

兰州远郊区黑碳气溶胶浓度特征

张磊^{1,2},张镭^{1*},张丁玲¹,赵世强^{1,3},黄建平¹,张武¹,史晋森¹(1.兰州大学大气科学学院,半干旱气候变化教育部重点实验室,甘肃兰州 730000; 2.中国人民解放军 92543 部队,河南 济源 454650; 3.中国人民解放军 93808 部队,甘肃 榆中 730109)

摘要: 利用兰州大学半干旱气候与环境观测站(SACOL)2007年1月1日至2009年8月28日黑碳气溶胶浓度和同期常规气象资料,分析了兰州远郊区黑碳气溶胶浓度特征.结果表明,该区黑碳气溶胶日平均浓度为1568ng/m³,低于东部地区区域本底站浓度,表明该地区污染较轻;黑碳浓度具有明显的季节变化,从春季到冬季平均浓度依次增大,分别为1234.74,1290.23,1669.06,2088.73ng/m³,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.黑碳浓度的变化特征与本地区的盛行风向、人类活动及天气过程有密切关系.沙尘气溶胶对黑碳浓度的影响取决于沙尘过程的强度、沙尘携带的人为污染物的种类及数量、黑碳颗粒被其他气溶胶混合和包裹的程度.统计分析得出该地区大气黑碳气溶胶本底浓度约为1000ng/m³.

关键词: 兰州郊区; 黑碳气溶胶; 沙尘气溶胶; 本底浓度

中图分类号: X131.1,P421 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2011)08-1248-08

Property of black carbon concentration over outskirts of Lanzhou, Northwest China. ZHANG Lei^{1,2}, ZHANG Lei^{1*}, ZHANG Ding-ling¹, ZHAO Shi-qiang^{1,3}, HUANG Jian-ping¹, ZHANG Wu¹, SHI Jin-sen¹ (1.Key Laboratory for Semi-Arid Climate Change of the Ministry of Education, College of Atmospheric Science, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 2.Unit of 92543 of People's Liberation Army, Jiyuan 454650, China; 3.Unit of 93808 of People's Liberation Army, Yuzhong 730109, China). *China Environmental Science*, 2011,31(8): 1248~1255

Abstract: The characteristics of black carbon (BC) concentration were analyzed using the BC monitoring data of Semi-arid Climate Observatory and Laboratory (SACOL) during the period from January 2007 to August 2009. The average daily BC surface concentration was 1568ng/m³, lower than that of some background observation stations in East China. The BC concentration obviously had a seasonal variation from spring to summer, autumn and winter, with respective value of 1234.74, 1290.23, 1669.06 and 2088.73ng/m³. The diurnal variation showed a bimodal distribution with the maximum value at 09:00 (Beijing Time), and the minimum at 17:00. The variation of BC concentration was closely related with the air pollution emission and diffusion condition. The affection of dust events to BC concentration depended on the strength of the dust events, the type and the amount of the anthropogenic aerosols captured by the dust particles, and the mixing state of BC particles with other aerosols. According to the data statistical analysis the BC surface background concentration at SACOL was 1000ng/m³.

Key words: outskirts of Lanzhou; black carbon; dust aerosol; background concentration

黑碳气溶胶对地气系统的辐射平衡有重要的影响.黑碳气溶胶主要来源于化石燃料和生物质的燃烧,是大气气溶胶中最主要的光学吸收成分.黑碳气溶胶可以通过直接、间接和半间接三种效应作用到大气辐射强迫中.黑碳气溶胶通过吸收和散射太阳辐射以及红外辐射产生直接辐射强迫^[1];在传输过程中可以由初始的疏水性颗粒转化为亲水的云凝结核,在暖云中形成更多更

小的云滴,增加了云反照率^[2],降低了降水的可能性,延长了云生命期^[3],产生间接辐射效应;通过吸收太阳辐射加热云滴,减少云中液态水的含量,进而减少云量和云的光学厚度,增加地表的太阳辐

收稿日期: 2010-11-10

基金项目: 国家“973”项目(2010CB428604);国家自然科学基金资助项目(41075104);中央高校基本科研业务费专项(lzujbky-2009-k03)

* 责任作者, 教授, zhanglei@lzu.edu.cn

射,产生半间接效应^[4]。

对黑碳浓度的研究是评估黑碳气溶胶气候效应的基础。Beegum 等^[5]在印度发现由于海陆风的作用,当西高止山脉发生森林火灾后不久,距离火灾发生地点 20km 处的 Trivandrum 黑碳浓度就有两倍的增长。Chow 等^[6]研究了加州 Fresno 黑碳气溶胶的吸收效率。Lambe 等^[7]研究了美国 Pittsburgh 不同来源对黑碳气溶胶的贡献。Dodson 等^[8]得到了罗德岛的 Warwick 机场附近黑碳小时平均浓度约为 $500\text{ng}/\text{m}^3$,并分析了由于飞机起降和附近道路交通排放导致的黑碳浓度的变化。Barnard 等^[9]在墨西哥城距离工业污染较远的商业-居民混合区得到的黑碳质量吸收系数在 500nm 波段为 $8.9\text{m}^2/\text{g}$ 。Järvi 等^[10]在距离赫尔辛基市中心两公里处得到的黑碳浓度的中位数从 1996 年的 $1110\text{ng}/\text{m}^3$ 减小到了 2005 年的 $1000\text{ng}/\text{m}^3$ 。Dutkiewicz 等^[11]得到了巴基斯坦卡拉奇市区黑碳浓度日平均值为 $10000\text{ng}/\text{m}^3$,在晚上可以达到 $15000\text{ng}/\text{m}^3$ 。亦有针对广州^[12]、北京^[13]、西安^[14]、四川^[15]、上海^[13,16]、内蒙^[17]等地区黑碳气溶胶浓度及季节变化特征的研究报道。在观测资料的时间长度上,多为个例和短时段的观测,一年以上长时间的观测较少。由于黑碳气溶胶的时空分布变化十分剧烈,因此长时间的观测更有助于推进对黑碳气溶胶气候效应的研究。在地理分布上,除了锡林浩特处在半干旱区,其余观测地点均为城市或植被覆盖较好的乡村。因此,迄今为止对半干旱地区长时间序列黑碳浓度的研究仍较为不足。

符淙斌等^[18]指出随着 20 世纪下半叶的持续增暖,欧亚大陆干旱化趋势明显,邓振镛等^[19]认为,随着气候变化和社会经济快速发展,甘肃气候呈现十分明显的干旱化趋势,是干旱化研究的重点区域。甘肃地区生态系统脆弱,对气候变化异常敏感,是全球气候变化的指示器之一^[20]。兰州地区属于典型的半干旱地区,降水量少,空气干燥,地表蒸发量大,春季多沙尘事件。本课题组利用兰州大学半干旱气候与环境观测站(SACOL)黑碳气溶胶浓度和同期常规气象资料,分析 2007 年 1 月至 2009 年 8 月兰州榆中地区黑碳气溶胶浓度

的变化特征,旨在为研究半干旱地区黑碳气溶胶的气候效应提供理论基础。

1 数据采集及资料处理

1.1 采样地点

兰州大学半干旱气候与环境观测站(SACOL)在兰州市东南方向,距离兰州市中心 48km,距离南部的榆中县城 10km,位于兰州大学榆中校区海拔 1965.8m 的萃英山塬顶(35.57°N , 104.08°E),被一些海拔介于 1714~2089m 范围内的山脊、土墩和小块平地所环绕。下垫面属于典型的黄土高原地貌,长有较短的冷蒿、芒草等。该区域属于温带大陆性气候,塬顶常年主导风向西北和东南,年平均地面温度 6.7°C ,年平均降水量 381.8mm,年平均蒸发量 1528.5mm,年平均风速 1.6m/s。样点 SACOL 的详细情况见文献[21]。该样点的空气污染可能源于山脚下兰州大学和西北民族大学榆中校区,西南方向 2km 处的岷柳高速公路、5km 处的 312 国道机动车尾气排放。另外,榆中县有零星分布的工业污染源,西北方向 40km 外兰州市区的污染排放可能也有贡献。

1.2 仪器和数据

采样仪器为美国玛基科技生产的 AE-31 型黑碳仪,利用黑碳对可见光有强烈吸收的特性测量黑碳浓度,属于光学灰度测量法。仪器有 7 个通道:370,470,520,590,660,880 和 950nm,本实验采用 880nm 通道。采样器切割头为 $2.5\mu\text{m}$,采样口距离地面 3m,采样流量 5L/min,每 5min 获取 1 个数据,时间采用北京时。黑碳仪定期使用标定气体进行标定。根据黑碳仪的说明书,黑碳仪可以将进入仪器的所有气溶胶造成的光衰减等效成黑碳气溶胶的贡献,因此,黑碳仪所得结果并不说明所采集样本都是黑碳气溶胶。

利用 2007 年 1 月 1 日至 2009 年 8 月 28 日的的数据,对资料进行了范围检查、时变检查^[22]等质量控制之后,得到 782d 的数据,完好率为 97%。

2 结果与分析

2.1 黑碳气溶胶浓度时间序列

2007 年 1 月 1 日至 2009 年 8 月 28 日黑碳

气溶胶的日平均浓度变化见图 1, 春季为 2007 年、2008 年、2009 年 3~5 月, 夏季为 2007 年、2008 年、2009 年 6~8 月, 秋季为 2007 年、2008 年 9~11 月, 冬季为 2007 年 1 月~2 月、12 月~2008 年 2 月、2008 年 12~2009 年 2 月. 可以看出 SACOL 观测的黑碳浓度每年都有明显的季节变化, 冬季较高, 春夏季较低, 日平均浓度为 1568.49ng/m^3 , 最大值为 7771.16ng/m^3 , 最小值为 249.713ng/m^3 . 表 1 示出了全国部分站点的观测值以作参考.

从表 1 可以看出, SACOL 黑碳平均浓度 1568.49ng/m^3 , 低于北京郊区的上甸子, 更低于北京市区、上海浦东新区等城市观测值, 这与观测点的地形、距离污染源的远近等都有密切的关系. 表 1 中城市观测点均在市区内部, 交通尾气和工业排放使得各观测点的黑碳浓度较高. 相比西安、北京等大城市, 西宁城市规模较小, 污染

较轻, 黑碳浓度较低. 上甸子观测站位于北京市密云自然保护区内, 位置偏僻, 受污染较轻, 黑碳浓度较低.

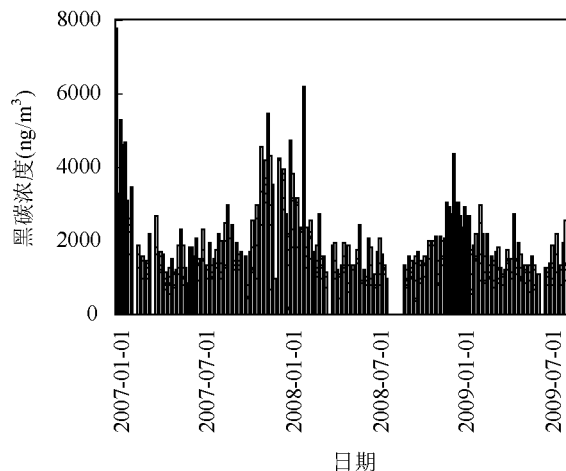


图 1 黑碳日平均浓度变化

Fig.1 Time series of daily averaged BC concentration at SACOL

表 1 中国部分大气监测站的黑碳浓度

Table 1 BC concentration at some sites in China

观测点	观测站环境	观测时间	仪器	日平均黑碳浓度(ng/m^3)
SACOL(本研究)	郊区站点	2007-01~2009-08	AE-31 黑碳仪(美国玛基公司)	1568
北京上甸子 ^[23]	区域本底站	2003-04~2005-01	AE-31 黑碳仪(美国玛基公司)	2120
青海西宁 ^[24]	城市站点	2005-09~2007-07	AE-T14 黑碳仪(美国玛基公司)	4240
上海浦东新区 ^[16]	城市站点	2006-10~2006-12	AE-31 黑碳仪(美国玛基公司)	5621
陕西西安 ^[14]	城市站点	2006-03~2007-02	AE-16-ER 黑碳仪(美国玛基公司)	10000
北京丰台 ^[25]	城市站点	2005-08~2005-09	AE-31 黑碳仪(美国玛基公司)	11100

2.2 黑碳气溶胶浓度的季节变化

分析了 2007 年 6 月到 2009 年 5 月黑碳气溶胶在不同季节平均的日变化特征, 见图 2, 黑碳浓度表现出明显的季节变化特征. 从春季到冬季黑碳浓度逐渐增大(表 2). 黑碳的粒子尺度介于 $0.01\sim 1\mu\text{m}$ 之间^[17,26-27], Huang 等^[21]的研究表明, 春季 SACOL 细粒子(空气动力学直径介于 $0.5\sim 1\mu\text{m}$)的数浓度春季为 178.26m^{-3} , 明显小于其他 3 个季节(夏 222.05m^{-3} , 秋 509.39m^{-3} , 冬 921.46m^{-3}), $1\mu\text{m}$ 左右的大粒子含量春季明显高于秋、冬季节^[28], 符合本研究中黑碳浓度从春季到冬季依次增大的特征. 春季和夏季的平均值接近, 秋季比夏季增长 30%(378.83ng/m^3), 冬季比秋

季增长 25% (419.67ng/m^3). 从表 3 也可以看出, 春夏两季黑碳浓度 $>2000\text{ng/m}^3$ 的频数接近, 分别为 13% 和 15%; 而秋季明显大于春夏季, 为 29%; 冬季最大, 为 44%.

黑碳浓度季节变化的原因比较复杂, 主要取决于各个季节黑碳气溶胶的来源和强度, 而且与大气湍流强弱、盛行风向、天气过程等有密切关系. 四季中大气湍流扩散的强弱有很大差别. 夏季日照时间长, 地面接收到的能量较多, 湍流垂直扩散较为剧烈, 有利于黑碳的扩散. 冬季日照时间短, 湍流发展弱, 且逆温层出现的频率较高, 不利于黑碳的扩散, 这也是导致黑碳浓度冬季比夏季高的主要原因.

兰州市东南方向,一直到定西市附近,有一条明显的西北-东南走向的山谷,SACOL 位于山谷的西南一侧,受山谷地形影响,SACOL 四个季节的主导风向都为西北和东南,但略有差别.东南和西北风向频数比,分别为春季 2.11、夏季 1.96、秋季 1.86、冬季 1.38,东南风依次减弱而西北风依次增强.SACOL 西北方向 48km 处为兰州市区,人口密

集,拥有石化、机械等重工业,污染较重,南部为榆中县,虽然有采矿、冶金等工业,但与兰州相比规模较小,污染排放较少,空气较为清洁.四个季节中春季东南风向最盛,而冬季西北风向最盛,冬季西北风从兰州市区带来重污染是 SACOL 冬季黑碳浓度最高的一个重要原因,相对清洁的东南风使得 SACOL 春季黑碳浓度最低.

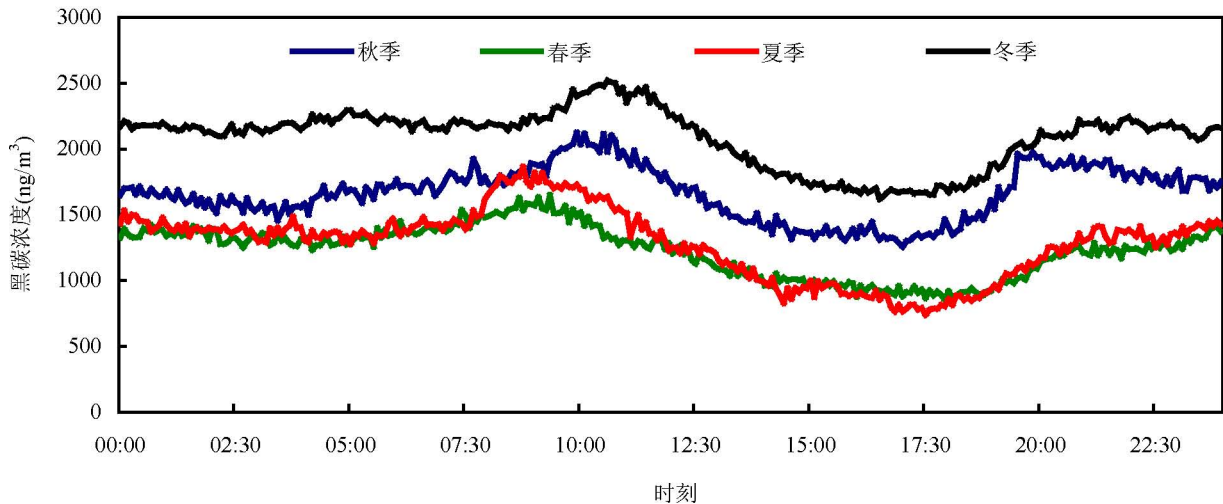


图 2 SACOL 不同季节平均的黑碳浓度日变化

Fig.2 Diurnal variation of BC concentration at SACOL in four seasons

表 2 4 个季节黑碳浓度的基本统计

Table 2 The statistical results of seasonal averaged BC concentration

季节	平均值 (ng/m ³)	最大值 (ng/m ³)	最小值 (ng/m ³)	中位数 (ng/m ³)	方差
春季	1234.74	11985.00	55.00	2721.00	694.04
夏季	1290.23	12413.00	61.00	915.00	796.19
秋季	1669.06	11331.00	66.00	1452.00	1170.12
冬季	2088.73	10306.00	55.00	2691.00	1254.33

表 3 4 个季节黑碳浓度的频数分布(%)

Table 3 Frequency distribution of BC concentration in four seasons (%)

季节	黑碳浓度(ng/m ³)			
	0~1000	1000~2000	2000~3000	>3000
春季	42.3	45.2	10.8	1.7
夏季	41.7	42.7	12.5	3.1
秋季	32.1	40.0	16.9	12.0
冬季	17.8	37.7	25.4	19.1

排放源是冬季的燃煤取暖.每年 10 月中旬到次年 4 月中旬是榆中的取暖期,居民燃烧煤炭取暖,空气中细粒子和二次气溶胶大量增加^[29],也是冬季黑碳气溶胶的浓度远大于其他季节的重要原因之一.黑碳气溶胶的清除与干、湿沉降和扩散稀释能力有关,降水能有效清除黑碳气溶胶^[27].2007 年 6 月至 2009 年 5 月每个季节的降水总量分别为春季 89.50,夏季 268.70,秋季 237.30 和 14.10mm,其中夏季降水量最大,秋季次之,而冬季最小,最不利于黑碳气溶胶湿清除.春季的前半段(3 月~4 月中旬)、秋季的后半段(10 月中旬~11 月)为燃煤取暖期,榆中县城采取集中供暖,周围乡镇农村为居民自己燃煤取暖,春季和秋季各有一个半月左右的取暖期,在此期间,黑碳排放较强,是 SACOL 春季和秋季主要的黑碳来源.春季黑碳浓度低于秋季,降水的湿沉降和春季多东南风是可能的影响因子.春季降水量为 89.50mm,只有 20.1%的降水分布在取暖期(18.00mm),79.9%的

对 SACOL 黑碳浓度影响最大的季节性本地

降水分布在非采暖期(71.50mm);秋季降水量为237.30mm,也只有14.1%的降水分布在取暖期(33.30mm),85.9%的降水分布在非取暖期(204.00mm),秋季取暖期降水量为春季的1.85倍,因此降水的湿沉降作用秋季可能要强于春季,但是春季东南和西北风向频数比(2.11)大于秋季(1.86),使得春季的黑碳浓度仍小于秋季。

春季频发的沙尘事件对SACOL的黑碳浓度有重要的影响.SACOL位于典型的半干旱地区,春季沙尘事件频发.统计了2008年和2009年春季全部20次沙尘事件,发现沙尘期间的黑碳浓度小时平均值为 $1419\text{ng}/\text{m}^3$,小于整个观测期间的小时平均值 $1586.47\text{ng}/\text{m}^3$.在沙尘过程中,沙尘气溶胶的吸收能力由沙尘的矿物起源以及在传播过程中物理性质的改变决定.沙尘粒子中所含的赤铁矿、粘土矿物质、方解石等对可见光有较强的吸收^[30],贾海鹏等^[31]研究表明,中国西北内陆腹地沙尘气溶胶颗粒的主要组成成分为 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 等,受人为污染物的影响,还含有Cu、V、Pb、Zn等微量元素.含铁的氧化物例如赤铁矿微粒、针铁矿微粒和黏土矿物微粒混合后,在可见光和紫外波段会表现出强烈的吸收性^[32].和撒哈拉沙漠沙尘相比,中国西北地区沙尘粒子的吸收性稍强^[33-34].

沙尘在输送中会受到工业、机动车排放、生物质燃烧等人为气溶胶污染,沙尘粒子吸附了含碳气溶胶,增强了粒子的吸收性^[35].沙尘粒子会充当黑碳气溶胶粒子外层覆盖物,而具有覆盖物包裹时,黑碳气溶胶的吸收性进一步增强^[36].有研究表明,当包裹物外壳和黑碳内核的直径比为1.2时,黑碳颗粒的吸收性增长约30%^[37],当黑碳颗粒被完全包裹时,其吸收性增长30%~50%^[38-40].因此,在沙尘过程中,黑碳浓度的变化往往是黑碳气溶胶和其他气溶胶共同作用的结果.每次沙尘事件的来源、携带污染物的种类及数量、黑碳颗粒包裹程度不尽相同,由于相关仪器的缺乏,目前尚不能定量地描述每次沙尘事件中,沙尘影响SACOL黑碳气溶胶浓度的微物理过程。

以2007年3月27日发生的沙尘事件为例,说明沙尘事件对SACOL黑碳浓度的影响,见图4.此次沙尘事件发生于2007年3月27日20:00至29日16:00,沙尘期间黑碳平均小时浓度为 $2028.61\text{ng}/\text{m}^3$,大于整个观测期间的平均值 $1586.47\text{ng}/\text{m}^3$.用HYSPLIT TRAJECTORIES (www.ready.noaa.gov)对此次沙尘过程所做的500m高度48h后向轨迹追踪显示(图略),沙尘来自塔克拉玛干沙漠,SACOL北部的腾格里沙漠亦有贡献。

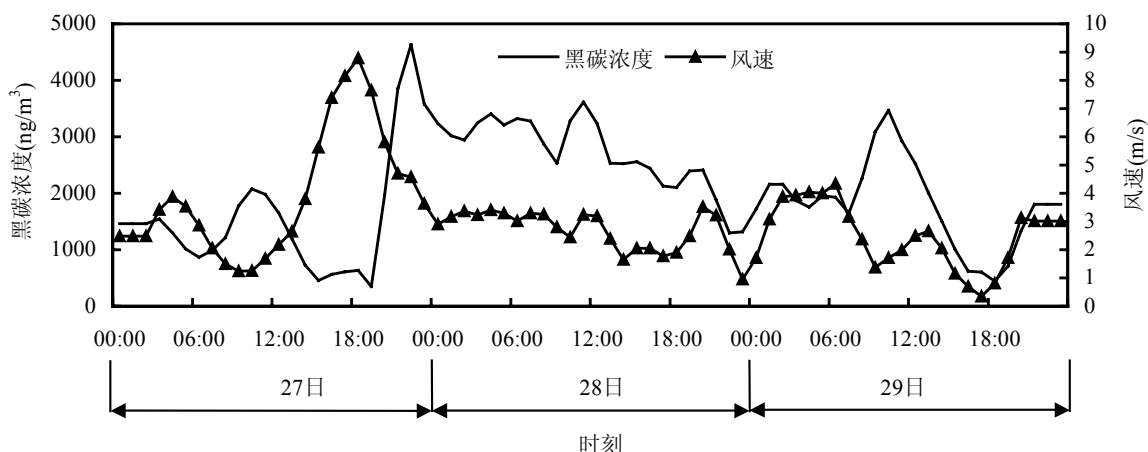


图3 2007年3月27~29日SACOL沙尘事件中黑碳浓度和风速时间序列

Fig.3 Time series of BC concentration and wind speed in dust event at SACOL from 2007-03-27 to 2007-03-29

由图3可以看出,在沙尘发生之前,27日00:00~16:00左右,黑碳浓度的变化受风速和湍流共同控制,从03:00~06:00,风速较大,平均风速达

到3.49m/s,使得该时段黑碳浓度较小,08:00~11:00平均风速降低为1.38m/s,同时早晨排放的增多,湍流活动的增强,使得黑碳浓度持续升

高.15:00 之后,风速开始持续增大,17:00~19:00 的平均风速达到 8.46m/s,极大的清除了本地排放的污染物,并带来了大量 $>1\mu\text{m}$ 的大粒子^[41].值得注意的是,黑碳浓度的最小值并不是出现在平均风速最大的 17:00~19:00 时段,而是出现在 15:00.可以看出在 27 日的 03:00~20:00 这段时间,黑碳浓度和风速有明显的负相关($R=-0.73$),03:00~15:00 当风速增大时,黑碳浓度明显降低;15:00~20:00 黑碳浓度反而随着风速的增大而缓慢增长,可能是风带来了外地的黑碳气溶胶,使得 SACOL 黑碳浓度出现增长.27 日 20:00 开始出现沙尘,受其影响,黑碳浓度在 21:00 达到 3d 中的最大值 5050.42 ng/m^3 ,此后,随着风速的减小,黑碳浓度逐渐降低.风速对黑碳浓度的影响具有滞后效应.在沙尘初期,风速较大,沙尘中 $>1\mu\text{m}$ 的大粒子急剧增多,黑碳浓度对风速的响应并不迅速.随着风速的减小,部分大粒子逐渐沉降到地面,空气中的小粒子逐渐增多,表现为风速和黑碳浓度的相关性越来越好.

2.3 黑碳气溶胶浓度的日变化

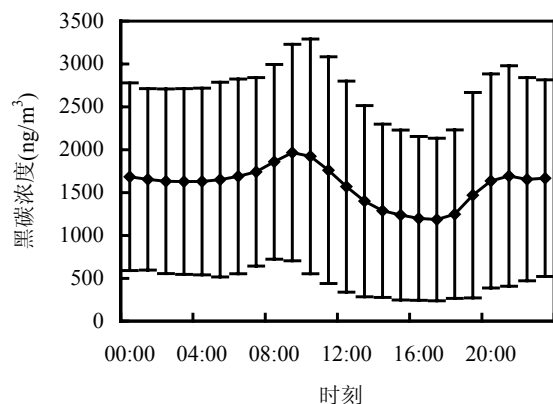


图 4 SACOL 黑碳浓度的日变化

Fig.4 Diurnal variation of BC concentration

利用 2007 年 1 月 1 日至 2009 年 8 月 28 日黑碳气溶胶浓度数据,采取各时次平均,得到 SACOL 黑碳浓度的日变化曲线.可以看出黑碳浓度具有明显的日变化特征,呈现出双峰双谷的态势,见图 4.黑碳浓度从 00:00 到 07:00 变化缓慢,07:00 以后增长迅速,09:00 左右达到全天的最大值 1967.42 ng/m^3 ,而后逐渐减小,17:00 左右达

到全天最小值 1185.64 ng/m^3 ,然后再次迅速增大,21:00 左右达到一天中的第 2 个高值后维持其浓度至 24:00.

日变化曲线更加清晰地反映出黑碳浓度受人类活动和湍流扩散机制共同作用的特点.影响 SACOL 黑碳浓度日变化的污染源主要考虑山脚下的榆中校区及附近的道路交通排放.黑碳浓度的排放主要集中在白天.夜晚大气层结经常呈稳定状态,不利于扩散,使得黑碳浓度较高;早晨太阳辐射较弱,湍流垂直扩散不强,但人类活动较多,烹饪活动多且处在上班高峰期,大量汽车尾气和烹饪活动排放的黑碳使其浓度达到一天中的最大值;中午及午后人类活动减少,黑碳的排放减少,而同时对流、湍流较强,有利于大气扩散,黑碳浓度在 17:00 左右出现全天最小值.傍晚烹饪活动增强又处在下班高峰期,使得黑碳浓度较高.

2.4 黑碳气溶胶的大气本底浓度

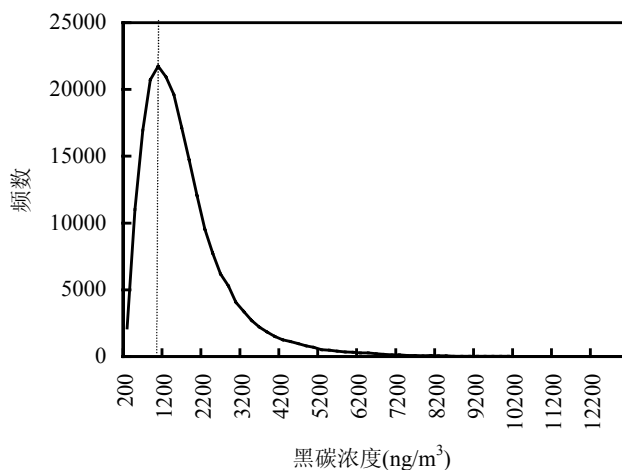


图 5 黑碳浓度频数分布

Fig.5 Frequency distribution of BC concentration

大气成分的本底浓度指能够反映某一区域内处于均匀混合状态的大气中某种成分的浓度,也就是不受本地源汇直接影响时的大气成分浓度.目前还没有一个统一的计算方法.在国内已有对黑碳本底浓度的研究报道,将出现频数最大的黑碳浓度数值作为当地的黑碳本底浓度^[15,42].为便于比较,这里沿用这种方法,选取出现频数最大的黑碳浓度数值作为 SACOL 黑碳大气本底浓度.图 5 利用多项式拟合方法,得到黑碳每 5min

浓度的频数分布最大值所对应的黑碳浓度为 $1000\text{ng}/\text{m}^3$, 作为 SACOL 黑碳大气本底浓度。

3 结论

3.1 SACOL 黑碳平均浓度为 $1568\text{ng}/\text{m}^3$, 小于东部地区区域本底站北京上甸子和浙江临安, 表明 SACOL 所受污染较轻。

3.2 SACOL 黑碳浓度具有明显的季节变化, 冬季最大, 春季最小。周围区域内燃煤取暖是造成冬季黑碳浓度最大的主要原因。春季沙尘事件对黑碳浓度有贡献, 但微物理过程有待于进一步研究。

3.3 SACOL 黑碳浓度日变化具有明显的双峰双谷特征, 最大值出现在 09:00, 最小值出现在 17:00, 与上下班高峰期的交通、烹饪排放和扩散条件有密切关系。

3.4 由多项式拟合得到 SACOL 黑碳气溶胶本底浓度为 $1000\text{ng}/\text{m}^3$ 。

参考文献:

- [1] Haywood J, Boucher O. Estimates of the direct and indirect radiative forcing due to tropospheric aerosols: a review [J]. *Reviews of Geophysics*, 2000, 38(4): 513-543.
- [2] Twomey S. The influence of pollution on the shortwave albedo of clouds [J]. *J. Atmos. Sci.*, 1977, 34: 1149-1152.
- [3] Albrecht B A. Aerosols, cloud microphysics, and fractional cloudiness [J]. *Science*, 1989, 245: 1227-1230.
- [4] Lohmann U, Feichter J. Global indirect aerosol effects: a review [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 2005, 5: 715-737.
- [5] Beegum S N, Moorthy K K, Babu S S, et al. Impact of a mountain grassland fire on the concentration of aerosol black carbon and carbon monoxide near the surface at a remote coastal location [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, 42: 46-55.
- [6] Chow J C, Watson J G, Doraiswamy P, et al. Aerosol light absorption, black carbon, and elemental carbon at the Fresno Supersite, California [J]. *Atmospheric Research*, 2009, 93: 874-887.
- [7] Lambe A T, Logue J M, Kreisberg N M, et al. Apportioning black carbon to sources using highly time-resolved ambient measurements of organic molecular markers in Pittsburg [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, 43: 3941-3950.
- [8] Dodson R E, Houseman E A, Morin B, et al. An analysis of continuous black carbon concentrations in proximity to an airport and major roadways [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, 43: 3764-3773.
- [9] Barnard J C, Kassianov E I, Ackerman T P, et al. Estimation of a "radiatively correct" black carbon specific absorption during the Mexico City Metropolitan Area (MCMA) 2003 field campaign [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 2007, 7: 1645-1655.
- [10] Järvi L, Junninen H, Karppinen A, et al. Temporal variations in black carbon concentrations with different time scales in Helsinki during 1996-2005 [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 2008, 8: 1017-1027.
- [11] Dutkiewicz V A, Alvi S, Ghauri B M, et al. Black carbon aerosols in urban air in South Asia [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, 43: 1737-1744.
- [12] Wu D, Mao J T, Deng X J, et al. Black carbon aerosols and their radiative properties in the Pearl River Delta region [J]. *Sci China Ser D-Earth Sci*, 2009, 52(8): 1152-1163, doi: 10.1007/s11430-009-0115-y.
- [13] Zhou Xue-hua, Gao Jian, Wang Tao, et al. Measurement of black carbon aerosols near two Chinese megacities and the implications for improving emission inventories [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, 43: 3918-3924.
- [14] 朱崇抒, 曹军骥, 沈振兴, 等. 西安黑碳气溶胶的污染及其成因分析 [J]. *中国粉体技术*, 2009, 15(2): 66-71.
- [15] 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.
- [16] 杨溯, 张武, 韩晶晶, 等. 上海市浦东新区秋冬季黑碳气溶胶特征 [J]. *兰州大学学报: 自然科学版*, 2008, 44(4): 66-70.
- [17] 章秋英, 牛生杰, 沈建国, 等. 半干旱区冬春季黑碳气溶胶吸收特性的观测研究 [J]. *中国沙漠*, 2009, 29(1): 183-188.
- [18] 符添斌, 马柱国. 全球变化与区域干旱化 [J]. *大气科学*, 2008, 32(4): 752-760.
- [19] 邓振镔, 张强, 尹宪志, 等. 干旱灾害对干旱气候变化的响应 [J]. *冰川冻土*, 2007, 29(1): 114-118.
- [20] 吕妍, 王让会, 蔡子颖. 我国干旱半干旱地区气候变化及其影响 [J]. *干旱区资源与环境*, 2009, 23(11): 65-71.
- [21] Huang Jian-ping, Zhang Wu, Zuo Jin-qing, et al. An overview of the Semi-arid Climate and Environment Research Observatory over the Loess Plateau [J]. *Advances in atmospheric sciences*, 2008, 25(6): 906-921.
- [22] 熊安元. 北欧气象观测资料的质量控制 [J]. *气象科技*, 2003, 31(5): 314-320.
- [23] Yan Peng, Tang Jie, Huang Jian, et al. The measurement of aerosol optical properties at a rural site in Northern China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2008, 8: 2229-2242.
- [24] 赵玉成, 德力格尔, 蔡永祥, 等. 西宁地区大气中黑碳气溶胶浓度的观测研究 [J]. *冰川冻土*, 2008, 30(5): 789-794.
- [25] 伍德侠, 魏庆农, 刘文清, 等. 2005 年夏季北京大气中碳黑气溶胶的观测研究 [J]. *大气与环境光学学报*, 2006, 1(3): 210-215.
- [26] 秦世广, 汤杰, 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.

- [27] 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): 352-360.
- [28] 姚济敏,张文煜,袁九毅,等.典型干旱区沙尘气溶胶光学厚度及粒度谱分布的初步分析 [J]. 中国沙漠, 2006,26 (1):77-80.
- [29] 谢 骅,王庚辰,任丽新,等.北京市大气细粒态气溶胶的化学成分研究 [J]. 中国环境科学, 2001,21(5):432-435.
- [30] Moosmüller H, Chakrabarty R K, Arnott W P. Aerosol light absorption and its measurement: A review [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2009, 110:844-878.
- [31] 贾海鹏,王晓兵.甘肃河西地区大气沙尘成分及影响分析 [J]. 中国沙漠, 2009,29(1):156-161.
- [32] Yang Ming-xi, Howell S G, Zhuang J, et al. Attribution of aerosol light absorption to black carbon and dust in China-interpretation of atmospheric measurements during EAST-AIRE [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2009,9:2035-2050.
- [33] Ge J M, Su J, Ackerman T, et al. Dust aerosol optical properties retrieval and radiative forcing over Northwestern China-US joint field experiment [J]. J. Geophys. Res., 2010,115D00K12, doi:10.1029/2009JD013263.
- [34] Zhang L, Cao X J, Bao J, et al. A case study of dust aerosol radiative properties over Lanzhou [J]. China, Atmos. Chem. Phys., 2010, 4283-4293, doi:10.5194/acp-10-4283-2010.
- [35] Chung S H, Seinfeld J H. Climate response of direct radiative forcing of anthropogenic black carbon [J]. J. Geophys. Res., 2005, D11102, doi:10.1029/2004JD005441.
- [36] Oshima N, Koike M, Zhang Y, et al. Aging of black carbon in outflow from anthropogenic sources using a mixing state resolved model: 2. Aerosol optical properties and cloud condensation nuclei activities [J]. J. Geophys. Res., 2009,114, D18, doi:10.1029/2008JD011681.
- [37] Shiraiwa M, Kondo Y, Iwamoto T, et al. Amplification of light absorption of black carbon by organic coating [J]. Aerosol Science and Technology, 2010,44:46-54.
- [38] Fuller K A, Malm W C, Kreidenweis S M. Effects of mixing on extinction by carbonaceous particles [J]. J. Geophys. Res., 1999, 014(D13), 15941-15954.
- [39] Schnaiter M, Horvath H, Möhler O, et al. UV-VIS-NIR spectral optical properties of soot and soot-containing aerosols [J]. J. Aerosol Sci., 2003,34(10):1421-1444.
- [40] Bond T C, Habib G, Bergstrom R W. Limitations in the enhancement of visible light absorption due to mixing state [J]. J. Geophys. Res., 2006, 111, D20211, doi:10.1029/2006JD007315.
- [41] 岳玉珺,牛生杰,岳 平,等.半干旱春季沙尘气溶胶谱分布的观测研究 [J]. 中国环境科学, 2009,29(10):1021-1028.
- [42] 汤 洁,温玉璞,周凌晔,等.中国西部大气清洁地区黑碳气溶胶的观测研究 [J]. 应用气象学报, 1999,10(2):160-170.
- 致谢:** 感谢兰州大学半干旱气候与环境观测站(SACOL)提供观测数据.
- 作者简介:** 张 磊(1984-),男,山东济宁人,硕士研究生,主要从事大气物理学与大气环境研究.

废旧轮胎的再利用

渔民湾污水排放区自主运营 1 座流量为 129m³/d 的曝气式氧化塘处理系统.为保证水质满足对粪大肠菌群、总余氯(TRC)、碳生化需氧量(CBOD)和总悬浮固体(TSS)等指标的要求,出水中的硝酸盐和藻类含量问题一直是管理人员比较头疼的问题.为此,区委大胆创新,在氧化塘后增加了 1 座人工湿地,并采用废旧轮胎颗粒作为填料.事实证明,该方法在保证处理效果的同时,还有效节约了构建成本和运行费用.

渔民湾污水排放区位于西雅图西北约 160km(100 英里)处,在其管辖范围内有酒店、食宿兼次日早餐的旅馆、餐厅、零售服务行业、1 所学校以及 250 名左右的居民.该排放区的生活废水经化粪池消解后,由排污泵接入市政废水收集系统.

经过处理后,氧化塘出水排放至 San Juan 航道.市政部门对污水处理系统的出水水质要求如下:粪大肠杆菌的月平均含量低于 200cfu/100mL,TRC 的月平均含量低于 0.5mg/L,CBOD 的月平均含量低于 25mg/L, TSS 的月平均含量低于 75mg/L;粪大肠杆菌的周平均含量低于 400cfu/100mL,TRC 的周平均含量低于 0.75mg/L,CBOD 的周平均含量低于 40mg/L, TSS 的周平均含量低于 110mg/L.

孙远军 译自《Water Environment and Technology》, September 9:48-53(2010)