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).

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*

王宏斌[1,2] 吴 泓[1,2] 李 永[3] 徐家平[1,2] 祖 繁[1,2] 张志薇[4]

1 中国气象局交通气象重点开放实验室,南京 210009
2 江苏省气象科学研究所,南京 210009
3 南京市气象局,南京 210019
4 江苏省气象服务中心,南京 210008

提 要: 2018年3月28—30日、6月20—26日和9月5—13日在江苏省盐城市射阳站开展了旋翼无人机大气边界层垂直结构观测试验,并与L波段雷达探空资料进行对比,验证无人机观测资料精度。结果表明无人机观测的温度、相对湿度、风向、风速廓线与探空观测资料具有较好的一致性。二者温度、相对湿度的相关系数均为0.98,温度绝对偏差为0.57℃,相对湿度绝对偏差为4.25%,风向相关系数为0.98,绝对偏差为11.5°,二者风速的相关系数为0.91,绝对偏差为1.88 m·s^{-1},且无人机探测的风速为对应高度上的瞬时风速,可以更好地反映出边界层内风速细节变化特征。试验期间,无人机观测到一次夏季浓雾过程边界层结构细致变化特征,其观测的雾的边界层结构特征和宏观特征与探空观测基本一致。验证结果表明无人机在边界层气象观测中具有很好的应用前景。

关键词: 无人机,边界层观测,L波段雷达探空,验证
中图分类号: P412 **文献标志码:** A **DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2020.01.009

Validation of Rotorcraft UAV Boundary Layer Meteorological Observation Data and Its Application in a Heavy Fog Event in Yancheng

WANG Hongbin[1,2] WU Hong[1,2] LI Yong[3] XU Jiaping[1,2] ZU Fan[1,2] ZHANG Zhiwei[4]

1 Key Laboratory of Transportation Meteorology of CMA, Nanjing 210009
2 Jiangsu Institute of Meteorological Sciences, Nanjing 210009
3 Nanjing Meteorological Bureau, Nanjing 210019
4 Jiangsu Meteorological Service Center, Nanjing 210008

Abstract: Three experiments of boundary-layer meteorological profiles observed by rotorcraft unmanned aerial vehicle (UAV) were carried out in spring (28−30 March), summer (20−26 June) and autumn (5−13 September) 2018 respectively in Sheyang Station of Yancheng, Jiangsu Province, and compared with L-band radar sounding data to verify the accuracy of UAV observation data. The results show that the observation data of temperature, relative humidity, wind direction and wind speed vertical profile measured by UAV are in good agreement with the observation data of the L-band radar sounding data. The correlation

* 江苏省自然科学青年基金项目(BK20161073)、江苏省重点研发计划(社会发展)(SBE2016710052)、中国气象科学研究院基本科研业务费专项(2019Z007)和江苏省第五期"333工程"科研项目(BRA2018420)共同资助
2018年11月6日收稿; 2019年2月20日收修定稿
第一作者:王宏斌,主要从事大气环境和遥感观测研究. Email:kaihren@163.com
通讯作者:吴泓,主要从事大气探测应用研究. Email:wu58238@163.com

coefficients of temperature (T), relative humidity (RH), wind direction (WD) and wind speed (WS) of UAV and L-band radar sounding are 0.98, 0.98, 0.98 and 0.91, respectively. The absolute deviations of T, RH, WD and WS are 0.57℃, 4.25%, 11.5° and 1.88 m·s^{-1} respectively. Since UAV measures the instantaneous wind speed at corresponding height, it can better reflect the subtle variation of wind speed characteristics in boundary layer. The summer UAV experiment recorded detailed changes of boundary layer structure during a heavy fog process. The boundary-layer structure and fog macro-characteristics observed by the UAV during this process were similar as that of L-band radar. The results show that UAV has a promising prospect in the application of boundary layer meteorological observation.

Key words: unmanned aerial vehicle (UAV), boundary layer observation, L-band radar sounding, validation

引 言

大气垂直观测是综合气象观测的重要组成部分,特别是大气边界层的垂直观测,不仅是数值预报模式、地气交换等理论研究的数据基础,还在生态文明建设、大气污染防治、城市规划等实际应用上具有重要的参考价值(叶笃正, 1977; 胡非等, 2003)。目前,L波段雷达探空系统(周毓荃和欧建军, 2010; 郭启云等, 2018; 余君等, 2016; 刘超等, 2017; 张思齐等, 2018)、系留气球(李子华等, 1999; 卞林根等, 2002; 奥银焕等, 2005; 陆春松等, 2010),以及风廓线雷达、微波辐射计等新型遥感仪器(黄治勇等, 2014; 郭丽君和郭学良, 2015; 韩珏靖等, 2015; 杨晓亮等, 2018; 刘梦娟和刘舜, 2016)是边界层垂直观测的常用手段。Guo et al (2016)利用全国120个探空站秒级探空资料和再分析资料对中国地区2011—2015年的大气边界层高度气候特征进行了综合分析。郭启云等(2018)开展了气球携带探空仪上升和降落伞携带探空仪下降的全程探空试验,并对观测数据精度进行了验证分析。

利用无人机进行大气边界层的垂直观测具有独特的优势。近年来,基于旋翼无人机平台的大气边界层廓线观测开始发展,并具有多方面优势(Saggiani and Teodorani, 2004; Cassano, 2014; 沈怀荣等, 2006; 沈怀荣, 2010; 史静等, 2018)。与传统探空气球、系留气艇等观测方式相比,旋翼无人机的廓线观测具有准垂直观测、升速稳定、可悬停、可高频次观测等特点(马舒庆等, 2005)。与商用飞机气象观测比,在垂直方向上旋翼无人机具有恒定低速的特点,各环境要素的观测不受商用飞机高移速的影响,并且数据集在对比过程中可以不受航线的时空差异、区域分布不均的影响(陈洪滨和郑国光, 2005)。与卫星遥感产品相比,旋翼无人机则有更高的时空分辨率、并且接触式的探测方式能避免所探测的物理量不受云层、污染物等大气干扰(Colomina and Molina, 2014)。与气象铁塔、地基廓线产品相比,则具有观测地点机动性强,贴地层数据受下垫面环境干扰小的优点。因此,开展基于旋翼无人机的气象观测研究可为边界层气象研究提供具有高时空解析能力的新手段,有助于对低层大气物理过程研究的深入理解。

本文利用自主研发的无人机边界层气象综合探测系统于2018年3、6和9月在江苏省盐城市5个气象站点开展试验,并与射阳站(58150)L波段雷达探空资料进行对比分析,验证了无人机观测误差及其应用前景。

1 无人机边界层探测系统及组网观测试验

1.1 无人机边界层气象综合探测系统

自主研发集成的无人机边界层气象综合探测系统可进行从地表到1500 m高度内温度、湿度和风的廓线和它们的短期变化的测量,主要包括气象传感器、无人机平台和地面站等部分。实现了无人机状态数据与气象环境数据的统一输出,每秒进行一次测量,垂直上升速度通常在150～200 m·min^{-1},保证了2.5～3 m的垂直分辨率,以获得更详尽的廓线数据。其中传感器集成了温、湿、压、风向、风速五要素,参考世界气象组织关于边界层气象观测的要求,气压、温度、湿度传感器设计上沿用探空观测体制,传感器兼具高灵敏度和准确度,风向、风速采用压力式固态传感器,可实现1～10 Hz采样速率的瞬时风向、风速测量。结构布局充分考虑旋翼扰流

的影响,传感器架设在机臂高度以上 60 cm 处,使用三根支柱的结构以保证支撑稳定,避免产生共振。表 1 为无人机边界层气象综合探测系统传感器参数。

表 1　无人机边界层气象综合探测系统传感器参数

Table 1　Sensor parameters of UAV boundary layer meteorological comprehensive observation system

要素	工作范围	分辨率
气压/hPa	1050～500	0.1
温度/℃	−40～40	0.1
湿度/%	10～100	1
风速/(m·s^{-1})	0.5～60	0.1
风向/(°)	0～360	1

1.2　无人机组网观测试验

利用无人机分别于 2018 年 3 月 28—30 日、6 月 20—26 日、9 月 5—13 日在江苏省盐城市射阳站(58150)开展了与 L 波段雷达探空的对比观测试验,同时 6 月 22—26 日、9 月 5—13 日在盐城市滨海站(58049)、阜宁站(58143)、建湖站(58146)、大丰站(58158)和射阳站(58150)开展无人机组网观测试验,每日 07:30、10:30、13:30、16:30 和 19:30 在 5 个站点 5 台无人机同时开始观测,获得同时次 5 个站点的温度(T)、湿度(RH)、气压(p)、风向(WD)和风速(WS)的 0～1500 m 廓线(在观测试验前已申请到空域,但部分时次因临时空域管制原因只有 4 个或 3 个站点同时观测),部分日期在 22:30 也开展了观测。无人机采用设定观测模式自动观测的方式,观测时上升速度设定为 3 m·s^{-1},下降速度为 2 m·s^{-1},飞机上升和下降过程中水平无位移,传感器数据采集时间间隔为 1 s。图 1 为无人机组网观测站点地理位置分布。表 2 中列出了无人机观测站点地理信息、观测时段及无人机飞行参数。

1.3　L 波段雷达秒级探空

射阳站为全国 120 个 L 波段雷达探空站之一,选择无人机观测时间同时次的L波段雷达秒级探空资料作为无人机观测数据对比的真值,对无人机垂直观测数据精度进行验证。L 波段雷达探空观测放球开始时间一般为每日 07:15 和 19:15,选择 07:30 和 19:30 时次的无人机观测数据进行对比验证。L 波段雷达探空数据采集间隔为 1 s,垂直分辨率为 5～8 m。

表 2　无人机观测站点信息和时段及无人机飞行参数

Table 2　The information of UAV observation stations and flying parameters

站点	站号	纬度/°N	经度/°E	海拔高度/m	观测时段	垂直速度/(m·s^{-1})		时间分辨率/s
						上升	下降	
射阳	58150	33.767	120.250	1.8	3 月 28—30 日 6 月 20—26 日 9 月 5—13 日	3	2	1
滨海	58049	34.033	119.817	4.1	6 月 22—26 日 9 月 5—13 日	3	2	1
阜宁	58143	33.800	119.850	4.8	6 月 22—26 日 9 月 5—13 日	3	2	1
建湖	58146	33.483	119.800	2.7	6 月 22—26 日 9 月 5—13 日	3	2	1
大丰	58158	33.200	120.483	3.1	6 月 22—26 日 9 月 5—13 日	3	2	1

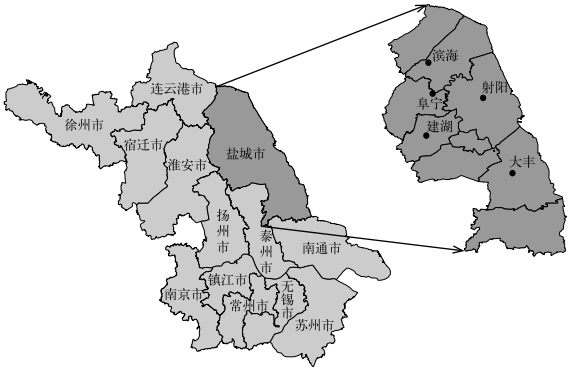


图 1　无人机组网观测站点地理位置分布

Fig. 1　Location distribution of UAV observation stations

2　无人机观测数据精度验证

为方便无人机观测数据与探空数据的对比,将两种数据的垂直分辨率重采样为 6 m,共有 24 个同时观测的廓线进行对比。图 2 为射阳站无人机观测

的温度(T_{UAV})、相对湿度(RH_{UAV})、风向(WD_{UAV})、风速(WS_{UAV})与L波段雷达探空温度(T_R)、相对湿度(RH_R)、风向(WD_R)、风速(WS_R)对比,表3列出了无人机观测与L波段雷达探空观测的温度、相对湿度、风向、风速相关系数,偏差平均值和中值,绝对偏差,均方根误差,偏差第25%、75%、5%、95%分位数。由图可见,温度、相对湿度、风向数据集中在1∶1线(图中灰色实线)上和两侧,拟合直线(红色实线)与1∶1线接近重合。

无人机和探空观测温度的相关系数为0.98,二者温度偏差的平均值、中值、绝对偏差和均方根误差分别为0.25、0.05、0.57和0.76℃,偏差第25%、75%、5%和95%分位数分别为−0.27,0.43、−0.68和2.46℃,表明无人机温度的观测与探空观测值一致性较好。

无人机和探空观测相对湿度的相关系数为0.98,二者相对湿度偏差平均值、中值、绝对偏差和均方根误差分别为−0.08%、−0.98%、4.25%和5.53%,偏差的25%、75%、5%和95%分位数分别为−3.52%、3.42%、−7.82%和8.46%,表明无人机相对湿度的观测与探空观测值一致性较好。

无人机和探空观测风向的相关系数为0.98,二者风向偏差平均值、中值、绝对偏差和均方根误差分别为0.1°、1.0°、11.5°、15.5°,偏差的25%、75%、5%和95%分位数分别为−10.0°、8.0°、−24.0°和23.0°。以气象上常用的16方位风向计算,二者风向落在同一方向上的比例占80.2%。风向对比图中左上角和右下角的点是由于风向由360°转0°(或0°转360°)数值变化导致的,风向差并不大,在计算相关系数等参数时,对二者之差绝对值大于180°的情况,进行订正后再计算。

从二者风速的对比图可以看到,无人机观测的风速较探空气球观测的风速存在系统性偏大(偏大1.8 m·s^{-1}左右),二者的相关系数为0.91,偏差平均值、中值、绝对偏差和均方根误差分别为1.83、1.80、1.88和2.18 m·s^{-1},偏差的25%、75%、5%和95%分位数分别为1.10、2.50、0.10和4.00 m·s^{-1}。这一系统性的偏差除无人机观测风速误差以外,还有二者的观测方式不同导致的偏差。无人机采用测风传感器直接测量当前时刻风速,而根据中国气象局监测网络司(2005)有关业务规范,L波段雷达探空的风向、风速是利用当前时刻和1 min前的探空气球水平位置的移动计算,即虽是秒级数据,但其实是当前时刻前1 min内的平均风速和风向。这一计算方法会使得探空不容易观测到低空急流等特征或观测到的最大风速及出现高度等信息存在偏差。如从射阳站2018年6月24日19:41无人机观测数据与19:15探空观测数据对比图(图3)上可以看到,无人机在400 m高度上观测到风速为13.8 m·s^{-1}的低空急流,而探空数据0～1500 m的最大风速仅为8 m·s^{-1},且276～615 m风速均为8 m·s^{-1},可见探空的风速计算方式导致了极大风速的失真。对比无人机观测和探空观测的这一时次温度、相对湿度、风向的垂直分布,可以看到这3个要素二者均具有较好的一致性。

图4为无人机与探空观测的每层的温度、相对湿度、风向、风速的偏差平均值和均方根误差。对比上升和下降阶段每一层的无人机与探空观测数据,可以看到温度、相对湿度、风向在不同高度上二者的偏差平均值均在0值附近,均方根误差也较小,表明一致性均较好。对风速,可以看到在每一层上也都表现为偏大,偏差随高度表现为先增大后减小的趋势,上升阶段和下降阶段风速偏差平均值最大值均出现在60 m高度上,分别为3.4和3.6 m·s^{-1}。

综上所述,无人机观测的温度、相对湿度、风向和风速廓线与探空观测具有较好的一致性,数据准确度满足使用要求。

表3 无人机观测与L波段雷达探空观测的温度、相对湿度、风向、风速对比统计参数

Table 3 Statistics of comparison parameters of temperature, relative humidity, wind direction and speed of UAV and L-band radar sounding

观测要素	相关系数	偏差平均值	偏差中值	绝对偏差	均方根误差	25%分位数	75%分位数	5%分位数	95%分位数
$T_{UAV}-T_R$/℃	0.98	0.25	0.05	0.57	0.76	−0.27	0.43	−0.68	2.46
$RH_{UAV}-RH_R$/%	0.98	−0.08	−0.98	4.25	5.53	−3.52	3.42	−7.82	8.46
$WD_{UAV}-WD_R$/(°)	0.98	0.1	1.0	11.5	15.5	−10.0	8.0	−24.0	23.0
$WS_{UAV}-WS_R$/(m·s^{-1})	0.91	1.83	1.80	1.88	2.18	1.10	2.50	0.10	4.00

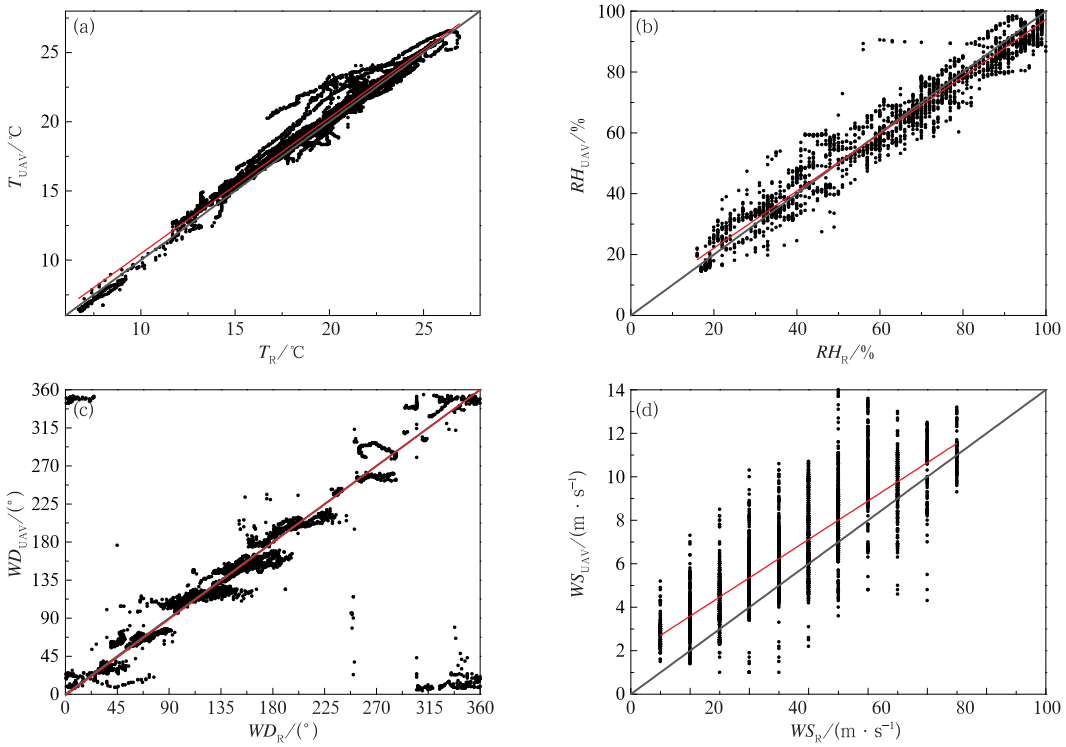


图 2　射阳站无人机观测数据与 L 波段雷达探空数据对比

(a)温度,(b)相对湿度,(c)风向,(d)风速

(红线为无人机和探空观测数据拟合直线)

Fig. 2　Comparison of temperature (a), relative humidity (b), wind direction (c) and speed (d) of UAV and L-band radar sounding

(Red line: the fitting line of UAV and sounding observation data)

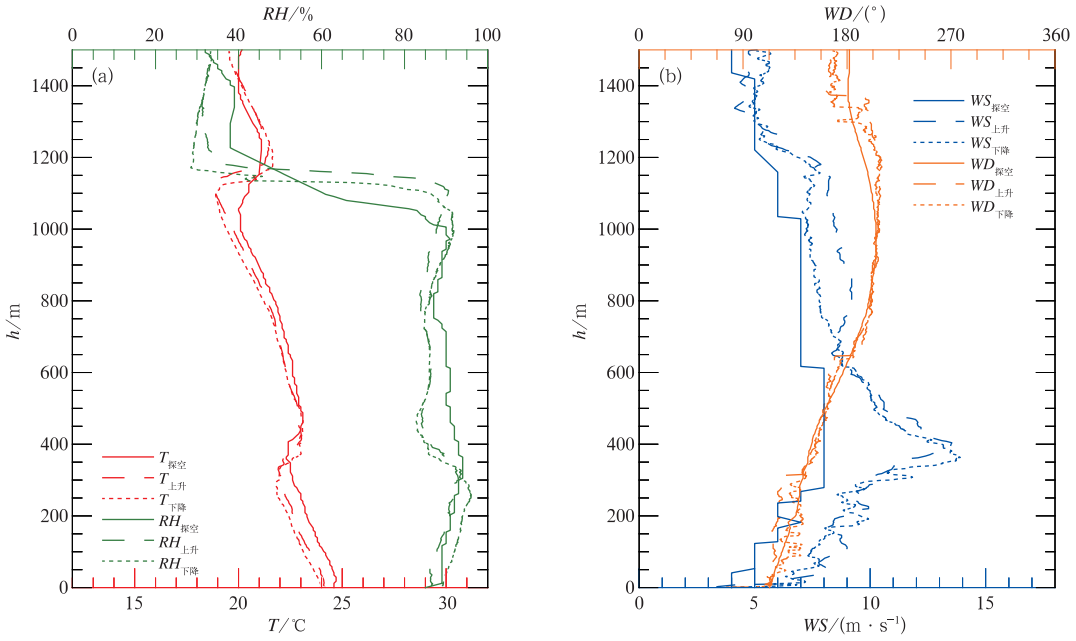


图 3　2018 年 6 月 24 日 19:41 射阳站无人机观测数据与探空数据对比

(a)温度和相对湿度,(b)风速和风向

Fig. 3　Comparison of observation data of UAV and L-band radar sounding at 19:41 BT 24 June 2018

(a) temperature and relative humidity, (b) wind speed and wind direction

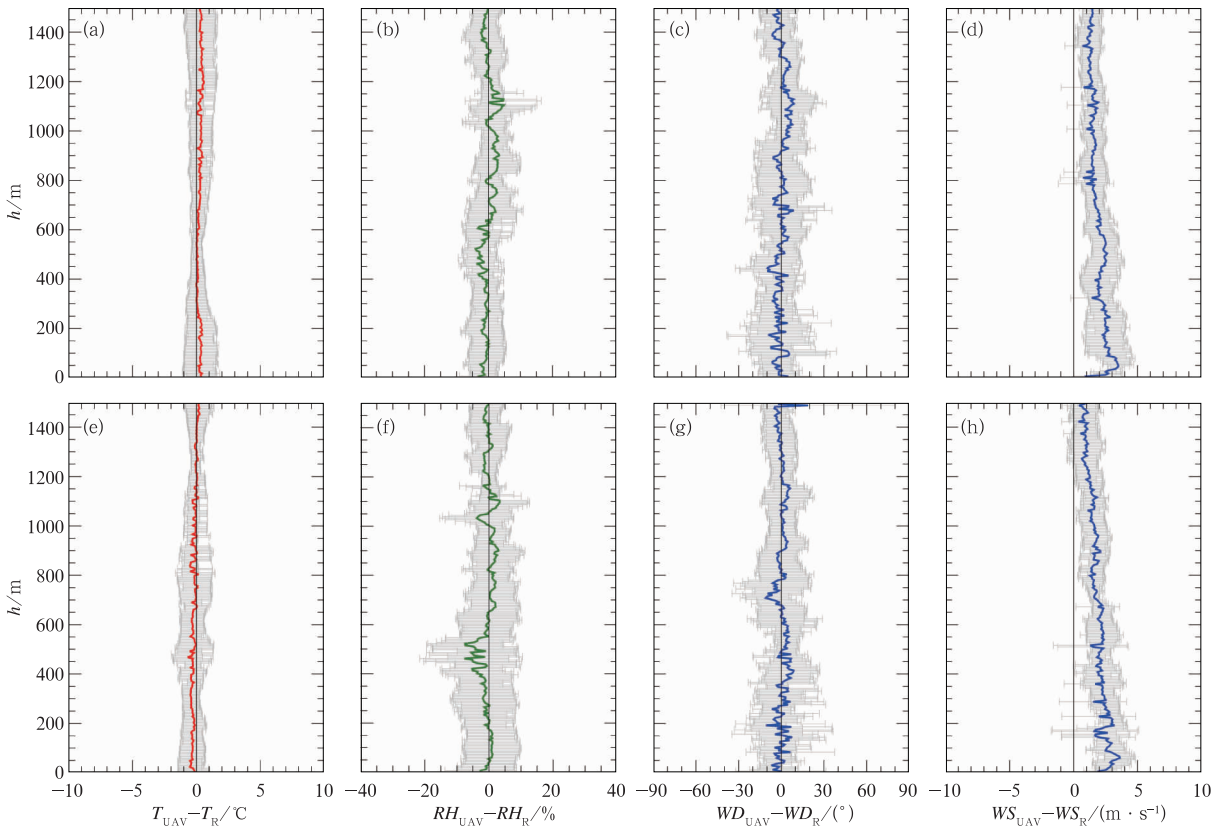


图 4 无人机上升阶段(a～d)和下降阶段(e～h)观测与 L 波段雷达探空观测的每层的温度(a,e)、相对湿度(b,f)、风向(c,g)、风速(d,h)偏差平均值(彩色线)和均方根误差(灰色阴影)

Fig. 4 The mean deviation (color lines) and root mean square error (gray shaded) of the T difference (a, e), RH difference (b, f), WD difference (c, g) and WS difference (d, h) of UAV in rise stage (a－d) and decline stage (e－h) and L-band radar sounding data

3 无人机探测浓雾过程

2018 年 6 月 21 日凌晨到早上江苏省盐城、淮安、宿迁、连云港、徐州等地发生浓雾,特别是盐城市射阳站和大丰站出现能见度低于 200 m 的强浓雾,射阳站、大丰站最低能见度(出现时刻)分别为113 m(05:55)、41 m(03:30,特强浓雾)。

图 5 为射阳站和大丰站 2018 年 6 月 20 日 20 时至 21 日 12 时能见度、温度、相对湿度、风向、风速时间变化。射阳站 21 日 01:15 能见度为 1292 m,5 min 后(01:20)降到 281 m,01:25 继续降到 143 m,能见度在短时间内快速降低,具有强浓雾爆发性增长的特性。到 07:40 能见度上升到 1050 m,大雾消散。01:15—07:40 期间,能见度有短时间上升到 1000 m 以上,大多数时间在 200 m 左右。大丰站 02:10 能见度为 998 m,5 min 后(02:15)降到 211 m,之后,02:20—07:05 均维持在 200 m 以下,07:50 上升到 1108 m,大雾消散。从夜间卫星云图和辐射资料可以看到(图略),20 日夜间江苏地区天空无云覆盖,晴空辐射条件良好,此次雾为辐射雾。

这次雾过程及其前后在射阳站共进行了 6 次无人机观测,雾发生前 6 月 20 日 19:23 进行了一次观测,6 月 21 日早上雾消散前后进行了 4 次观测(起飞时间 06:22、06:50、07:35、08:09),其中 06:22 和 08:09 的飞行高度为 1000 m,21 日午后进行了一次观测(13:21),图 6 为每次观测的温度、湿度、风向和风速廓线(选取上升段数据进行分析,由于传感器架设位置,上升阶段理论上受旋翼气流影响要小),其中 20 日 19:15 和 21 日 07:15 的 L 波段雷达探空廓线分别在图 6a 和 6d 中与无人机观测廓线对比显示,可见无人机观测的各要素廓线与探空观测基本一致。

由图 6a 可见,6 月 20 日 19:23 的无人机和探空观测均在 400 m 以下存在一个相对湿度在 85% 以上的高湿层,地面自动站、探空和无人机在地面的

相对湿度分别为 89%、86%和 91%,在相对湿度的观测误差内。温度整体上随高度上升逐渐减小,地面温度为 23.2℃,到 1500 m 降为 17.6℃。在 0～600 m 高度,风向为东南风,风速为 2～6 m·s^{-1},风速先增大后减小;600 m 以上,风向转为东北风,随高度风向逆转,存在冷平流,风速逐渐增大,到 1500 m 达 13.4 m·s^{-1},为低空急流。

21 日 06:22,此时能见度降到 192 m,为强浓雾,无人机观测的廓线上在 230 m 以下相对湿度达到 100%,为饱和层,即雾顶高度为 230 m。在 0～270 m 存在逆温层,温度由 19.5℃上升到22.3℃,逆温强度为 1.0℃·(100 m)$^{-1}$,逆温层的存在有助于雾的形成和维持,雾层也位于这一逆温层内。雾层内风速均小于 3 m·s^{-1},地面为静风;从雾顶到 600 m 高度,这一层相对湿度在 80%～90%,风向为偏北风,风速增大到 6～8 m·s^{-1};600～800 m 风向由偏北风转为偏东风,800～1000 m 风稳定为偏东风,风速由 1～2 m·s^{-1}再次增大到 6～8 m·s^{-1}。

半小时后,06:50,此时能见度为 176 m,由于太阳辐射加热作用,饱和层(雾顶高度)降低到150 m,同时 150～520 m 仍存在相对湿度较大(80%～90%)的一层,520 m 以上相对湿度迅速降到 40%以下。0～266 m 为逆温层,温度由20.6℃ 上升到22.6℃,逆温强度仍为 1.0℃·(100 m)$^{-1}$。风随高度的变化与 06:22 观测时相似。

45 min 后,07:35,能见度上升到 510 m,5 min 后能见度持续上升到 1000 m 以上,可见此时为大雾即将消散的临界时刻。无人机和探空观测的雾顶高度分别为 173 和 193 m,结果基本一致。此时由于太阳辐射作用继续加强,地表温度快速上升,从地面到 70 m 温度随高度减小,即逆温从地面开始消失。70～210 m 为一逆温层,温度由 20.8℃上升到22.4℃,逆温强度仍为 1.0℃·(100 m)$^{-1}$,可见逆温层底高度被抬升,逆温顶高度降低,逆温厚度减小。湿度减小到 100%以下,0～160 m 相对湿度在 90%以上,160～570 m 相对湿度在 80%～90%,570 m 以上相对湿度迅速下降到 40%以下。此时底层风普遍为 2～3 m·s^{-1},较 06:50 时(1～2 m·s^{-1})增大,在 200～600 m 转为偏北风增大到 6～7 m·s^{-1},在 800～1000 m 转为偏东风再次增大到 7～9 m·s^{-1}。

到 08:09,此时能见度为 3432 m,底层逆温层消失,0～300 m 为一等温层,温度在 22.7±0.2 ℃,300～540 m 温度随高度递减,540～600 m 高度上存在逆温层,之上到 1000 m 为等温层。湿度的大值区也集中在 540 m 之下,540 m 以上相对湿度迅速减小。可见,随着逆温层的减小直到消失,雾随之消散。

到午后 13:21,除在 750 m 高度上有一薄逆温层,其他高度温度均随高度递减;湿度在 750 m 以下在 40%以上,750 m 以上降低到 30%以下。

可见,无人机观测获取的雾的边界层结构特征和雾的宏观特征与探空观测基本一致,有助于对雾的生消机制的理解和认识。

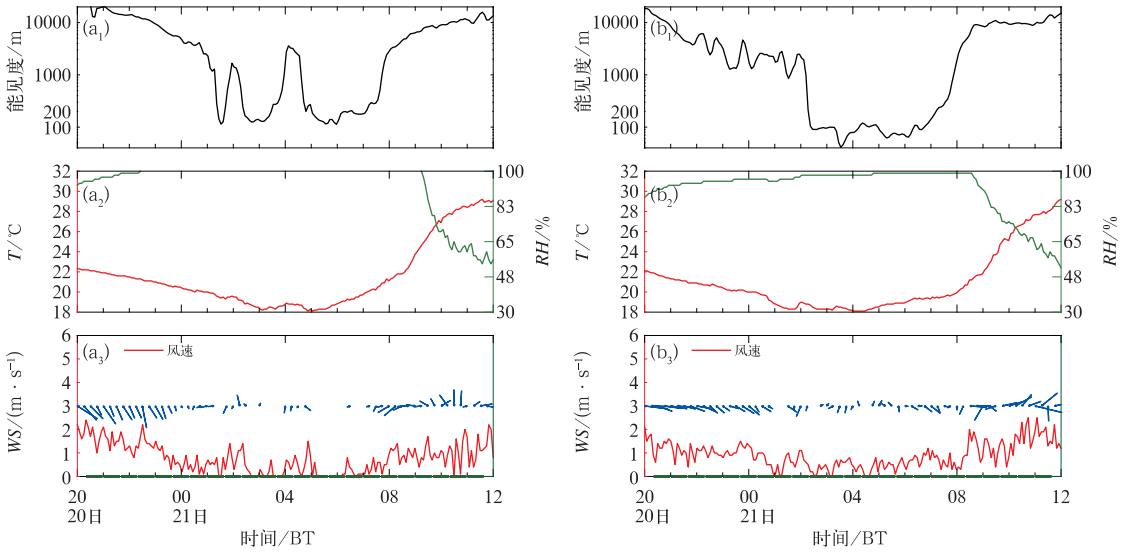


图 5　2018 年 6 月 20 日 20 时至 21 日 12 时射阳站(a)和大丰站(b)能见度(a_1,b_1)、温度和相对湿度(a_2,b_2)、风向和风速(a_3,b_3)时间变化

Fig. 5　Time series of (a_1, b_1) visibility, (a_2, b_2) temperature, relative humidity, (a_3, b_3) wind direction, wind speed at Sheyang Station (a) and Dafeng Station (b) from 20:00 BT 20 to 12:00 BT 21 June 2018

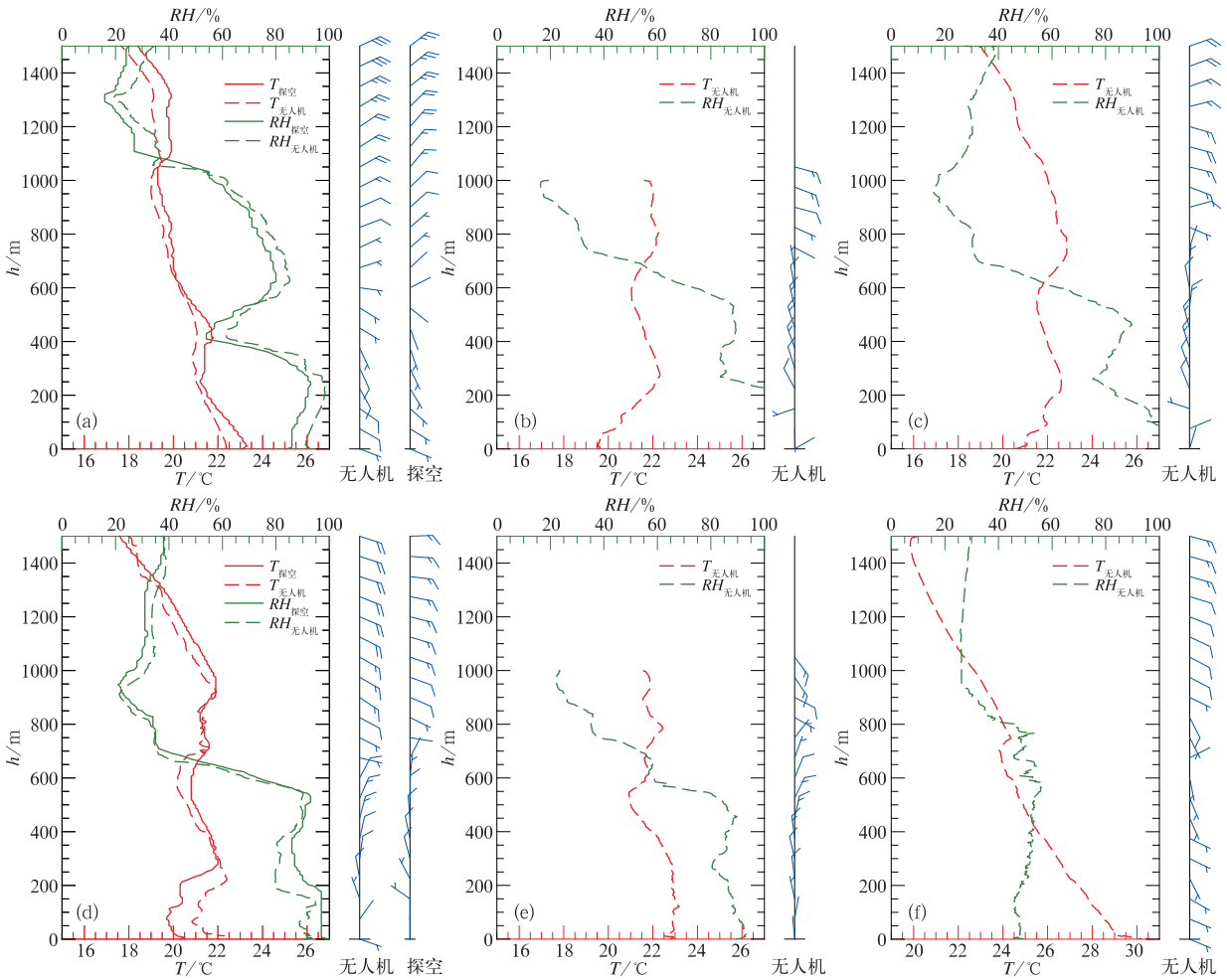


图 6 2018 年 6 月 20 日 19:23(a)、21 日 06:22(b)、06:50(c)、07:35(d)、08:09(e)、13:21(f)无人机起飞观测的温度、湿度、风向、风速廓线

Fig. 6 Profiles of temperature, relative humidity, wind direction and wind speed by UAV observation (a) 19:23 BT 20, (b) 06:22 BT, (c) 06:50 BT, (d) 07:35 BT, (e) 08:09 BT, (f) 13:21 BT 21 June 2018

4 结论和讨论

利用 L 波段雷达探空和地面自动站资料对基于旋翼无人机的边界层气象环境观测数据精度进行了验证,并利用无人机观测资料对一次夏季浓雾过程边界层结构特征进行了分析,也进一步验证了无人机边界层廓线观测的可靠性。

(1) 无人机观测的温度、相对湿度、风向、风速廓线与探空观测具有较好的一致性,数据准确度满足使用要求。二者温度、湿度的相关系数均为0.98,温度绝对偏差为 0.57℃,湿度绝对偏差为 4.25%,风向绝对偏差为 11.5°,二者风速的相关系数为 0.91,绝对偏差为 1.88 m·s^{-1},且无人机探测的风速为对应高度上的瞬时风速,可以更好地反映出边界层内风速细节变化特征。

(2) 无人机观测到一次夏季浓雾过程边界层结构变化特征。无人机观测获取的雾的边界层结构特征和宏观特征与探空观测基本一致。

(3) 无人机采取“直上直下”的垂直观测方式,而探空气球释放后上升过程中随气流漂浮,二者观测目标并不完全相同也是二者对比结果不完全一致的原因之一。

参考文献

奥银焕,吕世华,陈世强,等,2005. 夏季金塔绿洲及邻近戈壁的冷湿舌及边界层特征分析[J]. 高原气象,24(4):503-508. Ao Y H, Lü S H, Chen S Q, et al, 2005. Analyses of cold-wet tongue and boundary layer characteristic inside and outside of Jinta Oasis [J]. Plateau Meteor, 24(4): 503-508(in Chinese).

卞林根,程彦杰,王欣,等,2002. 北京大气边界层中风和温度廓线的观测研究[J]. 应用气象学报,13(S1):13-25. Bian L G, Cheng Y J, Wang X, et al, 2002. Observational study of wind and temperature profiles of urban boundary layer in Beijing winter[J]. J

Appl Meteor Sci，13(S1)：13-25(in Chinese).

陈洪滨，郑国光，2005. 基于商用运输平台的流动大气和环境监测系统[J]. 地球科学进展，20(5)：520-524. Chen H B，Zheng G G，2005. Mobile systems for monitoring the atmosphere and its environments based on commercial transport platforms[J]. Adv Earth Sci，20(5)：520-524(in Chinese).

郭丽君，郭学良，2015. 利用地基多通道微波辐射计遥感反演华北持续性大雾天气温、湿度廓线的检验研究[J]. 气象学报，73(2)：368-381. Guo L J，Guo X L，2015. Verification study of the atmospheric temperature and humidity profiles retrieved from the ground-based multi-channels microwave radiometer for persistent foggy weather events in northern China[J]. Acta Meteor Sin，73(2)：368-381(in Chinese).

郭启云，杨荣康，钱媛，等，2018. 气球携带探空仪上升和降落伞携带探空仪下降的全程探空对比分析[J]. 气象，44(8)：1094-1103. Guo Q Y，Yang R K，Qian Y，et al，2018. Full-range sounding comparison analysis of balloon borne rdiosonde rising and parachute carrying radiosonde descending[J]. Meteor Mon，44(8)：1094-1103(in Chinese).

韩珏靖，陈飞，张臻，等，2015. MP-3000A 型地基微波辐射计的资料质量评估和探测特征分析[J]. 气象，41(2)：226-233. Han J J，Chen F，Zhang Z，et al，2015. Assessment and characteristics of MP-3000A ground-based microwave radiometer[J]. Meteor Mon，41(2)：226-233(in Chinese).

胡非，洪钟祥，雷孝恩，2003. 大气边界层和大气环境研究进展[J]. 大气科学，27(4)：712-728. Hu F，Hong Z X，Lei X E，2003. Recent progress of atmospheric boundary layer physics and atmospheric environment research in IAP[J]. Chin J Atmos Sci，27(4)：712-728(in Chinese).

黄治勇，徐桂荣，王晓芳，等，2014. 基于地基微波辐射计资料对咸宁两次冰雹天气的观测分析[J]. 气象，40(2)：216-222. Huang Z Y，Xu G R，Wang X F，et al，2014. Analysis on two hailstorm events in Xianning based on observations of ground based microwave radiometer[J]. Meteor Mon，40(2)：216-222(in Chinese).

李子华，黄建平，周毓荃，等，1999. 1996 年南京连续 5 天浓雾的物理结构特征[J]. 气象学报，57(5)：622-631. Li Z H，Huang J P，Zhou Y Q，et al，1999. Physical structures of the five-day sustained fog around Nanjing in 1996[J]. Acta Meteor Sin，57(5)：622-631(in Chinese).

刘超，花丛，张恒德，等，2017. L 波段探空雷达秒数据在污染天气边界层分析中的应用[J]. 气象，43(5)：591-597. Liu C，Hua C，Zhang H D，et al，2017. Application of L-band radar sounding data in analyzing polluted weather boundary layer[J]. Meteor Mon，43(5)：591-597(in Chinese).

刘梦娟，刘舜，2016. 上海组网风廓线雷达数据质量评估[J]. 气象，42(8)：962-970. Liu M J，Liu S，2016. Evaluation of wind profiler network data in Shanghai[J]. Meteor Mon，42(8)：962-970(in Chinese).

陆春松，牛生杰，杨军，等，2010. 南京冬季一次雾过程宏微观结构的突变特征及成因分析[J]. 大气科学，34(4)：681-690. Lu C S，Niu S J，Yang J，et al，2010. Jump features and causes of macro and microphysical structures of a winter fog in Nanjing[J]. Chin J Atmos Sci，34(4)：681-690(in Chinese).

马舒庆，赵志强，邢毅，2005. VAISALA 探空技术及中国探空技术的发展[J]. 气象科技，33(5)：390-393. Ma S Q，Zhao Z Q，Xing Y，2005. VAISALA's radiosonde technology and advancement in radiosonde technology in China[J]. Meteor Sci Technol，33(5)：390-393(in Chinese).

沈怀荣，2010. 无人机气象探测技术[M]. 北京：清华大学出版社. Shen H R，2010. UAV Meteorological Observation Technology[M]. Beijing：Tsinghua University Press(in Chinese).

沈怀荣，邵琼玲，王盛军，2006. 基于微小型无人机的气象探测有效载荷研究[J]. 装备指挥技术学院学报，17(5)：102-106. Shen H R，Shao Q L，Wang S J，2006. Research on the meteorological-exploring payload based on a Min-UAV[J]. J Acad Equip Command Technol，17(5)：102-106(in Chinese).

史静，姜明，姚巍，等，2018. 基于微型多旋翼无人机的气象及环境监测系统设计[J]. 气象水文海洋仪器，35(1)：47-51. Shi J，Jiang M，Yao W，et al，2018. Design of meteorological and environmental monitoring system based on micro multi rotor UAV[J]. Meteor，Hydrol Marine Instrum，35(1)：47-51(in Chinese).

杨晓亮，杨敏，李江波，等，2018. 一次太行山焚风对霾强度的影响分析[J]. 气象，44(2)：313-319. Yang X L，Yang M，Li J B，et al，2018. Impact analysis of a Taihang Mountain fohn on haze intensity[J]. Meteor Mon，44(2)：313-319(in Chinese).

叶笃正，1977. 探空资料的应用(二)[J]. 气象，3(12)：21-23. Ye D Z，1977. Application of radiosonde data(Ⅱ)[J]. Meteor Mon，3(12)：21-23(in Chinese).

余君，李庆祥，廖捷，等，2016. 中国区域高空三种气温、湿度资料交叉对比[J]. 气象，42(6)：743-755. Yu J，Li Q X，Liao J，et al，2016. Cross comparison of three kinds of upper air temperature and humidity data over China[J]. Meteor Mon，42(6)：743-755(in Chinese).

张思齐，郭艳君，王国复，2018. 中国探空观测与第 3 代再分析大气湿度资料的对比研究[J]. 气象学报，76(2)：289-303. Zhang S Q，Guo Y J，Wang G F，2018. A comparative study of atmospheric humidity over China between radiosonde and the third generation reanalysis datasets[J]. Acta Meteor Sin，76(2)：289-303(in Chinese).

中国气象局监测网络司，2005. L 波段(1 型)高空气象探测系统业务操作手册[M]. 北京：气象出版社. Department of Integrated Observations of China Meteorological Administration，2005. The Operation Manual of L Band (type 1) Radiosonde Meteorological Observation System[M]. Beijing：China Meteorological Press(in Chinese).

周毓荃，欧建军，2010. 利用探空数据分析云垂直结构的方法及其应用研究[J]. 气象，36(11)：50-58. Zhou Y Q，Ou J J，2010. The method of cloud vertical structure analysis using rawinsonde observation and its applied research[J]. Meteor Mon，36(11)：50-58(in Chinese).

Cassano J J，2014. Observations of atmospheric boundary layer temperature profiles with a small unmanned aerial vehicle[J]. Antarctic Sci，26(2)：205-213.

Colomina I，Molina P，2014. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing：a review[J]. ISPRS J Photogramm Remote Sens，92：79-97.

Guo J P，Miao Y C，Zhang Y，et al，2016. The climatology of planetary boundary layer height in China derived from radiosonde and reanalysis data[J]. Atmos Chem Phys，16(20)：13309-13319.

Saggiani G M，Teodorani B，2004. Rotary wing UAV potential applications：an analytical study through a matrix method[J]. Aircraft Eng Aerosp Technol，76(1)：6-14.