

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

李 杨^{1,2} 曹军骥¹ 张小曳³ 车慧正¹

1 中国科学院地球环境研究所黄土与第四纪地质国家重点实验室, 西安 710075

2 中国科学院研究生院, 北京 100039

3 中国气象局大气成分观测与服务中心, 北京 100081

摘 要 2003年9~11月在西安站点通过黑碳测量仪(Aethalometer)获得了大气细粒子中每5 min的黑碳气溶胶(BC)浓度, 这些实时的BC浓度经过元素碳校对后, 日平均浓度为 $10.2 \pm 5.8 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 其变化范围为 $1.8 \sim 27.5 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。BC浓度与污染指数(API)的变化具有良好的一致性(相关系数为0.64), 表明BC是大气颗粒物污染的一个重要贡献。正常天气下, BC小时平均浓度呈三峰分布, 这与机动车污染、居民活动和农村秸秆燃烧等来源相关联。通过降水天气下BC的浓度分布和BC浓度频次分布法, 获得了西安大气中BC的本底浓度为 $4.5 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 以此估算了西安大气BC中不同来源的相对贡献, 其中周边源对BC的贡献超过了1/3。这表明了该季节内城市周边农村秸秆燃烧对城市空气质量的显著贡献, 需要进一步严格控制。

关键词 黑碳测量仪 黑碳气溶胶 时间序列 来源解析

文章编号 1006-9585 (2005) 02-0229-09 **中图分类号** P402 **文献标识码** A

The Variability and Source Apportionment of Black Carbon Aerosol in Xi'an Atmosphere During the Autumn of 2003

LI Yang^{1,2}, CAO Jun-Ji¹, ZHANG Xiao-Ye³, and CHE Hui-Zheng¹

1 State Key Lab of Loess & Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710075

2 Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039

3 Centre for Atmosphere Watch and Services, Chinese Meteorological Administration, Beijing 100081

Abstract Black carbon (BC) aerosol has been measured using an Aethalometer at Xi'an station from September to November 2003. These BC concentration data have corrected by element carbon and average BC daily concentration was found to be $10.2 \pm 5.8 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, ranged from 1.8 to $27.5 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$. Daily BC has similar variations with API (correlation coefficient = 0.64), which implies BC is one of important contributors to atmosphere particulate pollution. Under normal weather, three notable peaks appeared in the daily variations of BC, which has been related to the direct emissions from motor vehicles, anthropogenic activities and biomass burning. Background BC concentration has also been obtained with value $4.5 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ via its concentration distributed under rainy days and frequency distribution method. Based on this, the source contributions to ambient BC have been apportioned, i. e., remote source contributes one third. Therefore, remote source such as biomass burning is the largest contributor to Xi'an

收稿日期 2004-04-29 收到, 2005-04-16 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40205018, 中国科学院黄土与第四纪地质国家重点实验室开放基金 (SKLLQG0520)

作者简介 李杨, 女, 1977年出生, 博士研究生, 主要从事大气化学的研究。

E-mail: liyang@cams.cma.gov.cn; liyang@loess.llqg.ac.cn

BC. That implies more rigorous measures should be taken further for controlling the biomass burning in farmland around the city.

Key words aethalometer, black carbon, time series, source apportionment

1 引言

黑碳气溶胶 (Black carbon, BC, 或 soot) 是空气中一种重要的颗粒态污染物, 来源于任何含碳物质不完全燃烧而排放出来的无定型碳质。其主要来源有 3 种: 化石燃料燃烧, 生物质燃烧, 自然火 (森林火灾)。其中前两个来源是由于人类活动引起的。全球化石燃料排放的 BC 估计为 $7 \times 10^6 \sim 24 \times 10^6 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$, 生物质燃烧排放的 BC 为 $28 \times 10^6 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ [1]。中国区域 BC 的排放量占到了全球排放总量的 1/4, 其中 83% 是居民燃煤和柴薪燃烧产生的 [2]。研究已证实 BC 的直接辐射驱动因子超过了 CH_4 , 成为全球大气系统中仅次于 CO_2 的增温组分 [3], 对全球气候变暖贡献了 15% ~ 30% [4], 因此中国区域排放的 BC 成为区域乃至全球气候与环境变化的一个重要驱动因子 [5]。由于 BC 能对人体产生危害, 并能降低能见度, 直接和间接的影响气候效应, 改变平流层臭氧和光化学烟雾, 参与全球生物地球化学循环等, 因此黑碳气溶胶的研究越来越受到科学家的关注 [5~8]。

国外早在 20 世纪 70 年代就出现了 BC 的研究 [9], 到目前为止开展了包括南极、北极等地区的广泛观测 [9~12]。国内有关 BC 的工作开展较晚, 自 90 年代起, 黑碳气溶胶的观测实验在我国才逐步展开。汤洁等 [13] 1991 年在我国临安大气本底污染监测站进行过短期的 BC 浓度观测; 王庚辰等 [14] 于 1992 到 1997 年在北京市北郊测量了 BC 的浓度; 1992~1994 年, 汤洁等在青海西宁市西南方向约 90 km 海拔 3 810 m 的瓦里关山地区, 进行本底地区大气 BC 浓度的观测, 至今已得到一些有价值的研究结果 [13]。但有关 BC 系统深入的观测、分析及源解析并没有展开, 特别是城市大气中的 BC 观测工作尤为缺乏。我国北方城市的大气污染相当严重, 气溶胶的气候效应越来越受到关注 [15~17], 尤其秋冬季, 由于居民燃煤和农村秸秆燃烧导致 BC 浓度显著增高, 但因为缺乏系统观测, 目前还不清楚 BC 的浓度分布、变化特征及其

主要来源贡献等基本数据。西安是典型的北方城市, 颗粒物污染严重, 1997~2001 年曾被联合国开发计划署选列为大气颗粒物污染研究的示范性城市 [18], 已有较好的工作积累。

本次工作选择西安作为城市大气 BC 的观测站点, 经过 2 个月的先导性连续观测, 获得了 BC 浓度分布等一批第一手观测数据, 并通过分析 2003 年秋季西安市大气黑碳气溶胶的演化特征, 为认识其排放来源及各自的贡献份额提供了基础数据。本项研究为城市环境监测部门开展 BC 的监测积累了实际经验, 为保护居民身体健康提供了背景资料, 为开展城市和区域大气化学以及气溶胶特征研究奠定了基础, 并积累了相关的科学数据。

2 实验与方法

2.1 采样地点

观测站点位于西安 ($34^{\circ}16'N$, $108^{\circ}54'E$), 地处关中平原中部, 属于暖温带半湿润季风气候, 年均降水量为 604.2 mm, 年平均温度为 13.3°C , 人口 741 万。采样地点设在市内高新区中国科学院地球环境研究所综合大楼二楼楼顶, $\text{PM}_{2.5}$ (空气动力学粒径小于 $2.5 \mu\text{m}$) 采样头距地面高约 10 m, 四周没有明显的 BC 污染排放源, 能够较好地代表城市大气状况。

2.2 样品采集与分析

采样仪器为美国玛基科学公司生产的 AE-16 型黑碳测量仪 (Aethalometer, Magee Scientific Co, Berkeley, California, USA) [19]。黑碳测量仪具有内制泵, 通过一根软管将采样头和仪器相连, 仪器内部安装有滤纸带, 平均每 5 min 获取一个数据实时监测西安市城区大气黑碳气溶胶的浓度。该仪器的工作原理是利用 BC 对可见光的强烈吸收特性, 属于光学灰度测量法 [20], 检测通过滤纸的光学衰减, 换算成 BC 浓度, 其中光学衰减 A_{ATN} (attenuation) 定义为

$$A_{\text{ATN}} = -100 \ln (I/I_0), \quad (1)$$

其中 I_0 和 I 分别为通过空白滤纸和样品滤纸的光

强^[21]。此外, ATN 线性相关于滤纸上 BC 的质量负荷 S_{BC} , 有如下关系式:

$$A_{ATN} = \sigma_{ATN} S_{BC}, \quad (2)$$

σ_{ATN} 是 BC 浓度测量的最关键参数。本次 BC 连续观测的同时, 以石英质滤膜采集了 PM_{2.5} 样品, 并采用美国沙漠研究所的热光碳分析仪分析了滤纸上的元素碳含量, 通过元素碳与 BC 的相关关系获得了 σ_{ATN} 为 $27.4 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$, 因此, 本文的 BC 浓度是经过元素碳校对后得到的结果。

同时, 利用 HFY-IA 型风向风速仪(长春气象仪器研究所)测量了小时平均的风速和风向数据。

3 结果与讨论

3.1 BC 的日平均浓度变化

图 1 为西安 2003 年 9 月 13 日~11 月 13 日 BC 日变化及其与污染指数 (API)^[22] 的对比, 表 1 给出了 9、10、11 月的 BC 平均浓度分布状况。BC 的日平均浓度变化范围为 $1.8 \sim 27.5 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 平均为 $10.2 \pm 5.8 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。其中, 9 月的 BC 平均浓度偏低(表 1), 10 和 11 月的 BC 相当, 这可

能主要与 9 月出现较多的降水和较少的农村秸秆燃烧有关。根据当天的采样记录, BC 浓度较低值出现的时间均为降水过程(图 1 中箭头所示)。除了降水过程的影响外, BC 浓度的变化呈较显著的周变化, 一般星期一到星期四的浓度较高, 最高值一般出现在星期三或四; 星期五至星期日 BC 的浓度较低, 最低值一般出现在星期日。由于观测点靠近地面, 可能受到人为活动的影响, 另外也与天气过程以及气团的更替有关。上班期间人为活动比较频繁, 颗粒物在大气中不断积聚, 大气扩散不十分明显, 由于 BC 在大气中的寿命为 40 h(降水过程)到 1 周左右(干洁地区)^[23], 所以导致了星期一到星期四 BC 浓度较高, 随着人为活动的减少, BC 通过沉降过程而不断从大气中清除, 所以星期五到星期日, BC 浓度逐渐降低, 最低值一般出现在星期日。此外, 显著的 BC 周变化可能也与当地气象条件的周期性变化有关, 当然, 明确的结论需要更多的数据来进一步的验证。图 1 对比了 BC 与西安地区污染指数的日变化曲线, 可以看出, 实测 BC 浓度的变化情况与污染指数的变化具有很好的一致性, 其相关系数达到了 0.64, 这表明 BC 是大气颗粒物的一个重要组成部分。

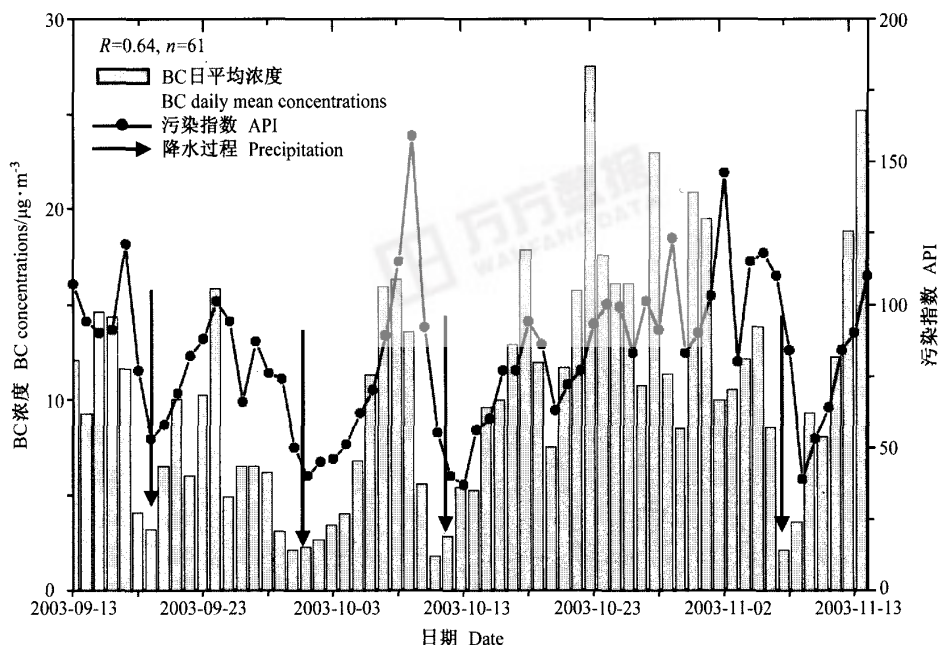


图 1 BC 日平均浓度变化与污染指数对比

Fig. 1 Time series of daily BC and the comparison of BC with API

表 1 2003 年秋季西安大气中黑碳日平均浓度分布及其与国外其他城市的对比

Table 1 The daily mean concentration of BC at Xi'an during autumn 2003 and the comparison of BC at Xi'an with other foreign cities

采样地点 Sampling site	采样时间 Sampling time	天数 Sampling day/d	BC 日平均浓度 Daily mean concentration of BC/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	BC 日平均浓度变化范围 Variety range of daily mean concentration of BC/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	平均温度 Mean temperature/ $^{\circ}\text{C}$	平均风速 Mean windspeed/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
中国 西安 Xi'an, China	2003-09	18	8.2 ± 4.2	2.1~15.8	20.5	1.04
	2003-10	30	11.3 ± 6.6	1.8~27.5	13.0	0.83
	2003-11	13	11.8 ± 6.4	2.1~25.2	8.7	0.91
法国 巴黎 ^[24] Paris, Fance	1997-08~10		14 ± 7	7.8~26	18.0	2.3
加拿大 哈利法克斯 ^[25] Halifax, Canada	1995~1996			0.54~1.74		
芬兰 赫尔辛基 ^[26] Helsinki, Finland	1996-11	6	1.44 ± 0.67	0.67~2.63	4	4.0
美国 费城 ^[27] Philadelphia, USA	1998-08~09	18	1.1			
美国 芝加哥 ^[27] Chicago, USA	1997-10~11	38	1.2			

表 1 给出了西安 3 个月的日平均浓度，并对比了国外 5 个城市秋季 BC 浓度的分布状况^[24~27]。由表可知，西安大气 BC 浓度远高于加拿大的哈利法克斯市^[25]、芬兰的赫尔辛基市^[26]、美国的费城和芝加哥市^[27]，约为这些城市的 7~10 倍。这些城市 BC 的主要来源是机动车尾气的排放以及居民的取暖和烹饪，没有生物秸秆燃烧等来源的贡献。与这些城市大气 BC 载荷相比，西安大气 BC 污染是严重的，秸秆燃烧是一个急需控制的污染源。虽然西安和巴黎的 BC 日平均浓度比较接近，但是应该指出的是，Ruellan 等^[24]的采样地点位于巴黎市内的一条主干高速公路附近，来往机动车辆较多，因而造成了高浓度的 BC 污染；相比而言，Cachier^[28]得到的巴黎大气 BC 浓度为 $1.6\sim 5.9\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ，基本代表了巴黎城市的 BC 浓度。

3.2 非降水过程和降水过程中 BC 的日浓度变化

为清楚地表征 BC 日浓度变化状况，获得西安大气中 BC 载荷的主要来源及其贡献份额，下文将以非降水和降水过程来分别叙述 BC 的浓度变化。降水和非降水过程的区分标准为：如果全天没有出现降水则定义为非降水过程，只要有降水出现则定义为降水过程。

3.2.1 非降水过程中 BC 浓度的日变化

图 2 为非降水过程（即正常天气下），BC 小

时平均浓度以及 5 min 平均浓度的变化情况。从图 2 中可以看出，BC 的浓度变化具有明显的峰值和谷值，其峰值分别出现在凌晨 0:00~3:00（北京时间，下同），清晨 7:00~10:00，傍晚后 18:00~23:00，其间有两个谷值分别出现在午后 14:00~17:00，次谷值出现在日出前 4:00~6:00。其中小时平均浓度最高值出现在傍晚后 21:00，其浓度最高达 $55.2\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ；最低值出现在午后 14:00，其浓度最低约 $0.8\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ，与最高值相差约 70 倍。污染物浓度的日变化特征，主要取决于其源的日变化和近地层中湍流交换，以及大气稳定度的日变化特征。

清晨 7:00~10:00，由于正处于上班高峰时段，来往的机动车辆增加，排放的汽车尾气中含有大量的黑碳，直接表现为大量的黑烟排放，因此 BC 浓度急剧增加；另外，由于该时段正处于日出后不久，太阳辐射不断增强，加热大气，但此时冷的地面还未及升温，因此造成了清晨大气逆温现象，这也是造成 BC 浓度升高的一个重要原因。午后 14:00~17:00 为全天 BC 浓度低值时段，随着太阳辐射的不断增强，地面的增温速度明显高于大气的增温速度，与大气之间形成热力对流，此种天气形势有利于污染物的扩散；另外，相对于清晨和傍晚，午后的人为活动明显降低，

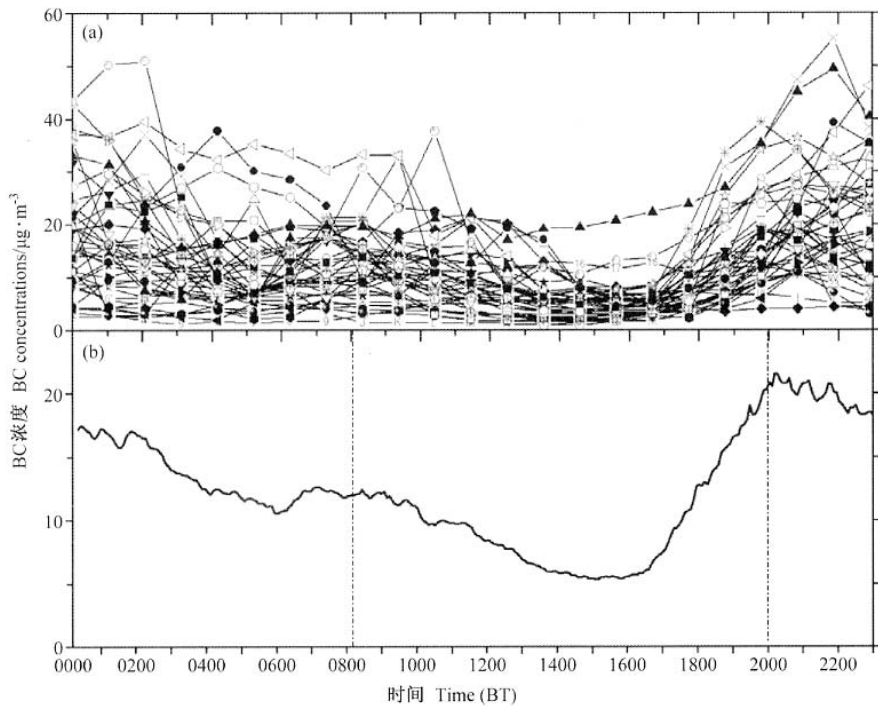


图2 非降水过程中 BC 小时平均浓度变化 (a) 与 5 min 平均浓度变化 (b)
Figure 2 Hourly variations and 5-min average variations of BC under normal weather

机动车污染排放低,这也可能是午后 BC 浓度较低的一个原因。从图 2 中可以看出,一天中浓度的最高值出现在傍晚 18:00 以后,此阶段正值下班高峰,机动车辆活动频繁,不断地排放出大量尾气;同时,居民开始烹饪活动,所用的能源也释放出大量的 BC。由于最初排放的污染物进入大气后尚未扩散,又有大量新的污染物产生进入大气,所以各种颗粒物在大气中聚集、凝聚,导致此时 BC 浓度较高。从图 2 中还可以看出,最高值一般出现在 21:00 左右,有时可持续到次日 3:00。该段时间以后当地的人为活动明显减少,烹饪产生的 BC 大幅度降低;并且市内机动车活动减少,与白天相比对 BC 的贡献也很小。此外,夜间大气处于稳定状态,地面产生的气溶胶粒子不能向上快速扩散,因此浓度较高;日间大气活动较为强烈,气溶胶粒子由于湍流扩散作用,导致浓度较低^[15]。当然逆温层厚度的抬升以及风切变等因素的影响也是不容忽视的。

对比国外相关的研究,BC 浓度的日变化主要与排放来源有关^[29~31]。如果仅为局地来源的贡

献,一天中 BC 的峰值通常有 2 个,其主峰值一般出现在上午 7:00~10:00 左右,次峰值出现在 18:00~22:00,因为影响城市大气的 BC 浓度变化主要是两个来源:一是机动车尾气排放,二是人为活动(如烹饪的影响)。LaRosa^[31]的研究中也显示出与本文类似的三峰分布,即 21:00 以后 BC 浓度持续升高,达到一天内的最高值,他们认为该峰值主要与居民家庭的木材燃烧有关。事实上,由于西安地处关中平原,是中国著名的粮食基地,各种农作物秋收后,农田中残余的植物根系主要通过燃烧方式清除。

图 3 为 9~11 月的风玫瑰图,从图中看出,该时间段内的主导风向为西风 and 南风,其中以西南风和东南风为主。由于采样点西部、西南及南部均为农田区,正值秋收过后,农民开始燃烧残留在麦地里的生物秸秆,通常燃烧时间为傍晚,在盛行风向的作用下,燃烧产生的黑碳等颗粒物随着大气输送,大约数小时后,到达城区。这样一般在 20:00 以后,采样点附近的空气中弥漫着浓重的燃烧麦草的呛人烟味,而且浓度很高,污

染相当严重，且这种高浓度的污染状况可一直持续到次日凌晨 3:00 左右。虽然国家环境保护局出台了禁止农田秸秆燃烧的措施，但实际上在当

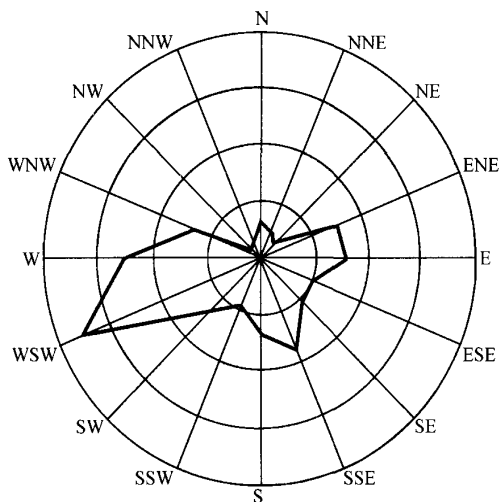


图 3 9~11 月的风玫瑰图 (粗黑线代表 16 个方位的风向和风速)

Fig. 3 Wind rose from September to November (the band line stands for 16 wind direction and wind intensity)

地农村并没有很大的改观。从农田中出现的大片燃烧后的黑土，就可以证实农村秸秆燃烧问题的严重性。在其他地区也观测到农田秸秆燃烧的现象^[32]，这不仅严重影响了大气的空气质量，危害了居民的身体健康，还由于大气能见度降低对飞机起降、高速公路的机动车行驶等活动都造成了严重的影响。

3.2.2 降水过程中 BC 浓度的日变化

图 4 为降水过程中 BC 浓度的日变化，如图所示，BC 浓度没有明显的峰值和谷值，而且其小时平均浓度的变化曲线比较平缓，其小时平均浓度的最低值为 $0.5 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ，日平均浓度值为 $4.2 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ，这基本上代表了城市大气 BC 的本底浓度。图中虽还有一些曲线出现波动，但没有规律，其主要是受到降水出现时间及降水量的影响。比较图 2 和图 4 可以看出，降水过程是 BC 的一个主要清除机制。

3.3 BC 的来源解析

为获得局地来源和周边源对西安大气 BC 载荷的贡献份额，首先要确定大气中本底气溶胶

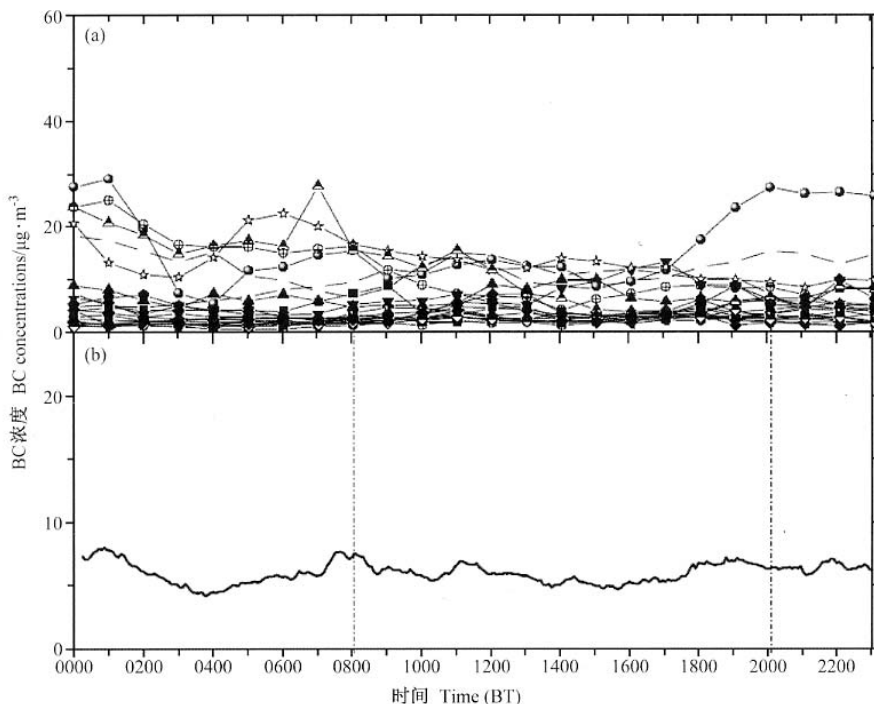


图 4 降水过程中 BC 小时平均浓度变化 (a) 与 5 min 平均浓度变化 (b)

Fig. 4 Hourly variations and 5-min average variations of BC under rainy days

的浓度。本文采用最大频数浓度法^[13]获得了本底 BC 浓度。根据图 5 所示, 对 BC 小时平均浓度的出现频数分布进行正态拟合, 其光滑外廓曲线的最高点即是最大出现频数浓度, 为 $4.8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。与背景清洁点瓦里关山地区秋季的 BC 背景浓度 $77 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ 相比^[13], 西安大气中 BC 背景浓度约为其的 63 倍, 这反应了城市大气中 BC 本底浓度非常高。与前文通过降水过程中 BC 日浓度变化分析获得的 BC 本底浓度 $4.2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 相比, 两个估计值很接近。因此, 本次研究采用两者的平均值 $4.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 作为西安秋季大气中 BC 的本底浓度。

大气本底浓度值已用于 BC 主要来源贡献份额的估算^[33], 依此思路, 本文对正常天气下, 即非降水过程中, 局地来源和周边源对西安大气 BC 浓度的贡献份额进行初步估算。由图 2, 不考虑 BC 在大气中的重复累积效应以及各种气象因素的影响, 选择 6: 00~20: 00 为局地来源 (如机动车、居民燃煤和烹饪), 作为 BC 主导贡献源的时段; 晚 20: 00~次日凌晨 6: 00 为周边源 (如农村秸

杆燃烧), 作为另一主导贡献源时段。在 6: 00~20: 00 内, BC 的总浓度积分为 $7467 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 而 20: 00~6: 00 内 BC 的总浓度积分为 $9617 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, BC 的背景浓度积分为 $6\,480 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (即降水过程中 BC 本底浓度积分)。因此局地来源对大气 BC 的贡献约为 32%, 周边源的贡献份额约为 41%, 本底贡献约为 27%。由此可见, 农村秸秆燃烧等非局地的周边来源对西安秋季大气中 BC 的贡献份额占到了 1/3 以上, 超过了机动车尾气和居民活动等来源的贡献。

4 结论

通过 2003 年 9~11 月在西安开展的为期 2 个月的黑碳气溶胶连续观测, 获得了西安城市大气中 BC 的时间变化序列及其主要来源的相对贡献份额。

61 个观测日获得的 BC 日平均浓度为 $10.2 \pm 5.8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 其变化范围为 $1.8\sim27.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 远远高于国外城市, 显示了西安大气中高浓度的

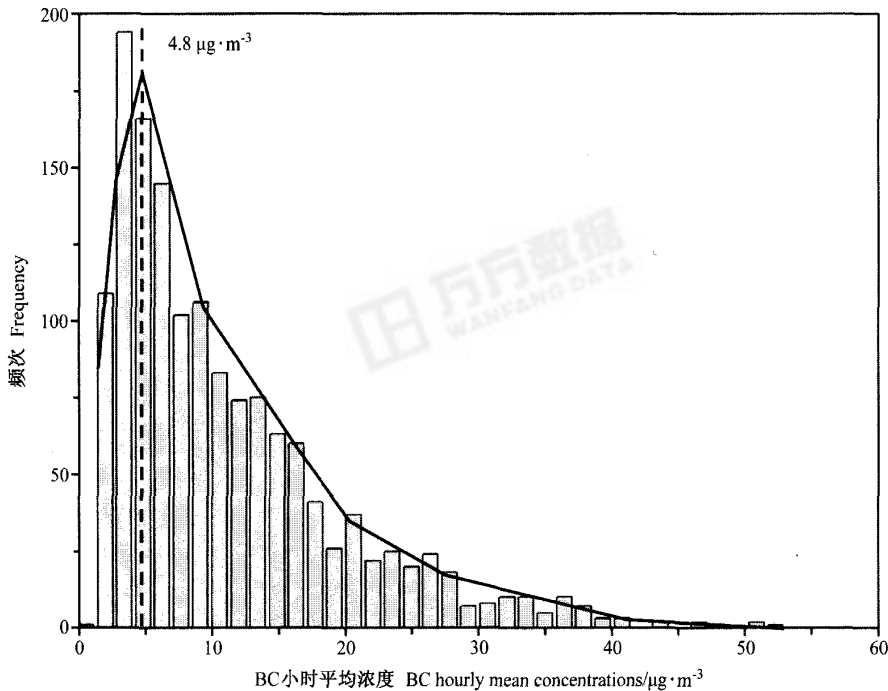


图 5 BC 小时平均浓度的频次分布
Fig. 5 The frequency distribution of BC hourly mean concentration

BC 污染。正常天气下, BC 的小时平均浓度变化曲线呈三峰分布, 其峰值分别出现在凌晨 0:00~3:00、清晨 7:00~10:00、傍晚后 18:00~23:00, 两个谷值分别出现在 14:00~17:00 和 4:00~6:00。其中小时平均浓度的最高值出现在 21:00, 达到了 $55.2 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 最低值则为 14:00 的 $0.8 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。通过大气本底浓度法获得了局地来源和周边源对西安大气 BC 的贡献份额, 结论表明, 周边源贡献超过了 1/3, 其贡献份额超过了机动车尾气和居民活动等来源的贡献, 这显示了西安秋季城市周边农村秸秆燃烧对城市空气质量的显著贡献, 因此农村秸秆燃烧是一个值得关注的污染来源, 需要进一步严格控制。

参考文献

- [1] Liousse C, Penner J E, Chuang C, Walton J J, Eddleman H, Cachier H. A global three-dimensional model study of carbonaceous aerosols. *Journal of Geophysical Research*, 1996, **101**: 19411~19432
- [2] Streets D G, Gupta S, Waldho S T, Wang M Q, Bond T C, Bo Y Y. Black carbon emissions in China. *Atmospheric Environment*, 2001, **35**: 4281~4296
- [3] Jacobson M Z. Strong radiative heating due to the mixing state of black carbon in atmospheric aerosols. *Nature*, 2001, **409**: 695~697
- [4] Frazer L. Seeing through soot. *Environmental Health Perspectives*, 2002, **110** (8): A471~A473
- [5] Menon S, Hansen J, Nazarenko L, Luo Y F. Climate effects of black carbon aerosols in China and India. *Science*, 2002, **297**: 2250~2253
- [6] Chameides W L, Bergin M. Soot Takes Center Stage. *Science*, 2002, **297**: 2214~2215
- [7] Cao J J, Lee S C, Ho K F, et al. Characteristics of carbonaceous aerosol in Pearl River Delta region, China during winter period. *Atmospheric Environment*, 2003, **37**: 1451~1460
- [8] Hansen J, Nazarenko L. Soot climate forcing via snow and ice albedos. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 2004, **101** (2): 423~428
- [9] Woff G T. Particulate elemental carbon in the atmosphere. *J. Air Pollut. Contr. Assoc.* 1981, **31**: 935~938
- [10] Hansen A D A, Lowenthal D H, Chow J C, et al. Black carbon aerosol at McMurdo station, Antarctica. *J. Air & Waste Manage. Assoc.* 2001, **51**: 593~600
- [11] Bhugwant C, Bremaud P. Simultaneous Measurements of Black Carbon, PM_{10} , Ozone and NO_x Variability at a Locally Polluted Island in the Southern Tropics. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 2001, **39**: 261~280
- [12] Barrie L A. Arctic air pollution: an overview of current knowledge. *Atmospheric Environment*, 1986, **20**: 643~663
- [13] 汤洁, 温玉璞, 周凌唏, 等. 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, 1999, **10**: 160~170
Tang Jie, Wen Yupu, Zhou Lingxi, et al. Observation research of black carbon in clean area in western China. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 1999, **10**: 160~170
- [14] 王庚辰, 孔琴心, 刘广仁, 等. 秋末冬初北京大气颗粒物的变化. 第七届全国大气环境学术论文集, 北京: 1998, 210~215
Wang Gengchen, Kong Qinxin, Liu Guangren, et al. The variation of particulate matter in Beijing in the late autumn. Seventh International Conference on Atmospheric Environment (in Chinese), Beijing: 1998. 210~215
- [15] 张仁健, 王明星, 戴淑玲, 张文, 王秀玲, 李爱国. 北京地区气溶胶粒度谱分布初步研究. 气候与环境研究, 2000, **5** (1): 85~89
Zhang Renjian, Wang Mingxing, Dai Shuling, et al. Preliminary research on the size distribution of aerosols in Beijing. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2000, **5** (1): 85~89
- [16] 张仁健, 王明星, 张文, 王跃思, 李爱国, 朱光华. 北京冬春季气溶胶化学成分及谱分布研究. 气候与环境研究, 2000, **5** (1): 6~12
Zhang Renjian, Wang Mingxing, Zhang Wen, et al. Research on elemental concentrations and distributions of aerosols in winter/spring in Beijing. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2000, **5** (1): 6~12
- [17] 张仁健, 王明星, 浦一芬, 等. 北京春季特大沙尘暴物理化学特性的分析. 气候与环境研究, 2000, **5** (3): 259~266
Zhang Renjian, Wang Mingxing, Pu Yifen, et al. Analysis on the chemical and physical properties of "2000.4.6" super dust storm in Beijing. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2000, **5** (3): 259~266
- [18] 张小曳, 曹军骥, 苏广路, 张承中. 西安市的颗粒物污染控制. 见联合国开发计划署、中国国际经济技术交流中心主编, 中国城市空气污染控制. 北京: 中国科学技术出版社, 2001. 222~293
Zhang Xiaoye, Cao Junji, Su Guanglu, Zhang Chengzhong. Urban Air Pollution Control Program in Xi'an. In: *Urban Air Pollution Control Program in China* (in Chinese), the United Nations Development Programme (UNDP) and the China International Center for Economic and Technical Exchange (CICETE), Eds. Beijing: Chinese Science Technology publishing company, 2001

- [19] Magee Scientific Company Berkeley, California, USA. www.mageesci.com
- [20] Ball J, Willie C, Young C. Evidence of a new class of mutagenes in diesel particulate extracts. *Environment Science and Technology*, 1992, **26**: 2181~2186
- [21] Hansen A D A, Rosen H, Novakov T. The Aethalometer-an instrument for the real-time measurement of optical absorption by aerosol particles. *Science Total Environment*, 1984, **36**: 191~196
- [22] 中国环境监测总站. www.zhb.gov.cn
Environmental Monitoring of China. www.zhb.gov.cn
- [23] Im J S, Saxena V K, Wenny B N. Temporal trends of black carbon concentrations and regional climate forcing in the southeastern United States. *Atmospheric Environment*, 2001, **35**: 3293~3302
- [24] Ruellan S, Cachier H. Characterization of fresh particulate vehicular exhausts near a Paris high flow road. *Atmospheric Environment*, 2001, **35**: 453~468
- [25] Chylek P, Kou L, Johnson B, Boudala F, Lesins G. Black carbon concentrations in precipitation and near surface air in and near Halifax, Nova Scotia. *Atmospheric Environment*, 1999, **33**: 2269~2277
- [26] Pakkanen T A, Kerminen V-M, Ojanen C H, Hillamo R E, Aarnio P, Koskentalo T. Atmospheric black carbon in Helsinki. *Atmospheric Environment*, 2000, **34**: 1497~1506
- [27] Babich P, Davey M, Allen G, Koutrakis P. Method comparisons for particulate nitrate, elemental carbon, and PM_{2.5} mass in seven U. S. cities. *J. Air & Waste Management Association*, 2000, **50**: 1095~1105
- [28] Cachier H, Bremond M-P, Buat-Ménard P. Thermal separation of soot carbon. *Aerosol Science Technology*, 1989b, **10**: 358~364
- [29] Allen G A, Lawrence J, Koutrakis P. Field validation of a semi-continuous method for aerosol black carbon (aethalometer) and temporal patterns of summertime hourly black carbon measurements in southwestern PA. *Atmospheric Environment*, 1999, **33**: 817~823
- [30] Hugwant C B, Cachier H, Bessafi M, Leveau J. Impact of traffic on black carbon aerosol concentration at la Réunion Island (Southern Indian Ocean). *Atmospheric Environment*, 2000, **34**: 3463~3473
- [31] LaRosa L E, Buckley T J, Wallace L A. Real-Time Indoor and Outdoor Measurements of Black Carbon in an Occupied House: An Examination of Sources. *J. Air & Waste Management Association*, 2002, **52**: 41~49
- [32] 王正心, 高红, 姚力红. 烧麦秆与大气污染, 四川环境, 1997, **16** (4): 35~38
Wang Zhengxin, Gao Hong, Yao Lihong. Biomass burning and atmosphere pollution. *Sichuan Environment* (in Chinese), 1997, **16** (4): 35~38
- [33] Pakkanen T A, Kerminen V M, Ojanen C H, Hillamo R E, Aarnio P, Koskentalo T. Atmospheric black carbon in Helsinki. *Atmospheric Environment*, 2000, **34**: 1497 ~ 1506