

秸秆焚烧期的碳黑气溶胶观测及研究

伍德侠¹, 魏庆农¹, 魏健琍², 刘世胜¹, 冯巍巍¹

(1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所环境光学与技术重点实验室, 合肥 230031; 2. 合肥市环境监测中心站, 合肥 230031)

摘要: 2007 年 5~6 月在合肥市郊 3 个站点连续实时监测碳黑气溶胶, 研究其在秸秆焚烧期的变化特征和来源. 正常时期碳黑气溶胶平均质量浓度约为 $4.85 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 而秸秆焚烧期其平均浓度约为 $8.38 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 这说明秸秆焚烧是碳黑气溶胶的重要来源. 同步监测的 PM_{10} 与 BC 一致性较好, 相关系数为 0.74, 一般情况下 BC 约占 PM_{10} 的 4.7%, 而秸秆焚烧期 BC/ PM_{10} 的统计平均值较高, 约为 7.9%. 比对 2004 年秸秆焚烧期 BC 浓度数据, 证实了合肥市在实行农作物秸秆禁烧后, 碳黑气溶胶的污染情况有较大好转.

关键词: 碳黑气溶胶; 秸秆焚烧; 可吸入颗粒物(PM_{10}); 变化特征

中图分类号: X513 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2008)12-3304-06

Observational Study of Black Carbon Aerosol During Straw-Burning Period

WU De-xia¹, WEI Qing-nong¹, WEI Jian-li², LIU Shi-sheng¹, FENG Wei-wei¹

(1. Key Laboratory of Environmental Optics & Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Machine, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China; 2. Hefei Environmental Monitoring Central Station, Hefei 230031, China)

Abstract: Black carbon aerosol (BC) has been measured at three sites in Hefei City during May and June, 2007. Analyzing these real-time BC data, the concentration characters and the sources of black carbon aerosol can be found. The average concentrations of BC in normal period and straw-burning period are $4.85 \mu\text{g}/\text{m}^3$ and $8.38 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectively. The significant difference shows that the straw-burning is one of the main sources. The correlation coefficients between daily average concentration of BC and PM_{10} is 0.74, while the values of BC/ PM_{10} in normal period and straw-burning period are 4.7% and 7.9%, respectively. Through comparing to the BC concentration during straw-burning period in 2004, the results indicated that pollution of BC has reduced after straw-burning was forbidden by the government.

Key words: black carbon aerosol(BC); straw-burning; inhalable particles(PM_{10}); concentration characters

碳黑气溶胶(black carbon, BC)是大气气溶胶中一种重要组成部分, 来源于含碳物质不完全燃烧而排放出来的无定型碳质^[1], 它在可见到红外波段范围内对太阳辐射均有强烈的吸收^[2], 所以习惯上被称为碳黑气溶胶. 由于碳黑气溶胶具有危害人体健康^[3]、降低能见度^[4]、影响气候效应^[5-7]、改变对流层臭氧和光化学烟雾^[8, 9]等特性, 因此有关研究越来越受到各国科学家的关注^[10-15].

农作物秸秆含有大量的氮、磷、钾、碳氢元素及其机质硫等, 曾是我国广大农村地区重要的生活燃料之一. 然而近年来, 随着人们生活水平的提高和农业耕作方式的转变, 农作物成熟收割季节, 各地都出现了大规模露天焚烧秸秆的现象, 造成了严重的环境污染. 大量农作物秸秆的露天焚烧, 产生了氮氧化物、二氧化硫、碳氢化合物和烟尘等有毒有害污染物, 其中就包括非完全燃烧产生的碳黑气溶胶, 对环境和公共健康产生不良影响. 近几年北京多次遭到周边省份秸秆燃烧引起的空气污染; 1996~2001 年间, 北京秋末冬初碳黑浓度日均值约为 22.37

$\mu\text{g}/\text{m}^3$ ^[16]; 西安地区由于秋收后麦秆焚烧, 秋末冬初 BC 平均浓度约为 $20.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 显著高于春秋季节监测值^[17]; 而四川温江地区在 5 月水稻收割后有焚烧秸秆现象, 造成 BC 平均浓度上升到 $7.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 左右^[18].

本研究以合肥地区为例, 利用 2007 年 5~6 月在合肥市郊 3 个站点实时监测的碳黑气溶胶质量浓度数据, 并配合同步监测的 PM_{10} 及气象参数资料, 分析了合肥市郊区在秸秆焚烧期的碳黑气溶胶浓度变化特征及其主要来源, 这些观测研究对城市地区的环境治理具有一定的参考价值.

1 材料与方法

1.1 监测仪器

对碳黑气溶胶进行连续实时监测的仪器分别为 1 台 AE-31 型碳黑测量仪(Aethalometer, 美国 Magee Scientific 公司生产)和 2 台 BCA7 型碳黑气溶胶分析

收稿日期: 2007-11-29; 修订日期: 2008-04-07

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2005AA641010)

作者简介: 伍德侠(1978~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为大气环境监测, E-mail: robinwood@aiofm.ac.cn

仪(中国科学院安徽光学精密机械研究所研制), 2 种设备的检测方法都属于光学测量法^[19,20], 其工作原理是利用了碳黑气溶胶对可见到红外波段范围内的强吸光特性, 以恒定的流速把样气抽进检测室, 附着在透光均匀的石英纤维滤纸上, 再以固定波长的光源照射, 测量光线透过滤纸时所产生的衰减量. 在有效范围内, 光衰减量与单位面积石英滤纸上沉积的碳黑总质量有着线性关系^[21], 通过一定算法即可获得大气中碳黑气溶胶的质量浓度. 实验预备期对 3 台仪器进行了 2d 连续比对测试, 获得的数据值近似且三者相关性较好. 另外, 各站点在监测碳黑气溶胶的同时, 使用振荡天平(TEOM RP1400a, 美国 R&P 公司生产), 通过 PM₁₀ 切割头对大气气溶胶采样, 获得了大气中 PM₁₀ 的质量浓度.

1.2 实验站点及时间

实验的观测站点共有 3 处, 分别位于合肥市西郊董铺岛站点(31°54'N, 117°09'E, 采样相对高度 14.5 m), 距离市中心直线距离约 14 km; 东郊三里街站点(31°52'N, 117°18'E, 采样相对高度 9.5 m), 距离市中心直线距离约 5 km; 南郊明珠广场站点(31°47'N, 117°11'E, 采样相对高度 21.5 m), 距离市中心直线距离约 11 km.

董铺岛站点周边植被茂盛, 空气较为洁净, 无明显污染源, 平常作为合肥市环境监测中心的空气监测对照点, 但在每年 5、6 月份的收割季节, 也受到周边露天焚烧秸秆的影响. 此处放置 AE31 型碳黑测量仪 1 台, 观测时间为 2007-05-15 ~ 2007-06-20, 获得 BC 有效数据 9 246 个, 共计约 770 h. 三里街站点

位于市区东郊交通道路边, 机动车尾气排放是 BC 来源之一, 此处放置 BCA7 型大气碳黑气溶胶分析仪 1 台, 观测时间为 2007-05-15 ~ 2007-06-07, 获得 BC 有效数据 5 456 个, 共计约 454 h. 明珠广场站点靠近合肥市南郊, 附近有部分在建住宅区, 建筑工地扬尘可能对 BC 的监测存在一定干扰, 此处放置 BCA7 型大气碳黑气溶胶分析仪 1 台, 观测时间为 2007-05-18 ~ 2007-06-19, 获得 BC 有效数据 6 970 个, 共计约 580 h.

2 结果与分析

2.1 BC 时均浓度变化趋势

2007 年 5 月中旬, 合肥地区开始进入农作物成熟收割期, 尽管合肥市政府采取了秸秆禁烧措施, 但在市郊某些地点仍然出现了露天焚烧秸秆情况, 造成了短时间的空气轻度污染. 在静稳天气占主导的气象条件下, 污染物扩散和消除的速度较慢, 其积累效应使得 5 ~ 6 月合肥地区大气中碳黑气溶胶的质量浓度高于平常月份. 图 1 显示了合肥市 3 个站点监测的碳黑气溶胶时均浓度变化趋势, 从中可见, 5 月 20 日、22 日、29 日和 6 月 5 日有明显的峰值, 远远高于该次实验期间的浓度均值, 这与合肥市环保局 2007 年秸秆禁烧简报中介绍的监督情况一致, 这 4 d 城市周边地区的确有较多秸秆燃烧火点. 例如, 2007-05-29 由 MODIS 卫星数据反演的卫星火点图(图 2)即可反映当天合肥地区秸秆焚烧的情况. 这 4 d 以晴天为主, 无强对流天气(降雨或大风), 有利于污染物的积累. 静稳天气和污染源排放量的增加, 这

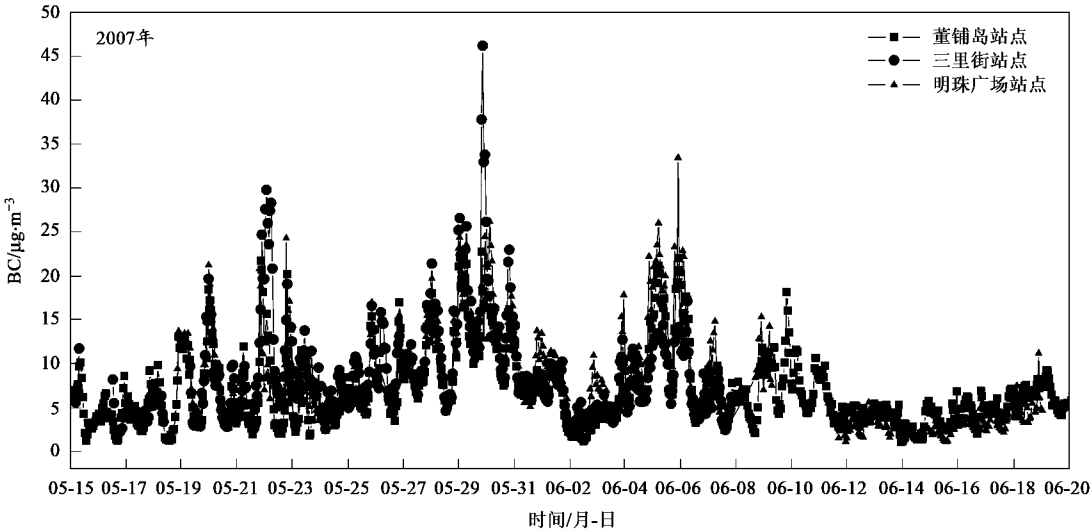


图 1 合肥市 BC 时均浓度的变化趋势

Fig. 1 Hourly average particulate BC concentration measured in Hefei City

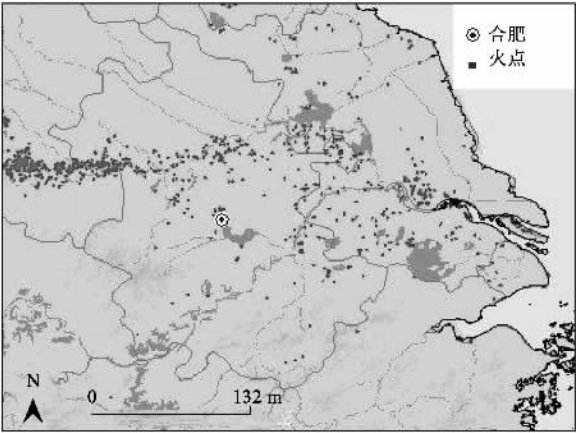


图 2 MODIS 卫星火点图(2007-05-29)
Fig.2 Map of fire locations by MODIS telemetry

2 个因素造成了秸秆焚烧期碳黑气溶胶浓度较高。
3 个站点的碳黑气溶胶浓度变化趋势基本一致,这说明在较小区域范围内,尽管不同站点附近的偶然事件可能造成其浓度短期内有所不同,但是经过较长时间的扩散后,碳黑气溶胶的浓度变化趋势会呈现较高的相关性,如图 3 所示,明珠广场站点和三里街站点相对于董铺岛站点 BC 浓度的相关系数

分别为 0.88 和 0.79. 2007-05-18 ~ 2007-06-07 监测碳黑气溶胶的 3 台仪器同步工作,分析数据可得到 3 个站点该段时间内 BC 的平均浓度,见表 1.董铺岛站点位于环境较洁净的西郊,因此 BC 平均浓度较低,为 $(8.38 \pm 4.87) \mu\text{g}/\text{m}^3$;而另外 2 个站点离市区较近,除秸秆焚烧外还有市区机动车尾气等污染源贡献,所以 BC 平均浓度略高.

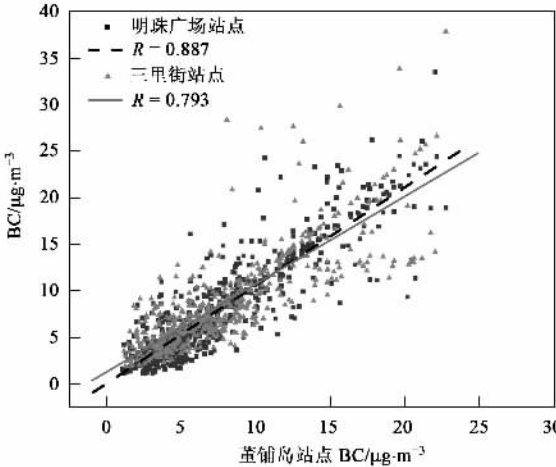


图 3 不同站点间 BC 浓度的关系
Fig.3 Relation of BC concentration between different stations

表 1 BC 时均浓度统计结果

Table 1 Statistics of BC hourly average concentration

观测站点	观测区域	平均浓度 $/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	误差 $/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	最小值 $/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	最大值 $/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	采样数 /h
董铺岛	西郊	8.38	4.87	1.17	22.75	463
三里街	东北郊	9.34	5.66	1.87	46.20	468
明珠广场	南郊	9.45	5.45	1.59	33.47	461

在实验后期(6 月 11 日 ~ 6 月 20 日),合肥地区收割季节已过,农作物秸秆基本处理完毕,去除强对流天气时段的 BC 数据,可近似得到正常情况下董铺岛站点(合肥郊区)BC 浓度日变化趋势,如图 4 所示.碳黑气溶胶的浓度变化趋势恢复平稳状态,呈现双峰特征,即早晚高,中午低,这与文献[16]中的结论一致,这种现象是由人为活动和太阳辐射的共同作用造成的.无秸秆焚烧影响的正常情况下,合肥市郊的碳黑气溶胶平均浓度为 $(4.85 \pm 0.67) \mu\text{g}/\text{m}^3$,远远低于秸秆焚烧期的 BC 平均浓度 $(8.38 \pm 4.87) \mu\text{g}/\text{m}^3$.为了直观比较正常情况和秸秆焚烧污染情况下的 BC 差异,图 4 中还绘制了 5 月 29 日和 6 月 5 日这 2 d 的 BC 日变化趋势,从中可见,尽管污染较高的时段碳黑气溶胶的变化趋势也符合夜间高,白天低的双峰特征,但其绝对浓度高出正常情况下的

4~5 倍.这证明了秸秆焚烧事件对大气中碳黑气溶胶浓度的急剧上升具有较大贡献,同时也证实了碳黑气溶胶的浓度高低平时可以作为检验空气质量好坏的重要标志之一,而在农作物收割季节可以作为评估秸秆焚烧严重程度的决策依据.

2.2 BC 与 PM₁₀ 的对比分析

秸秆焚烧会产生大量的悬浮颗粒物,本次实验期间使用了振荡天平加 PM₁₀ 切割头,对大气中粒径 < 10 μm 的悬浮颗粒物进行了同步监测. BC 的粒径一般 < 2.5 μm ^[22, 23],城市地区碳黑气溶胶质量浓度约占 PM₁₀ 的 5% ~ 10%^[24, 25].图 5 显示了 2007-05-15 ~ 2007-06-20 期间合肥地区 BC 和 PM₁₀ 的日均浓度,两者的变化趋势基本一致.董铺岛站点 BC 统计平均值为 6.87 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,日均浓度范围 2.17 ~ 15.82 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,而 PM₁₀ 统计平均值为 0.092 mg/m^3 ,日均浓度

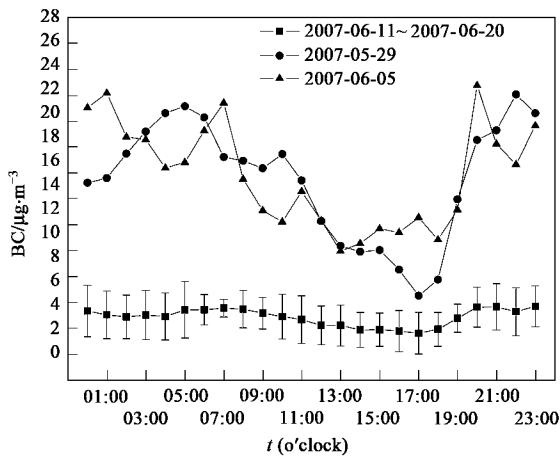


图 4 合肥地区碳黑气溶胶浓度日变化趋势

Fig.4 Diurnal variation of hourly average BC concentration in Hefei City

范围 $0.017 \sim 0.213 \text{ mg/m}^3$, 两者线性相关系数为 0.74 , BC 约占 PM_{10} 的 4.7% , 略低于城市地区 BC/PM_{10} 比值, 这与采样站点位于市郊有关. 图 5 中的虚线为 PM_{10} 国家二级标准 (0.15 mg/m^3), PM_{10} 日均值超过此标准的日期与 BC 出现高值的日期基本相同. 秸秆焚烧情况较为严重时, BC/PM_{10} 的统计平均值约为 7.9% , 明显高于正常时期市郊的 BC/PM_{10} 比值.

总之, PM_{10} 与 BC 的浓度趋势都可反映出秸秆焚烧期的空气质量, 但在城市周边地区, 无工业污染源和机动车尾气排放的情况下, 碳黑气溶胶的浓度趋势可更有效地说明秸秆焚烧的程度. 因为 PM_{10} 会受到自然界扬尘等悬浮颗粒物的干扰, 而碳黑气溶胶

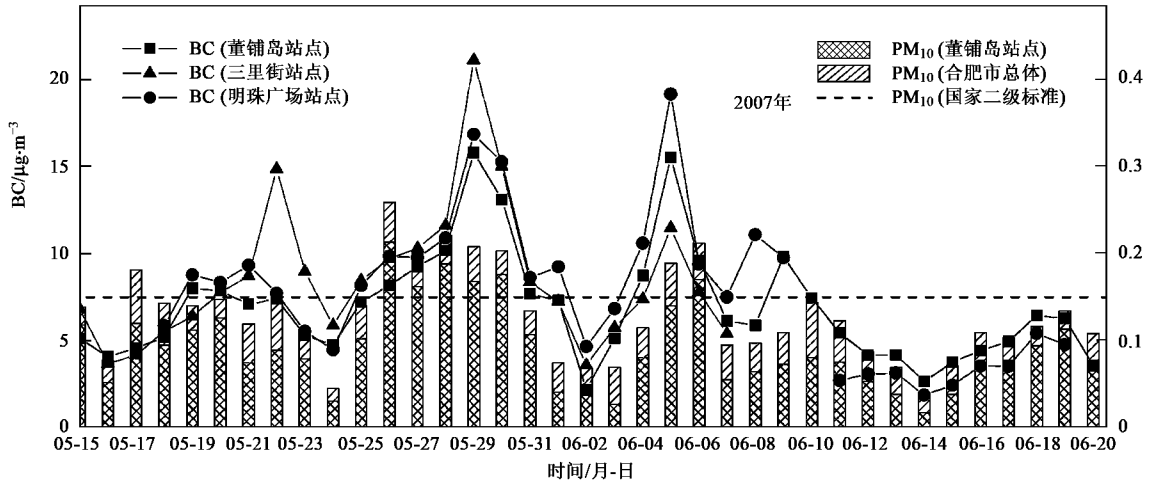


图 5 BC 和 PM_{10} 的日均浓度趋势图

Fig.5 Example of daily variation of BC and PM_{10} concentration

一般只在含碳物质非完全燃烧过程中产生, 来源较为单一.

另外, 分析气象数据和污染物浓度可知, 天气条件也是影响大气气溶胶浓度的重要因素. 合肥地区 5 月 24 日、6 月 1~3 日以及 6 月 14 日都有强降雨过程, 降雨造成了悬浮颗粒污染物的湿沉降, 因此在这几天 PM_{10} 与 BC 浓度都出现了低值.

2.3 与 2004 年秸秆焚烧污染事件中 BC 浓度的比较分析

近几年每到 5、6 月份, 合肥市周边地区总会存在露天焚烧秸秆的情况, 在静稳天气条件下, 污染物的积累会造成极为恶劣的污染事件, 过低的能见度导致机场和高速公路关闭, 空气中高浓度污染物会

严重危害公共健康. 2004 年 5 月, 董铺岛站点进行空气质量连续监测时就遭遇了 1 次秸秆焚烧的重污染事件, 获得的 BC 时均浓度如图 6 所示. 2004-05-23 ~ 2004-05-26 碳黑气溶胶的统计平均浓度为 $26.12 \text{ } \mu\text{g/m}^3$, 尤其在 5 月 25 日夜間, 碳黑气溶胶的时均浓度高达 $130 \text{ } \mu\text{g/m}^3$, 超过正常情况十几倍甚至几十倍.

2007 年 5、6 月份, 合肥市政府采取了秸秆禁烧措施, 在政府和市民环保意识增强的作用下, 秸秆露天焚烧的情况大大减少, 无重污染事件发生, 只有几天存在轻度污染. 该次实验所获得的 BC 浓度数据也从侧面证明: 尽管 2007 年 5、6 月份 BC 统计平均浓度高于平常月份, 但空气污染状况比往年大有好转.

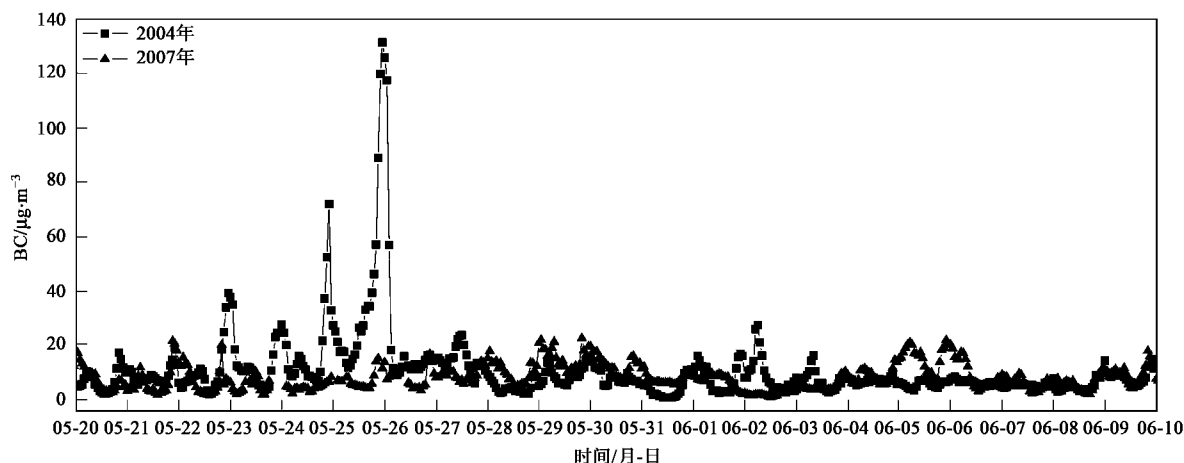


图6 合肥市不同年份秸秆焚烧期 BC 时均浓度的变化趋势 (05-20~06-10)

Fig.6 Hourly average BC concentration measured in different years in Hefei City

3 结论

(1)正常情况下,合肥地区碳黑气溶胶的统计平均浓度约为 $4.85 \mu\text{g}/\text{m}^3$,而秸秆焚烧情况较为严重时,BC 的统计平均浓度为 $8.38 \mu\text{g}/\text{m}^3$,其日均浓度变化范围为 $2.17 \sim 15.82 \mu\text{g}/\text{m}^3$.秸秆焚烧是该段时期 BC 连续高值的主要贡献源,长期连续监测 BC 可作为减少此类污染事件的有效预警手段之一.

(2)碳黑气溶胶是 PM_{10} 中重要的组成部分,市郊两者的浓度变化趋势具有良好的一致性,相关系数约为 0.74,且 BC 在 PM_{10} 中约占 4.7%.在秸秆焚烧期,BC/ PM_{10} 的统计平均值约为 7.9%,显著高于正常时期.城市郊区的碳黑气溶胶由于其来源单一,比 PM_{10} 更有效地反映了秸秆焚烧的程度.

(3)尽管 2007 年 5、6 月份 BC 统计平均浓度较高,但是远低于 2004 年相同时段监测值,这说明合肥市实行的农作物秸秆焚烧措施对环境保护具有一定的积极作用,今后应该加大治理力度,减少秸秆焚烧带来的环境污染.

致谢:实验观测工作在合肥市环境监测中心站所辖的 3 个站点完成,在此对该站大气室所有工作人员对本研究观测工作提供的各种帮助和支持表示感谢.

参考文献:

[1] Penner J E, Eddleman H. Toward the development of global inventory for black carbon emissions[J]. *Atmospheric Environment*, 1993, **27**(8): 1277-1295.

[2] Marrin R V, Daniel J J, Robert M Y, *et al.* Global and regional decreases in tropospheric oxidants from photochemical effects of

aerosols[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, **108**(D3): 4097-4116.

- [3] Hamilton R S, Mansfield T A. Airborne particulate elemental carbon: its sources, transport and contribution to dark smoke and soiling[J]. *Atmospheric Environment*, 1991, **25**(3): 715-723.
- [4] Groblicki P J, Wolff G T, Countess R J. Visibility reducing species in the Denver 'brown cloud' - I Relationships between extinction and chemical composition [J]. *Atmospheric Environment*, 1981, **15**(12): 2473-2481.
- [5] Horvath H. Atmospheric light absorption-A review[J]. *Atmospheric Environment*, 1993, **27A**: 293-317.
- [6] Hitzenberger R, Jennings S G, Larson S M, *et al.* Intercomparison of measurement methods for black carbon aerosols[J]. *Atmospheric Environment*, 1999, **33**: 2823-2833.
- [7] Meinrat O A. The dark side of aerosols[J]. *Nature*, 2001, **409**: 671-672.
- [8] Lary D J, Lee A, Touni M, *et al.* Carbon aerosols and atmospheric photochemistry[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, **102**(D3): 3671-3682.
- [9] Bizjak M, Turšič J, Lešnjak T, *et al.* Aerosol black carbon and ozone measurements at Mt. Kravac EMEP/GAW station, Slovenia [J]. *Atmospheric Environment*, 1999, **33**: 2783-2787.
- [10] Menon S, Hansen J, Nazarenko L, *et al.* Climate effects of black carbon aerosols in China and India [J]. *Science*, 2002, **297**: 2250-2253.
- [11] Streets D G, Gupta S, Waldho S T, *et al.* Black carbon emissions in China[J]. *Atmospheric Environment*, 2001, **35**: 4281-4296.
- [12] Chameides W L, Bergin M. Soot takes center stage [J]. *Science*, 2002, **297**: 2214-2215.
- [13] Cao J J, Lee S C, Ho K F, *et al.* Characteristics of carbonaceous aerosol in Pearl River Delta region, China during winter period [J]. *Atmospheric Environment*, 2003, **37**: 1451-1460.
- [14] Hansen J, Nazarenko L. Soot climate forcing via snow and ice albedos [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2004, **101**

- (2):423-428.
- [15] 鄂勇, 宋国利, 张颖, 等. 碳黑大气颗粒物的环境效应[J]. 地球与环境, 2006, **34**(1): 61-64.
- [16] 王庚辰, 孔琴心, 任丽新, 等. 北京地区大气中的黑碳气溶胶及其变化特征[J]. 过程工程学报, 2002, **11**(2):284-288.
- [17] 李杨, 曹军骥, 张小曳, 等. 西安大气中黑碳气溶胶的演化特征[J]. 过程工程学报, 2004, **4**: 472-479.
- [18] 秦世广, 汤洁, 石广玉, 等. 四川温江黑碳气溶胶浓度观测研究[J]. 环境科学学报, 2007, **27**(8):1370-1376.
- [19] Hansen A D A, Rosen H, Novakov T. The Aethalometer-an instrument for the real-time measurement of optical absorption by aerosol particles [J]. Science of the Total Environment, 1984, **36**: 191-196.
- [20] 伍德侠, 魏庆农, 刘世胜, 等. 大气碳黑气溶胶检测仪的研制[J]. 分析仪器, 2007, **2**: 7-9.
- [21] Gundel L A, Dod R L, Rosen H, *et al.* The relationship between optical attenuation and black carbon concentration for ambient and source particles[J]. Science of the Total Environment, 1984, **36**: 197-202.
- [22] Thomas W, Kirchstetter, Novakov T. Controlled generation of black carbon particles from a diffusion flame and applications in evaluating black carbon measurement methods[J]. Atmospheric Environment, 2007, **41**: 9.
- [23] 秦世广, 汤洁, 温玉璞. 黑碳气溶胶及其在气候变化中的意义[J]. 气象, 2001, **27**(11):3-7.
- [24] 娄淑娟, 毛节泰, 王美华. 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, 2005, **25**(1):17-22.
- [25] Hitznerberger R. Absorption coefficients and mass concentrations of the urban aerosol of Vienna, Austria, during the years 1985 and 1986 [J]. Water Air Soil Pollution, 1993, **71**:131-153.