

傅新姝, 王晓峰, 雷明, 等, 2020. 小型无人机探测城市近地边界层的适用性分析[J]. 气象, 46(12): 1565-1574. Fu X S, Wang X F, Lei M, et al, 2020. On the use of small unmanned aircraft system for the atmospheric surface layer measurements over the urbanized areas[J]. Meteor Mon, 46(12): 1565-1574 (in Chinese).

小型无人机探测城市近地边界层的适用性分析^{*}

傅新姝¹ 王晓峰¹ 雷 明² 杜明斌¹ 夏卫祖³ 陈 哲³ 张紫龙²

1 上海市生态气象和卫星遥感中心, 上海 200000

2 湖北航天飞行器研究所, 武汉 430000

3 上海市宝山区气象局, 上海 201901

提 要: 利用垂直起降固定翼无人机搭载温湿传感器, 针对 2018—2019 年冬季、春季典型天气过程, 在上海开展了 20 次无人机试验, 获得有效数据 19 组, 并基于同站自动站和探空资料, 评估探测资料精度, 分析了无人机探测在城市地区的适用性。结果表明: 无人机试验能获得较高精度的城市近地层探测资料, 冬季和春季试验获得的地面气温(相对湿度)与自动站的平均偏差分别为 -0.5°C (4.9%) 和 0.9°C (-5.9%); 无人机探测的贴地逆温等结构及其变化特征与探空资料一致, 说明无人机对城市地区近地层结构及其演变特征有较好的探测能力。

关键词: 小型无人机, 城市, 边界层, 评估

中图分类号: P412, P414

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2020.12.004

On the Use of Small Unmanned Aircraft System for the Atmospheric Surface Layer Measurements over the Urbanized Areas

FU Xinshu¹ WANG Xiaofeng¹ LEI Ming² DU Mingbin¹

XIA Weizu³ CHEN Zhe³ ZHANG Zilong²

1 Shanghai Ecological Forecasting and Remote Sensing Center, Shanghai 200000

2 Hubei Aerospace Flight Vehicle Institute, Wuhan 430000

3 Shanghai Baoshan Meteorological Office, Shanghai 201901

Abstract: This study is to demonstrate whether the accurate and high spatio-temporal resolution thermodynamic profiles of the lower atmospheric boundary layer (ABL) over the urbanized areas could be obtained by small unmanned aircraft system (sUAS). Twenty flights in total were conducted in Shanghai during winter (in December 2018) and spring (in March 2019) months, and 19 profiles (surface—200 m) of temperature and relative humidity were collected. Measurements from automatic weather station (AWS) and radiosonde at the same site were used to evaluate these profiles. The results showed that surface temperature and relative humidity observed by sUAS are close to those from AWS, with the mean differences of -0.5°C , 4.9% for winter flights and 0.9°C , -5.9% for spring flights. The general features of temperature and relative humidity profiles obtained by sUAS are consistent with those from radiosonde, such as temperature inversion near the ground and so on. These findings indicate that sUAS is capable of revealing detailed structures and variations of the lower ABL over the urbanized areas.

^{*} 上海市科学技术委员会科研计划项目(17DZ1205300)、上海市青年科技英才扬帆计划(20YF1443400)和国家自然科学基金青年科学基金项目(41905007)共同资助

2019 年 12 月 25 日收稿; 2020 年 7 月 30 日收修定稿

第一作者: 傅新姝, 主要从事城市观测资料综合应用研究. E-mail: fxshu366@163.com

通讯作者: 王晓峰, 主要从事数值预报研发应用及台风预报研究. E-mail: Wangxf@mail.typhoon.gov.cn

Key words: small unmanned aircraft system (sUAS), urban, boundary layer, evaluation

引 言

近地边界层是地气物质能量交换的关键区域,也是大气边界层中变化最剧烈、结构最复杂的层之一。城市地区,下垫面性质变化、人为热排放等改变了能量、物质交换过程(Kotthaus and Grimmond, 2014a; 2014b; Li et al, 2019),进而形成了独特的大气边界层结构(张璐等, 2011; 朱丽等, 2020),影响城市地区的天气气候(Fu et al, 2019; Li et al, 2018; Wang and Yan, 2016; Wang et al, 2017; 刘伟东等, 2014; 岳彩军等, 2019; 郑祚芳和任国玉, 2018; 郭良辰等, 2019; 苗世光等, 2020)。采取有效的探测手段,获得近地边界层精细结构,对提高城市地区大气边界层过程的认识,理解城市天气气候机制有重要价值。

目前,探空、气象塔、地基遥感设备等是探测大气边界层的重要手段,但由于时间分辨率以及垂直分辨率低等原因,上述设备尚不能满足近地边界层精细结构的探测需求。无人机具有灵活、垂直分辨率高(秒级)、直接探测等优点,能一定程度弥补上述不足,是对上述探测手段的重要补充(Kral et al, 2018; Martin et al, 2011; 马舒庆等, 1997; 李杨等, 2009)。

近年来,无人机在大气边界层探测方面的应用越来越广泛(Alaoui-Sosse et al, 2019; Barbieri et al, 2019; Jacob et al, 2018; Koch et al, 2018; Islam et al, 2019; Rautenberg et al, 2018; 王宏斌等, 2020)。然而,飞行环境、天气条件等诸多因素均会影响无人机探测试验的结果以及无人机探测资料的精度(Greene et al, 2019; Islam et al, 2019),了解无人机试验在特定地区和天气背景的适用性,是开展进一步研究应用的前提。

已有的研究表明,在乡村或郊区可以顺利开展无人机试验,并获得较高精度的探测资料。很多工作对乡村或者郊区获得的无人机探测资料精度开展评估(Koch et al, 2018; Witte et al, 2017; Zhou et al, 2018),结果表明无人机探测资料的精度能够满足研究大气边界层结构的要求,近期的研究还指

出,在乡村地区获得的无人机探测资料精度正在接近业务应用的需求(Koch et al, 2018)。但是,乡村地区的研究结果不能直接应用于建筑物密集、人类活动集中的城市地区。城市地区下垫面复杂(Grimmond and Oke, 1999),湍流活动强,试验环境比较复杂,对无人机飞行及其探测精度的影响与乡村环境差异较大。城市地区能否成功开展无人机探测试验,获得高精度的探测资料,还需进一步研究。

超大城市上海地处长江下游,地势平坦,城市化对该地区天气气候影响突出(Liang and Ding, 2017; 张贇程等, 2017; 徐伟等, 2019)。本文利用垂直起降固定翼无人机搭载气象观测设备,针对冬季和春季期间多类天气过程,在上海地区连续开展多次无人机气象探测试验,深入分析城市地区开展无人机探测试验、获取高精度近地边界层探测资料的适用性。

1 观测设备及试验介绍

1.1 设备介绍

此次试验采用的无人机为湖北航天飞行器研究所研制的 18 kg 级垂直起降固定翼飞行器,翼展为 2.8 m,起飞总重为 18 kg,有效负载重量为 2 kg,如图 1 所示。无人机最长巡航时间为 1.5 h,巡航距离可达 120 km,最大飞行海拔高度为 4.5 km。与固定翼无人机相比,垂直起降固定翼无人机对起飞场地要求较小,更适合在建筑物比较密集的区域开展作业。

无人机搭载的气象探测仪为天津华云公司 HT-GTS(U)2-1 型探空仪,可实时探测大气温度、相对湿度、气压等要素,温湿度传感器性能指标详见表 1。为了尽可能减少试验期间无人机机身发热(电池等发热、太阳辐射加热机身等)、螺旋桨气流等对探测结果的影响,本研究将探空仪安装在无人机机翼外端靠近副翼的位置,由金属条固定,方便拆卸更换。采用 MCU+SD 卡方式通过串口将探测数据传输至无人机的存储芯片(图 1)。

为了评估无人机探测资料的精度,本文使用自



图 1 (a) 试验使用的垂直起降固定翼飞行器及探空仪安装位置示意图;(b) 试验使用的探空仪照片

Fig. 1 (a) Vertically taking off and landing fixed-wing UAS deployed and sensor placement configurations;
(b) picture of sensors used in this study

表 1 温湿度传感器性能指标

Table 1 Specifications of temperature and humidity sensors

观测要素	采样范围	采样精度	响应时间
温度	-90~50℃	±0.2℃	<1 s
相对湿度	0~100%	±3 %	<1 s (>-20℃) <10 s (<-20℃)

动站温度、相对湿度数据以及同时段探空资料开展分析。自动站资料来自上海宝山站,温度和相对湿度资料的时间分辨率为 1 min(2019 年 3 月 25 日 08—16 时,有部分资料缺测),降水和能见度的时间分辨率为 1 h。探空资料来自宝山站 L 波段雷达探空系统,每组数据包括地面至 200 m 范围内,间隔 10 m 的各高度温度、相对湿度、气压等信息。上述探空资料已完成了台站级质量控制。

1.2 试验设计及试验情况

城市化区域由 2013 年夜间灯光资料表征。夜间灯光资料来自美国国家地理数据中心网站(<http://www.ngdc.noaa.gov/dmsp/downloadV4composites.html>),空间分辨率为 1 km,数据灰度值范围为 0~63,可用于估算城市建成区面积(Imhoff et al, 1997a;1997b),灰度值 54 可作为上海地区提取城市建成区的阈值(舒松等,2011)。

图 2 显示,上海地区城市化水平高,范围广。无人机试验地点为上海宝山国家基本气象站观测场,海拔为 5.5 m,位于上海城市化核心区域(图 2),其所在地区(上海市宝山区)为典型的城市复杂下垫面,多年平均城市冠层热岛强度超过 2℃,具有明显的城市气候特征(Huang et al,2017),为开展超大城市探测试验提供了重要前提。另外,宝山站是上

海地区唯一的国家基本站和探空站,有完善的气象观测设备,为无人机探测试验提供了丰富的验证资料。

无人机探测范围为地面至 200 m 高度,无人机从地面垂直起飞,到达 100 m 高度后,转换为盘旋爬升模式,直至到达 200 m 高度。垂直起飞模式下,无人机上升速度设置为 $3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;盘旋爬升模式下,每次盘旋过程分为平飞盘旋和爬升两个阶段,盘旋半径为 200 m,爬升高度为 30 m,巡航速度设为 $22\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,最大爬升角限制为 10° ,飞行轨迹示例如图 3,到达 200 m 后,盘旋一圈,然后以理想滑翔状态盘旋下降。

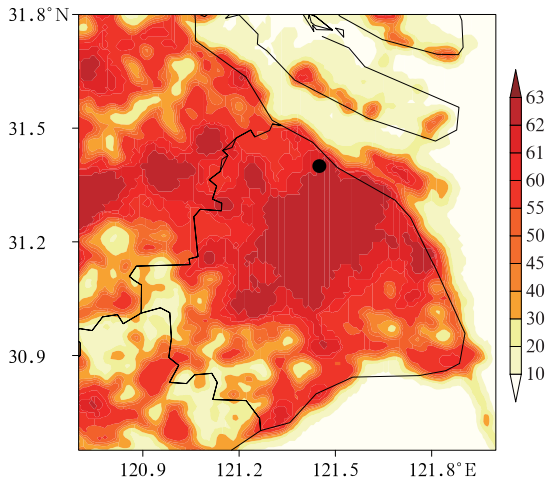


图 2 2013 年上海市夜间灯光图像以及宝山站的位置(黑色实心圆)

Fig. 2 Shanghai nighttime light image in 2013 and the location of Baoshan Station (black solid circle)

本文主要分析无人机上升期间采集的数据。2018 年 12 月 11—14 日以及 2019 年 3 月 25—28 日,在上海宝山站开展两次连续 4 天的无人机探测试验,总共完成 20 次试验,其中成功获取有效探测数据的试验 19 次,探空同步观测 9 次,试验时间、飞行高度等信息详见表 2。

2018 年 12 月 11—14 日为冷空气影响上海的过程,温度大幅下降后回升(如图 4)。11 日 12 时至 12 日 08 时降温期间,开展了 5 次无人机试验,其中 1 次没有数据,1 次受大风影响,无人机仅上升至 100 m;12 日上午至 14 日,温度回升期间开展了 4 次无人机试验。

2019 年 3 月 25—28 日,上海地区出现一次大雾和多次降水过程(图 5)。25 日夜间至 26 日早晨,上海多个区域出现能见度小于 500 m 的浓雾,25—26 日,共开展 5 次无人机探测试验。27 日下午至 28

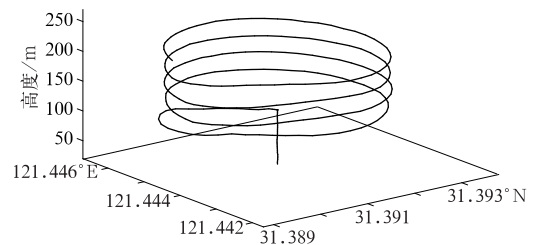


图 3 2019 年 3 月 27 日 13:57—14:04 开展的无人机试验对应的无人机上升轨迹

Fig. 3 The ascending trajectory of sUAS in the experiment conducted from 13:57 BT to 14:04 BT 27 March 2019

日傍晚,上海地区出现两次降水过程,在降水间隙开展 6 次无人机试验,其中 1 次环境风速过大,无人机上升至 125 m 后下降。

表 2 无人机探测试验汇总

Table 2 Summary of sUAS flights performed at Baoshan Station

编号	日期/年月日	试验时间/BT	对应的探空开始时刻/BT	是否获得有效探测数据
1	20181211	10:03—10:08	/	✓
2	20181211	10:43—10:46	/	×
3	20181211	13:51—13:54	/	✓
4	20181211	16:07—16:13	/	✓
5	20181212	07:15—07:18	07:15	✓
6	20181213	07:17—07:24	07:15	✓
7	20181213	14:57—15:00	15:03	✓
8	20181213	16:09—16:16	16:17	✓
9	20181214	07:15—07:23	07:15	✓
10	20190325	07:26—07:34	07:15	✓
11	20190325	13:39—13:47	/	✓
12	20190326	07:36—07:44	07:15	✓
13	20190326	11:03—11:10	/	✓
14	20190326	16:32—16:40	/	✓
15	20190327	07:54—08:01	07:15	✓
16	20190327	10:55—11:03	/	✓
17	20190327	13:57—14:04	/	✓
18	20190328	07:04—07:09	07:15	✓
19	20190328	09:01—09:09	/	✓
20	20190328	11:04—11:10	/	✓

2 结果分析

2.1 地面资料精度评估

首先,基于高时间分辨率的自动站资料,对无人机气象探测系统的观测能力进行初步评估。无人机气象探测系统的精度受到飞机扰流、传感器安装位

置等多种因素的影响,将无人机探测系统固定在地面开展对比观测或者在实验室条件下进行评估,均不能反映上述因素的影响,从而不能反映无人机气象探测系统的真实观测能力(Koch et al,2018)。因此,参考 Lee et al(2019)的工作,本文用无人机上升期间采集的地面至 3 m 范围内的气象要素平均值代表无人机系统探测的地面气象要素值,与无人机起飞时刻的自动气象站(1.5 m)资料进行对比。两

次无人机试验期间,地面自动站观测的气温、相对湿度等分别如图 4 和图 5 所示。

针对冬季天气过程(2018 年 12 月 11—14 日)开展的试验结果表明,无人机探测资料与自动站的偏差较小,两套资料反映的大幅降温、升温以及相对湿度降低等温、湿度变化过程基本一致。统计结果

表明,冬季开展的无人机试验探测资料有偏冷偏湿的现象,气温与自动站资料的平均偏差为 -0.5°C ,相对湿度与自动站资料的平均偏差为 4.9% 。从自动站资料反映的温度和相对湿度时间变化特征分析,12 月 11 日 12 时至 12 日 08 时,冷空气影响上海导致温度大幅降低(图 4a),大气湿度逐渐减小(图 4b),

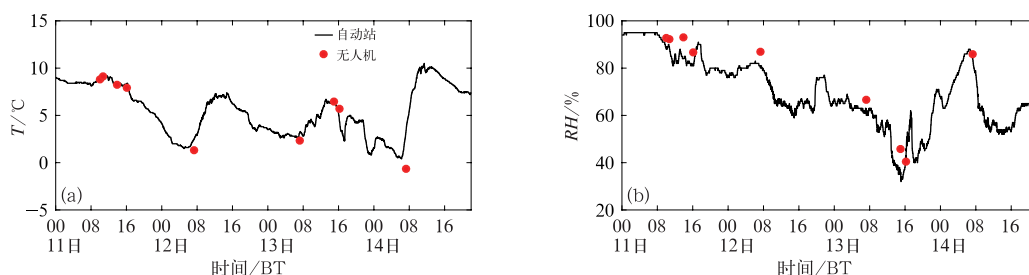


图 4 2018 年 12 月 11—14 日上海宝山站(a)气温,(b)相对湿度的观测值

(无人机探测的地面气象要素值用红色实心点在对应的开展无人机试验的时刻标出,自动站气温和相对湿度的时间分辨率为 1 min,无人机观测值为无人机上升期间采集的地面至 3 m 范围内的要素平均值)

Fig. 4 Temperature (a) and relative humidity (b) observed by sUAS (red dots)

at Baoshan Station during 11—14 December 2018

(Temperature and relative humidity data from AWS are minutely, measurements of sUAS here represent the lowest 3 m mean values of the profiles obtained during the ascending portions of flights)

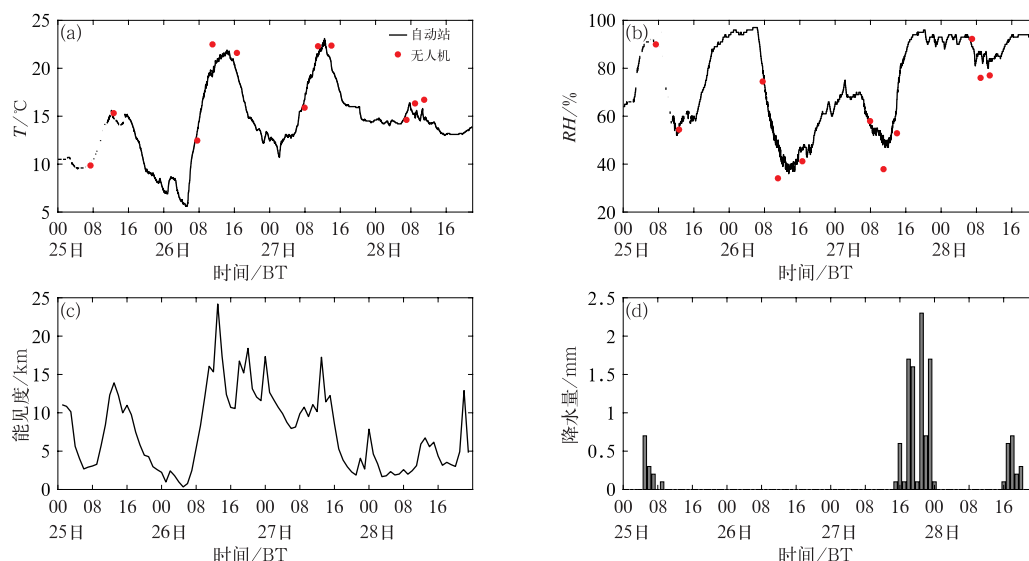


图 5 2019 年 3 月 25—28 日上海宝山站(a)气温,(b)相对湿度,

(c)能见度,(d)小时累积降水量的观测值

(无人机探测的地面气象要素值用红色实心点在对应的开展无人机试验的时刻标出。

自动站气温和相对湿度的时间分辨率为 1 min,降水和能见度时间分辨率为 1 h。

无人机观测值为无人机上升期间采集的地面至 3 m 范围内的要素平均值)

Fig. 5 Temperature (a), relative humidity (b), visibility (c) and hourly accumulated precipitation (d) observed by sUAS (red dots) at Baoshan Station during 25—28 March 2019

(Temperature and relative humidity measurements from AWS are minutely,

visibility and rainfall measurements are hourly, measurements of sUAS here represent

the lowest 3 m mean values of the profiles obtained during the ascending portions of flights)

14日开始,温度缓慢回升至降温前水平,大气湿度逐渐增加。虽然此次无人机探测试验频次较少,但仍反映了本次冷空气过程前后温度大幅降低后缓慢回升、湿度缓慢降低后快速回升的主要特征。

春季(2019年3月25—28日)开展的无人机试验,其探测资料与自动站资料的偏差比冬季略高,但对温度和相对湿度日变化的主要特征仍有较好的描述能力。基于图5的统计结果表明,无人机探测的地面气温与自动站资料平均偏差为 0.9°C ,相对湿度与自动站资料的平均偏差为 -5.9% 。无人机探测资料反映的温度和相对湿度日变化特征与自动站资料基本一致。

进一步分析发现,2019年春季试验期间,无人机探测资料与自动站资料偏差较大的时段主要出现在中午一下午时段(11—17时)。早晨无人机试验探测的地面气温和相对湿度与自动站基本吻合(如图5),但中午一下午时段,无人机试验探测资料比自动站略偏暖偏干。这可能是由于中午一下午时段地表温度高,相对湿度低,导致地面至3 m范围内的气象要素平均值与1.5 m高度处的气象要素值(自动站观测资料)偏差较大。

上述对地面气象要素观测资料的评估结果表

明,无人机气象探测系统对地面气象要素的观测能力与自动站资料接近,仪器本身的测量误差较小。下文将进一步分析无人机气象探测系统对近地边界层各高度温度和湿度的探测能力。

2.2 近地边界层廓线探测精度评估

为了分析无人机探测近地边界层的能力,下文主要采用与探空同步观测的9组无人机试验资料(表2)及其对应的探空数据进行对比分析。

总体而言,无人机探测资料与探空资料没有明显的系统性偏差,温度偏差地面最大,相对湿度的偏差随高度变化较小,温度偏差的离散度随高度降低。与探空资料相比,各次无人机试验探测的近地边界层温度或相对湿度没有一致性偏高或偏低的现象(图6),以随机偏差为主,温度廓线的平均偏差为 $-0.75\sim 1.26^{\circ}\text{C}$,相对湿度廓线与探空的平均偏差为 $-12.87\%\sim 10.43\%$ 。从偏差的垂直分布看,大部分无人机试验获得的温度偏差地面最高,温度偏差的离散度也随高度减小,偏差标准差从地面的 1.16°C 减小到200 m高度的 0.35°C 。总体而言,相对湿度偏差随高度变化较小。

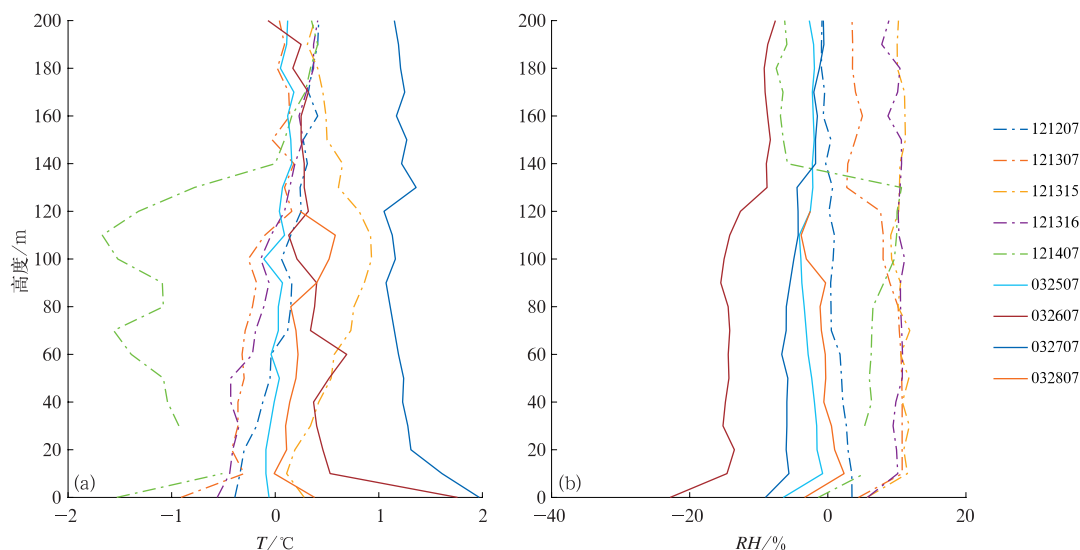


图6 无人机探测数据与探空资料(a)温度和(b)相对湿度的偏差

(图例中的数字表示无人机试验的时段,例如“121307”表示2018年12月13日07时,
“032507”表示2019年3月25日07时)

Fig. 6 Differences of (a) temperature and (b) relative humidity measured by sUAS and radiosonde

(The numbers in the legend indicate the time performing sUAS flights, for instance,

“121307” means 07:00 BT 13 December 2018, and “032507” means 07:00 BT 25 March 2019)

进一步分析发现,除了仪器本身的测量误差外,两套资料的偏差很大部分来自气象要素本身的变化。以偏差最大的两次试验为例(2019 年 3 月 26 日 07 时和 27 日 07 时),无人机探测的地面气温均比探空资料偏高 1.5°C 以上。但上述两次试验的地面气温与对应时刻自动站资料的偏差远低于 1.5°C (图 5a),说明无人机气象探测仪器的测量误差较小。考虑到上述两次试验与同时段探空气球的施放时间间隔较长(20 min 以上,如表 2),且上述试验时段内地面气温升温幅度明显大于其他试验时段,导致无人机探测时刻的地面气温明显高于探空气球施放时刻。对比图 6a 和 6b 发现,无人机探测温度比探空资料高(低)的个例,相对湿度比探空资料低(高),即温度偏差与湿度偏差存在一定的相关性,进一步说明无人机探测资料与探空的偏差主要由大气温、湿度变化导致。另一方面,业务探空最低层(0 m)资料实际由 1.5 m 地面观测资料代替,无人机最低层为实际探测的地表(0 m)资料,而地表气象要素与 1.5 m 高度的气象要素本身存在差异,这可能会影响两套探测资料在最低层的偏差。可

见,无人机与探空的偏差,除了来自仪器测量误差外,很大部分与气温本身的变化密切相关。

上述分析表明,无人机探测的近地边界层内各高度的温、湿度资料与探空没有系统性偏差,两者偏差很大部分与气象要素本身的变化有关。下文重点分析无人机探测近地边界层温、湿垂直结构的能力。

2.3 近地边界层廓线探测能力分析

为分析无人机探测近地边界层结构的能力,选取冬季和春季的典型天气过程,分析无人机探测大气温湿度廓线结构的能力。

结果表明,无人机气象探测系统对贴地逆温等冬季近地边界层典型结构特征有较好的探测能力(图 7)。从温度廓线分析,12 月 12—14 日的 07 时均出现贴地逆温,无人机试验能够探测到这一现象,且无人机探测到的逆温层厚度均与探空资料接近。12 月 13 日下午,湍流活动比早晨强,探空资料显示 60 m 以下温度垂直变化率小,无人机探测资料也较好地反映了这一现象。从湿度廓线分析(图 8),除 12 月 14 日 07 时外,无人机探测的湿度垂直结构特

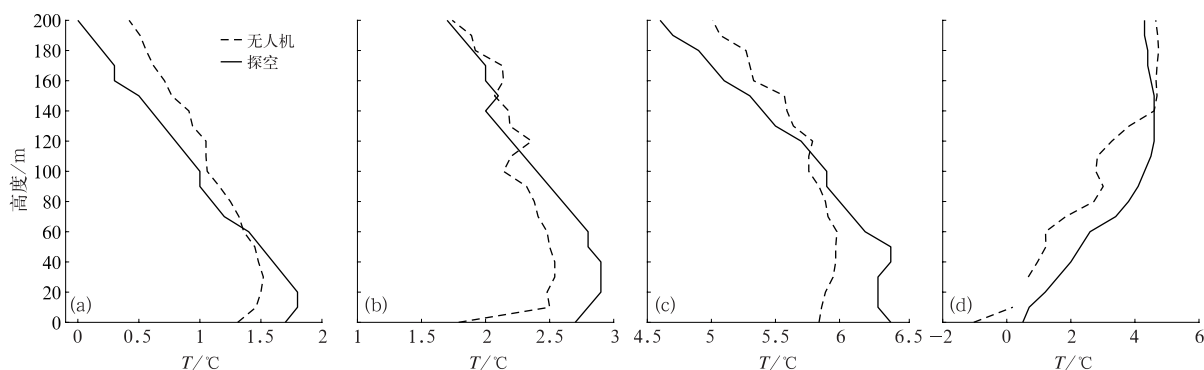


图 7 2018 年 12 月(a)12 日 07:15,(b)13 日 07:17,(c)13 日 16:09,(d)14 日 07:15 开展无人机探测试验获得的温度廓线与最近时刻探空的对比

Fig. 7 Comparison of temperature profiles (0–200 m) measured by sUAS and radiosonde at (a) 07:15 BT 12, (b) 07:17 BT 13, (c) 16:09 BT 13 and (d) 07:15 BT 14 December 2018

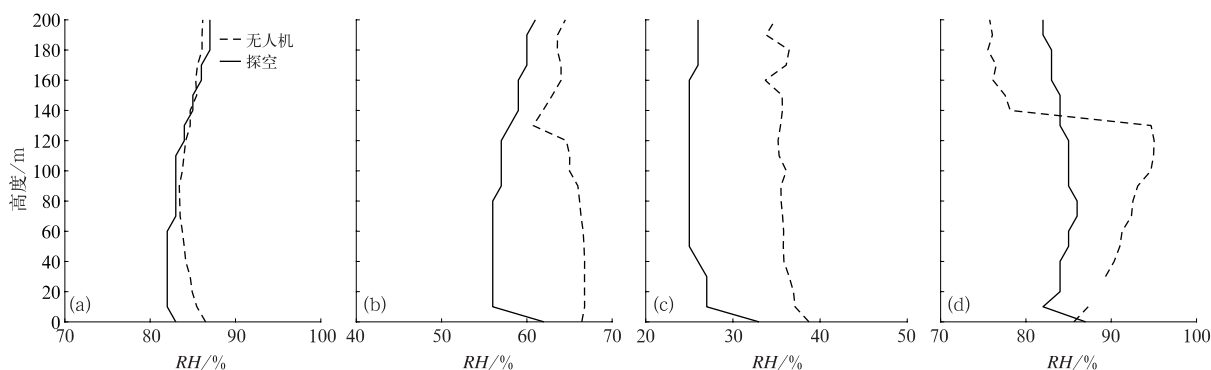


图 8 同图 7,但为相对湿度廓线

Fig. 8 Same as Fig. 7, but for relative humidity profiles

征与探空基本一致。

对于春季典型天气过程(大雾、降水),无人机试验资料反映的该类过程的近地边界层结构主要特征与探空基本一致,精细结构方面略有差异(图9,图10)。3月25日07时为降水天气,无人机探测的温度、相对湿度廓线准确地反映了对应的近地边界层精细结构特征,包括0~20 m的等温层,20 m以上的温度递减现象、整层大气(地面至200 m)饱和状态以及100 m高度的逆湿层等。3月26日07时为大雾天气,大气层结稳定,地面至10 m高度以及100 m以上高度均为逆温结构,整层大气(地面至200 m)呈现饱和状态,180 m以上湿度随高度递减;无人机探测的温、湿度结构与探空整体接近,但仍存在一些差异,例如无人机探测的温度高于探空,贴地逆温消失,整层大气(地面至200 m)已经变为不饱和状态。3月27日早晨(07时),两套资料的温度、湿度垂直结构整体比较接近,但与探空资料相比,无

人机探测的温度整体偏高,相对湿度整体偏低。

进一步分析发现,无人机探测温、湿廓线结构与探空存在差异,可能与试验时段内边界层结构的演变有关。3月26日,探空气球施放时大雾还未完全消散,无人机试验比探空晚20 min,当时大雾已经消散,两套探测资料描述的温、湿廓线结构差异可能反映了大雾过程中(探空)和过程后(无人机),大气温度、湿度层结的演变。3月27日07时,无人机探测试验比探空气球施放时间晚40 min,近地层温度升高,相对湿度降低,但垂直结构与探空基本一致,两者差异反映了试验时段内边界层结构的演变。

2018年12月14日07时,无人机虽然探测到地面至140 m范围内的贴地逆温结构,但温度廓线精细结构与探空差异较大,尤其是120 m高度附近,温度增加幅度比探空大,对应的大气湿度变化也比探空明显。上述差异的具体原因有待进一步研究。

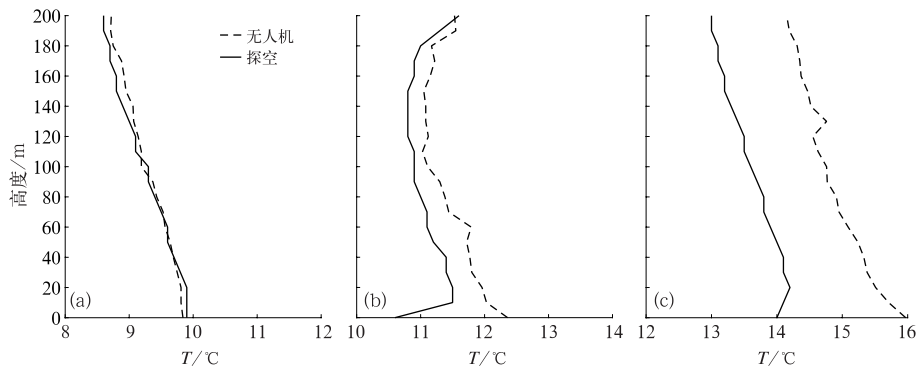


图9 2019年3月(a)25日07:26,(b)26日07:36,(c)27日07:54开展

无人机探测试验获得的温度廓线与最近时刻探空的对比

Fig. 9 Comparison of temperature profiles (0–200 m) measured by sUAS and radiosonde at (a) 07:26 BT 25, (b) 07:36 BT 26, and (c) 07:54 BT 27 March 2019

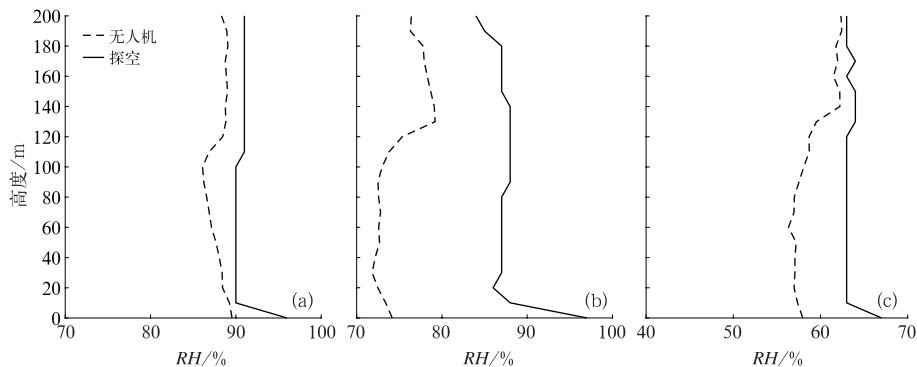


图10 同图9,但为相对湿度廓线

Fig. 10 Same as Fig. 9, but for relative humidity profiles

3 结论与讨论

利用垂直起降固定翼无人机搭载气象探测设备,在上海宝山气象站,针对2018年冬季冷空气、升温以及2019年春季大雾、降水等多种天气过程,连续开展无人机气象探测试验,获得有效观测数据19组,基于同站点、同时段的自动站资料以及探空数据,深入评估无人机探测资料的精度,以超大城市上海为例,探讨无人机在探测超大城市近地边界层方面的适用性。主要结论如下:

(1)无人机探测的地面气象要素(气温、相对湿度)值与自动站资料的偏差较小,能够较好地反映冬季和春季典型天气过程发生前后地面气温和湿度的变化特征。冬季试验期间,无人机探测的地面气温、相对湿度与自动站资料的平均偏差为 -0.5°C 和 4.9% ;春季试验期间,无人机探测的地面气温和湿度的平均偏差分别为 0.9°C 和 -5.9% 。

(2)无人机探测的温度廓线与探空的偏差为 $-0.75\sim 1.26^{\circ}\text{C}$,其中地面的偏差最大;相对湿度廓线与探空的偏差为 $-12.87\%\sim 10.43\%$,偏差随高度变化不明显。进一步分析发现,无人机探测数据与探空资料的偏差,与试验时段大气温、湿度本身的变化密切相关,仪器测量误差的贡献相对较小。

(3)无人机探测系统能够探测贴地逆温等冬季温、湿度垂直结构典型特征,对春季大雾过程的边界层结构及其演变特征也有很好的探测能力,但无人机探测的近地边界层精细结构与探空略有差异。考虑到无人机试验与探空气球施放之间有一定的时间间隔,两套资料描述的近地边界层结构的差异,可能正是对大气温、湿垂直结构时间演变特征的反映。

本文在超大城市地区开展的无人机试验,其探测资料的精度与NOAA近期在郊区开展的无人机试验(Lee et al, 2019)相当,上述结果表明,在城市地区开展无人机探测试验,能获得较高精度的近地边界层温度和相对湿度廓线,通过提高试验频次及组网观测,可获得近地层结构及其演变特征,进而提高对城市地区近地边界层及其演变过程的科学认识。另外,考虑到风是边界层内最重要的气象要素之一,为进一步提升无人机探测系统的应用能力,在本文的初步试验结果基础上,后续开展试验时,拟增加测风传感器,并从传感器参数、无人机性能、传感器安装位置及方式等多个角度进行测试,深入探讨

提高无人机探测系统稳定性及探测资料精度的方法。

致谢:感谢上海市宝山区气象局吴峻石、张燕燕,湖北飞行器研究所黄飞、周子鸣、刘青、黄晓龙、邬华明、李盛、张达、张华君、李康伟以及上海市生态气象和卫星遥感中心顾问在无人机气象探测系统研制、探测试验实施、资料下载等方面的重要贡献和技术支持。

参考文献

- 郭良辰,付丹红,王咏薇,等,2019.北京城市化对一次降雪过程影响的数值模拟研究[J].气象学报,77(5):835-848. Guo L C, Fu D H, Wang Y W, et al, 2019. A numerical study of urbanization impacts on a snowfall event in Beijing area[J]. Acta Meteor Sin, 77(5):835-848(in Chinese).
- 李杨,马舒庆,王国荣,等,2009.利用无人机探测台风海鸥的气象要素特征[J].应用气象学报,20(5):579-585. Li Y, Ma S Q, Wang G R, et al, 2009. Characteristics of meteorological elements during Typhoon Kalmaegi observed by unmanned aerial vehicle[J]. J Appl Meteor Sci, 20(5):579-585(in Chinese).
- 刘伟东,张本志,尤焕苓,等,2014.1978—2008年城市化对北京地区气温变化影响的初步分析[J].气象,40(1):94-100. Liu W D, Zhang B Z, You H L, et al, 2014. Preliminary analysis of urbanization effects on temperature change in Beijing during 1978—2008[J]. Meteor Mon, 40(1):94-100(in Chinese).
- 马舒庆,汪政,潘毅,1997.微型无人驾驶飞机探空初步试验研究[J].南京气象学院学报,20(2):171-177. Ma S Q, Wang G, Pan Y, 1997. Experiments on robot craft sounding[J]. J Nanjing Inst Meteor, 20(2):171-177(in Chinese).
- 苗世光,蒋维楣,梁萍,等,2020.城市气象研究进展[J].气象学报,78(3):477-499. Miao S G, Jiang W M, Liang P, et al, 2020. Advances in urban meteorology in China[J]. Acta Meteor Sin, 78(3):477-499(in Chinese).
- 舒松,余柏菡,吴健平,等,2011.基于夜间灯光数据的城市建成区提取方法评价与应用[J].遥感技术与应用,26(2):169-176. Shu S, Yu B L, Wu J P, et al, 2011. Methods for deriving urban built-up area using night-light data: assessment and application[J]. Rem Sen Techno Appl, 26(2):169-176(in Chinese).
- 王宏斌,吴泓,李永,等,2020.旋翼无人机盐城试验观测资料分析及其在一次浓雾天气观测中的应用[J].气象,46(1):89-97. Wang H B, Wu H, Li Y, et al, 2020. Validation of rotorcraft UAV boundary layer meteorological observation data and its application in a heavy fog event in Yancheng[J]. Meteor Mon, 46(1):89-97(in Chinese).
- 徐伟,张蕾,漆梁波,等,2019.地面风对上海城市热岛影响的观测分析[J].气象,45(9):1262-1277. Xu W, Zhang L, Qi L B, et al, 2019. Observation analysis of the influence of surface wind on urban heat island in Shanghai[J]. Meteor Mon, 45(9):1262-1277(in Chinese).
- 岳彩军,唐玉琪,顾问,等,2019.城市阻碍效应对局地台风降水的影响[J].气象,45(11):1611-1620. Yue C J, Tang Y Q, Gu W, et

- al, 2019. Study of urban barrier effect on local typhoon precipitation[J]. *Meteor Mon*, 45(11): 1611-1620 (in Chinese).
- 张璐, 杨修群, 汤剑平, 等, 2011. 夏季长三角城市群热岛效应及其对大气边界层结构影响的数值模拟[J]. *气象科学*, 31(4): 431-440. Zhang L, Yang X Q, Tang J P, et al, 2011. Simulation of urban heat island effect and its impact on atmospheric boundary layer structure over Yangtze River Delta region in summer[J]. *J Meteor Sci*, 31(4): 431-440 (in Chinese).
- 张赞程, 王晓峰, 张蕾, 等, 2017. 海风与热岛耦合对上海强对流天气影响的数值模拟[J]. *高原气象*, 36(3): 705-717. Zhang Y C, Wang X F, Zhang L, et al, 2017. Numerical simulation of the impacts of the sea-breeze and the urban heat island on the severe convective event in Shanghai[J]. *Plateau Meteor*, 36(3): 705-717 (in Chinese).
- 郑祚芳, 任国玉, 2018. 北京地区大气湿度变化及城市化影响分析[J]. *气象*, 44(11): 1471-1478. Zheng Z F, Ren G Y, 2018. Analysis on atmospheric humidity change and its response to urbanization in Beijing Area[J]. *Meteor Mon*, 44(11): 1471-1478 (in Chinese).
- 朱丽, 苗峻峰, 高阳华, 2020. 重庆城市热岛环流结构和湍流特征的数值模拟[J]. *大气科学*, 44(3): 657-678. Zhu L, Miao J F, Gao Y H, 2020. A numerical simulation of urban breeze circulation structure and turbulence in Chongqing[J]. *Chin J Atmos Sci*, 44(3): 657-678 (in Chinese).
- Alaoui-Sosse S, Durand P, Medina P, et al, 2019. OVLI-TA: an unmanned aerial system for measuring profiles and turbulence in the atmospheric boundary layer[J]. *Sensors*, 19(3): 581.
- Barbieri L, Kral S T, Bailey S C C, et al, 2019. Intercomparison of small unmanned aircraft system (SUAS) measurements for atmospheric science during the lapse-rate campaign[J]. *Sensors*, 19(9): 2179.
- Fu X S, Yang X Q, Sun X G, 2019. Spatial and diurnal variations of summer hourly rainfall over three super city clusters in eastern china and their possible link to the urbanization[J]. *J Geophys Res*, 124(10): 5445-5462.
- Greene B R, Segales A R, Bell T M, et al, 2019. Environmental and sensor integration influences on temperature measurements by rotary-wing unmanned aircraft systems[J]. *Sensors*, 19(6): 1470.
- Grimmond C S B, Oke T R, 1999. Aerodynamic properties of urban areas derived from analysis of surface form[J]. *J Appl Meteor*, 38(9): 1262-1292.
- Huang W J, Li J, Guo Q Y, et al, 2017. A satellite-derived climatological analysis of urban heat island over Shanghai during 2000-2013[J]. *Remote Sens*, 9(7): 641.
- Imhoff M L, Lawrence W T, Elvidge C D, et al, 1997a. Using nighttime DMSP/OLS images of city lights to estimate the impact of urban land use on soil resources in the United States[J]. *Remote Sens Environ*, 59(1): 105-117.
- Imhoff M L, Lawrence W T, Stutzer D C, et al, 1997b. A technique for using composite DMSP/OLS "City Lights" satellite data to map urban area[J]. *Remote Sens Environ*, 61(3): 361-370.
- Islam A, Houston A L, Shankar A, et al, 2019. Design and evaluation of sensor housing for boundary layer profiling using multirotors[J]. *Sensors*, 19(11): 2481.
- Jacob J D, Chilson P B, Houston A L, et al, 2018. Considerations for atmospheric measurements with small unmanned aircraft systems[J]. *Atmosphere*, 9(7): 252.
- Koch S E, Fengler M, Chilson P B, et al, 2018. On the use of unmanned aircraft for sampling mesoscale phenomena in the pre-convective boundary layer[J]. *J Atmos Oceanic Technol*, 35(11): 2265-2288.
- Kotthaus S, Grimmond C S B, 2014a. Energy exchange in a dense urban environment—part I: temporal variability of long-term observations in central London[J]. *Urban Climate*, 10: 261-280.
- Kotthaus S, Grimmond C S B, 2014b. Energy exchange in a dense urban environment—part II: impact of spatial heterogeneity of the surface[J]. *Urban Climate*, 10: 281-307.
- Kral S T, Reuder J, Vihma T, et al, 2018. Innovative strategies for observations in the arctic atmospheric boundary layer (isobar)—the Hailuoto 2017 Campaign[J]. *Atmosphere*, 9(7): 268.
- Lee T R, Buban M, Dumas E, et al, 2019. On the use of rotary-wing aircraft to sample near-surface thermodynamic fields: results from recent field campaigns[J]. *Sensors*, 19(1): 10.
- Li D, Liao W L, Rigden A J, et al, 2019. Urban heat island: aerodynamics or imperviousness? [J]. *Sci Adv*, 5(4): eaau4299.
- Li Z Q, Song L L, Ma H, et al, 2018. Observed surface wind speed declining induced by urbanization in East China[J]. *Climate Dyn*, 50(3-4): 735-749.
- Liang P, Ding Y H, 2017. The long-term variation of extreme heavy precipitation and its link to urbanization effects in Shanghai during 1916–2014[J]. *Adv Atmos Sci*, 34(3): 321-334.
- Martin S, Bange J, Beyrich F, 2011. Meteorological profiling of the lower troposphere using the research UAV "M²AV Carolo" [J]. *Atmos Meas Tech*, 4(4): 705-716.
- Rautenberg A, Graf M S, Wildmann N, et al, 2018. Reviewing wind measurement approaches for fixed-wing unmanned aircraft[J]. *Atmosphere*, 9(11): 422.
- Wang J, Yan Z W, 2016. Urbanization-related warming in local temperature records: a review[J]. *Atmos Oceanic Sci Lett*, 9(2): 129-138.
- Wang J, Yan Z W, Quan X W, et al, 2017. Urban warming in the 2013 summer heat wave in eastern China[J]. *Climate Dyn*, 48(9): 3015-3033.
- Witte B M, Singler R F, Bailey S C C, 2017. Development of an unmanned aerial vehicle for the measurement of turbulence in the atmospheric boundary layer[J]. *Atmosphere*, 8(10): 195.
- Zhou S D, Peng S L, Wang M, et al, 2018. The characteristics and contributing factors of air pollution in Nanjing: a case study based on an unmanned aerial vehicle experiment and multiple datasets[J]. *Atmosphere*, 9(9): 343.