杨溯，张武，史晋森，等. 2010. 半干旱地区黑碳气溶胶特征初步分析［J］. 气候与环境研究，15（6）：756-764. Yang Su, Zhang Wu, Shi Jinsen, et al. 2010. Preliminary analyses of the characteristics of black carbon in the semi-arid area［J］. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 15 (6): 756-764.

半干旱地区黑碳气溶胶特征初步分析

杨溯[1,2,3] 张武[1] 史晋森[1] 石广玉[2] 秦世广[2,3]
常倬林[1] 陈艳[1] 王振海[1] 黄建平[1]

1 兰州大学大气科学学院干旱气候变化教育部重点实验室，兰州 730000
2 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室，北京 100029
3 中国科学院研究生院，北京 100049

摘 要 黑碳气溶胶（BC）是大气气溶胶中的重要成分，在可见光和红外光都具有强烈吸收作用，对局地和全球气候有重要的影响。利用兰州大学半干旱气候环境观测站（SACOL）历时近一年的观测资料结合常规气象资料对我国半干旱地区的BC浓度特征进行研究。结果表明，该地区全年平均BC浓度为1797.3 ng·m^{-3}，低于我国城市地区；测站BC浓度日变化趋势呈双峰特征，日最高浓度多出现在第一个波峰，第二个波峰的浓度值较小且峰型不如前者明显；降水可以有效地清除大气中16%～40%的BC。

关键词 黑碳气溶胶 观测 黑碳仪 半干旱气候
文章编号 1006-9585（2010）06-0756-09 **中图分类号** P421 **文献标识码** A

Preliminary Analyses of the Characteristics of Black Carbon in the Semi-arid Area

YANG Su[1,2,3], ZHANG Wu[1], SHI Jinsen[1], SHI Guangyu[2], QIN Shiguang[2,3], CHANG Zhuolin[1], CHEN Yan[1], WANG Zhenhai[1], and HUANG Jianping[1]

1 *Key Laboratory of Semi-Arid Climate Change, Ministry of Education, School of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou* 730000
2 *State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100029
3 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049

Abstract Black carbon (BC) is a very important component of the aerosols. It contributes significantly to the regional and global climate changes, due to its strong absorption in the visible and infrared range. The used data are observed during April 2007 to March 2008 at the Semi-Arid Climate and Environment Observatory of Lanzhou University (SACOL), Gansu Province. The variation characteristics of the BC concentrations are discussed combined with the meteorological observational data. The means concentration of BC at SACOL is 1797.3 ng·m^{-3}, which is lower than that in the cities. The variation of BC concentration is controlled by the diurnal and seasonal variations of the local circulation and local anthropogenic activity. The hourly means of the BC concentrations show a diurnal vari-

收稿日期 2009-05-07收到，2010-05-20收到修定稿
资助项目 国家自然科学基金重点项目40633017
作者简介 杨溯，男，1983年出生，博士研究生，研究方向为大气辐射与气溶胶。E-mail：yangsu@mail.iap.ac.cn
通讯作者 张武，男，1960年出生，博士，教授，研究方向为大气辐射与大气遥感。E-mail：wzhang@lzu.edu.cn

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

ation characterized by a pronounced double-peak pattern with the high values in the morning and the evening, and the concentration is getting higher and higher in winter. Precipitation is an effective way of cleaning BC.

Key words black carbon, observation, Aethalometer, semi-arid climate

1 引言

黑碳气溶胶（Black Carbon，BC）是含碳物质（主要是化石能源）不完全燃烧产生的不定型碳质（IPCC，2001；韩永明和曹军骥，2005），在可见光波段有强烈的吸收，它是大气气溶胶中最主要的光学吸收成分，是大气气溶胶的重要组成部分。

环境中存在的 BC 主要来源于火山喷发和化石能源消耗，随着社会对能源需求的不断提高，后者已经成为 BC 的主要来源。IPCC 第四次评估报告指出（IPCC，2007），当前全球每年排放的 BC 为 8.0 $Tg \cdot a^{-1}$(C)，其中化石燃料消费排放为 4.6 $Tg \cdot a^{-1}$(C)，生物质燃烧排放 3.3 $Tg \cdot a^{-1}$(C)。1950～1990 年，美国、欧洲、亚洲经济高速发展，全球化石燃烧排放的 BC 增长非常迅速［2.2～6.7 $Tg \cdot a^{-1}$(C)］，1990 年后由于减排措施的实施，全球 BC 排放量也逐渐减少［5.6 $Tg \cdot a^{-1}$(C)］。全球年平均 BC 的源强分布有 4 个极大值区，最大的源强位于欧洲（0.2～0.5 $kg \cdot km^{-2} \cdot h^{-1}$），其次是中国东部（0.05～0.1 $kg \cdot km^{-2} \cdot h^{-1}$），另两个排放源分别位于南美洲和非洲（0.02～0.05 $kg \cdot km^{-2} \cdot h^{-1}$）（IPCC，2001）。Streets et al.（2001，2003）对我国 1995 年和 2000 年的 BC 排放量进行了估算，按照他们的计算结果，1995 年中国向大气排放的 BC 为 1342 Gg，其中 83%来自煤和生物质燃烧；2000 年中国的 BC 排放量为 1050 Gg。

目前 BC 排放量主要是基于排放因子估算得到的。但由于燃烧的物质、条件、环境不同，得到精确的排放因子是非常困难的，尤其对于我国地域广、人口分布不均、气象环境差异大的特点，用排放因子来估算 BC，误差更是在所难免，因此需要大量的观测试验对估算结果进行验证。当前国内已进行了 BC 浓度观测实验，如杨东贞等（1995）、汤洁等（1999）对我国临安、青海等地区全球本底站的持续观测，Wang et al.（2005）、许黎等（2006）对北京、河北香河等地区的观测，娄淑娟等（2005）针对北京地区不同尺度气溶胶中 BC 含量进行了观测研究，秦世广等（2007）和杨溯等（2008）分别对四川温江、上海浦东地区的 BC 进行了观测研究等。这些研究成果为科学的评估我国 BC 水平提供了可靠依据。但由于受到仪器设备、观测条件的限制，目前已有的研究多集中在我国经济较发达的中东部地区，对我国西部干旱、半干旱区的关注甚少。另一方面，由于干旱、半干旱区地表植被覆盖率低，降水量少且时空分布不均、生态环境脆弱的特点，其对 BC 引起的气候效应（Haywood and Shine，1995；Schult et al.，1997；Menon et al.，2002；Hansen and Nazarenko，2004；Jacobson，2004，2005；Jacobson and Kaufman，2006；Lau and Kim，2006a，2006b）更加敏感。因此迫切需要在这些地区开展 BC 监测，为科学评估我国 BC 水平、研究气候强迫因子提供依据。

本文通过使用兰州大学半干旱气候环境观测站近一年的连续观测资料，对我国半干旱地区 BC 浓度特征进行研究，分析了该地区 BC 浓度的日、季变化规律，讨论了站点周围主要污染源对观测结果的影响，以及降水对 BC 的清除机制及效率，最后与国内外 BC 观测结果进行对比。

2 数据来源及质量控制

2.1 观测站点介绍

兰州大学半干旱气候与环境观测站（Semi-Arid Climate and Environment Observatory of Lanzhou University，SACOL）位于兰州大学榆中校区海拔 1965.8 m 的萃英山顶上（35.946°N，104.137°E）。观测场占地约 80000 m^2，下垫面属于典型的黄土高原地貌，塬面梁峁基本为原生植被。年平均气温 6.7 ℃，1 月平均气温－8 ℃，7 月平均气温 19 ℃。年平均降雨量 381.8 mm，属温带半干旱气候。全年盛行西北和东南风，年平均风速约为 2.6 $m \cdot s^{-1}$，全年日照时数 2607.2 h

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

左右[http://climate.lzu.edu.cn/chinese/introduce.asp?newsid=706(站点风貌)[2009-05-01]]。观测站点所在地隶属兰州市榆中县夏官营镇，距离兰州市区46 km，全镇人口16133人，总面积136 km^2，耕地13.41 km^2(http://www.xgy.gov.cn/pagk/index.asp[2009-05-01])。测站周围最大工业区榆中钢铁公司位于站点北西北方，直线距离约16 km（见图1）。

2.2 观测仪器介绍及其设置

采用目前使用比较广泛的AE-31型黑碳仪对黑碳气溶胶进行实时监测。AE-31黑碳仪是美国玛基公司（Magee Scientific CO.，USA）生产的一种利用光学衰减法测得BC浓度的黑碳监测仪器，具有7个不同波长的测量通道（0.37、0.47、0.52、0.59、0.66、0.88、0.95 μm），其中0.88 μm通道为BC浓度标准通道。

黑碳仪利用BC对可见光的吸收特性来进行测量（Hansen et al.，1984）①。一般认为，除去一些特殊天气状况下（如沙尘、扬尘），BC总的光吸收贡献在90%（Hansen et al.，1993）至95%（Japar et al.，1986），因此对BC而言，气溶胶中其他成分对可见光的吸收可以忽略不计。黑碳仪通过外接采样管和抽气泵将采样空气抽入采样室，并将空气中的气溶胶吸附在透光均匀的滤膜上，滤膜采用石英纤维制成，可以最大限度消除气溶胶中非吸收成分对透光率的影响①（Rosen et al.，1978）。利用固定波长的单色光照射滤带，测定采样膜上BC的光学衰减。

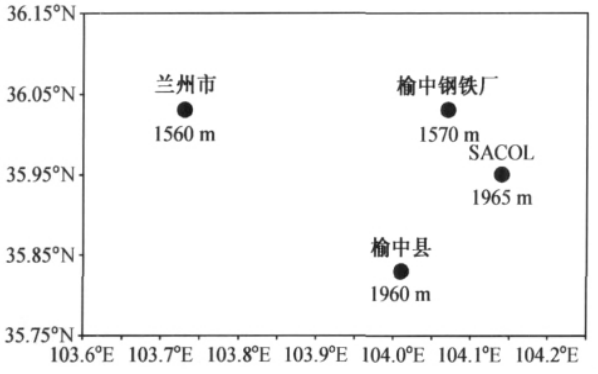

图1 站点及周边主要城市、工业区地理位置

Fig.1 Location of the Semi-Arid Climate and Environment Observatory of Lanzhou University (SACOL) and the nearby cities and factory

实验期间将黑碳仪主机置于大气成分监测室，采样口距地面3 m，设定黑碳仪流量5 L·min^{-1}，进气口加装了SCC1.82型切割头（BGI Inc.公司生产），切割粒径2.5 μm，采样周期为5 min。除断电、更换配件等客观原因外，黑碳仪每5分钟记录数据一次。工作人员每日两次巡视采样地点并记录当时周围环境状况作为数据处理参考。

2.3 数据质量控制

原始数据的时间长度为2007年4月1日至2008年3月24日，共计82056组、6838 h。由于观测站周围出现局地污染以及仪器自身造成的误差不可避免，为保证数据质量，分析前需进行数据质量控制。质量控制方案具体如下：

（1）根据观测站的每日工作和天气记录，去除出现有明显局地污染的数据，如施工、沙尘时段数据。

（2）由于黑碳仪器的测量是利用采样膜上的光学衰减增量计算对应时间段内的黑碳浓度，因而，测量器件的信号波动往往导致互补的邻近极端值，即前一个低值接着一个高值，或者相反，为了消除这种由于仪器测量器件信号波动带来的极端值，往往采用平滑处理，或者就是简单的滑动平均。本文采用7点平滑对数据进行处理，以平滑后的数据作为参照，再来判断原始数据中是否存在野点，即：计算每个数据与平滑后的数据的差值，如果该差值不超一定范围，且相邻数据的差值符号相反，说明是正常的数据波动，应予保留，否则可以考虑剔除其中不合理的数据。重复剔除方案直至前后两次剔除数据百分比之差小于0.1%。

筛选后共得到有效数据79970组、6664.2 h，数据有效性为97.5%，整个观测期间BC平均浓度1797.3 ng·m^{-3}（见表1）。

表1 BC每小时平均浓度统计特征

Table 1 Statistical characteristic of hourly black carbon (BC) concentration

平均值/ng·m^{-3}	剔除数据百分比	不同百分位时的浓度/ng·m^{-3}				
		5%	25%	50%	75%	95%
1797.3	2.5%	357	854	1421	2245	4097

①Hansen A D A. 2005. The Aethalometer™. Magee Scientific（仪器说明书）

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

3　日、季变化特征分析

3.1　日变化特征

从图 2 上可以看到，测站的 BC 浓度随时间波动呈双峰特征，07～10 时（北京时间，下同）、17～20 时 BC 浓度增长迅速，在 10 时和 21 时分别出现两个波峰。日最高浓度多出现在第一个波峰，第二个波峰的浓度值较小，峰型不如前者明显。10～17 时 BC 含量迅速减少，在 17 时达到一天中浓度最低值，其值仅为日最高值的 1/2 左右。

BC 浓度日变化特征清晰地反映出受人为活动规律、大气热湍流扩散规律控制特征。通常情况下人类活动主要集中在白天，而在夜间较少，因此排放主要集中在从清晨到晚间的时段。受太阳辐射控制的垂直湍流扩散则在正午至 14 时最旺盛，而夜间大气常处于稳定层结状态，湍流扩散能力弱。人类活动多集中盆地、山谷地区，这里有稳定的 BC 源。山谷风的日夜交替和日出后盆地上空稳定层结的抬升有利于在山谷、盆地积聚的 BC 向测站输送。由于早晨层结稳定、湍流扩散较弱、排放增加以及日出后盆地聚集的 BC 随层结抬升共同作用造成 10 时出现日浓度最高值；夜间虽然排放量减少但由于大气趋于稳定，日间排放物沉积下来造成 21 时出现第二个 BC 浓度峰值。在正午及午后，太阳辐射较强、热对流旺盛，大气湍流扩散能力强，BC 容易随大气对流扩散出去因此出现浓度低值。日落后山谷风替换，风向由较洁净的山顶吹向山谷，虽然测站风速仍然较大，但 BC 浓度趋于稳定。

BC 浓度日变化在不同季节的差异主要体现在第一峰值出现的时间和夜间第二个峰值时刻以后 BC 浓度的变化趋势上。通过对不同季节 BC 浓度日变化（图 3）比较发现，秋冬季第一峰值出现的时间要比春夏季晚 1 h，其产生主要受逆温层和人类活动规律影响。秋冬季早晨逆温现象频繁，会抑制对流扩散、有利于 BC 的积累。人类早晨活动时间延迟，集中排放时间随之推后。夜间第二个峰值时刻以后 BC 浓度在不同季节的变化各有不同：春、夏季略有增长，秋、冬季下降，这种变化趋势与各季节风速日变化吻合（图略）。

3.2　季节变化特征

BC 浓度的季节变化特征是源排放、大气稳定度及降水等因素共同影响的结果。从图 4 可以看到，从 11 月下旬开始到次年 2 月出现明显的浓度增长，持续时间长，浓度水平稳定，期间 BC 平均浓度在 2700 ng·m^{-3}左右，为整个观测期间平均值的 1.5 倍，明显高于其他季节。在 2007 年 11 月 22 日和 2008 年 2 月 11 日两次出现 BC 日平均浓度高值，浓度值达到观测期间平均浓度的 4 倍。结合当时气象和人为活动不难发现，BC 高浓度值的出现是气候条件和污染源季节变化共同作用的结果。兰州地区从 11 月下旬开始大范围供暖，碳类燃料消耗增加所排放的大量颗粒物成为秋冬季 BC 重要的排放源，同时冬季频繁出现逆温不利于 BC 的扩散、造成其浓度升高。另外需要注意的是，全年月平均浓度最高的是 11 月，而非完全进入供暖期后的月份。通过分析期间天气资料可以

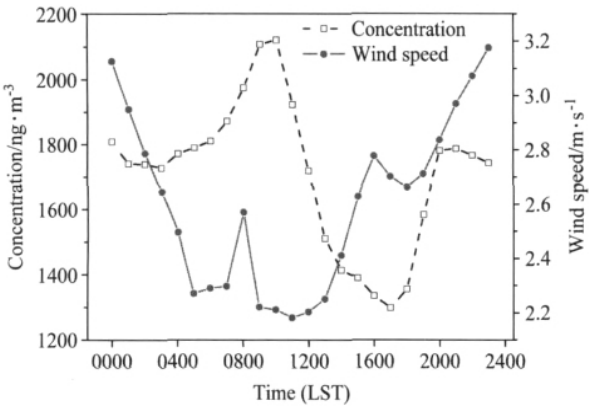

图 2　BC 浓度与风速日变化

Fig. 2　Diurnal variations of BC concentration and wind speed

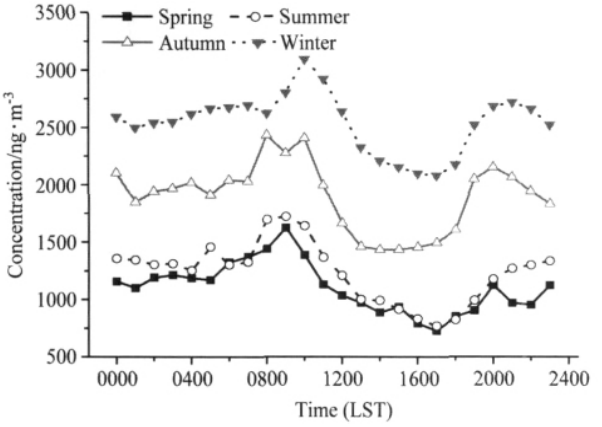

图 3　各季节 BC 浓度日变化

Fig. 3　Diurnal variations of BC concentration in four seasons

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

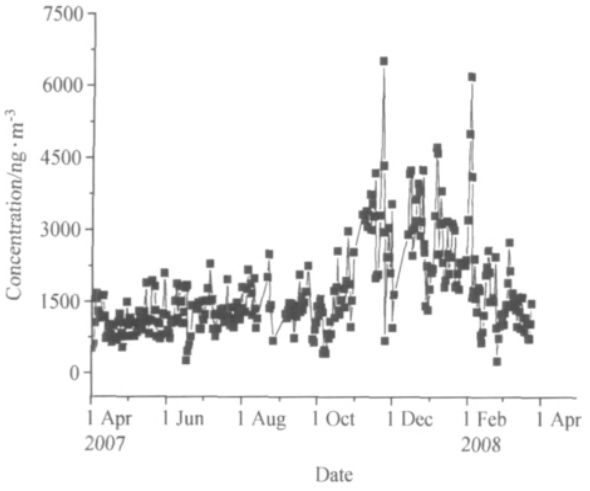

图4 BC日平均浓度时间序列

Fig. 4 Time series of the daily BC concentration

发现，11月没有降水记录，缺少湿沉降这种有效的清除机制造成BC在大气中积累（详见4.2节），加上从该月下旬开始的供暖造成更多的BC进入到大气中，都是造成高浓度的因素，这就不难解释11月BC浓度明显高于其他月份了。

4 源汇分析

4.1 源分析

兰州市区、榆中钢铁厂、榆中县是SACOL站周围3处主要污染源，它们对观测结果的影响不能忽略，但由于测站特殊的地理位置（详见图1），可以在较大程度上减少这种直接影响。兰州市区是SACOL站周围最大的BC源，其与测站间距离46 km，但由于兰州市全年静风频率高、风速小，测站与市区之间山脉（海拔1800 m左右）阻隔，因而城市污染物不易向外输送；榆中钢铁厂和榆中县与SACOL站的直线距离小于20 km，但是从测站的风向玫瑰图（图5）上看，测站全年盛行西北、东南风向，能够夹带榆中钢铁厂和榆中县排放污染物的北西北、南东南风向出现频率很小。

本文通过NOAA研制的HYSPLIT4（Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated）（Draxler，1997）的后向轨迹方法分析SACOL站观测到不同浓度等级时的BC来源，轨迹起始高度设为2100 m。根据表1的结果分别选择连续两天

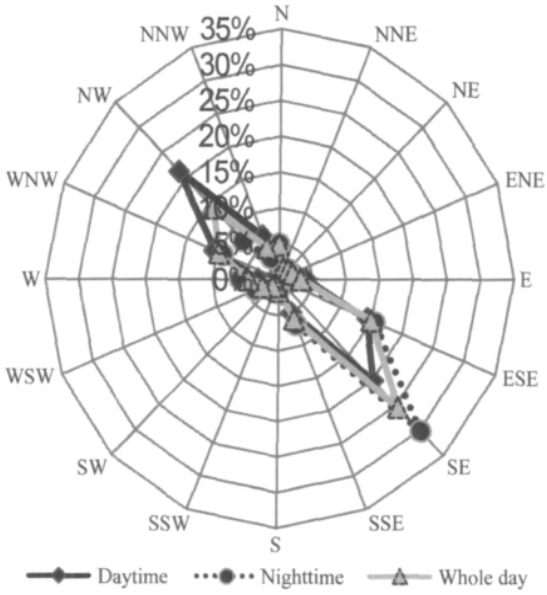

图5 2007～2008年SACOL站风向玫瑰图

Fig. 5 Wind rose during 2007-2008 at SACOL

以上无降水且日均值小于（大于）25%（75%）分位浓度的数据做48 h后向轨迹（图6和图7），两者分别代表测站低、高BC浓度等级时的污染物来源，并认为气团输送是引起持续数天的清洁（高污染）情况的主要因素。从图6a和6b上看，4月2日、4月18日、6月2日气流均由西北方向输送过来，途中未经过城市，气流平均输送高度高于测站海拔；5月5日的轨迹比较特殊，它的平均输送高度低于测站海拔，输送方向变化较大，在兰州市西侧有明显拐点，经由兰州市与榆中县之间的山谷到达测站。虽然其输送高度较低、途经两座城市之间，但是从地形图上不难发现由于城市分布于河谷、山谷之中，受周围山脉阻挡，城市污染物对这股气流的影响较小。另外这股气流强度较弱，移动速度较慢，无法翻越山脉进入城市，也是其BC含量低的原因。从图7a和7b看，气流的平均输送高度从3700～1650 m不等，气流移动速度快，输送范围大，都经过城市上空，有利于将城市的污染物携带到测站，造成高BC浓度的现象。对比图6和图7不难发现，测站特殊的地理位置在一定程度上可以减少城市源的影响，但城市仍然是重要的BC污染源，在强劲气流的配合下城市源会引起测站高BC浓度。

结合以上两点认为，不能忽略测站周围城市、工厂对观测结果的影响，但是也要认识到，它们

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

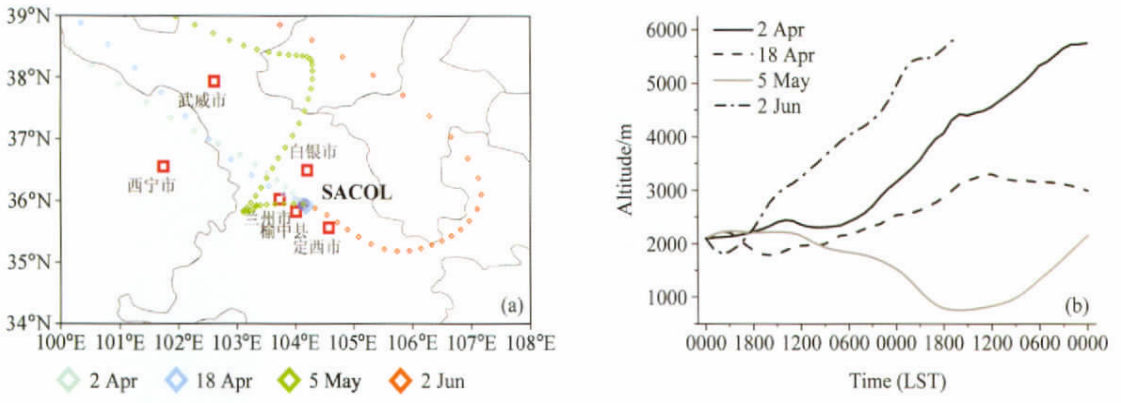

图 6　低 BC 浓度（a）后向轨迹和（b）后向轨迹气团高度

Fig. 6　(a) 48-h backward trajectory and (b) backward trajectory altitude for the low BC concentration

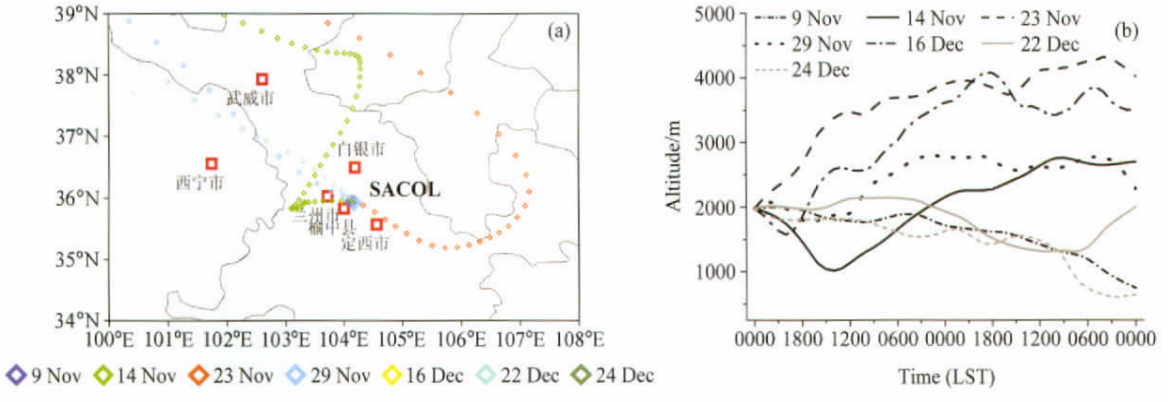

图 7　同图 6，但为高 BC 浓度

Fig. 7　Same as Fig. 6, but for high BC concentration

对测站的影响是需要一定的气象条件配合而非持续的。

4.2　降水的清除作用

研究表明，BC 是一种高聚合的、黑色的、在 400 ℃以下很难被氧化的物质（Penner and Novakov, 1996），粒子的尺度主要在 0.01～1.0 μm 的细粒子区，在常温下表现惰性和憎水性，不溶于任何溶剂，其转换和清除都是物理过程，不会由大气中其他的化学反应过程生成或清除。本文挑选出有较强降水发生的数据，通过对比降水前后日小时平均浓度分析降水对 BC 的作用。为了清晰地分析降水的影响，根据测站的实时天气记录挑选出满足以下两点要求的数据：降水强度较大或持续时间较长；降水前后 5 天内没有另一次降水发生。通过表 2 比较降水前后日与降水期间日平均 BC 浓度可以看到，降水对大气中的 BC 有显著的清除作用，降水能使空气中 BC 含量减少 16%～40%。

表 2　降水前后黑碳浓度比较

Table 2　Comparison of BC concentration between rainy day and non-rain day

有降水		无降水		
日期	平均浓度 /ng·m^{-3}	日期	平均浓度 /ng·m^{-3}	两浓度比值
4 月 16 日	815.8	4 月 15 日	1207.3	67.6%
4 月 28 日	782.9	4 月 27 日	1072.6	73.0%
5 月 22～23 日	1055.1	5 月 21 日	1790.7	58.9%
6 月 15～20 日	851.8	6 月 14 日	1281.3	66.5%
7 月 11～13 日	1123.8	7 月 14 日	1328.4	84.6%
平均	925.9	平均	1336.1	70.1%

5　与其他地区观测结果比较

表 3 列出了部分国内外其他地区 BC 观测的结果。尽管在实验仪器、观测时间、观测地点代表的

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 3 不同地区黑碳研究结果
Table 3 BC concentration in different regions

实验地	观测区域	观测时间	浓度/ $\mu g \cdot m^{-3}$	文献
兰州大学 SACOL 站	郊区	2007 年 4 月至 2008 年 3 月	1.8	
香港鹤咀	城市背景	2004 年 6 月至 2005 年 5 月	2.4	Cheng et al.（2006）
瓦里关本底站	全球本底站	1994 年 7 月至 1999 年 12 月	0.05～0.6	汤洁等（1999）
		1996～2000 年	0.056～0.66	秦世广等（2001）
临安本底站	区域本底站	1991 年 9～11 月	2.3	汤洁等（1999）
		2000 年 8 月至 2001 年 2 月	1.44～7.51	秦世广等（2001）
北京上甸子	区域本底站	1999 年 9 月至 2000 年 3 月	0.2～3.3	秦世广等（2001）
温江	郊区	1999 年 9 月至 2000 年 8 月	1.24～19.12	秦世广等（2007）
西藏拉萨	郊区	1998 年 6～10 月	0.3～4.8	秦世广等（2001）
布达佩斯（西班牙）	城市背景	2002 年 4 月 23 日至 5 月 5 日	0.33	Salma et al.（2004）
上海浦东	城市	2006 年 10～12 月	5.6±4.7	杨溯等（2008）
西安	城市	2003 年 9～11 月	1.8～27.5	李扬等（2005）
北京	城市	2003 年 7～8 月	8.8±2.59	娄淑娟等（2005）
		2003 年 11 月至 2004 年 01 月	11.4±8.18	
京都（日本）	城市	2002 年 7 月 23 日至 8 月 2 日	1.3	He et al.（2004）
赫尔辛基（芬兰）	城市	2000 年 7 月 17～31 日	1.2	He et al.（2004）
布达佩斯（西班牙）	城市	2002 年 4 月 23 日至 5 月 5 日	3.4	Salma et al.（2004）

区域特征不尽相同，无法对浓度值进行严格比较，但从浓度数量级上还是可以发现，SACOL 站的 BC 浓度要低于我国城市水平，与背景区域（上甸子、鹤咀）的观测结果相当，但明显高于全球本底站瓦里关 BC 水平（汤洁等，1999；Cheng et al.，2006）。与国外相比，SACOL 站的 BC 浓度明显高于国外城市背景（布达佩斯）的观测结果，与国外城市（京都、赫尔辛基）的结果比较接近。

6 结论

本文通过 SACOL 站近一年的连续 BC 观测，分析其浓度变化特征及降水、风向对浓度的影响，得到如下结论：

（1）观测期间兰州大学半干旱气候与环境观测站（SACOL）平均黑碳气溶胶（BC）浓度 1797.3 $ng \cdot m^{-3}$。与其他研究结果相比，测站的 BC 浓度低于城市水平，但高于全球本底站瓦里关 BC 浓度水平，与香港背景区域 BC 浓度接近。

（2）SACOL 站 BC 浓度日变化呈显著的双峰特征，10 时和 21 时分别出现两个波峰，日最高浓度多出现在第一个波峰，第二个波峰的浓度值较小、峰型不如前者明显，17 时出现一天中浓度最低值，其值仅为日最高值的 1/2 左右。测站 BC 浓度平均日变化特征清晰地反映出受人为活动规律、大气热湍流扩散规律控制特征。秋冬季第一峰值出现的时间比春夏季晚 1 h，其产生主要受逆温层和人类活动规律影响。

（3）BC 浓度有明显的季节变化特征，其变化特征是源排放、大气稳定度及降水等因素共同影响的结果。由于大范围供暖，煤消耗增加，从 11 月下旬开始到次年 2 月出现明显的浓度增长，期间平均 BC 浓度为观测平均浓度的 1.5 倍。此外因为缺少降水使 11 月成为全年最高的月平均 BC 浓度月份。

（4）城市是重要的 BC 源，配合强劲气流，城市气溶胶可以影响到测站观测结果，它是引起测站持续高 BC 等级的主要源。降水是 BC 有效的清除机制。通过降水前后的 BC 浓度比较发现，一次充足的降水过程可以清除大气中约 16%～40% 的 BC。

致谢 感谢兰州大学半干旱气候与环境观测站（SACOL）为本研究提供的资料。

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

参考文献 (References)

Cheng Y, Lee S C, Ho K F, et al. 2006. Black carbon measurement in a coastal area of south China [J]. J. Geophys. Res., 111 (D12): 12310-12310.

Draxler R R. 1997. Description of the HYSPLIT _4 Modeling System [R]. NOAA Technical Memorandum. 24.

Hansen A D A, Rosen H, Novakov T A. 1984. The aethalometer—An instrument for real-time measurement of optical absorption by aerosol particles [J]. The Science of the Total Environment, 36: 191-196.

Hansen A D A, Kapustin V N, Kopeikin V M, et al. 1993. Optical absorption by Aerosol black carbon and dust in desert region of central Asia [J]. Atmos. Environ., 27 (16): 2527-2531.

Hansen J, Nazarenko L. 2004. Soot climate forcing via snow and ice albedos [J]. Proc. Natl. Acad. Sci., 101 (2): 423-428.

韩永明，曹军骥. 2005. **环境中的黑碳及其全球生物地球化学循环** [J]. **土壤通报**, 25 (1): 125-131. Han Yongming, Cao Junji. Black carbon in the environments and its global biogeochemical cycle [J]. Marine Geology and Quaternary Geology (in Chinese), 25 (1): 125-131.

Haywood J M, Shine K P. 1995. The effect of anthropogenic sulfate and soot aerosol on the clear sky planetary radiation budget [J]. Geophys. Res. Lett., 22 (5): 603-606.

He Z, Kim Y J, Ogunjobi K O, et al. 2004. Carbonaceous aerosol-characteristics of PM 2.5 particles in northeastern Asia in summer 2002 [J]. Atmos. Environ., 38: 1795-1800.

IPCC. 2001. Climate Change 2001: The Scientific Basis [M]. Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, et al., Eds. London: Cambridge University Press, 289-348.

IPCC. 2007. Climate Change 2007: The Physical Scientific Basis [M]. Christensen J H, Hewitson B, Busuioc A, et al., Eds. London: Cambridge University Press, 131-217.

Jacobson M Z. 2004. Climate response of fossil fuel and biofuel soot, accounting for soot's feedback to snow and sea ice albedo and emissivity [J]. J. Geophys. Res., 109: D21201.

Jacobson M Z. 2005. Strong radiative heating due to the mixing state of black carbon in atmospheric aerosols [J]. Nature, 409: 695-697.

Jacobson M Z, Kaufman Y J. 2006. Wind reduction by aerosol particles [J]. Geophys. Res. Lett., 33: L24814.

Japar S M, Brachaczek W W, Gorse R A, et al. 1986. The contribution of elemental carbon to the optical properties of rural atmospheric aerosols [J]. Atmos. Environ., 20 (6): 1281-1289.

Lau K M, Kim M K. 2006a. Asian summer monsoon anomalies induced by aerosol direct forcing: The role of the Tibetan Plateau [J]. Climate Dyn., 26: 855-864.

Lau K M, Kim K M. 2006b. Observational relationships between aerosol and Asian monsoon rainfall, and circulation [J]. Geophys. Res. Lett., 33: L21810.

李扬，曹军骥，张小曳，等. 2005. 2003 **年秋季西安大气黑碳气溶胶的演化特征及其来源解析** [J]. **气候与环境研究**, 10 (2): 229-237. Li Yang, Cao Junji, Zhang Xiaoye, et al. 2005. The variability and source apportionment of black carbon aerosol in Xi'an atmosphere during the autumn of 2003 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 10 (2): 229-237.

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** [J]. **环境科学学报**, 25 (1): 17-22. Lou Shujun, Mao Jietai, Wang Meihua. 2005. Observational study of black carbon aerosol in Beijing [J]. Acta Scientiae Circumstantiae (in Chinese), 25 (1): 17-22.

Menon S, Hansem J, Nazarenko L, et al. 2002. Climate effects of black carbon aerosols in China and India [J]. Science, 297: 2250-2253.

Penner J E, Novakov T. 1996. Carbonaceous particles in the atmosphere: A historical perspective to the fifth international conference on carbonaceous particles in the atmosphere [J]. J. Geophys. Res., 101: 19373-19378.

秦世广，汤洁，温玉璞. 2001. **黑碳气溶胶及其在气候变化研究中的意义** [J]. **气象**, 27 (11): 3-7. Qin Shiguang, Tang Jie, Wen Yupu. 2001. Black carbon and its importance in climate change studies [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 27 (11): 3-7.

秦世广，汤洁，石广玉，等. 2007. **四川温江黑碳气溶胶浓度观测研究** [J]. **环境科学学报**, 27 (8): 1370-1376. Qin Shiguang, Tang Jie, Shi Guangyu, et al. 2007. Observational study of black carbon at Wenjiang, Sichuan Province [J]. Acta Scientiae Circumstantiae (in Chinese), 27 (8): 1370-1376.

Rosen H, Hansen A D A, Gundel L, et al. 1978. Identification of the optically absorbing component in urban aerosols [J]. Applied Optics, 17: 3859-3861.

Salma I, Chi X G, Maenhaut W. 2004. Elemental and organic carbon in urban canyon and back-ground environments in Budapest, Hungary [J]. Atmos. Environ., 38: 27-36.

Schult I, Feichter J, Cooke W F. 1997. Effect of black carbon and sulfate aerosols on the global radiation budget [J]. J. Geophys. Res., 102 (D25): 30107-30118.

Streets D G, Gupta S, Waldhof S T, et al. 2001. Black carbon emissions in China [J]. Atmos. Environ., 35: 4281-4296.

Streets D G, Bond T C, Canniehael G R, et al. 2003. An inventory of gaseous and primary aerosol emissions Asia in the year 2000 [J]. J. Geophys. Res., 108 (D21): 8809.

汤洁，温玉璞，周凌晞. 1999. **中国两部大气清洁地区黑碳气溶胶的观测研究** [J]. **应用气象学报**, 10 (2): 160-169. Tang Jie, Wen Yupu, Zhou Lingxi. 1999. Observation research of the black carbon aerosol in clean atmosphere regions of western China [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 10 (2): 160-169.

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Wang Gengchen, Bai Jianhui, Kong Qinxin, et al. 2005. Black carbon particles in the urban atmosphere in Beijing [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 22 (5): 640-646.

许黎，王亚强，陈振林，等. 2006. **黑碳气溶胶研究进展Ⅰ：排放、清除和浓度** [J]. **地球科学进展**, 21 (4): 352-360. Xu Li, Wang Yaqiang, Chen Zhenlin, et al. 2006. Progress of black carbon aerosol research. I: Emission, removaland concent [J]. Advances in Earth Science (in Chinese), 21 (4): 352-360.

杨东贞，于晓岚，李兴生. 1995. **临安大气污染本底站气溶胶特征分析** [J]. **大气科学**, 19 (2): 119-227. Yang Dongzhen, Yu Xiaolan, Li Xingsheng. 1995. Characterstics analysis of aerosol at Lin'an air pollution background station [J]. Scientia Atmospherica Sinica (in Chinese), 19 (2): 119-227.

杨溯，张武，韩晶晶，等. 2008. **上海市浦东新区秋冬季黑碳气溶胶特性** [J]. **兰州大学学报（自然科学版）**, 44 (4): 66-70. Yang Su, Zhang Wu, Han Jingjing, et al. 2008. Characteristics of black carbon aerosol over Pudong district in Shanghai during autumn and winter [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences) (in Chinese), 44 (4): 66-70.

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net