

兰州城市和远郊区黑碳气溶胶浓度特征

李燕军^{1,2}, 张 镭^{1*}, 曹贤洁¹, 岳 芸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. 61769 部队, 山西 文水 032100)

摘要: 利用兰州大学半干旱气候与环境观测站(SACOL)2010年9月至2011年8月的黑碳气溶胶观测资料, 分析了兰州市区和远郊区黑碳气溶胶的浓度变化特征. 结果表明: 市区的年平均黑碳浓度要远大于郊区. 日变化都呈明显的双峰结构, 最大值出现在 08:00~10:00, 最小值出现在 16:00 左右; 对于月最大频数浓度的年变化, 市区和远郊区均是 5 月黑碳浓度最小, 其值分别为 1143 和 932 ng/m³, 1 月黑碳浓度最大, 分别为 10230 和 5063 ng/m³; 市区的周变化较远郊区明显; 沙尘条件下黑碳气溶胶浓度值低于当月的日均值.

关键词: 黑碳气溶胶; 日变化; 最大频数浓度

中图分类号: X513 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2014)06-1397-07

Property of black carbon concentration over urban and suburban of Lanzhou. LI Yan-jun^{1,2}, ZHANG Lei^{1*}, CAO Xian-jie¹, YUE Yun¹, SHI Jin-sen¹ (1. Key Laboratory for Semi-Arid Climate Change of the Ministry of Education, College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 2. Unit 61769 of People's Liberation Army, Wenshui 032100, China). *China Environmental Science*, 2014, 34(6): 1397~1403

Abstract: The variation of black carbon (BC) concentration over urban and suburban areas of Lanzhou were analyzed using the BC observation data from the Semi-arid Climate and Environment Observatory of Lanzhou University (SACOL) from September 2010 to August 2011. The results showed that the average BC concentration in urban area was much higher than that in suburban area. The diurnal variation showed a bimodal distribution with the maximum value at 08:00~10:00 (Beijing Time), and the minimum around 16:00; the annual variations of monthly maximum frequency BC concentration in urban and suburban areas were similar, the minimums of BC were shown in May with the values of 1143 and 932 ng/m³ respectively, and the maximums were in January with their values of 10230 and 5063 ng/m³ respectively; the weekly variation was more obviously in urban area than that in suburban area; BC concentration under the condition of dust event was lower than the daily average concentration in the same month.

Key words: black carbon; diurnal variation; maximum frequency concentration

黑碳主要是由于物质的不完全燃烧造成的, 工业生产、汽车尾气、居民燃火、生物质燃烧等都会产生黑碳. 随着人们对能源需求的不断提高, 化石燃料的燃烧成为黑碳气溶胶的主要来源. IPCC 第 4 次评估报告指出(IPCC, 2007)^[1], 当前全球平均每年排放的黑碳为 8.0 Tg/a(C), 其中化石燃料燃烧排放为 4.6 Tg/a(C)、生物质燃烧排放为 3.3 Tg/a(C). 我国各大城市化石燃料消耗量较大, 同时工业废气排放治理较差, 城市工业、汽车尾气和居民活动产生的黑碳较多, 而乡村地区燃烧秸秆较多^[2].

黑碳气溶胶是大气气溶胶的主要吸收性成分, 其吸收性能占大气气溶胶总吸收性能的

90%^[3]~95%^[4], 所以一般可以用黑碳气溶胶的吸收系数作为大气气溶胶的吸收系数. 黑碳气溶胶和二氧化碳都会产生温室效应, 不同的是二氧化碳吸收地表长波辐射对大气的辐射强迫为正, 而黑碳直接吸收太阳短波辐射对大气辐射强迫为正, 但会减少到达地面的太阳短波辐射, 对地表辐射强迫为负, 两者之和为正^[5]. 大气中的黑碳气溶胶亦可通过云-气溶胶相互作用, 对云高、云顶反照率、云量和云层厚度等造成影响, 对大气造成

收稿日期: 2014-10-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41075104); 国家“973”项目(2010CB428604)

* 责任作者, 教授, zhanglei@lzu.edu.cn

半直接和间接辐射强迫^[6].近些年在南极^[7]、北极^[8]这些人类活动非常少的地区也观测到黑碳气溶胶,沉积在冰雪表面的黑碳吸收太阳辐射使气温升高,同时使得地表反照率减小,加速冰雪的融化,使得海平面上升进一步恶化.

近年来国内外很多学者开展了大量的研究,如结合实地观测、卫星资料和轨迹模式研究冰雪覆盖区域黑碳的来源以及对冰雪下垫面造成的影响^[9];分析黑碳气溶胶的排放现状及其清除机制^[10];利用数值模式研究黑碳对气候变化产生的影响^[11];通过仪器观测研究黑碳气溶胶的变化特征及其对城市下垫面的影响^[12];还有结合其他碳质气溶胶来揭示黑碳气溶胶对气候产生的影响^[13].这些研究成果有助于进一步认识黑碳气溶胶的变化特征及其危害.

我国于 1980 年代中期开始对黑碳气溶胶进行观测研究^[14],1992~1994 年,在青海省西宁市的瓦里关山上建立了我国第一个国际大气本底基准观象台,也是世界上第一个位于欧亚内陆半干旱地区的 WMO/GAW 监测站,1994 年起对黑碳气溶胶进行了连续观测.广州^[15]、北京^[16]、西安^[17]、四川^[18]、上海^[19]、内蒙^[20]等地区也有黑碳气溶胶浓度和其季节变化特征的研究报道.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.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.

兰州位于我国西北,属于典型的半干旱地区,降水量少,空气干燥,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^[21].同时兰州市是我国重要的重工业城市,工业污染较为严重,也是西北地区沙尘暴高发城市之一.由于兰州市特殊的河谷地形,排放的污染物质不易向外扩散,所以城市气溶胶中黑碳气溶胶的含量对城市下垫面的辐射强度和人群生命健康都有较大且持续的影响^[22].本文对兰州市区和郊区榆中地区进行了连续 1 年的黑碳气溶胶浓度的观测试验,对比分析了市郊黑碳日平均浓度的年变化、季节平均日变化、月平均浓度的年变化及周变化特征的异同,并分析了沙尘天气对黑碳浓度

的影响.

1 观测站点、仪器与数据处理

1.1 观测站点

兰州大学半干旱气候与环境观测站(SACOL)有 2 个观测点:位于郊区兰州大学榆中校区的综合站和位于市区兰州大学本部校区的城市站,两者处于同一地区,都属温带半干旱气候.

SACOL 综合站位于兰州市东南方向,距离兰州市区 48km,距离南部的榆中县城 10km,位于兰州大学榆中校区的萃英山顶(35.57°N, 104.08°E).年均降雨量为 250~390mm,相对湿度为 63%,全年平均气温为 6.7℃.下垫面属于典型的黄土高原地貌,长有较短的冷蒿、芒草等.山顶全年盛行西北和东南风,年平均风速约为 1.6m/s.该站的黑碳气溶胶可能源于山脚下兰州大学榆中校区和西北民族大学榆中校区、西南方向 2km 处的高速公路和西北方向 10km 处的钢铁厂.另外,西北方向 40km 外兰州市区的污染排放可能也有贡献.

城市站位于兰州市中心盘旋路附近兰州大学校园内(36.08°N, 103.88°E).属半干旱地区,有明显的大陆性季风气候特征,年平均降水量在 250~350mm,并集中分布在 6~9 月,全年平均气温为 9.3℃.属于城市下垫面,全年以静风为主,冬季有明显的逆温现象.盘旋路作为兰州城市交通枢纽之一,车流量大.兰州市处于两条山脉之间,整个城市呈东南到西北的带状分布.城市站位于东南方向,而西北方向分布有较多的重工业污染源.因此,该站黑碳气溶胶可能源于机动车尾气排放和工业污染排放输送.

1.2 观测仪器

黑碳气溶胶的观测使用多角度吸收光度计 MAAP(Multi-Angle Absorption Photometer, Model-5012, Thermo Scientific).外界的黑碳通过进气口沉积在滤膜上,光束通过气溶胶沉积后会有一衰减量,其与滤膜上黑碳气溶胶的质量浓度存在线性关系,仪器通过测量光透过滤膜后的衰减量,反算出黑碳气溶胶的浓度,其中光束波长为 670nm.传统的黑碳仪(AE)只通过一束光测量

衰减量,MAAP 通过多方向的光束增测了黑碳的散射量,减少了累积在滤带上的颗粒物散射的影响,其输出的黑碳浓度数据可信度更高.在进气口加装了切割粒径为 2.5 μm 的切割头,采样管采用外径 1/2 英寸碳质防静电管,进气管路的损失可忽略不计.气溶胶样本从 PM_{2.5} 切割头进入采样管后到达并积累在滤膜上,当滤膜透过率小于 0.2 或滤膜上累积的颗粒物质量大于 30 μg 时自动更换滤膜.其流量调节偏差小于 1%,最小检测限为 10min 平均小于 0.05 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,环境工作温度为 -20~50 $^{\circ}\text{C}$.观测采取连续观测,每 1min 输出保存数据.

滤膜上的黑碳质量由下式计算:

$$\text{MBC} = (1 - \omega_0) \cdot X_1 \cdot A / \sigma_{\text{BC}} \quad (1)$$
$$\text{BC} = \Delta\text{MBC} / \text{VOL} \quad (2)$$

式中:MBC 为黑碳质量; ω_0 为单次散射反照率; X_1 为透过率的自然对数; A 为滤膜采样面积; σ_{BC} 为衰减横截面,计算中取 6.6 m^2/g ;VOL 为采样气体体积;BC 为仪器输出的黑碳质量浓度.

1.3 数据处理与质量控制

2010 年 9 月至 2011 年 8 月在兰州大学本部校区城市站和榆中校区综合站进行了黑碳浓度的连续观测,同时每 8h 记录 1 次天气情况、云量及周边局地人为活动的变化,数据处理时通过环境记录对不合理数据进行剔除:仪器故障造成的非正常数据,有时仪器会出现错误代码,这可能是由于实验室环境发生变化使得仪器工作不正常造成的,这些数据在研究中予以剔除;由于仪器本身的工作原理造成的少数不正常数据:①由于仪器通过滤膜上的黑碳对光的衰减进行黑碳浓度的观测,当一张滤膜上积累的黑碳达到一定浓度时会自动更换下一张滤膜,通过对数据的观察发现,更换滤膜的前两个数据相对前一数据突然减小很多,不符合正常值,对此类数据予以剔除;②由于仪器是通过光衰减量进行黑碳浓度的计算,测量光强度的器件上的信号波动有可能导致相邻的 2 个数据差异很大,常常造成相邻的 2 个数据 1 个高估 1 个低估,甚至产生负值,也不符合正常值^[23].对仪器自身问题造成的非正常值,先用总数据进行 7 点平滑处理,然后用实测值与平滑

后的值的相对偏差来判断数据是否需要剔除:当相对误差超过 15%时,认为数据不正常,剔除对应数据;反之则认为对应数据正常,可以使用.

表 1 数据质量控制统计
Table 1 Statistics of data quality control

观测地点	平均值(ng/m^3)	数据总数	保留数据数	保留比例(%)
郊区	2273	419600	364758	86.9
市区	7585	450960	402876	89.3

2 结果分析

2.1 黑碳日平均浓度的年变化

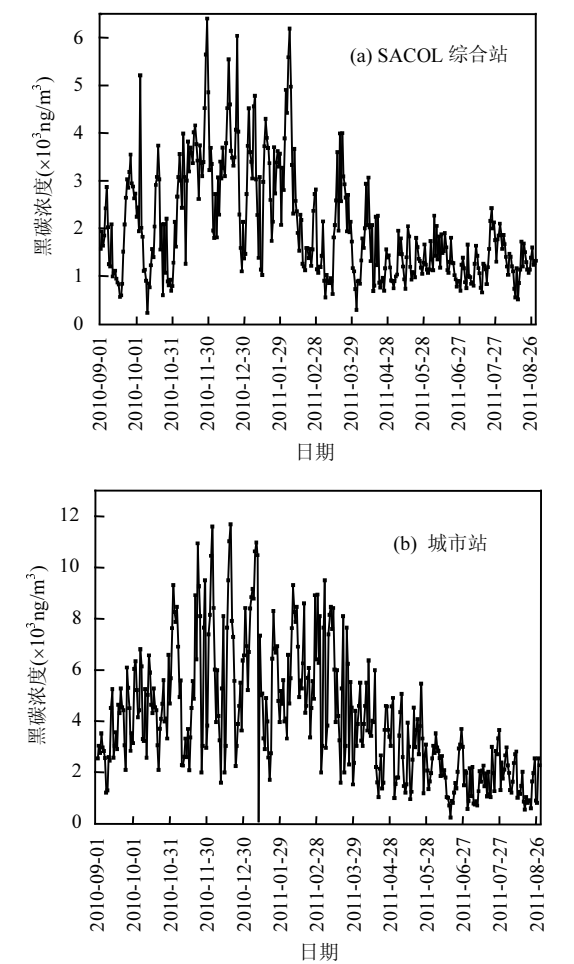


图 1 SACOL 和兰州城市黑碳日平均浓度的年变化
Fig.1 Annual variation of daily average BC concentration at SACOL and Downtown of Lanzhou

图 1 为兰州 SACOL 综合站和城市站 2010 年 9 月至 2011 年 8 月黑碳日平均浓度的年变化.可以看出,两站的黑碳浓度冬季较高,春夏季较低,日平均浓度分别为 2270,5580ng/m³.兰州城市受交通排放影响,同时地形影响逆温严重,甚至在白天也会有逆温层存在^[24],扩散条件很差,黑碳气溶胶在市区空气中累积较为严重,浓度比郊区要大,尤其在冬季供暖期间.

表 2 给出了国内外部分站点的监测值.2007~2008 年 SACOL 综合站的黑碳平均浓度为 1800ng/m³,2007~2009 年为 1568ng/m³,2009~2010 年为 1750ng/m³,而 2010~2011 年 SACOL 的黑碳平均浓度为 2270ng/m³.兰州城市的黑碳平均浓度与西安、上海、广州等城市的黑碳平均浓度类似,都很高.瓦里关本底站黑碳平均浓度很低,可能是其地处偏僻,黑碳来源主要是外来输送,而黑碳在大气中的寿命较短,只有少量黑碳对该站点的黑碳浓度产生影响.

表 2 不同地区黑碳研究结果			
Table 2 BC concentration in different sites in China			
观测点	采样时间	观测站 环境	平均浓度 (ng/m ³)
兰州城市 (本研究)	2010-09~2011-08	城市站	5580
	2010-09~2011-08(本 研究)		2270
SACOL	2007-04~2008-03 ^[23]	郊区站	1800
	2007-01~2009-08 ^[25]		1568
	2009-09~2010-06 ^[26]		1750
西安 ^[17]	2003-09~11	城市站	10200±5800
上海 ^[19]	2006-10~12	城市站	5600±4700
广州 ^[15]	2007-04	城市站	7400±2900
瓦里关 ^[27]	1996~2000	区域本底站	56~660

2.2 黑碳季节平均日变化

图 2 为兰州 SACOL 综合站和城市站黑碳浓度的季节平均日变化.2 个站点冬季黑碳气溶胶的日均值水平较高,秋季次之,夏季最小.季节的变化主要取决于各个季节黑碳气溶胶的来源和强度,且与大气湍流强弱、主导风向、天气过程等密切相关.夏季日照时间长,地面接收的能量多,湍流发展剧烈,有利于黑碳扩散,降水量大,而降

水对黑碳等亲水性粒子有明显的清除作用^[4];秋季黑碳浓度高于春、夏季除局地源污染外,可能还与四川、陕西、甘肃等地燃烧秸秆有关^[28];冬季黑碳排放量大,大气湍流较弱,不利于黑碳扩散,导致空气中细粒子和二次气溶胶的大量增加^[29].

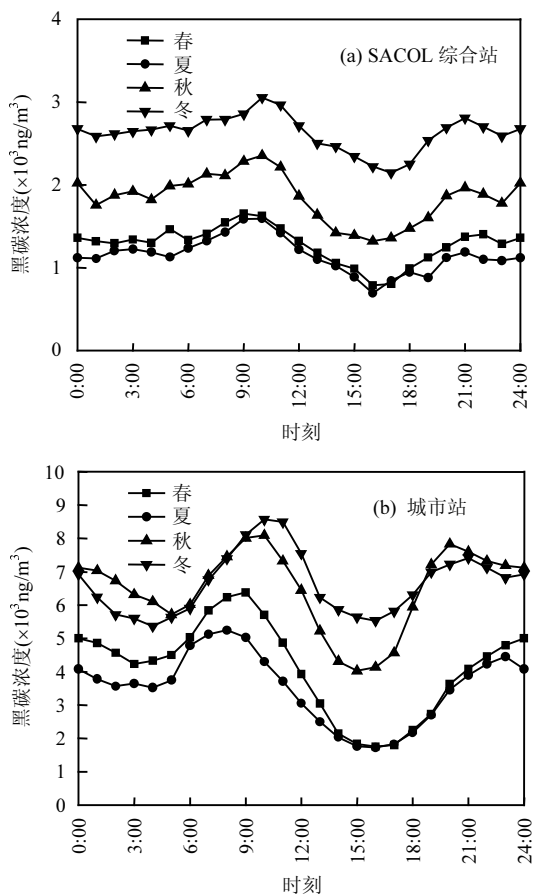


图 2 SACOL 和兰州城市不同季节的黑碳浓度日变化
Fig.2 Diurnal variations of BC concentration at SACOL and downtown of Lanzhou in four seasons

城市站黑碳气溶胶的日均值较综合站高,且变化范围更大,波动较剧烈.2 个站 4 季的日变化曲线都呈双峰结构,峰值和谷值出现的时间大致相同.白天峰值都在 10:00 左右,谷值出现在 16:00 左右;晚上市区的峰值在 21:00 左右,略晚于郊区的 20:00,谷值在 04:00 左右.白天由于人类活动的增加,黑碳也随之增加,由于市区地形影响和郊区山谷风的影响,都存在逆温层,导致黑碳不易扩散,在 10:00 左右出现第 1 个极大值;随着对流活动的

增强,逆温层消失,地面黑碳被稀释,浓度减少,在 16:00 左右出现第 1 个极小值;晚上对流活动减弱,逆温层开始出现,导致黑碳不易扩散,在 20:00、21:00 出现第 2 个极大值;随后由于人类活动减少,黑碳浓度也随之慢慢减少,在 03:00、04:00 出现第 2 个极小值.城市站中黑碳气溶胶浓度秋冬季节的第 1 个峰值出现的时间晚于春夏季节,可能是由于秋冬季节人类开始活动的时间比较晚,且日出时间延后,导致逆温层结构稳定,持续时间比较长.郊区综合站受人类活动影响较小,其 4 季黑碳气溶胶浓度峰值出现的时间差别不大.

2.3 黑碳月平均浓度和最大频数浓度的年变化

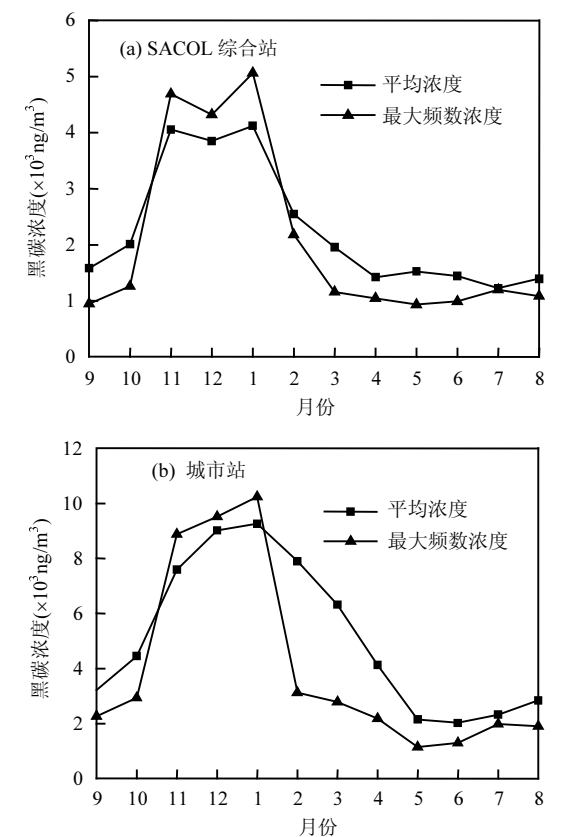


图3 SACOL 和兰州城市黑碳月平均浓度和最大频数浓度的年变化

Fig.3 Annual variations of monthly average BC concentration with the distributions of maximum frequency in every month at SACOL and Downtown of Lanzhou

图3 为兰州 SACOL 综合站和城市站黑碳月

平均浓度和最大频数浓度的年变化,其中最大频数浓度使用对数正态分布函数对频数分布特征进行拟合得出^[30].最大频数浓度能较好反映黑碳气溶胶的污染程度,月最大频数浓度高于月平均浓度说明黑碳滞留在高值区的时间较长,污染水平高;反之,污染水平低.从图 3 可以看出,黑碳气溶胶在 1 月污染水平最高,最大频数浓度分别为 5063,10230ng/m³;5 月污染水平最低,最大频数浓度分别为 932,1143ng/m³.而平均浓度,2 个站都是 1 月黑碳浓度达到最大值,分别为 4120, 9256ng/m³;综合站是 7 月达到最小为 1223ng/m³,城市站是 6 月最小为 2021ng/m³.在采暖期前期(11~1 月)黑碳浓度的月均值小于最大频数浓度,这可能是因为 11~1 月兰州市区逆温严重,甚至在白天也会有逆温层的发展^[23],扩散条件差,黑碳气溶胶在市区空气中累积较为严重;而非采暖期逆温层减弱,扩散较好,所以黑碳浓度较低.采暖期中 11~1 月和 2~3 月黑碳浓度差别较大,但最大频数浓度差别更大,说明逆温强度是影响城市黑碳浓度的重要因素.

2.4 黑碳浓度的周变化

为了更直观的分析交通等人为活动对黑碳浓度的影响,将两个站点的黑碳观测数据分两个时段,即工作日和非工作日.由图 4 可以看出,兰州郊区工作日和非工作日日均浓度差别较小,市区工作日明显高于非工作日.市区站位于市中心,呈现明显的周变化;郊区站远离人为活动区域,周变化特征不明显.

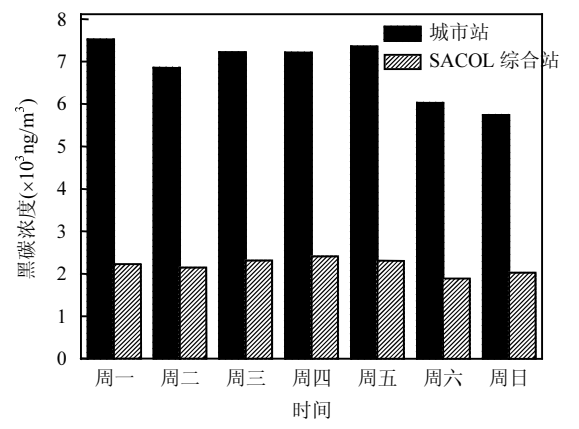


图4 黑碳浓度的周变化

Fig.4 Weekly variation of BC concentration

2.5 沙尘天气对黑碳气溶胶浓度的影响

沙尘天气主要发生在春季,将观测中遇到的沙尘天气条件的数据单独处理,对沙尘天气条件下兰州市区和郊区黑碳气溶胶浓度进行了分析.数据采用有沙尘天气发生且后一天为晴天的数据.

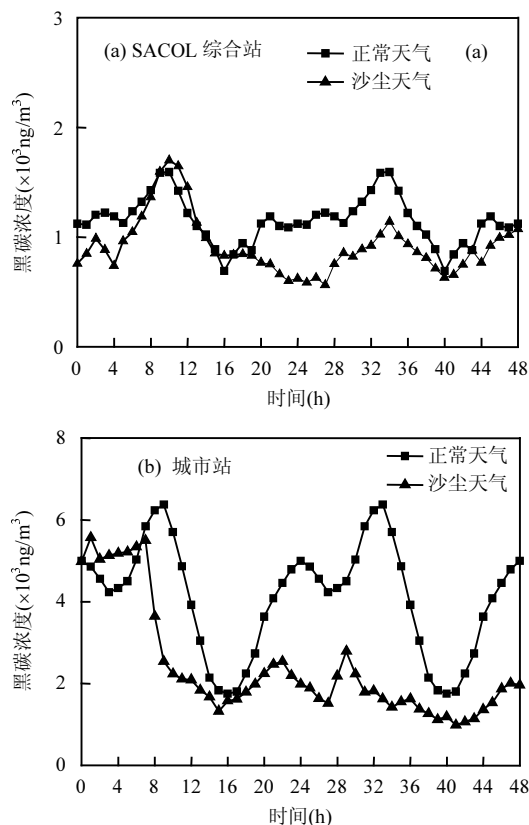


图5 SACOL 和兰州城市 4 月 19 日沙尘天气过程黑碳气溶胶浓度变化

Fig.5 Variations of BC concentration in dust event on April 19th at SACOL and Downtown of Lanzhou

图 5 为兰州 SACOL 综合站和城市站春季沙尘发生日和次日黑碳气溶胶浓度变化.沙尘到来时,黑碳浓度突然减小,且沙尘发生的后一天,黑碳浓度会维持在相对较低的水平,日变化没有呈现明显的双峰特征,日均黑碳浓度小于沙尘日黑碳浓度,并远小于当月的正常天气的日均浓度,这与一些对沙尘天黑碳气溶胶浓度变化的研究结果不同^[31].可能原因有二:(1)沙尘发生时风速较

大,对黑碳浓度有稀释作用^[32];(2)多角度吸收光度计(MAAP)可以在测量吸收的同时可测量散射信息,使黑碳吸收观测相对更准确.而目前其他研究多使用黑碳仪,例如 AE-31,测量采集样本造成的光衰减,并将其完全归因于黑碳气溶胶的吸收.于是沙尘细粒子进入仪器造成的光散射衰减也被记为黑碳吸收造成,高估了黑碳浓度.

3 结论

3.1 SACOL 综合站和城市站黑碳日平均浓度的年变化特征是秋冬高,春夏低,城市站的年平均黑碳浓度为 5580ng/m^3 ,远大于综合站的 2270ng/m^3 .

3.2 SACOL 综合站和城市站黑碳季节平均日变化都有明显的双峰结构,最大值出现在 8:00–10:00 之间,最小值出现在 16:00 左右.城市站第 1 个峰值出现的时间秋冬季比春夏季延后,综合站不明显.两站点黑碳浓度的季节日变化特征反映出受人为活动规律、逆温层和大气湍流扩散规律控制特征.

3.3 SACOL 综合站和城市站黑碳月最大频数浓度的年变化都是 5 月黑碳浓度最小,分别为 $932,1143\text{ng/m}^3$;1 月黑碳浓度达到最大值,分别为 $5063,10230\text{ng/m}^3$.11~1 月由于大范围的供暖及逆温层的影响,黑碳最大频数浓度大于平均浓度.周变化中,城市站受人为活动影响,工作日的黑碳浓度大于非工作日,综合站不明显.沙尘天气条件下黑碳气溶胶浓度值低于当月的日均值.

参考文献:

- [1] Christensen J H, Hewitson B, Busuioac A, et al. IPCC climate change 2007: The physical scientific basis [M]. London: Cambridge University Press, 2007:131–217.
- [2] 曹国良,郑方成,王亚强.中国大陆生物质燃烧排放的 TSP, PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ 清单 [J]. 过程工程学报, 2004,4:700–704.
- [3] Hansen A D A, Kapustin V N, Kopeikin V M, et al. Optical absorption by black carbon and dust in desert region of central Asia [J]. Atmospheric Environment, 1993,27(16):2527–2531.
- [4] Japar S M, Brachaczek W W, Gorse R A, et al. The contribution of elemental carbon to the optical properties of rural atmospheric aerosols [J]. Atmospheric Environment, 1986,20(6):1281–1289.
- [5] 张 华,马井会,郑有飞.黑碳气溶胶辐射强迫全球分布的模拟

- 研究 [J]. 大气科学, 2008,32(5):1147-1158.
- [6] Koch D, DelGenio A D. Black carbon semi-direct effects on cloud cover: review and synthesis [J]. Atmos. Chem. Phys., 2010,10:7685-7696.
- [7] Graf H F, Shirsat S V, Oppenheimer C, et al. Continental scale Antarctic deposition of sulphur and black carbon from anthropogenic and volcanic sources [J]. Atmos. Chem. Phys., 2010,10:2457-2465.
- [8] Huang L, Gong S L, Sharma S, et al. A trajectory analysis of atmospheric transport of black carbon aerosols to Canadian high Arctic in winter and spring (1990-2005) [J]. Atmos. Chem. Phys., 2010,10:5065-5073.
- [9] Kopacz M, Mauzerall D L, Wang J, et al. Origin and radiative forcing of black carbon transported to the Himalayas and Tibetan Plateau [J]. Atmos. Chem. Phys., 2011,11:2837-2852.
- [10] 许黎,王亚强,陈振林,等.黑碳气溶胶研究进展 1:排放、清除和浓度 [J]. 地球科学进展, 2006,21(4):352-360.
- [11] 王志立,郭品文,张华.黑碳气溶胶直接辐射强迫及其对中国夏季降水影响的模研究 [J]. 气候与环境研究, 2009,14(2): 161-171.
- [12] 陶俊,朱李华,韩静磊,等.2007 年春季广州城区黑碳气溶胶污染特征的初步研 [J]. 气候与环境研究, 2008,13(5):658-662.
- [13] Cheng Y, He K B, Duan F K, et al. Ambient organic carbon to elemental carbon ratios: Influences of the measurement methods and implications [J]. Atmospheric Environment, 2011,45:2060-2066.
- [14] 栾胜基,毛节泰.大气气溶胶吸收系数的测量 [J]. 气象学报, 1986,44(3):321-327.
- [15] Wu D, Mao J T, Deng X J, et al. Black carbon aerosols and their radiative properties in the Pearl River Delta region [J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2009,52(8):1152-1163.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [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] 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.
- [20] 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.
- [21] 邓振镭,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.
- [22] 邹长伟,黄虹,曹军骥.大气气溶胶含碳物质基本特征综述 [J]. 环境污染与防治, 2006,28(4):270-274.
- [23] 杨溯,张武,史晋森,等.半干旱地区黑碳气溶胶特征初步分析 [J]. 气候与环境研究, 2010,15(6):756-764.
- [24] 刘宇,胡非,王武功,等.兰州市城区稳定边界层变化规律的初步研究 [J]. 中国科学院研究生院学报, 2003,20(4):482-487.
- [25] 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.
- [26] 陈霖,张镭,张磊,等.半干旱地区黑碳气溶胶和含碳气体特征及来源 [J]. 中国环境科学, 2012,32(8):1345-1352.
- [27] 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.
- [28] 姚青,蔡子颖,韩素芹,等.天津城区秋冬季黑碳气溶胶观测与分析 [J]. 环境化学, 2012,31(3):324-329.
- [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] 汤洁,温玉璞,周凌峰,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):160-169.
- [31] 高润祥,牛生杰,张华,等.2006 年春季西北地区黑碳气溶胶的观测研究 [J]. 南京气象学院学报, 2008,31(5):655-661.
- [32] 肖秀珠,刘鹏飞,耿福海,等.上海市区和郊区黑碳气溶胶的观测对比 [J]. 应用气象学报, 2011,22(2):158-168.

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: 李燕军(1986-),男,山西长治人,硕士研究生,主要研究方向为大气污染物的浓度特征和扩散.