

基于无人机平台的黑炭垂直变化监测

王晗煜¹, 彭仲仁^{1,2}, 王东生¹

(1.上海交通大学 智能交通与无人机应用研究中心, 上海 200240;

2.佛罗里达大学 城市与区域规划系, 美国 佛罗里达 盖斯维尔 32611)

摘要: **目的** 获取对流层内黑炭的垂直分布规律和输送来源。**方法** 在2014年夏天和2015年冬天,通过无人机平台搭载便携式设备来监测临安市高空1000 m内黑炭的垂直变化情况。经过2天的试验,总共成功采集了8次试验数据,为了减少统计误差,取300~1000 m内每隔100 m高度层所测得数据的平均值进行分析。**结果** 地面试验结果表明,上午冬季黑炭的质量浓度几乎是夏季的3倍,但是下午冬季黑炭的质量浓度却略低于夏季。无人机试验结果表明,总体上,日变化情况中,夏季黑炭质量浓度逐渐增加,而冬季黑炭质量浓度逐渐减少。不管是夏季还是冬季,上午黑炭的质量浓度随着高度增加而下降,且降幅较大,冬季上午黑炭的质量浓度要远高于夏季上午,但下午黑炭的质量浓度相似。48 h后向轨迹结果表明,夏季300 m和1000 m处气团来源于上海,且输送轨迹都在长三角区域,输送距离在200 km以内;冬季300 m和1000 m处气团来源于北方地区,且输送距离都在1000 km以上。**结论** 通过个例分析,结果表明,冬季早晨黑炭的质量浓度较高,夏季污染物主要来源于近距离输送,但是冬季污染物主要来源于远距离输送。

关键词: 黑炭; 无人机平台; 垂直分布

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2019.06.008

中图分类号: X831

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2019)06-0041-06

UAV-based Vertical Profiles of Black Carbon

WANG Han-yu¹, PENG Zhong-ren^{1,2}, WANG Dong-sheng¹

(1. Center for ITS and UAV Applications Research, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. Department of Urban and Regional Planning, University of Florida, Gainesville 32611, USA)

ABSTRACT: Objective To study vertical profiles and conveying sources of black carbon in the troposphere. **Methods** Vertical measurements with unmanned aerial vehicle (UAV) carrying portable sensors were conducted to collect altitude profiles on concentration of BC within 1000 meters in the summer of 2014 and the winter of 2015 in Lin'an, China. In order to reduce statistical error, two days' BC data including eight field experiments was averaged according to altitude. **Results** The ground test results indicated that the mass concentration of BC in the winter morning was 3 times of that in the summer morning; while the mass concentration of BC in the winter afternoon was less than that in the summer afternoon. The UAV test results showed, during the day, the concentration of BC increased over time during summer and decreased over time during winter. During the morning in both summer and winter, the mass concentration of BC decreased with the increase of height. Moreover, the mass concentration of BC in the winter morning was much larger than that in the summer morning. But the mass concentration of BC in summer afternoon and winter afternoon was similar. The results of 48 h HYSPLIT archive trajectories exhibited that air mass

收稿日期: 2019-03-16; 修订日期: 2019-04-29

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0200502); 上海市环保科研项目(沪环科 2014-8)

作者简介: 王晗煜(1991—),女,江苏人,博士研究生,主要研究方向为交通环境。

通讯作者: 彭仲仁(1963—),男,湖南人,博士,教授,主要研究方向为智能交通与无人机应用。

of the summer at 300 m and 1000 m was derived from Shanghai and the conveying distance was within 200 km. That is, all transport paths were in the Yangtze river delta region. However, air mass of the winter at 300 m and 1000 m was dated from northern areas and the conveying distance was beyond 1000 km. **Conclusion** The case study indicates heavy concentration of BC tends to form in the winter morning. The main source of pollutants in summer is the short distance transport; while the main source of pollutants in winter is the remote transport.

KEY WORDS: black carbon; unmanned aerial vehicle; vertical profile

近年随着经济的繁荣发展,大气环境污染问题突出,国内频繁出现严重且持久的雾霾污染^[1-3]。作为细颗粒物($\text{PM}_{2.5}$, 气体动力学直径小于等于 $2.5\ \mu\text{m}$ 的颗粒物)的重要组成部分,黑炭(black carbon, BC)不仅影响全球气候变化和区域空气质量,而且危害人类健康^[4]。黑炭主要是由化石燃料和生物质不完全燃烧产生的,具有消光作用,从而降低大气能见度,有利于雾霾的产生^[5]。自20世纪80年代中期开始,国内学者对城市地区进行黑炭的监测研究工作,从20世纪90年代初开始,黑炭观测工作在全国各地广泛进行^[6-9],但基本都是地面观测,少有关于黑炭垂直探测的研究。杭州市临安区由于其独特的地理、环境等优势,成为长三角地区唯一大气本底站的建设地点,因此临安区已经成为了长三角地区大气成分观测研究的基地。文中给出了2014年夏季和2015年冬季在临安运用无人机平台进行的黑炭气溶胶的垂直监测结果,并结合地面监测结果和气象数据,分析了黑炭的地面浓度变化和垂直浓度变化特点,进一步探讨了该区域黑炭的输送来源,为大气污染防治提供依据。

1 试验

1.1 区域及时间

试验区域位于浙江省杭州市临安区,无人机起飞地点位于长西线旁通运路,距杭州市区西北方向约10 km。该区域周围没有类似化工厂等明显的污染物排放源,因此有利于应用无人机平台监测黑炭气溶胶的垂直分布情况。

在2014年夏天和2015年冬天,运用无人机平台在2天内共进行了8次试验,试验时间分别为2014年8月21日(6:25-7:01, 10:15-10:52, 14:10-14:45, 16:21-16:56)和2015年2月5日(8:07-8:46, 10:43-11:22, 14:12-14:51, 15:23-16:00)。每天上午2个航次,下午2个航次,每个航次需要35 min左右的飞行时间。

试验采用的是轻型固定翼无人机,首先人为操控起飞,到达300 m高度时,沿着水平路线飞行一周,飞行范围为 $4\text{ km}\times 4\text{ km}$,之后爬升至400 m,再水平盘旋一周,这样循环直至1000 m(如图1所示),最后直接降落到地面。由于无人机燃料是汽油,为避

免无人机自身排放的影响,水平飞行范围随着高度升高而缩小,并且只对无人机上升期间数据进行分析。

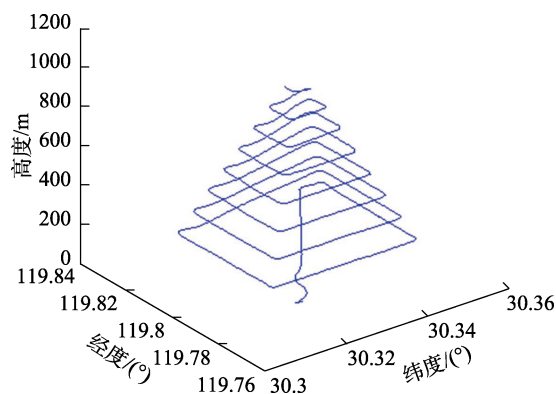


图1 无人机的飞行路径

1.2 试验设备及数据处理

试验采用的轻型固定翼无人机最大载荷约为3.5 kg,最长飞行时间约为2 h,机身总长1.8 m,翼展长2.4 m。采用Aethlabs公司生产的MicroAeth® AE51微型黑炭仪监测黑炭的质量浓度。该设备利用光学吸收衰减方法,将880 nm处测量值转换成黑炭的质量浓度,测量范围为 $0\sim 1\text{ mg/m}^3$,测量分辨率为 $0.001\ \mu\text{g/m}^3$ 。数据记录时间间隔为1 s,该设备质量为280 g。采用Onset公司生产的HOBO® U12 Temp/RH Data Logger监测温度和相对湿度,温度的测量范围为 $0\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$,在 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时测量分辨率为 $0.03\text{ }^{\circ}\text{C}$;相对湿度的测量范围为 $10\%\sim 90\%$,测量分辨率为0.03%,数据记录时间间隔为2 s,该设备质量为46 g。通过Columbus公司生产的探险家™ V-900插卡式多功能导航记录器定位记录无人机的路径点,记录的数据包括日期、时间、经度、纬度和高度等,数据记录时间间隔为1 s,该设备质量为55 g。

所有微型传感器都放置在专门定制的机舱里,设备均用减震塑料包裹,设备之间的间隙采用减震塑料填充,以减少飞机震动的影响。黑炭设备进气口处连接了一根约0.5 m长的采样管,通过内置的气泵将空气样品抽入设备中。采样管的前进气段被固定在机身腹部,以减少大气湍流对进气的干扰^[10]。温度和相对湿度设备也固定在机身腹部,以减少太阳直射和大气湍流等的影响。多功能导航记录器放置在机身背部,避免遮挡,使其能接受强卫星信号,以保证定位准确

度。所有设备均自带存储功能。

为了保证数据的准确性,在试验之前,将黑炭设备与上海市浦东新区环境监测站的标准黑炭设备(Aethalometer™ AE31)以1 h均值进行连续比对,比对结果如图2a所示,得到两者的线性关系($y=1.93x-0.16$, $R^2=0.88$)。试验所采用的黑炭设备的测量值几乎是标准黑炭设备的2倍,这应该与两种设备不同的测量原理有关。在无人机试验进行的同时,另一台与本试验同样型号的黑炭设备放置在地面,以同步获取地面黑炭的质量浓度。为了减少系统误差的影响,在试验开始之前,将放置在地面和无人机上的两台黑炭设备进行同步比对,比对结果如图2b所示。两者的相关系数大于0.82,故系统误差在可接受范围内。为减小抽样误差,无人机上黑炭设备所测得的黑炭质量浓度取300~1000 m之间每隔100 m所监测得到的所有值的平均值。

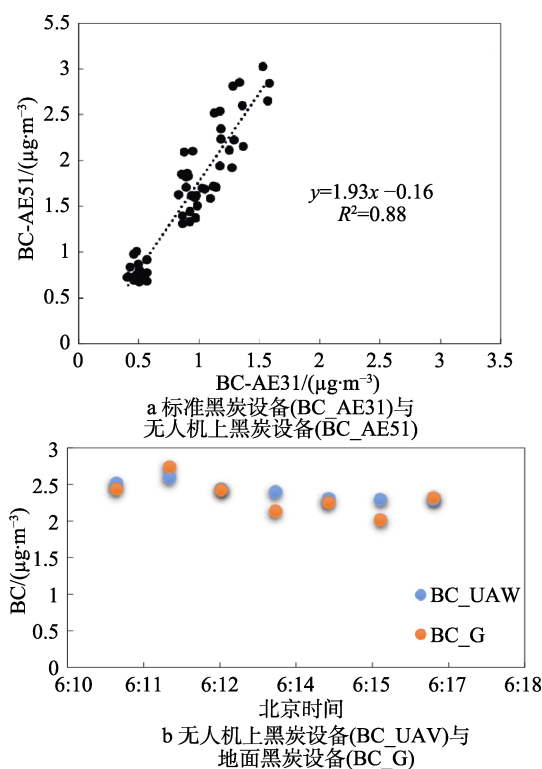


图2 设备比对结果

2 结果及分析

2.1 地面 BC 的日变化情况

试验地点地面黑炭质量浓度半小时均值的日变化情况如图3所示。由于受到设备电池容量和内存容量的影响,无法记录黑炭24 h的变化情况。整体来说,2014年8月21日和2015年2月5日所测得地面黑炭质量浓度的均值分别为2.54、4.86 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,因此冬季黑炭的质量浓度要高于夏季,这与之前临安地

面 $\text{PM}_{2.5}$ 观测结果一致^[11]。2014年8月21日上午和下午所测得的地面黑炭质量浓度的均值分别为2.36、2.82 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,2015年2月5日上午和下午所测得的地面黑炭质量浓度的均值分别为6.42、1.80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,因此上午冬季黑炭的质量浓度要远高于夏季,下午冬季黑炭的质量浓度却略低于夏季。

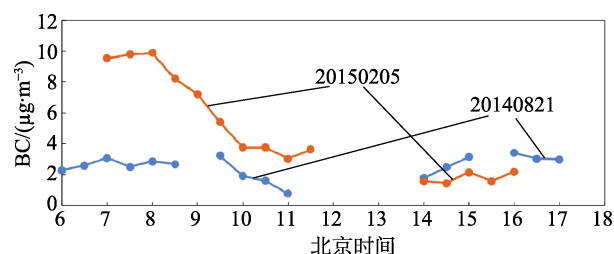


图3 BC地面质量浓度日变化

图4中的大气边界层高度日变化来源于美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)空气资源实验室。表1中的天气、温度、相对湿度、风速和风向等天气数据来源于中国空气质量在线监测分析平台。由表1可知,2014年8月21日温度较高,湿度大,整体风速变化不大,风向由上午的偏南风转至下午的偏东风。2015年2月5日温度低,湿度低,整体风向变化不大,上午风速为1 m/s,下午风速增加至3 m/s。

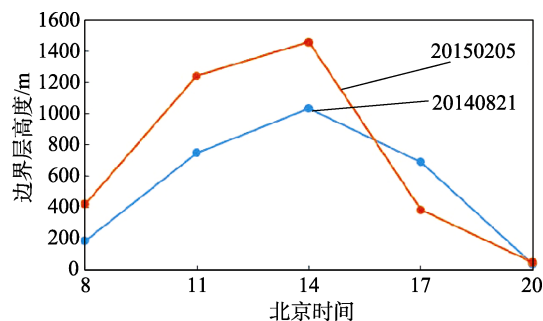


图4 大气边界层高度日变化

2014年8月21日上午6—9点之间,黑炭质量浓度值略有波动,9—11点之间,黑炭的质量浓度由3.23 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 降低至0.78 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。因为上午风速减小,故这与大气边界层的快速扩展有关。14—15点之间,黑炭的质量浓度由1.80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 升高至3.16 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。这是由于下午风速略有增加,风向由偏南风转成东北风,故这与增加的交通排放以及大气边界层的降低有关。16—17点之间黑炭质量浓度值的变化不大。2015年2月5日上午7—12点之间,黑炭的质量浓度先由9.53 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 略微增加到9.87 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,然后迅速降低至3.04 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。可见上午7—8点之间黑炭的质量浓度值是上午最低值的3倍多,说明易形成黑炭污染。由于上午风速没有变化,故这与大气边界层的快速扩展有关。14—16点之间,黑炭质量浓度值略有增加,这

表1 各监测航次地面天气状况

日期	时间	天气	温度/℃	相对湿度/%	风速/(m·s ⁻¹)	风向
20140821	6:25-7:01	多云	20	99	2	西南
	10:15-10:52	多云	25	78	1	东南
	14:10-14:45	多云	30	60	2	东北
	16:21-16:56	多云	30	58	2	东
20150205	8:07-8:46	多云	0	89	1	东北
	10:43-11:22	晴	5	51	1	东
	14:12-14:51	晴	8	31	3	北
	15:23-16:00	晴	7	31	3	东

与增加的交通排放以及大气边界层的降低有关,因为下午风速增加,故黑炭质量浓度只是略有增加。

2.2 垂直 BC 日变化情况

如图5所示,通过无人机试验,在2014年8月21日和2015年2月5日总共获取了8条黑炭的垂直廓线,上午和下午各进行2次试验。夏季上午第一个航次从317~975 m处,测得黑炭的质量浓度下降梯度为0.001 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)/m;夏季上午第二个航次检测结果,测得325 m处黑炭的质量浓度较高,325~655 m处黑炭的质量浓度下降梯度为0.005 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)/m,655~981 m处黑炭的质量浓度降低变缓,下降幅度为0.001 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)/m,和第一个航次类似。夏季下午两个航次黑炭的质量浓度整体波动幅度不大,第三个航次和第四个航次的检测结果:黑炭的质量浓度均值分别为2.10、2.01 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,相差甚微。由图4和图6可知,夏季温度高,且上午10点后大气边界层快速扩展,有利于对流条件的形成,也有利于污染物扩散到高空。故第二个航次于325 m处测得的黑炭的质量浓度较高,到下午的时候,污染物上下混合均匀。

整体来看,2015年2月5日从早到晚,黑炭的质量浓度呈现出明显的递减趋势。冬季上午第一个航次从294~983 m处,测得黑炭的质量浓度下降梯度为0.004 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)/m,均值为4.43 $\mu\text{g}/\text{m}^3$;第二个航次从290~988 m处,测得黑炭的质量浓度随着高度增加而缓慢降低,均值为3.67 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。由图6可知,冬季上

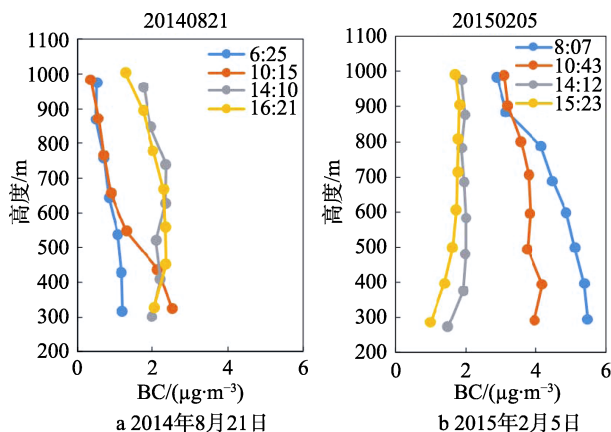


图5 黑炭垂直变化情况

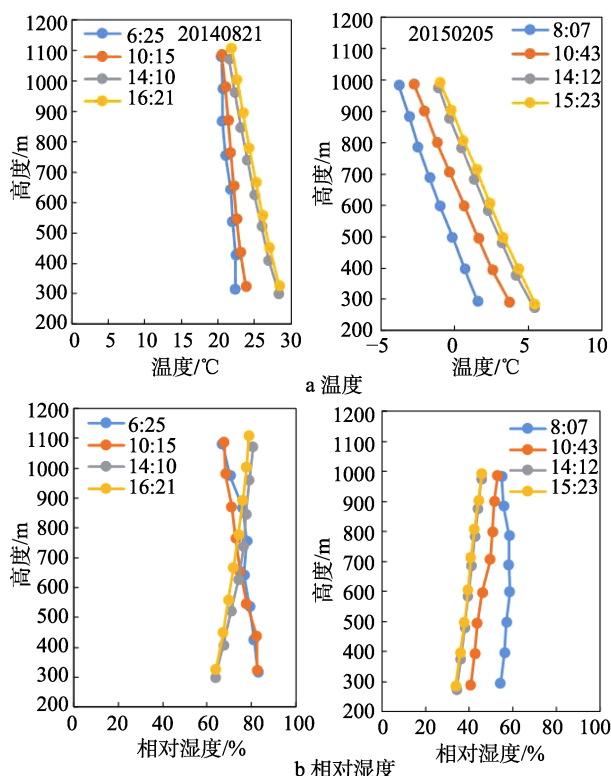


图6 温度和相对湿度垂直变化

午温度低,不利于黑炭的垂直扩散,相对湿度低,说明降雨少,不利于黑炭的清除。总体上,冬季下午两个航次中,测得黑炭的质量浓度随着高度的增加都呈现出递增的趋势。第三个航次从273~375 m处,测得黑炭的质量浓度上升梯度为0.004 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)/m,从375~975 m处,黑炭的质量浓度整体波动幅度较小;第四个航次从285~498 m处,黑炭的质量浓度的上升梯度为0.003 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)/m,从498~993 m处,测得黑炭的质量浓度整体波动幅度较小。第三个航次和第四个航次测得黑炭的质量浓度均值分别为1.89、1.61 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,呈减少趋势。由图4可知,冬季上午边界层快速扩展,但下午却陡降,故冬季上午黑炭的质量浓度递减趋势快,但下午递减趋势趋缓。

2.3 BC 的来源

拉格朗日混合单粒子轨道模型 (Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model,

HYSPLIT) 中的后向轨迹 (archive trajectories) 可以用来计算和模拟大气污染物的输送和扩散轨迹^[12-13]。因此, 文中运用后向轨迹来分析无人机试验地点 300 m 和 1000 m 高度的气团在试验当天下午 6 点之前 48 h 的输送来源, 运行结果如图 7 所示。

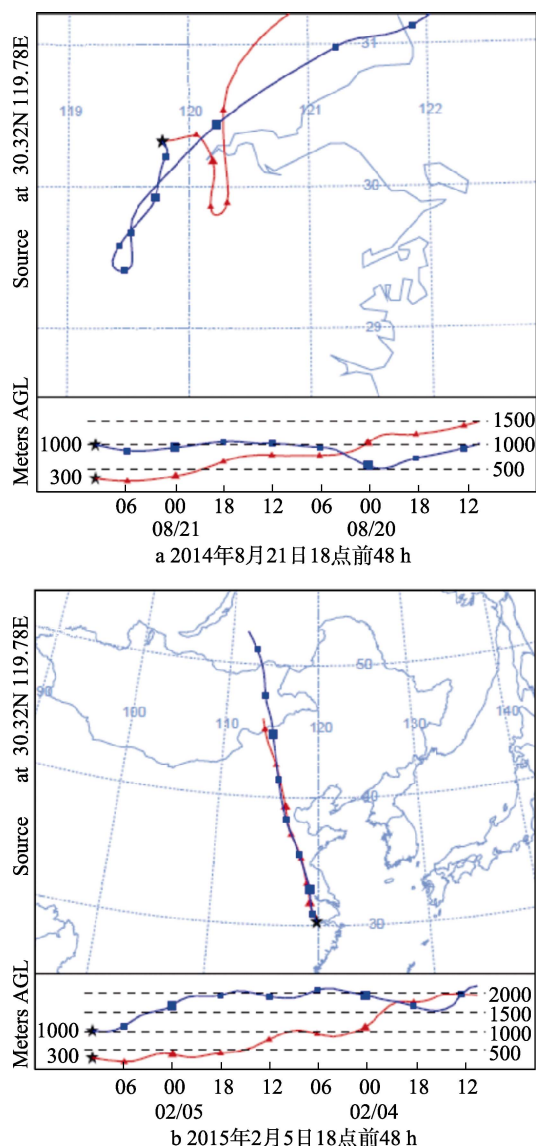


图7 黑炭的输送来源

图 7a 所示的是 2014 年 8 月 21 日 18 点 (即 UTC 10 点) 前 48 h, 无人机试验地点 300 m 和 1000 m 高度处大气污染物的输送轨迹。其中, 300 m 处气团的输送轨迹为: 从 2014 年 8 月 19 日 18 点到 2014 年 8 月 20 日 18 点, 气团来源于上海市, 再输送到江苏省苏州市, 然后到浙江省湖州市、杭州市和绍兴市, 输送高度从 1500 m 降至 800 m 左右。从 8 月 20 日 18 点到 8 月 21 日 2 点, 气团输送方向在绍兴市诸暨市转向, 由朝南输送变成往北输送。接下来到 8 月 21 日 8 点, 气团往北输送到杭州市滨江区, 输送高度由 700 m 左右降至 300 m 左右。最后到 8 月 21 日 18 点, 气团首先沿着偏北方向输送到杭州市余杭区, 最后往

西输送到临安区试验地点处, 输送高度维持在 300 m 左右。1000 m 处气团的输送轨迹为: 气团来源于上海市, 在 8 月 20 日 14 点前, 气团沿西南方向输送, 途径浙江省嘉兴市和杭州市, 输送高度由 1000 m 降至 500 m, 然后又升至 1000 m。从 8 月 20 日 14 点到 8 月 20 日 20 点, 气团输送方向在杭州市建德市转向, 由朝南输送变成往偏北输送, 输送高度维持在 1000 m 左右。接下来至 8 月 21 日 18 点, 气团在杭州市沿偏北方向输送到试验地点, 输送高度依然维持在 1000 m 左右。由此可知, 300 m 和 1000 m 处气团 48 h 前都来源于上海, 且输送轨迹都在长三角区域, 输送距离在 200 km 以内。

图 7b 所示的是 2015 年 2 月 5 日 18 点 (即 UTC 10 点) 前 48 h, 无人机试验地点 300 m 和 1000 m 高度处大气污染物的输送轨迹。300 m 处气团的输送轨迹为: 气团来源于蒙古境内, 途径内蒙古自治区、河北省、北京市、山东省、江苏省、安徽省, 最后到达浙江省杭州市临安区试验地点处, 输送高度由 2000 m 处降至 1000 m 左右, 接着又缓慢降至 300 m 左右。1000 m 处气团的输送轨迹为: 气团来源于俄罗斯境内, 经过蒙古到达国内, 途径内蒙古自治区、河北省、北京市、山东省、江苏省、安徽省, 最后到达浙江省杭州市临安区试验地点处, 输送高度由 2000 m 以上降至 1500 m, 然后又回升至 2000 m 左右, 接着又降至 1000 m 左右。由此可知, 300 m 和 1000 m 处气团 48 h 前输送轨迹相似, 输送距离都在 1000 km 以上。由于北方地区冬季供暖的原因, 故冬季黑炭的质量浓度均值要高于夏季。

3 结论

通过个例分析, 结果表明:

1) 不论夏季还是冬季, 上午地面黑炭的质量浓度都会随着边界层的升高而降低, 下午由于交通排放的增加和边界层的降低, 地面黑炭的质量浓度会略有增加。冬季早晨黑炭易聚积, 故冬季上午地面黑炭的质量浓度日均值要远高于夏季。

2) 不管是夏季还是冬季, 上午和下午的两个航次中, 黑炭的质量浓度随着高度的增加分别显示出了相似的变化规律。冬季上午的黑炭的质量浓度要远高于夏季上午, 但下午黑炭的质量浓度相似。

3) 夏季气团输送轨迹在长三角区域内, 可见污染物主要来源于近距离输送, 而冬季污染物主要来源于远距离输送。

参考文献:

- [1] 金均, 吴建, 蔡菊珍等. 杭州市灰霾天气基本特征及成因分析[J]. 环境污染与防治, 2010, 32(5): 61-63.

- [2] 周敏, 陈长虹, 王红丽, 等. 上海秋季典型大气高污染过程中有机碳和元素碳的变化特征[J]. 环境科学学报, 2013(1): 181-188.
- [3] 张海鸥, 周瑶瑶, 马嫣, 等. 南京霾天气及 $PM_{2.5}$ 化学污染特征分析[J]. 环境科学与技术, 2015, 38(3): 114-118.
- [4] BOND T C, DOHERTY S J, FAHEY D W, et al. Bounding the Role of Black Carbon in the Climate System: A Scientific Assessment[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2013, 118(11): 5380-5552.
- [5] ZHANG X Y, WANG Y Q, NIU T, et al. Atmospheric Aerosol Compositions in China: Spatial/Temporal Variability, Chemical Signature, Regional Haze Distribution and Comparisons with Global Aerosols[J]. Atmospheric Chemistry Physics, 2012, 12: 779-799.
- [6] PARUNGO F, NAGAMOTO C, ZHOU M Y, et al. Aeolian Transport of Aerosol Black Carbon from China to the Ocean[J]. Atmospheric Environment, 1994, 28(20): 3251-3260.
- [7] 汤洁, 温玉璞, 周凌晞, 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.
- [8] 秦世广. 我国大陆地区大气黑碳气溶胶观测研究[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2001.
- [9] 李杨, 曹军骥, 张小曳, 等. 2003 年秋季西安大气中黑碳气溶胶的演化特征及其来源解析[J]. 气候与环境研究, 2005, 2(2): 229-237.
- [10] 张静, 张诗建, 朱振宇, 等. 气溶胶采样头在无人机上安装位置的模拟[J]. 中国环境科学, 2014, 34(9): 2192-2198.
- [11] 孟昭阳, 贾小芳, 张仁健, 等. 2010 年长江三角洲临安本底站 $PM_{2.5}$ 理化特征[J]. 应用气象学报, 2012, 23(4): 424-432.
- [12] STEIN A F, DRAXLER R R, ROLPH G D, et al. NOAA's HYSPLIT Atmospheric Transport and Dispersion Modeling System[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2015, 96(12): 2059-2077.
- [13] ROLPH G, STEIN A, STUNDER B. Real-time Environmental Applications and Display System: Ready[J]. Environmental Modelling & Software, 2017, 95: 210-228.