

半干旱地区黑碳气溶胶和含碳气体特征及来源

陈霖¹, 张镭^{1*}, 张磊^{1,2}, 曹贤洁¹, 黄建平¹, 张武¹, 张北斗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)

摘要: 利用 2009 年 9 月~2010 年 6 月兰州大学半干旱气候与环境观测站(SACOL)多角度吸收分光光度计(MAAP-5012)观测数据、CO 和 CO₂ 气体成分混合比数据, 分析了西北半干旱地区黑碳气溶胶和含碳气体特征、影响源地, 以及影响黑碳浓度的排放物类型。结果表明 BC、CO、CO₂ 平均浓度分别为 1.75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、601.71 $\times 10^{-9}$ 、387.78 $\times 10^{-6}$ 。利用后向轨迹模式将从观测站西部和东部输送过来的气流区分开, 气流从东部来时, BC、CO、CO₂ 浓度分别为 1.38 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、462.79 $\times 10^{-9}$ 、383.03 $\times 10^{-6}$; 气流从西部来时, BC、CO、CO₂ 浓度分别为 2.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、768.38 $\times 10^{-9}$ 、393.47 $\times 10^{-6}$ 。对 500m、1500m、3000m 高度气流来向的发源地进行聚类分析, 发现 3 个高度上气流从中东、中亚及欧洲区域传输过来时, BC、CO、CO₂ 浓度较高, $\Delta\text{BC}/\Delta\text{CO}$ 、 $\Delta\text{CO}/\Delta\text{CO}_2$ 值较大, 说明燃料燃烧效率较低; 气流从我国华北华中地区传输过来时, BC、CO、CO₂ 浓度较低, $\Delta\text{BC}/\Delta\text{CO}$ 、 $\Delta\text{CO}/\Delta\text{CO}_2$ 值较小, 表明燃料燃烧效率较高。

关键词: 半干旱地区; 黑碳气溶胶; 后向轨迹; 聚类分析

中图分类号: X131.1, P421 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2012)08-1345-08

Characteristics of black carbon aerosol and carbonaceous gases and their emission sources in semi-arid region.

CHEN Lin¹, ZHANG Lei^{1*}, ZHANG Lei^{1,2}, CAO Xian-jie¹, HUANG Jian-ping¹, ZHANG Wu¹, ZHANG Bei-dou¹ (1.Key Laboratory for Semi-Arid Climate Change, Ministry of Education, College of Atmospheric Science, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 2.Unit of 92543 of People's Liberation Army, Jiyuan 454650, China). *China Environmental Science*, 2012,32(8): 1345~1352

Abstract: Adopting observational data of multi angle absorption photometer (MAAP-5012) and the gas composition mixing ratio data of CO and CO₂ of Semi-Arid Climate Observatory and Laboratory (SACOL) from September 2009 to June 2010, the characteristics and effects of source of black carbon aerosol and carbon gas in semi-arid areas of Northwest China, and the types of emissions which have impact on the concentration of black carbon were analyzed. The result indicated that average concentrations of BC, CO and CO₂ were 1.75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 601.71 $\times 10^{-9}$ and 387.78 $\times 10^{-6}$, respectively. Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated model (HYSPLIT-4) was used to distinguish the flow areas from eastern and western of the observation station. When the airstreams came from the east, the concentrations of BC, CO, CO₂ were 1.38 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 462.79 $\times 10^{-9}$ and 383.03 $\times 10^{-6}$, respectively. When the airstreams came from the west, the concentrations of BC, CO, CO₂ are 2.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 768.38 $\times 10^{-9}$ and 393.47 $\times 10^{-6}$, respectively. Taking the clustering analysis on the origin places of the airstreams in the height of 500m, 1500m and 3000m, get the results that when the airstreams of different height flow respective from the Middle East, Central Asia, and Europe, the concentrations of BC, CO, CO₂ were higher and the values of $\Delta\text{BC}/\Delta\text{CO}$, $\Delta\text{CO}/\Delta\text{CO}_2$ were larger, indicating the efficiency of fuel combustion was lower; when the airstreams transmits from Central and Northern China, the concentrations of BC, CO, CO₂ were lower, and the values of $\Delta\text{BC}/\Delta\text{CO}$, $\Delta\text{CO}/\Delta\text{CO}_2$ were smaller, indicating the efficiency of fuel combustion is higher.

Key words: semi-arid areas; black carbon aerosol; backward trajectory; clustering analysis

黑碳气溶胶作为吸收太阳辐射的主要气溶胶成分,近年来引起国内外很多学者关注^[1-6]。黑碳主要是由于物质的不完全燃烧产生的,如工业生产、汽车尾气、居民燃火、生物质燃烧等。黑碳气溶胶的吸收性能占大气气溶胶总吸收性能

的 90%以上^[7],所以一般也用黑碳气溶胶的吸收

收稿日期: 2011-11-21

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

系数作为大气气溶胶的吸收系数.黑碳气溶胶能吸收太阳短波辐射,对大气及大气层顶造成正辐射强迫,同时由于其吸收和散射作用,使得到达地面的太阳短波辐射减少,对地表造成负的辐射强迫作用^[8].大气中黑碳气溶胶可以通过云-气溶胶相互作用,对云层的厚度、云层高度、云量和云顶反照率造成影响,从而造成半直接辐射强迫效应和间接辐射强迫效应^[9].近年研究发现,在南极^[10]、北极^[11]地区也观测到了黑碳气溶胶,且浓度较大.

大气中的黑碳气溶胶主要来源于火山喷发和化石燃料燃烧.IPCC第4次评估报告^[12]指出,当前全球平均每年排放黑碳约8.0Tg/a,其中化石燃料燃烧排放为4.6Tg/a,生物质燃烧排放为3.3Tg/a.我国大城市的日常生活中的化石燃料消耗量较大,城市工业、汽车尾气和居民活动产生的黑碳较多,乡村燃烧秸秆较多^[13-14],也对大气中的黑碳浓度有较大的影响.

目前对人为排放气溶胶的研究多集中于OC(有机碳)和BC(黑碳)之间的关系及其季节变化^[15-16]、BC的混合态^[17]及硫酸盐气溶胶和有机气溶胶的形成^[18]方面,而对BC与燃烧示踪物(CO、CO₂等)的研究较少,BC与CO、CO₂的相互关系可以反映物质的燃烧效率及BC在大气中得传输效率,可较好地表征不同区域的燃烧物燃烧效率及黑碳的传输效率.

我国半干旱地区由于沙尘天气及重工业污染的双重影响,使得黑碳气溶胶研究变得相对复杂.本课题组前期工作分析了兰州远郊区2007年1月1日至2009年8月28日黑碳气溶胶浓度特征,黑碳浓度日变化及季节变化特征,并分析了沙尘过程对黑碳浓度的影响,但没有分析周边区域对观测站黑碳浓度的影响,且没有结合其他物质进行分析.本文在此基础上,利用兰州大学半干旱气候与环境观测站(SACOL)多角度吸收分光光度计(MAAP-5012)观测数据进行半干旱地区黑碳气溶胶变化特征的研究,同时结合CO和CO₂数据,通过后向轨迹分析影响观测站的气流的起源地、起源高度和燃烧物质情况,并将观测站西部和东部输送来的气流区分开,研究观测站两个

主导风向对黑碳气溶胶及含碳气体的影响.

1 观测仪器与资料

1.1 观测仪器

黑碳气溶胶的观测使用Thermo Scientific公司生产的多角度吸收分光光度计(Model-5012).该仪器利用光束通过气溶胶样品后的衰减量与滤膜上黑碳气溶胶质量浓度之间的线性关系,在测量光透过滤膜后的衰减量后,通过线性关系反算出气溶胶中黑碳的浓度.测量仪器腔体内增加了光散射的测量,可用于校正颗粒物累积在滤带上造成的多次散射的影响.MAAP-5012型黑碳仪使用滤膜玻璃纤维收集大气中气溶胶,其观测波长为670nm.

采用ML9830型一氧化碳分析仪观测CO,仪器由微处理器控制,采用非色散红外(NDIR)气体过滤相关光度测定法,可较为精确、稳定地测定大气中CO的含量.用ML9820型二氧化碳分析仪进行CO₂观测,ML9820型二氧化碳分析仪由计算机控制,采用非分散红外相关(GFC)光学测量技术,使CO和H₂O的干扰降到最小,可较为精确、稳定地测量CO₂浓度.

1.2 资料处理与质量控制

2009年9月~2010年6月在兰州大学半干旱气候与环境观测站连续观测了BC浓度和CO、CO₂气体混合比,BC浓度数据时间步长为1min,CO、CO₂数据时间步长为5min,实验室每天记录天气情况、云量及周边局地人为活动的变化.

黑碳数据使用范围检查和时变检查^[19]的方法进行质量控制.

MAAP-5012黑碳仪通过测量滤膜上的黑碳对光的衰减量来反算黑碳的质量浓度,其反演公式为:

$$MBC=(1-\omega_0)\cdot\ln(X)\cdot A/\sigma_{BC} \quad (1)$$

$$BC=\Delta MBC/VOL \quad (2)$$

式中:MBC为黑碳质量; ω_0 为单次散射反照率; X 为透过率; A 为滤膜上黑碳斑点面积; σ_{BC} 为黑碳的质量吸收系数,m²/g;VOL为气流流量;BC为仪器输出的黑碳质量浓度.式中 X 为观测值, A 、VOL

值为固定值,因此订正时需要考虑 σ_{BC} 的取值,仪器设定值为 $6.6\text{m}^2/\text{g}$,但不同地区 σ_{BC} 的值不同,数据处理时参考欧洲西南部与非洲撒哈拉沙漠临近地区用 MAAP-5012 黑碳仪得出黑碳质量吸收系数(约 $10.3\text{m}^2/\text{g}$ [21-23]),这一区域气溶胶的吸收特性既受北部欧洲地区工业排放的影响,又有南部撒哈拉沙漠的沙尘影响,与我国西北半干旱地区环境较为相似.本文中 σ_{BC} 取 $10.3\text{m}^2/\text{g}$.订正时用下式:

$$CBC_C = CBC \cdot 6.6 / 10.3 \quad (3)$$

CBC_C 为订正后的黑碳浓度.

CO 、 CO_2 观测仪器使用零/跨检查、多点较准和定期对仪器做检查与维护进行质量控制,同时使用数据时通过校准数据所得到的多点较准方程进行订正[24].

通过 BC 与 CO 、 CO_2 数据质量控制和订正后, BC 与 CO 、 CO_2 数据同时完好的共有 253d, 占总天数 303d 的 83.5%,若剔除降雨和沙尘暴等特殊天气,总天数为 280d.

2 结果分析

2.1 两种黑碳仪 MAAP-5012 与 AE-31 观测结果比较分析

黑碳仪 MAAP-5012 和 AE-31 都可用于测量大气中的黑碳浓度,但 MAAP 在观测时同时接收滤膜上气溶胶的散射信号,并将散射信号剔除.利用兰州大学半干旱气候与环境观测站 2009 年 9 月~2010 年 3 月 MAAP-5012(670nm) 和 AE-31(660nm 波段)的同步观测数据进行对比分析.所选波段差异很小,观测波长造成的差异可以忽略不计.

由图 1 可见,MAAP-5012 与 AE-31 测定的 BC 浓度 5min 数据的均值相关系数为 0.93,日变化趋势相关度略差;而日均值相关系数为 0.98,说明长时间平均结果基本一致.

2.2 黑碳、一氧化碳及二氧化碳变化特征

观测站地面风速在秋、冬季节较小,春、夏季较大. BC 和 CO 变化也基本为秋冬季较大,春夏季相对较小,这与冬季采暖燃煤量较大有关;而 BC 与 CO_2 变化联系较弱, CO_2 冬季较大,与冬季

燃煤有关,但日变化特征不明显,可能与天气过程有关(图 2).

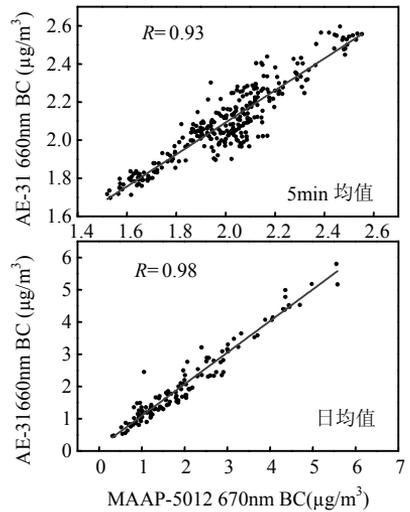


图 1 MAAP-5012 与 AE-31 黑碳浓度相关性
Fig.1 Correlation of BC between MAAP-5012 and AE-31

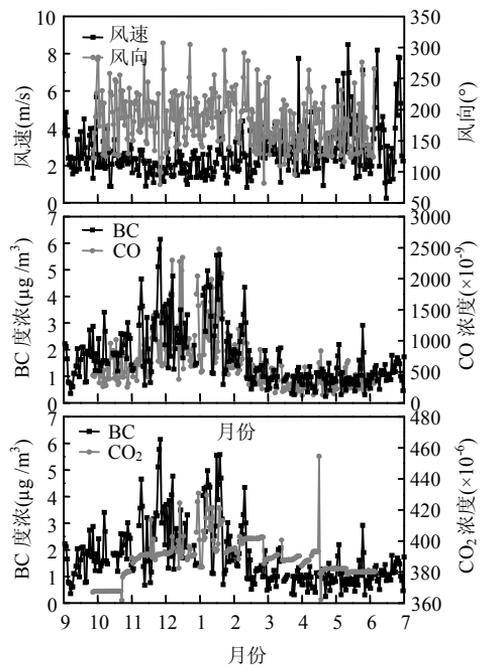


图 2 地面风速风向,BC 和 CO 及 CO_2 日均值变化
Fig.2 Daily mean of wind speed, wind direction, BC-CO and BC-CO₂ concentration

由图 3 可见,BC 平均浓度在一周中星期一最

小,为 $1.53\mu\text{g}/\text{m}^3$;星期六最大,为 $1.77\mu\text{g}/\text{m}^3$.BC 浓度星期一~星期四较星期五~星期日小.可能与周末居民活动黑碳排放增多有关,观测站地处兰州市远郊区,星期一~星期四附近经过车辆相对较少,周末出行车辆增多,使得附近黑碳排放相对星期一~星期四增多.

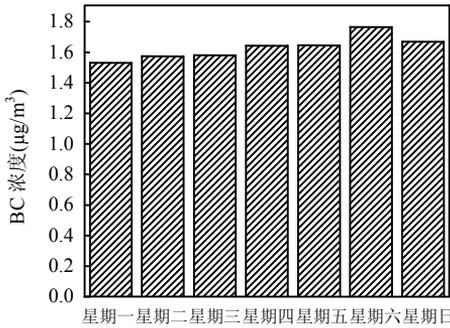


图3 黑碳浓度周变化

Fig.3 Weekly variation of BC Concentration

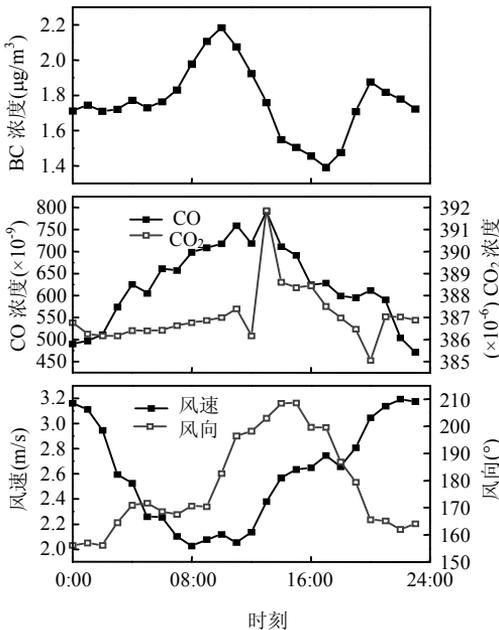


图4 BC、CO、CO₂浓度及地面风速风向日变化基本情况

Fig.4 Diurnal variation of BC,CO,CO₂ and surface wind speed, wind direction

由图4可见,观测站BC日变化呈现双峰结构,10:00和20:00为峰值,对应浓度分别为 $2.18, 1.88\mu\text{g}/\text{m}^3$,这与上下班高峰期及早晨逆温层

发展和地面风速较低有关;CO和CO₂日变化呈现单峰结构,13:00为峰值,最大值分别为 790.72×10^{-9} 和 391.86×10^{-6} ,可能与附近村庄人为活动有关;地面风速在08:00达最小值,为2.02m/s.

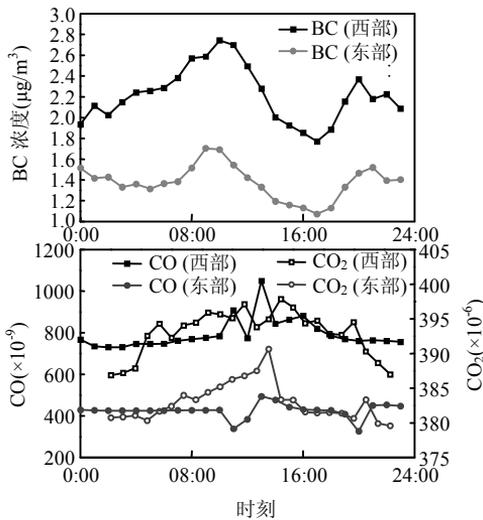
2.3 气流后向轨迹分析

考虑到观测站近地面主导风向为东南方向,且观测站以东至东南沿海地区和观测站以西至西亚地区无论地形、植被还是工业程度都有较大差异,所以将气团按发源地经度分为东、西两部分,利用HYSPLIT-4模式^[25]研究近地面气流来向不同对BC、CO及CO₂的影响.一般研究经过城市的气流造成的影响时,选取50~300m较为合适,由于SACOL站西部兰州市属河谷地形城市,需选取较低高度进行研究,所以通过后向轨迹模式给出50m高度处气流96h后向轨迹,每d1条轨迹,每条后向轨迹起始时间取北京时间(与仪器观测时间同步)00:00.2009年9月~2010年6月共303条后向轨迹,其中来自观测站东部的气流占比略多,为51%,西部传输过来的气流占49%,图略.

由表1可见,近地面气流从西部传输过来时,BC、CO、CO₂浓度分别为 $2.20\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 768.38×10^{-9} 、 393.47×10^{-6} ,比气流从东部来时高,这与观测站西部区域排放黑碳浓度较高有关.由图5可见,气流来自不同方向时,浓度日变化有较大差异:气流从西部传输过来时,BC浓度峰值和次峰值出现在10:00和20:00,浓度分别为 $2.75, 2.38\mu\text{g}/\text{m}^3$,这是由于气流从西部传输过来时,经过兰州市市区近地层,城市上下班高峰期对BC浓度峰值出现时间有一定影响,而气流从东部传输过来时,BC浓度峰值和次峰值出现在09:00和21:00,浓度分别为 $1.71, 1.55\mu\text{g}/\text{m}^3$;气流从西部传输过来时,CO白天维持较高水平,峰值出现在14:00,浓度为 955×10^{-9} ,这与城市白天工业污染较重有关,而从东部传输过来时CO白天平均浓度较低,但变化范围较大,峰值出现在13:00,浓度为 732×10^{-9} ;气流从西部、东部传输过来时CO₂峰值都出现在13:00,浓度分别为 402×10^{-6} 和 383×10^{-6} ,浓度值差别较大.

表 1 不同气流来向 BC、CO、CO₂ 浓度Table 1 BC, CO and CO₂ concentration of different airflow direction

方向	BC($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	CO($\times 10^{-9}$)	CO ₂ ($\times 10^{-6}$)
东部	1.38	462.79	383.03
西部	2.20	768.38	393.47
总计	1.75	601.71	387.78

图 5 不同气流来向 BC、CO、CO₂ 浓度日变化Fig.5 Diurnal variation of BC,CO,CO₂ concentration of different airflow direction

考虑到 SACOL 周围地区离地 500m 高度层气溶胶混合程度较好,1500m 高度一般为混合层顶,3000m 高度适合分析高空气团大尺度运行特征,所以选取 500m、1500m、3000m 做后向轨迹的模拟。每 d 1 条后向轨迹,每条后向轨迹起始时间取北京时(与仪器观测时间同步)00:00。分析中使用马氏距离^[26]的 K-均值聚类方法^[27],将后向轨迹路径按起点分为 6 个类别,并对每个类别的后向轨迹做“convhull”^[28](即按轨迹的边界做出包裹线)处理。由于单一的后向轨迹有不确定性且直观性差^[26],本文作出不同高度后向轨迹图,相对单一高度层后向轨迹图更为直观。图 6 为各个高度上每个类别后向轨迹平面图,3 个高度上后向轨迹起源基本一致,可大致划分为中东、中亚、欧洲、俄罗斯西部和北部、中国华北华中等

区域。

在 500m、1500m 高度层上,从中亚地区、西伯利亚平原和我国华北华中地区传输过来的气流所占比例较大;而 3000m 高度层上,主要是从观测站西部传输过来的气流,东部传输过来的气流所占比例很少,这主要是由于高空受西风气流主导所致。由表 2 可见,BC、CO、CO₂ 平均浓度的变化一致,BC 高值对应的 CO、CO₂ 也较高。在 500m、1500m 高度层上,气流从欧洲东部、欧洲中部、中东及中亚地区传输过来时,观测的 BC 及 CO 浓度明显较高,高于 2.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,而从我国华北华中地区传输过来时,BC 和 CO 浓度较低;在 3000m 高度层上,气流从欧洲地区传输过来时,观测的 BC 及 CO 浓度明显较高,而气流从西西伯利亚平原传输过来时,BC 和 CO 浓度较低。

$\Delta\text{CO}/\Delta\text{CO}_2$ 值(即 CO-CO₂ 离散点对比的斜率值)可反映排放源的燃烧效率,值越小说明燃烧越充分,一般化石燃料燃烧(如石油) $\Delta\text{CO}/\Delta\text{CO}_2$ 值较小,而生物质燃烧 $\Delta\text{CO}/\Delta\text{CO}_2$ 值较大^[29],通过与排放清单的对比,也可以作为确定区域主要燃烧物质的指标^[30], $\Delta\text{BC}/\Delta\text{CO}$ 值可以很好地反映黑碳排放后传输到边界层的效率以及从边界层传输到自由大气的效率^[31]。

从 3 个高度层上看,气流从欧洲、中东及中亚地区传输过来时,BC 浓度较高,同时 $\Delta\text{BC}/\Delta\text{CO}$ 、 $\Delta\text{CO}/\Delta\text{CO}_2$ 值明显较高,说明这些地区物质燃烧效率较低,物质燃烧不完全,导致黑碳排放较多,可能由于当地生物质燃烧所占比例较多,长距离传输混合作用也有一定影响;而从西西伯利亚平原、我国华北华中地区传输过来时,BC 浓度较低, $\Delta\text{BC}/\Delta\text{CO}$ 、 $\Delta\text{CO}/\Delta\text{CO}_2$ 值较低,说明这些区域物质燃烧效率较高,尤其我国华北华中地区,虽然能源消耗较大,但从结果来看产生的黑碳较少。

3 结论

3.1 BC、CO 和 CO₂ 平均浓度分别为 1.75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、601.71 $\times 10^{-9}$ 、387.78 $\times 10^{-6}$ 。BC 浓度日变化呈现双峰结构,10:00 和 20:00 为最大值,峰值分别为 2.18 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 1.88 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,CO 和 CO₂ 浓度日变化呈

现单峰结构,13:00 为最大值,分别为 790.72×10^{-9} 到最小值,为 $1.53 \mu\text{g}/\text{m}^3$;星期六较大,为 $1.77 \mu\text{g}/\text{m}^3$,和 391.86×10^{-6} .BC 平均浓度在一周中星期一达 这与周末居民活动所致黑碳排放增多有关.

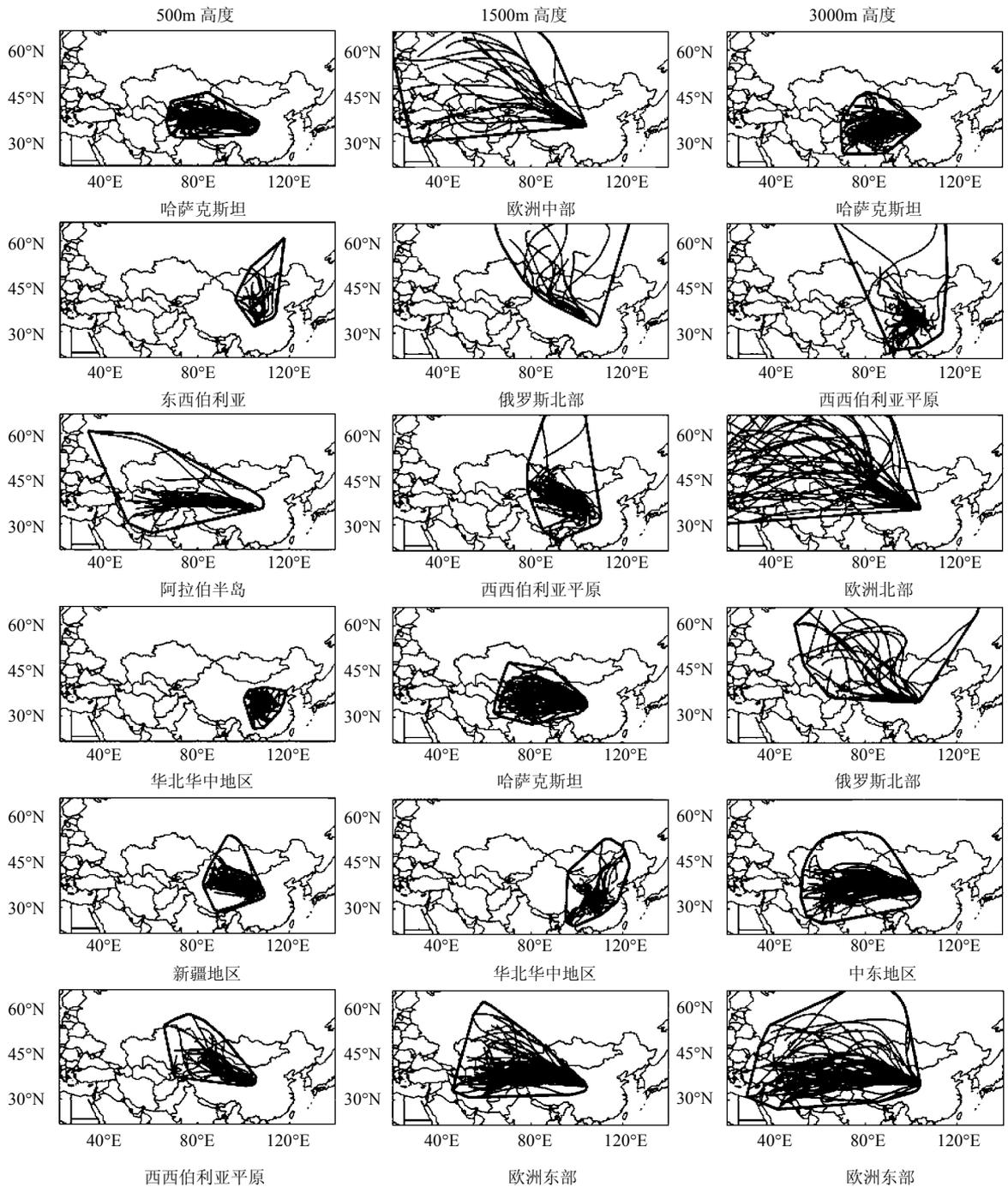


图6 500m、1500m、3000m 高度后向轨迹聚类分析

Fig.6 Clustering analysis of backward trajectory in 500m, 1500m and 3000m

表 2 各气流束比例和对应 BC、CO、CO₂ 浓度和 $\Delta BC/\Delta CO$ 、 $\Delta BC/\Delta CO_2$ 、 $\Delta CO/\Delta CO_2$ 比值Table 2 The percentage of airflow and concentration of BC, CO, CO₂ and amount of $\Delta BC/\Delta CO$ 、 $\Delta BC/\Delta CO_2$ 、 $\Delta CO/\Delta CO_2$

研究高度	来源区域	百分比(%)	BC($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	CO($\times 10^{-9}$)	CO ₂ ($\times 10^{-9}$)	$\Delta BC/\Delta CO$	$\Delta BC/\Delta CO_2$	$\Delta CO/\Delta CO_2$
500m	哈萨克斯坦	21.78	2.45	843.52	396.84	0.0024	0.066	25.06
	东西伯利亚	6.72	1.32	450.79	387.63	0.0006	0.005	4.25
	阿拉伯半岛	8.25	2.93	1026.46	398.96	0.0022	0.100	50.52
	华北华中地区	33.66	1.28	454.25	380.68	0.0011	0.010	2.25
	新疆地区	21.78	1.54	466.27	386.07	0.0021	0.003	1.53
	西西伯利亚平原	8.25	1.93	761.81	390.69	0.0021	0.005	27.02
1500m	欧洲中部	6.27	2.34	871.79	396.06	0.0018	0.089	40.17
	俄罗斯北部	4.62	1.63	487.51	390.91	0.0019	0.018	27.54
	西西伯利亚平原	24.09	1.41	454.07	383.54	0.0022	0.003	1.75
	哈萨克斯坦	23.76	2.08	719.34	393.07	0.0022	0.031	17.15
	华北华中地区	21.12	1.19	406.43	378.71	0.0012	0.008	2.74
	欧洲东部	20.13	2.29	824.02	393.96	0.0024	0.070	30.03
3000m	哈萨克斯坦	26.41	1.76	593.82	386.41	0.0022	0.009	7.28
	西西伯利亚平原	16.17	1.14	403.26	377.97	0.0007	0.007	1.70
	欧洲北部	11.55	1.93	683.88	392.38	0.0019	0.069	33.50
	俄罗斯北部	5.94	1.49	473.12	387.21	0.0026	0.064	29.72
	中东地区	21.78	1.91	668.18	390.38	0.0022	0.048	19.21
	欧洲东部	18.15	2.09	711.12	393.41	0.0024	0.083	36.49

3.2 气流从观测站东部传输过来时,BC、CO、CO₂ 浓度分别为 $1.38\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 462.79×10^{-9} 、 383.03×10^{-6} ,BC 浓度峰值和次峰值出现在 09:00 和 21:00,CO、CO₂ 浓度峰值出现在 13:00;气流从西部传输过来时,BC、CO、CO₂ 浓度分别为 $2.20\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 768.38×10^{-9} 、 393.47×10^{-6} ,浓度较高,BC 浓度峰值和次峰值出现在 10:00 和 20:00,CO 浓度白天维持较高水平,峰值出现在 14:00,CO₂ 峰值出现在 13:00。

3.3 500m、1500m、3000m 高度上气流从中东、欧洲及中亚地区上空传输过来时,BC 浓度较大,且 $\Delta BC/\Delta CO$ 、 $\Delta CO/\Delta CO_2$ 值较高,说明这些地区燃烧物燃烧效率较低;而气流从我国华北华中地区传输过来时 BC 浓度较低,且 $\Delta BC/\Delta CO$ 、 $\Delta CO/\Delta CO_2$ 值较小,说明东部地区燃烧物燃烧效率较高。

参考文献:

[1] 蔡子颖,韩素芹,黄 鹤,等.天津夏季黑碳气溶胶及其吸收特性的观测研究 [J]. 中国环境科学,2011,31(5):719-723.
[2] Huang J P, Fu Q, Zhang W, et al. Dust and black carbon in

seasonal snow across Northern China [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 2011,92:175-181.

- [3] Judith C C, John G W, Douglas H L, et al. PM_{2.5} source profiles for black and organic carbon emission inventories [J]. Atmos. Environ., 2011,45:5407-5414.
[4] Gilardoni S, Vignati E, Wilson J. Using measurements for evaluation of black carbon modeling [J]. Atmos. Chem. Phys., 2011,11:439-455.
[5] Jones G S, Christidis N, Stott P A. Detecting the influence of fossil fuel and bio-fuel black carbon aerosols on near surface temperature changes [J]. Atmos. Chem. Phys., 2011,11:799-816.
[6] 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.
[7] Hansen A D A, Kapustin V N, Kopeikin V M, et al. Optical absorption by aerosol black carbon and dust in desert region of central Asia [J]. Atmos. Environ., 1993,27(16):2527-2531.
[8] 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.
[9] Koch D, Del G A D. Black carbon semi-direct effects on cloud cover: review and synthesis [J]. Atmos. Chem. Phys., 2010,10:7685-7696.
[10] 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.

- [11] 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.
- [12] Christensen J H, Hewitson B, Busuioc A, et al. IPCC climate change 2007: The physical scientific basis [M]. London: Cambridge University Press, 2007,131–217.
- [13] 曹国良,郑方成,王亚强.中国大陆生物质燃烧排放的 TSP, PM₁₀, PM_{2.5} 清单 [J]. *过程工程学报*, 2004,4:700–704.
- [14] Streets D G, Bond T C, Carmichael G R, et al. An inventory of gaseous and primary aerosol emissions in Asia in the year 2000 [J]. *J. Geophys. Res.*, 2003,108:8809.
- [15] Rehman I H, Ahmed T, Praveen P S, et al. Black carbon emissions from biomass and fossil fuels in rural India [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 2011,11:7289–7299.
- [16] Verma R L, Sahu L K, Kondo Y, et al. Temporal variations of black carbon in Guangzhou, China, in summer 2006 [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 2010,10:6471–6485.
- [17] McMeeking G R, Morgan W T, Flynn M, et al. Black carbon aerosol mixing state, organic aerosols and aerosol optical properties over the United Kingdom [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 2011,11:9037–9052.
- [18] Xiao R, Takegawa N, Kondo Y, et al. Formation of submicron sulfate and organic aerosols in the outflow from the urban region of the Pear River Delta in China [J]. *Atmos. Environ.*, 2009, 43:3754–3763.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] Fernandez C R, Rodriguez S, de la Rosa J, et al. Ultrafine particle formation in the inland sea breeze airflow in Southwest Europe [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 2010, 10: 9615–9630.
- [22] Reche C, Querol X, Alastuey A, et al. New considerations for PM, black carbon and particle number concentration for air quality monitoring across different European cities [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 2011,11:6207–6227.
- [23] Pandolfi M, Cusack M, Alastuey A, et al. Variability of aerosol optical properties in the Western Mediterranean Basin [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 2011,11:8189–8203.
- [24] 林伟立,徐晓斌,于大江,等.龙凤山区域大气本底台站反应性气体观测质量控制 [J]. *气象*, 2009,35(11):93–100.
- [25] Draxler R R. Description of the HYSPLIT-4 Modeling System [M]. NOAA Technical Memorandum, 1997,24:1–28.
- [26] Roy D M, Delphine J R, Desire L M. The Mahalanobis distance [J]. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 2000,50:1–18.
- [27] Anderberg M R. Cluster Analysis for Applications [M]. New York: Academic Press, 1973:105–108.
- [28] Matlab 7 Mathematics [M]. MathWorks, 2010:296–302.
- [29] Yokelson R J, Bertschi I T, Christian T J, et al. Trace gas measurements in nascent, aged, and cloud processed smoke from African savanna fires by airborne Fourier transform infrared spectroscopy (AFTIR) [J]. *J. Geophys. Res.*, 2003,108:8478.
- [30] Takegawa N, Kondo Y, Koike M, et al. Removal of NO_x and NO_y in Asian outflow plumes: Aircraft measurements over the western Pacific in January 2002 [J]. *J. Geophys. Res.*, 2004, 109 (D23S04):1–16.
- [31] Park S S, Bae M S, Schauer J J, et al. Evaluation of the TMO and TOT methods for OC and EC measurement and their characteristics in PM_{2.5} at an urban site of Korea during ACE-Asia [J]. *Atmos. Environ.*, 2005,39:5101–5112.

致谢: 本文使用了兰州大学半干旱气候与环境观测站(SACOL)的观测资料及 NOAA 提供的 HYSPLIT-4 模式,谨致谢忱。

作者简介: 陈 霖(1988-),男,安徽六安人,兰州大学大气科学学院硕士研究生,主要从事大气物理与大气环境研究。