \cdot min^{-1}$, 采样时间为 12 h 按昼 (8:00—19:59) 和夜 (20:00—7:59) 样品分开采集。Teflon 滤膜在样品采集前和采集后分别称重, 计算 $PM_{2.5}$ 的质量。样品采集时间为 2008 年 9—11 月。

1.3 实验分析

颗粒物 $PM_{2.5}$ 采集后, 其黑碳分析在美国环境保护署 (US EPA) 的 NERI 实验室完成, 测量仪为美国

Mages 科学公司生产的 Aethalometer IM 黑碳仪, 该仪器是利用黑碳气溶胶对光的 90% 至 95% 的吸收特性进行测量, 黑碳观测采用透光均匀的石英纤维膜进行。本次观测数据以 880 nm 红外光作为黑碳的检测光, 黑碳质量衰减系数 σ 取 16.6 以空白、平行样的测定结果来控制实验数据质量。

2 结果与分析

2.1 黑碳浓度变化特征

贵阳市黑碳 24 h 和 12 h 浓度变化范围分别为 $1.6 \sim 12$ 和 $0.48 \sim 15 \mu g \cdot m^{-3}$, 平均值 $4.1 \mu g \cdot m^{-3}$ 。由表 1 可见, 9、10 和 11 月大气黑碳浓度分别为 4.4、3.7 和 $4.2 \mu g \cdot m^{-3}$; 其中 11 月浓度变化范围最大, 该月末大气中黑碳浓度高达 $15 \mu g \cdot m^{-3}$ 。

根据 12 h 黑碳浓度计算其频数分布, 由图 1 可以看出, 贵阳市秋冬季大气黑碳浓度主要分布范围为 $2 \sim 5 \mu g \cdot m^{-3}$, 占有黑碳浓度的 67%; 其次为 $5 \sim 6$ 和 $1 \sim 2 \mu g \cdot m^{-3}$, 分别占 12% 和 8%; 黑碳浓度 $> 10 \mu g \cdot m^{-3}$ 的只占 2%。白天贵阳市大气黑碳浓度变化范围较小, 介于 $1.9 \sim 9.2 \mu g \cdot m^{-3}$, 平均值为 $3.9 \mu g \cdot m^{-3}$, 夜间大气中黑碳浓度的波动较大, 出现峰值的频率高于白天, 变化范围为 $0.48 \sim 15 \mu g \cdot m^{-3}$, 平均值为 $4.3 \mu g \cdot m^{-3}$ (图 1)。

表 1 贵阳市大气黑碳浓度月平均变化 ($\mu g \cdot m^{-3}$)
Table 1 Monthly mean values of black carbon in Guiyang

时间	平均值	最小值	最大值	标准偏差	中值	n
2008年9月	4.4	1.7	11	1.9	4.2	56
2008年10月	3.7	1.1	9.3	1.7	3.7	62
2008年11月	4.2	0.48	15	2.7	3.9	60

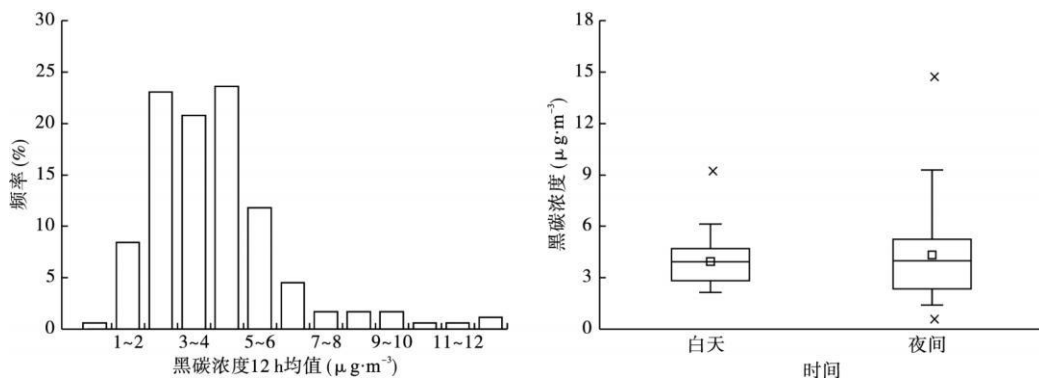


图 1 贵阳市大气黑碳浓度频率分布及昼夜变化特征

Fig. 1 Frequency distribution of black carbon and variations between daytime and nighttime in Guiyang

由图 2 可见, 大气中黑碳浓度与 $PM_{2.5}$ 浓度随时间的变化趋势基本一致, 说明 $PM_{2.5}$ 影响了黑碳浓度。对每次降雨的总量与黑碳和 $PM_{2.5}$ 浓度之间的关系进行相关分析, 发现, 总降雨量与黑碳浓度的相关性 ($r=0.79, P=0.006$) 比与 $PM_{2.5}$ 的相关性 ($r=0.54, P=0.1$) 更为显著, 可能暗示了降雨过程产生的洗脱作用对黑碳的影响强于 $PM_{2.5}$, 其在清除大气中的颗粒物同时, 还洗脱了吸附于颗粒物表面的黑碳, 从而导致黑碳浓度的降低。

2.2 黑碳与 $PM_{2.5}$ 及气象参数的关系

黑碳是大气中 $PM_{2.5}$ 的主要组成成分 (Moloi et al, 2002; Gauri & Bman, 2003)。由图 2 可见, 黑碳和 $PM_{2.5}$ 的 12 h 浓度呈正相关 ($r=0.84, P<0.0001, n=178$), 随着 $PM_{2.5}$ 浓度的升高, 黑碳浓度也增加。24 h 黑碳和 $PM_{2.5}$ 浓度表现出更强的正相关性 ($r=0.86, P<0.0001, n=89$) (图 3)。大气黑碳浓度与 $PM_{2.5}$ 浓度之间的正相关暗示了二者具有相同的污染来源。一般而言, 大气黑碳多来源于工业燃煤和机动车尾气及生物燃烧等 (Streets et al, 2001; 曹国良等, 2006)。而本研究采样点位于城区, 黑碳来自交通和居民燃煤的影响可能性更大。

由图 4 可见, 贵阳市大气黑碳浓度与气温呈正相关。尽管整个采样期间, 气温总体呈逐渐降低的趋势, 但随着气温的波动, 大气黑碳浓度亦随之波动, 表现出相同的变化趋势。大气黑碳浓度与大气相对湿度呈负相关, 黑碳浓度谷值多对应于相对湿度的峰值, 反之亦然。结合贵阳市降雨对黑碳浓度的影响 (图 2), 即随降雨总量的增加黑碳浓度发生明显降低这一特点, 可以初步推断: 由于气温与相对

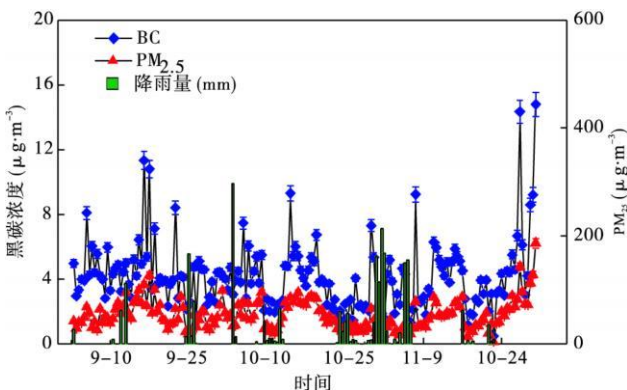


图 2 贵阳市降雨、大气黑碳和 $PM_{2.5}$ 12 h 浓度变化趋势
Fig 2 12 h variations of black carbon, $PM_{2.5}$ and precipitation in Guiyang

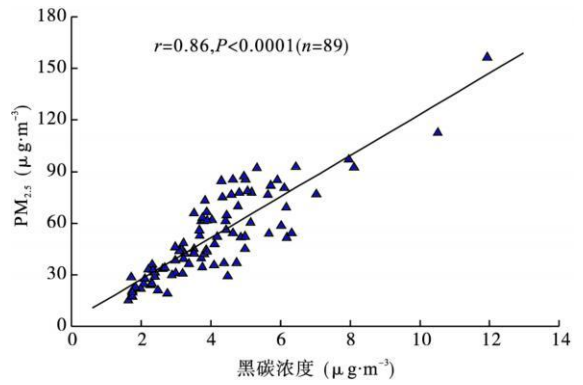


图 3 贵阳市大气黑碳与 $PM_{2.5}$ 24 h 浓度的相关关系
Fig 3 Correlation between black carbon and $PM_{2.5}$ in Guiyang

湿度之间的关系具有相对湿度与黑碳浓度变化的相同趋势, 而气温的波动会影响到相对温度的变化, 因此在上述两个气象参数中, 相对湿度可能是影响大气中黑碳浓度的主导因素, 但该假设仍需要进一步工作的验证。

由图 4 可见, 大气黑碳浓度随着风速的增大呈降低的趋势, 二者呈负相关。通常, 风速对黑碳的影响主要表在其对大气颗粒的影响, 风速的增加可以加快大气粉尘、微细颗粒物的扩散作用, 从而造成了黑碳浓度的降低。姜淑娟等 (2005) 认为, 风速变大使粗模态气溶胶增加, 而导致 $PM_{2.5}$ 中所含黑碳的比例减少。

2.3 黑碳浓度与国内其他城市对比

对比国内其他城市, 贵阳市大气黑碳月平均浓度偏低, 但高于大气本底观测点的浓度 (表 2)。贵阳市大气黑碳浓度低于其他发达城市的原因可能是相对于国内发达城市, 贵阳市黑碳主要来源于人为

表 2 贵阳市大气黑碳浓度 (月平均值) 与国内其他城市的对比
Table 2 Comparison of black carbon (monthly average value) in Guiyang and other cities in China

城市	测量时间	平均值 ($\mu g \cdot m^{-3}$)	资料来源
广州	2004.01-2007.12	3.1~14.8	吴兑等, 2009
	2007.04	7.4±2.9	陶俊等, 2008
上海浦东	2006.10-2006.12	4.5±3.1~7.4±5.6	杨溯等, 2008
西安	2003.09-2004.04	9.0±3.4~27.1±11.2	李杨等, 2004
	2004.01-2004.12	9.0±3.4~21.8±11.4	朱崇抒等, 2006
长春	2007.10-2008.01	10.3±4.1~20.2±7.2	高枫亭等, 2009
瓦里关	1994.07-1995.12	0.05~0.13	汤洁等, 1999
贵阳	2008.09-2008.11	3.7±1.7~4.4±1.9	本研究

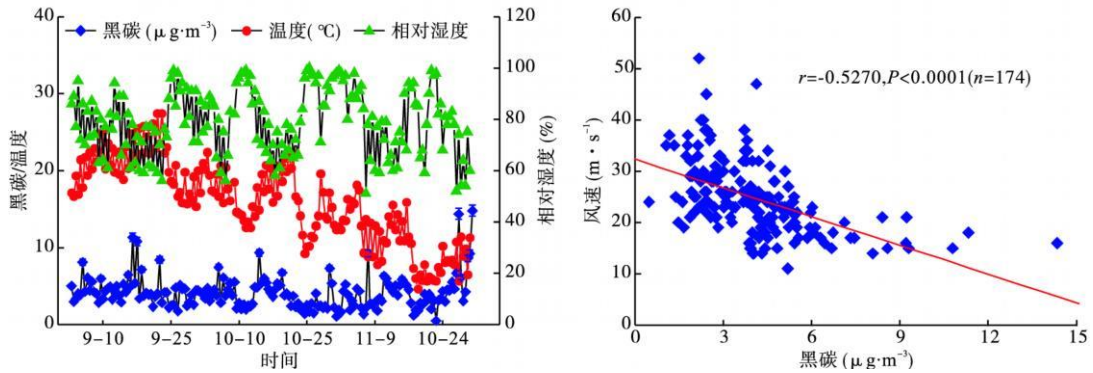


图4 贵阳市大气黑碳浓度与相对湿度、气温、风速间的相关关系

Figure 4 Correlations among black carbon, relative humidity, temperature and wind speed in Guiyang

活动,如机动车尾气排放、冬季采暖和工业用煤等,其总量相对较少,同时贵阳市大气相对湿度较高而且降雨频率较大,也可能是导致黑碳浓度较低的另一个原因。

3 结论

贵阳市城区大气黑碳浓度日变化范围 $1.6 \sim 12 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 平均值 $4.1 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$; 白昼变化范围较小,夜间变化范围大,且峰值出现率高,白昼黑碳平均浓度稍低于夜间。

贵阳市城区大气黑碳浓度与大气颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化趋势一致,呈正相关,同时相对湿度、大气温度和风速等气象参数亦明显影响黑碳浓度的变化,研究显示黑碳浓度与温度呈正相关,而与相对湿度和风速呈负相关。

由于论文中数据有限,只能得到初步的阶段性的结果,还需连续长期对贵阳市黑碳气溶胶的季节变化和随时间的趋势进行观测,从而有助于深入了解黑碳气溶胶与气象参数之间的关系,弄清我国西南地区气象条件下黑碳的迁移及产生的环境效应。

致谢 感谢美国国家研究委员会(NRC)学者交流项目和美国国家环境保护署(US EPA)国家暴露实验室(NERL)的实验分析工作的支持。

参考文献

曹国良, 张小曳, 王亚强, 等. 2006 中国大陆黑碳气溶胶排放清单. 气候变化研究进展, 2(6): 259-264
高枞亭, 张仁健, 苏丽欣. 2009 长春秋冬大气黑碳气溶胶的特征分析. 高原气象, 28(4): 803-807

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. 气候与环境研究, 10(2): 229-237.
李 杨, 曹军骥, 张小曳, 等. 2004 西安大气中黑碳气溶胶的演化特征. 过程工程学报, 4(2): 744-749.
刘艳菊, 张美根, 张仁健, 等. 2010 2009年北京市春季大气颗粒 $\text{PM}_{2.5}$ 和黑碳浓度变化特征. 中国粉体技术, 16(1): 18-22
娄淑娟, 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. 环境科学学报, 25(1): 17-22
汤 洁, 温玉璞, 周凌晔, 等. 1999 中国西部大气清洁地区黑碳气溶胶的观测研究. 应用气象学报, 10(2): 160-170
陶 俊, 朱李华, 韩静磊, 等. 2008 2007年春季广州城区黑碳气溶胶污染特征的初步研究. 气候与环境研究, 13(5): 658-662
王庚辰, 孔琴心, 任丽新, 等. 2002 北京地区大气中的黑碳气溶胶及其变化特征. 过程工程学报, 2(2): 284-288
吴 兑, 毛节泰, 邓雪娇, 等. 2009 珠江三角洲黑碳气溶胶及其辐射特性的观测研究. 中国科学 D辑, 39(11): 1542-1553
杨 溯, 张 武, 韩 晶, 等. 2008 上海市浦东新区秋冬季黑碳气溶胶特性. 兰州大学学报(自然科学版), 44(4): 66-70
赵玉成, 德力格尔, 马尔仓, 等. 2008 2005-2006年秋冬季西宁大气中的黑碳气溶胶及其变化特征. 城市环境与城市生态, 21(2): 26-29
朱崇抒, 曹军骥, 刘随心. 2006 西安大气黑碳气溶胶的观测和分析. 过程工程学报, 6(2): 10-14
Cao J, Lee S, Ho K, et al. 2003 Characteristics of carbonaceous aerosol in Pearl River Delta Region, China during 2001 winter period. Atmospheric Environment, 37: 1451-

1460

- Chameides W, Bergin M. 2002. Soot takes center stage. *Science* **297**: 2214–2215.
- Cooke W, Wilson J. 1996. A global carbon aerosol model. *Journal of Geophysical Research* **101**: 19395–19409.
- Gatari M, Bonan J. 2003. Black carbon and total carbon measurements at urban and rural sites in Kenya, East Africa. *Atmospheric Environment* **37**: 1149–1154.
- Hansen J, Nazarenko L. 2004. Soot climate forcing via snow and ice albedo. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **101**: 423–428.
- Jacobson M. 2001. Strong radiative heating due to the mixing state of black carbon in atmospheric aerosols. *Nature* **409**: 695–697.
- Menon S, Hansen J, Nazarenko L, et al. 2002. Climate effects of black carbon aerosols in China and India. *Science* **297**: 2250–2253.
- Mobi K, Chimidza S, Lindgren E, et al. 2002. Black carbon mass and elemental measurements of airborne particles in the village of Serowe, Botswana. *Atmospheric Environment* **36**: 2447–2457.
- Novakov T, Andreae M, Gabriel R, et al. 2000. Origin of Carbonaceous aerosols over the tropical Indian Ocean: Biomass burning or fossil fuels? *Geophysical Research Letters* **27**: 4061–4064.
- Streets D, Gupta S, Wadhoff S, et al. 2001. Black carbon emissions in China. *Atmospheric Environment* **35**: 4281–4296.
- WMO (World Meteorological Organization). 1993. Global Atmosphere Watch Measurement Guide [EB/OL]. [2010-10-15]. <http://www.wmo.int/pages/prog/gcos/documents/gruanmanuals/GAW/gaw143.Pdf>

作者简介 仇广乐, 男, 1971 年生, 博士。主要从事汞的地球化学研究。E-mail: qiuguangle@vip.sjkeg.cn
责任编辑 魏中青
