

DOI: 10.5846/stxb202204241121

孙义博, 张文宇, 苏德, 耿冰, 林兴稳, 陈琪婷, 姜鹏翰, 荆俊平, 全占军. 区域尺度无人机涡动相关通量观测系统的应用研究. 生态学报, 2022, 42(22): 9309-9323.

Sun Y B, Zhang W Y, Su D, Geng B, Lin X W, Chen Q T, Jiang P H, Jing J P, Quan Z J. Study on application of the regional scale UAV-based flux measurement system. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(22): 9309-9323.

区域尺度无人机涡动相关通量观测系统的应用研究

孙义博^{1,2,3,4}, 张文宇⁵, 苏 德^{1,2,3,4,*}, 耿 冰⁶, 林兴稳⁷, 陈琪婷⁸, 姜鹏翰⁵, 荆俊平⁹, 全占军¹⁰

1 中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012

2 中国环境科学研究院生态研究所, 北京 100012

3 中国环境科学研究院国家环境保护区域生态过程与功能评估重点实验室, 北京 100012

4 井冈山生态环境综合观测研究站, 井冈山 343699

5 中国民航大学航空工程学院, 天津 300300

6 北京市社会科学院, 北京 100101

7 浙江师范大学地理与环境科学学院, 金华 321004

8 中国科学院空天信息创新研究院遥感科学国家重点实验室, 北京 100101

9 国家海洋技术中心, 天津 300112

10 中国环境科学研究院, 北京 100012

摘要:陆地生态系统的水热循环与碳循环是陆地表层系统中物质能量循环的核心,其中区域尺度地表水、热、碳通量的直接观测是当下陆地生态系统通量观测与模拟研究中的热点与难点。机载涡动相关方法能够直接观测区域尺度生态系统通量,基于无人机平台的涡动相关通量观测技术同时兼具了区域覆盖性与经济灵活性等优点,是机载通量观测技术的最新发展方向。在介绍机载涡动相关通量观测方法的主要技术原理、观测特点以及无人机通量观测系统组成的基础上,通过在相对均匀的区域开展无人机与地面通量观测对比试验,采用谱分析、观测结果对比以及源区分析等方式对无人机通量观测系统的性能进行了初步评价。结果表明:无人机通量观测系统能够实现对大气高频湍流信号的有效采样;无人机与地面观测的湍流通量具有较好的一致性,但是感热和 CO₂ 通量出现了低估、潜热和摩擦风速出现了高估;观测平台与仪器的差异、垂直通量辐散、大气边界层条件、不同的地面源区及地表异质性的影响是造成二者差异的潜在主要因素。最后对未来研究目标进行了展望,以进一步推动该技术在相关领域中的应用。

关键词:生态系统通量;涡动相关方法;无人机;区域尺度

Study on application of the regional scale UAV-based flux measurement system

SUN Yibo^{1,2,3,4}, ZHANG Wenyu⁵, SU De^{1,2,3,4,*}, GENG Bing⁶, LIN Xingwen⁷, CHEN Qiting⁸, JIANG Penghan⁵, JING Junping⁹, QUAN Zhanjun¹⁰

1 State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

2 Institute of Ecology, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

3 State Environment Protection Key Laboratory of Regional Eco-Process and Function Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

4 Integrated Ecological Observation and Research Station of Jinggangshan, Jinggangshan 343699, China

基金项目:国家自然科学基金项目(42101477);中国博士后科学基金(2020M670411);生态环境部生态环境保护监管项目(2019HJ2096001006)

收稿日期:2022-04-24; **采用日期:**2022-08-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: sude@craes.org.cn

5 Aeronautical Engineering Institute, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China

6 Beijing Academy of Social Sciences, Beijing 100101, China

7 College of Geography and Environment Science, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China

8 State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

9 National Ocean Technology Center, Tianjin 300112, China

10 Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

Abstract: Water, heat, and carbon cycle of the terrestrial ecosystems are the core of the matter and energy cycle in the land surface system. The direct measurement of land surface water, heat, and carbon fluxes at the regional scale has always been a hotspot and a gordian knot in the study of the ecosystem flux observation and simulation. Airborne eddy covariance flux measurement method can directly measure ecosystem fluxes at the regional scale. The unmanned aerial vehicle (UAV)-based eddy covariance flux measurement has the advantages of regional coverage and economy flexibility, and is the latest development direction of the airborne flux measurement method. This study firstly introduced the basic technical principle, observation characteristics, and the system construction of the UAV-based flux measurement system. Then, a comparison experiment between UAV and ground flux measurement was carried out over a typical homogeneous surface. The performance of the UAV-based flux measurement system was preliminarily evaluated by spectral analysis, fluxes comparison, and footprint analysis. The results show that the UAV-based flux measurement system could effectively sample the high-frequency turbulence signals. The turbulent fluxes measured by UAV were basically consistent with those measured from ground. However, compared with ground measurements, the UAV underestimated the sensible heat and CO₂ fluxes and overestimated the latent heat fluxes and friction velocity. The main potential reasons causing the mismatching between the UAV and ground fluxes measurements are attribute to the effects including the differences in measurement platform and instruments, vertical flux divergence, atmospheric boundary layer condition, and the differences in footprint areas as well as the influence from surface heterogeneity. At last, we proposed the future work to promote the study and the application of the UAV-based flux measurement in the relevant fields.

Key Words: ecosystem fluxes; eddy covariance method; unmanned aerial vehicle; regional scale

陆地生态系统与大气之间的水、热、碳通量交换过程及其影响机制,一直是生态、气象、水文、农林等相关领域共同关注的前沿性研究课题。陆面交换过程极为复杂,涉及从叶片表面分子水平到斑块至区域水平的空间范围,传统以微小尺度为主的观测手段无法充分反映生态系统通量在空间上的异质性及相互作用关系^[1]。然而直至今日,区域尺度(>1 km²)地表通量的直接观测,特别是在复杂下垫面条件下,具有代表性的观测数据仍然十分有限^[2]。如何有效获取区域尺度地表通量观测数据,便成为了当下生态系统通量观测与模拟研究中的热点与难点,这对天气气候预报、区域水资源管理、区域碳收支核算以及全球变化等研究具有重要意义^[3]。

近年来,利用遥感或生态过程模型估算区域和全球尺度生态系统通量的方法已成为监测全球气候变化、开展区域碳收支核算评估及流域水资源管理的重要工具^[4]。但由于遥感模型在生态过程机理的表达、模型参数化、陆面参量反演等方面存在不确定性,生态过程模型对通量动力学特征及地表异质性的表达不够完善等原因,基于遥感或生态过程模型的方法在实际应用时常需要结合与遥感像元或过程模型网格空间尺度一致的地面观测真值对模型进行验证及标定^[5-6]。传统地面观测方法(包括地面涡动相关通量观测及其组成的观测网络、闪烁仪法等)往往由于有限的空间代表范围及分布密度,难以充分表达生态系统在区域上的复杂性和多样性^[7-8],无法满足当前大范围区域地表通量覆盖的应用需求^[9-10]。

机载涡动相关通量观测技术是目前开展大区域尺度陆地生态系统通量观测的一种有效方式^[11-12]。经过近 50 年的发展,目前装配有现代精密涡动相关观测仪器的机载通量观测系统对湍流通量观测的精度已与传

统地面涡动相关观测及闪烁仪观测相当,其观测的有效性也得到了广泛认可^[13-14]。因航空器的飞行速度远大于风速,机载观测可在短时间内形成对湍流在空间上的线性采样序列,直接展现出观测区域的瞬时湍流场,并不会像塔基涡动相关观测那样受到湍流的时间趋势和非稳态效应的影响^[13,15]。采用有人驾驶飞机开展涡动相关通量观测,存在空域申请流程繁琐,飞机的维护成本、运输成本以及飞行成本过高等问题,系统的维持和使用需要投入大量的人力、物力和财力,极大地限制了机载通量观测大规模开展^[16]。

采用无人飞行器搭载精密的涡动相关观测仪器进行湍流通量观测可有效弥补有人驾驶飞行器低空观测危险性及观测成本高的问题,是目前机载涡动相关通量观测新一代的技术方法。随着无人机技术的快速发展以及轻小型、高精度、快速响应涡动相关仪器的出现,基于无人机涡动相关方法的通量观测技术越来越多地被人们所采用^[17-18],实现了对生态系统通量的多时段、多架次以及多区域灵活观测。根据无人机的荷载不同,国际上已有大、中、轻型多种载荷能力的无人机观测系统,实现了对感热通量、潜热通量以及大气风、温、湿、压等要素的观测^[19]。其中,以 Manta C1 和 ScanEagle 为代表的大型无人机平台(荷载大于 5 kg)由于具有能够与小型有人飞行器相当的续航能力,并且能够搭载包括涡动相关观测仪器(包括测风探头、快速响应的大气温度、水汽或 CO₂ 浓度传感器)内更多的观测设备,实现对更多类型湍流通量(例如动量、感热、潜热通量或 CO₂ 通量)以及地表温度、大气辐射等变量的立体观测,是目前无人机通量观测的一个重要发展方向^[20-21]。与此同时,基于无人机涡动相关方法的通量观测技术也已越来越多地被人们所采用,观测的有效性也通过大量的野外试验得到了认可^[16]。在我国,早期由于传感器技术发展相对滞后,对机载涡动相关技术的研究起步也相对较晚。近年,孙义博^[22]对我国引进的有人驾驶飞行器通量观测系统 SkyArrow 650 ERA(Environmental Research Aircraft)开展了系列的研究工作。在此研究基础上,为有效提升区域尺度生态系统通量观测能力, Sun 等^[23-24]采用国产高性能垂直起降固定翼无人机试制了一套无人机涡动相关通量观测系统,实现了区域尺度感热通量、潜热通量、CO₂ 通量以及净辐射和光合有效辐射的直接观测,并开展了系统测试及野外应用等工作。

为了评估无人机通量观测系统对感热、潜热和 CO₂ 通量的观测性能,本文在介绍机载涡动相关通量观测方法的主要技术原理、观测特点以及无人机通量观测系统基本组成的基础上,以 2020 年 12 月在江苏省盐城市湿地珍禽国家级自然保护区开展的无人机与地面通量对比观测试验为数据基础,从湍流(协)谱分析、通量观测结果对比以及源区分析等方面对无人机通量观测系统的性能进行了初步评价,并对造成无人机与地面观测结果差异的潜在主要因素进行了讨论。最后对未来观测系统的改进和研究方向进行了展望,为无人机通量观测技术在我国广泛应用提供参考。

1 主要技术原理及观测特点

1.1 主要技术原理

机载通量观测是以涡动相关方法为基本理论,通过测定计算物理量(如温度、H₂O 和 CO₂ 浓度等)的脉动与垂直风速脉动的协方差求算垂直湍流输送通量。与传统地面观测不同的是:飞行器本身的位置和姿态是实时变化的,对风速的测量是在一个 6 自由度(3 个姿态角、3 个位置坐标)快速移动的参考坐标系中进行的。因此风速的计算包含了在两个关键空间坐标参考系统之间的转换,包括:①飞行器坐标系(移动坐标系,以飞行器重心为中心)下三维风速的计算;②地球坐标系下的三维风速的计算(引入飞行器在地球坐标系下的姿态和速度信息)^[16]。湍流通量的计算流程与传统地面涡动相关方法保持一致,需要保证高频率(50 Hz)的原始观测数据序列连续且没有野点,主要包括了坐标旋转修正(二次坐标旋转)和微量气体密度变化的订正(WPL 订正),详细的计算过程可参考孙义博^[22]的论文。

飞行器在穿越垂直方向的气流时,为了保持相对恒定的飞行高速,就无法保持匀速飞行,造成对湍流在空间上的不均匀采样。有研究指出,若采用传统时间平均的方式计算湍流通量,会产生高达 20% 的误差^[25]。因此,在进行观测湍流变量的平均运算时,需要用飞行器的对地速度对观测变量进行修正,即观测变量的空间平

均。以垂直风速(w)为例,空间平均($\bar{w}$)可表示为^[25]:

$$\bar{w} = \frac{1}{U_p T} \sum_i w_i U_{pi} \Delta t \quad (1)$$

式中: U_{pi} (m/s) 是飞机的瞬时对地速度, $\bar{U}_p$ (m/s) 为飞机的平均对地速度, Δt (s) 为时间增量(0.02 s), T (s) 为平均长度内的时间总长。涉及到涡动相关计算的所有变量都用这种方式进行平均,平均长度的确定可采用 Ogive 方法进行判定^[26]。

1.2 主要观测特点

1.2.1 区域尺度面积平均瞬时通量观测

鉴于飞行器是在空间上对大气湍流进行主动快速采样的特点,机载通量观测能够直接展现出观测区域的瞬时湍流场,其中对湍流空间尺度的最小分辨率与飞行器飞行速度以及观测频率有关,例如在无风条件下,以 50 Hz 的观测频率并以 30 m/s 的巡航速度进行飞行观测时,可分辨大于 1.2 m 波长的湍流;并且通过长距离的飞行可实现中大尺度(>10 km)湍流的空间采样,这对不同尺度大气湍流运动中的能量、动量、物质的传递和交换研究尤其重要^[27]。

湍流通量的计算是基于空间上某一长度观测航段的空間平均进行,在近地层(约为大气边界层高度的 10%)内进行观测时,其观测结果表征其源区内所有下垫面通量强度的混合平均^[28]。为获得具有局地意义的湍流通量,空間平均长度的选择一般在 2000—5000 m 之间^[26]。在逆风方向上,机载通量观测的覆盖范围与飞行高度、地表粗糙度和大气稳定度等条件有关^[13]。Kustas 等^[29]通过足迹分析研究表明,在飞行高度距地表约 35 m 的情况下,最大通量贡献区在沿航线逆风向约 250 m 的区域,90%的通量贡献区域能够覆盖到沿航线逆风向约 5000—6000 m 的区域。可见,当飞行器以 30 m/s 的巡航速度进行飞行观测时,能够在 1 至 3 min 内实现不低于 10 km²的区域覆盖。这种接近瞬时的大空间区域通量观测,在时间与空间尺度上与卫星遥感影像时空尺度一致,对基于卫星遥感模型反演地表蒸散发和碳收支等应用具有重要价值。

1.2.2 通量空间变化直接观测

通过设计不同形式的观测航线及合适的空間平均长度,机载通量观测能够实现对通量空间变化信息的直接获取。根据不同的研究目标,区域或流域尺度机载通量观测可采用“样带”或“网格”飞行方式开展,如图 1 所示。其中,“样带”飞行观测利用了飞行器长距离空间采样的优势,获取沿飞行航线上连续的地表通量观测值,常用于获取观测区域内不同类型下垫面的通量强度信息,在航线设计时,需要尽可能以相同的概率覆盖到研究区域内所有类型的下垫面。“网格”飞行观测对观测区域以一定间隔的平行航线进行往返观测,获得空間上覆盖整个区域的通量观测值,从而反映观测区域地表通量的空間变化。在航线设计时,各平行航线需要尽可能垂直于主风向,航线间隔的确定需要综合考虑分辨率、逆风向源区覆盖范围等因素的影响^[30]。

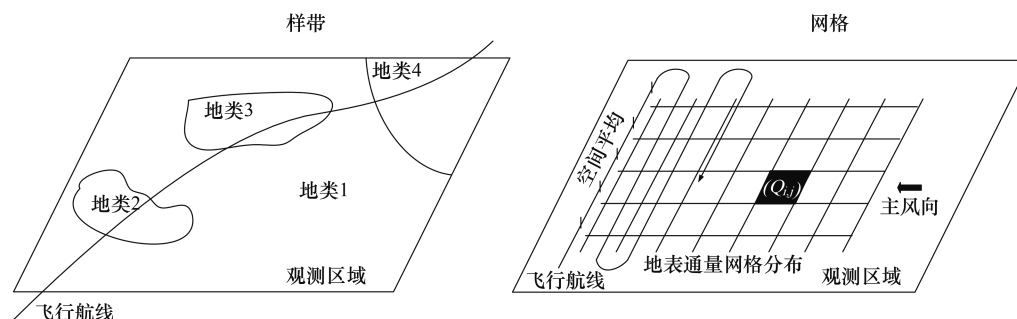


图 1 区域或流域尺度机载通量观测典型飞行方式示意图

Fig.1 The typical flight patterns for the regional or watershed application using airborne flux measurement

$Q(i, j)$ 为地面网格第 i 行,第 j 列的地表通量强度观测值

2 无人机通量观测系统简介

采用 Sun 等^[24]试制的无人机涡动相关通量观测系统开展观测应用研究,系统组成如图 2 所示,主要由科学观测部分、无人机控制部分以及地面控制站组成。科学观测部分包括移动通量观测系统和辅助观测设备。移动通量观测系统包括:①机载 5 孔湍流探头,用于测量无人机坐标系下的三维风速;②GPS/INS 组合导航系统,用于测量无人机在地球坐标系下实时的位置、速度与姿态,与机载多孔湍流探头一并计算地球坐标系下的三维风速;③开路式红外 $\text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2$ 气体分析仪,用于测量高频率的大气水汽和 CO_2 浓度;④铂电阻温度计,用于测量高频率的大气温度脉动;⑤热敏电阻温度计,用于测量高精度的大气温度,但测量频率较低(1 Hz)。除热敏电阻温度计的数据采集频率为 1 Hz 外,其他设备均以 50 Hz 的频率对湍流进行采样。辅助观测设备包括:①净辐射仪,用于测量天空向下投射于地表和由地表向上投射的全波段辐射量的尽差值;②光合有效辐射仪,用于测量太阳辐射中对植物光合作用有效的光谱范围的辐射量,包括向上观测的入射光合有效辐射和向下观测的反射光合有效辐射。主要科学观测仪器的型号、数据采集频率、厂家及关键技术指标如表 1 所示。所有科学观测仪器均接入机载控制计算机,由机载控制计算机负责数据采集与存储、模拟/数据信号转换、电力分配及数据导出。科学观测部分独立于无人机自动驾驶系统,并由独立的供电模块进行供电。

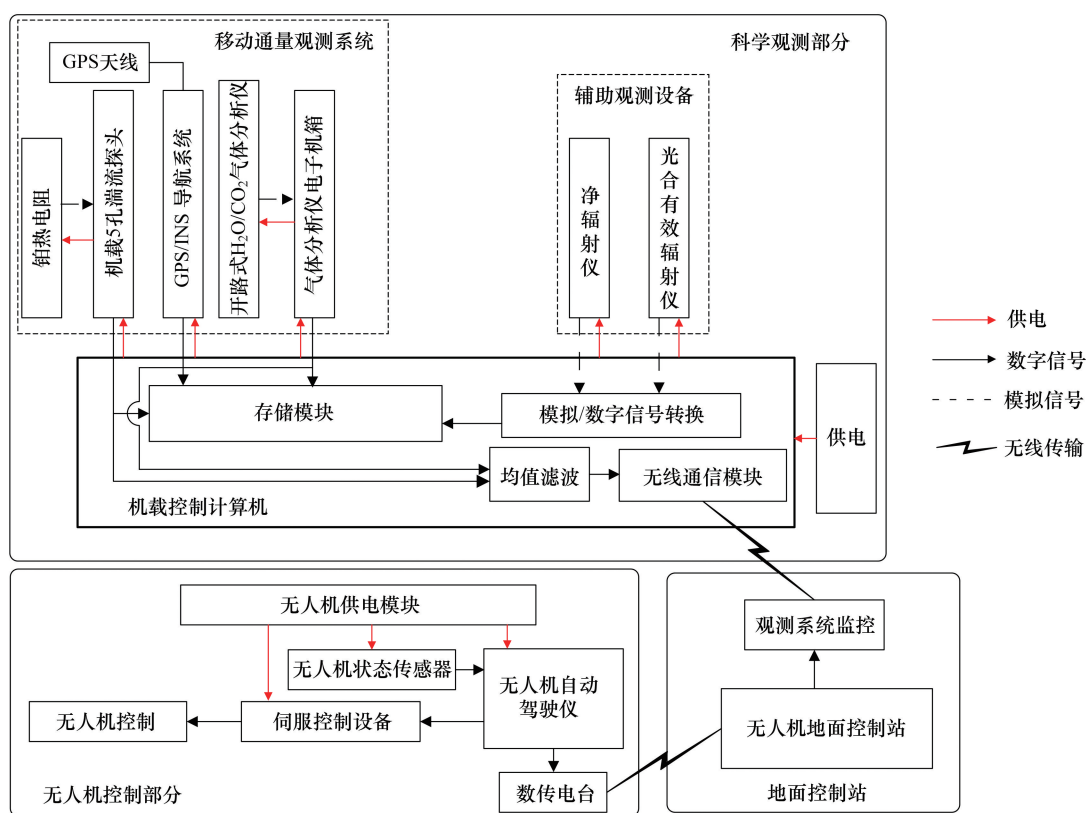


图 2 无人机通量观测系统集成框图^[24]

Fig.2 The system integration diagram of the UAV-based flux measurement system^[24]

GPS:全球定位系统 Global Positioning System;INS:惯性导航系统 Inertial Navigation System;UAV:无人驾驶飞行器 Unmanned Aerial Vehicle

无人机涡动相关通量观测系统外观及内部设备装配如图 3 所示^[24]。无人机最大起飞重量为 60 kg,有效载荷 10 kg,飞行阶段采用汽油动力提供不小于 2 h 的有效续航时间,巡航速度为 100—130 km/h,最大飞行高度 3500 m,可在 6 级及以下风力稳定飞行。机载 5 孔湍流探头(集成铂电阻温度计)沿无人机横滚轴安装于无人机的机头下方,向前伸出 43.3 cm,测量不受机体周围流场畸变影响的真空速;开路式红外 $\text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2$ 气体

分析仪通过隔振措施安装于机头下方;GPS/INS 的惯性导航模块安装于无人机的重心处,采用双天线定向方式来提高航向角测量精度,主副 GPS 天线分别安装机身前后,基线长大于 1 m;净辐射仪安装于左机翼翼尖;光合有效辐射仪安装在机头上下表面;机载控制计算机安装于机舱内部。关于该无人机通量观测系统的详细配置可参考 Sun 等^[24]的论文,本文不再赘述。

表 1 无人机通量观测系统主要科学观测仪器的型号、采样频率、功能及主要精度指标^[24]

Table 1 The model, sampling frequency, function and measurement precision of the scientific payload instrumentations^[24]

仪器名称 Instrument	型号 Model	采样频率 Frequency /Hz	功能 Function	厂家 Manufacturer	精度指标 ⁽¹⁾ Measurement precision
机载 5 孔湍流探头 ⁽²⁾ Airborne 5-hole turbulent probe	ADP-55	50	相对风速、动量以及标量通量观测	Simtec AC	风速: ± 0.05 m/s 攻角: $\pm 0.02^\circ$ 侧滑角: $\pm 0.04^\circ$
开路红外 H ₂ O/CO ₂ 气体分析仪 Open path H ₂ O/CO ₂ infra-red gas analyzer	EC150	50	大气水汽和 CO ₂ 绝对浓度、潜热和 CO ₂ 通量观测	Campbell	H ₂ O: ± 0.004 g/m ³ CO ₂ : ± 0.2 mg/m ³
铂电阻温度计 Platinum resistance thermometer	PT100	50	快速温度脉动、感热通量观测	Simtec AC	± 0.2 °C
热敏电阻温度计 thermistor	100K6A1A	1	大气温度观测	BetaTherm	± 0.15 °C
GPS/INS 组合导航系统 GPS/INS integrated navigation system	BD992	50	飞行器位置、速度、姿态测量,地球坐标系下三维风速计算	Trimble	水平速度: ± 0.007 m/s 垂直速度: ± 0.02 m/s 俯仰/横滚航向角: $\pm 0.1^\circ$
净辐射计 Net radiometer	NR-LITE2	10	净辐射观测	Kipp & Zonen	方向误差: < 30 W/m ²
光合有效辐射计 Photosynthetically radiation radiometer	active PQS1	10	下行和反射光合有效辐射观测	Kipp & Zonen	方向误差: < 30 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$

(1) 精度指标除机载 5 孔湍流探头外均来自各仪器厂家给定的数值;(2) 机载 5 孔湍流探头的测量精度来自于风洞测试后的精度评价结果

3 应用示范

3.1 示范区域概况与数据获取

为评估无人机涡动相关通量观测系统对感热、潜热和 CO₂ 通量的观测能力,2020 年 12 月 9 日至 15 日在江苏省盐城市湿地珍禽国家级自然保护区开展了无人机与地面通量观测对比试验。观测区域地处暖温带与北亚热带过渡地带,主要受海洋性和大陆性气候影响,年平均气温为 13.7 至 14.6 °C,年平均降水量 1000 mm 左右,具有夏季多雨冬季多干旱的气候特征。根据试验区域的地表覆被特点,对比试验的主要区域选择在芦苇上进行,飞行航线、地面涡动相关观测的位置以及观测区域的土地覆盖现状如图 4 所示,主要地表覆被有芦苇、互花米草、冬小麦和水体,由于观测是在冬季开展,期间芦苇大多已经枯黄。

本研究采用了无人机 6 个架次的对比飞行观测数据,基本观测信息统计如表 2 所示。在对比观测试验中,无人机按照设计好的航线以平均对地约 94 m 的相对高度进行观测(图 4),每架次往返飞行两次(即一个架次获得 4 次观测数据),一个观测架次总航线约为 42 km。为了尽量避免地表异质性对对比观测的影响,本研究截取了飞行航线中部下垫面较为均一(芦苇)的航段进行无人机水、热、碳通量的计算(图 4 红色线段),长度约为 5 km。

为获取与无人机观测同时刻的地面通量观测数据,在芦苇区域架设了临时的地面涡动相关通量观测塔,观测高度为距地面 2.5 m,坐标为:33°36′51.73″N,120°32′17.39″E(图 4)。观测设备包括一套开路涡动相关通量观测系统(IRGASON, Campbell Scientific)和热敏电阻,数据采集频率为 10 Hz。本研究获得了地面涡动相关观测的原始数据,考虑到无人机完成一个对比观测架次的时间在 15 min 左右,采用 EasyFlux 工具(<https://www.campbellsci.com/easyflux-pc>)按 15 min 的时间间隔进行地面通量观测数据的处理,主要包括野点的检测

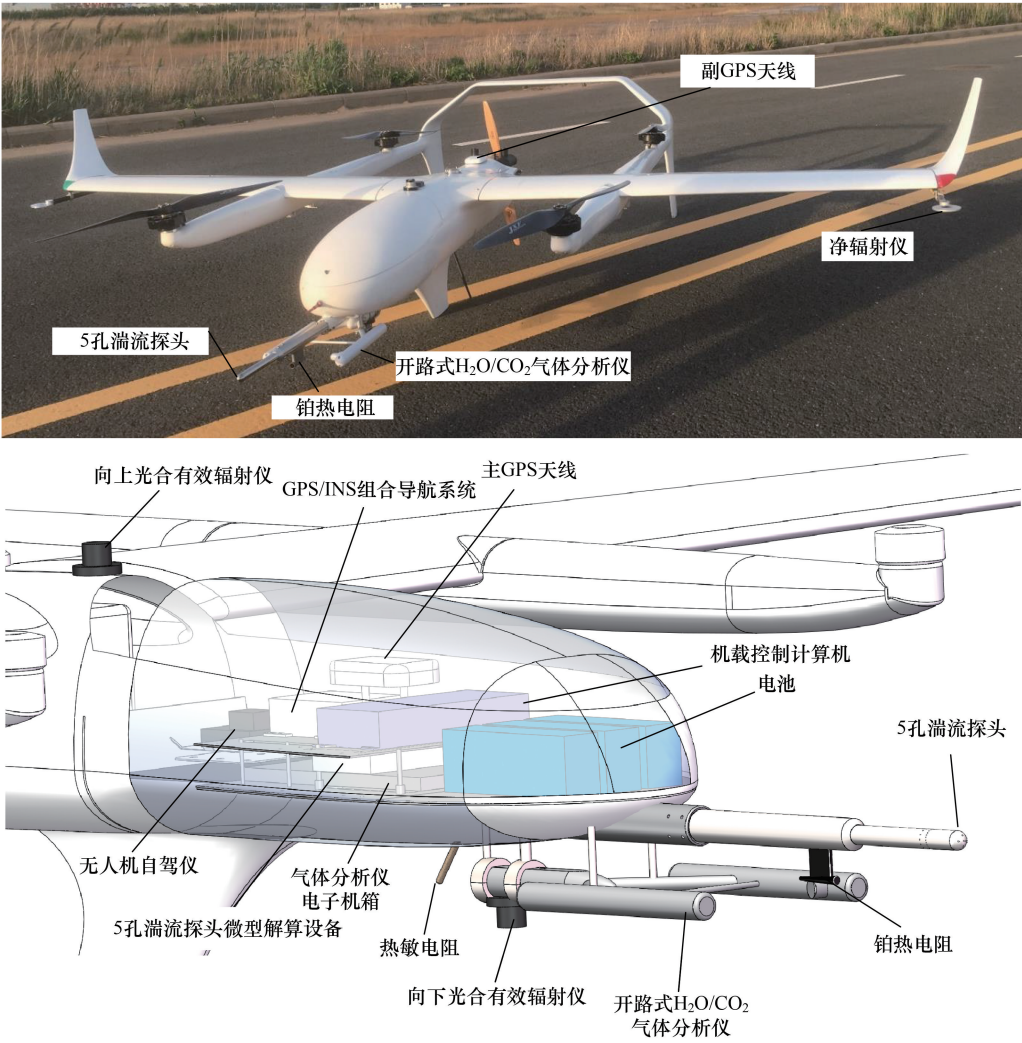


图 3 无人机通量观测系统实物及内部结构^[24]

Fig.3 The picture of the UAV-based flux measurement system and the internal structure^[24]

剔除、超声虚温修正、坐标旋转(二次坐标旋转)、WPL 修正、频率响应校正等,忽略了传输时间尺度大于 15 min 的湍流及其造成的不确定性,并对计算结果为空的数据采用了线性插值方法进行插补。本文将地面通量观测作为地面参考用于后续对无人机观测结果进行评价。

表 2 各架次无人机对比飞行统计表
Table 2 Summary of the flights used in this study

日期(月-日) Date	具体时间 Time	标识 Identification	航线长 Flight length/km	对地高 Flight height /m	风速 Wind speed/ (m/s)	风向 Wind direction/(°)	气温 Air temperature/K
12-09	15:53:27—16:13:58	COM1	42.2	90	1.08	42.25	280.62
12-10	12:04:55—12:25:52	COM2	41.8	88.6	3.63	324.2	281.26
12-10	15:59:05—16:20:09	COM3	42.3	91	0.71	332.18	280.99
12-12	13:00:14—13:21:21	COM4	42.5	97	1.53	294.58	281.97
12-12	15:22:46—15:43:40	COM5	42.2	96.6	1.37	199.38	282.35
12-15	10:43:43—11:05:25	COM6	42.1	95	5.7	317.74	273.37

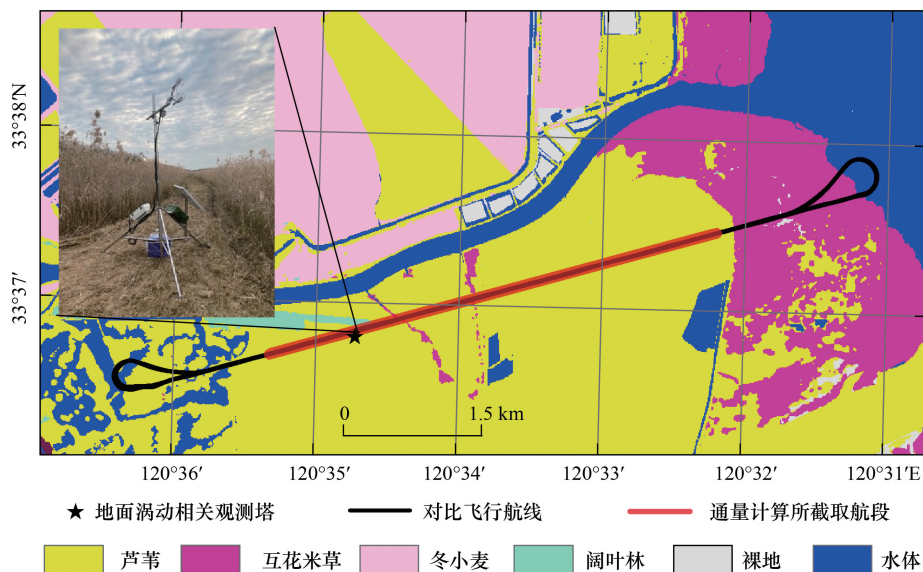


图4 对比观测试验区域土地覆盖现状(30 m分辨率)及地面观测站位置和无人机飞行航线图

Fig.4 The flight path of the UAV and the location of the ground EC tower over the land cover classification map (30 m) of the experimental area

3.2 湍流(协)谱分析

湍流(协)谱特征分析可用于检测涡动相关系统对高频湍流信号的响应能力。对所截取的无人机观测航段数据,采用快速傅里叶变换(FFT)对去趋势后的湍流脉动原始观测数据进行功率谱和协谱的计算。在进行标准化的情况下,功率谱与频率的乘积在惯性子区应符合“-2/3”定律^[31]。各观测架次截取航段平均后的功率谱曲线如图5所示,其中 x 轴为标准化后的频率($n=f \cdot z/\bar{U}$, z 为观测高度, $\bar{U}$ 为真空速)。

在对数坐标系下,整体上各观测变量在低频区有明显的峰值,在惯性子区也基本符合湍流能谱的“-2/3”定律,表明无人机通量观测系统能够有效的对大气高频湍流信号进行采样,满足涡动相关方法的基本要求。与此同时,气温脉动的观测在部分高频区域($5 < n < 20$)出现了一定程度的高频噪声影响,主要原因是采用铂热电阻进行高频气温脉动的观测易受发动机震动噪声影响所导致。对水汽和 CO_2 浓度的观测,COM5架次在高频区域出现了一个明显的高频噪声,这是由于期间气体分析仪的减震结构与机身有了直接的接触,丧失了部分隔振能力,随后对减震结构进行调整后,高频震动的影响消失(COM6),也表明所试制的无人机涡动相关通量观测系统对气体分析仪的隔振结构是有效的。

不同湍流通量的协谱曲线如图6所示。在对数坐标系下,整体上所有湍流协谱在惯性子区范围内均近似遵循“-4/3”定律。由于高频气温脉动观测受发动机高频震动的影响(图5),在垂直风速与气温的协谱曲线高频区域也相应地出现了噪声影响,该噪声可能会淹没一些高频温度脉动信号,导致对感热通量的低估及系统误差的增大。对高频温度观测易受震动影响的问题,后期可通过优化发动机减震结构或采用对震动不敏感的热电偶替代的方式进行解决。

3.3 直接对比

由于观测源区差异、地表异质性以及观测高度等因素的影响,地面与飞行器观测通量很难直接进行比较。本研究计算了无人机每个对比观测架次内4个截取航段通量观测结果的均值与方差,并与地面观测时间序列结果进行了直接比较,结果如图7所示。可以看出,整体上无人机与地面观测的感热通量、潜热通量、 CO_2 通量与摩擦风速基本一致,且12月10日和12日无人机观测通量的时间变化趋势与地面保持一致,说明无人机涡动相关通量观测系统能够有效识别地表通量的时间变化趋势。由于观测处于冬季,感热通量明显大于潜热通量,符合冬季干旱的气候特征; CO_2 通量在正午时间的观测基本均表现出吸收的特征(12月10日和12日),

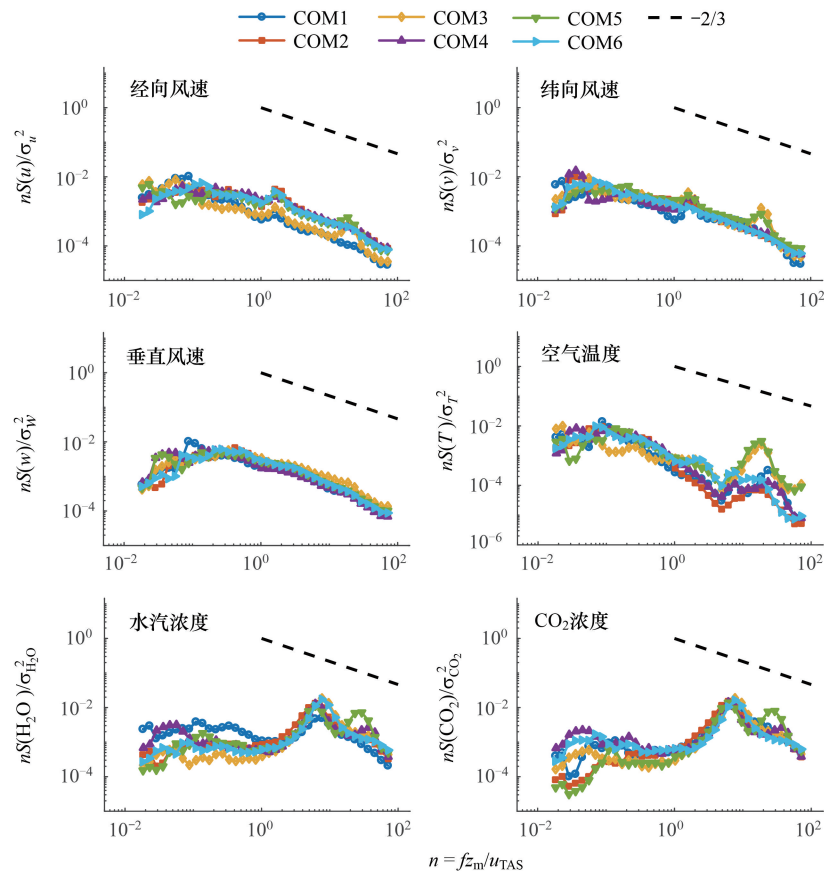


图5 平均后的无人机观测不同湍流变量标准化功率谱曲线

Fig.5 Mean normalized power spectra of the turbulent variables measured by UAV

COM1—6 表示与表 2 对应的不同无人机飞行架次标识,“-2/3”表示功率谱与频率的乘积在惯性子区内的理论参考斜率

下午观测的无人机 CO_2 通量基本在 0 值附近波动,而此刻地面观测大多表现为碳源,此外地面观测除 15 d 具有典型的日吸收特征外,其他日期的观测则有明显的波动特征,可能与地面涡动相关观测本身的设置情况、观测期间的光照辐射变化以及植被与微生物生理状态等因素有关。

对地面与无人机通量观测结果进行回归分析,采用线性插值方法获得每个无人机观测架次中间时刻的地面通量观测值及方差作为地面参考对无人机观测结果进行评价,结果如图 8 所示。可以看出,无人机与地面观测的结果均较为一致,两个平台之间的感热通量观测相关系数(R^2)为 0.97,均方根误差(RMSE)为 7.28 W/m^2 ,无人机比地面观测偏低 46%;潜热通量的相关系数(R^2)为 0.92,均方根误差(RMSE)为 8.76 W/m^2 ,无人机比地面观测偏高 45%; CO_2 通量的相关系数(R^2)为 0.66,均方根误差(RMSE)为 $1.52 \mu\text{mol/m}^2/\text{s}$,无人机比地面观测偏低 27%;摩擦风速的相关系数(R^2)为 0.7,均方根误差(RMSE)为 0.08 m/s ,无人机比地面观测偏高 31%。总体而言,无人机观测的感热和 CO_2 通量相比地面观测出现了系统性的低估,潜热通量和摩擦风速则出现了系统性的高估。造成这种现象的可能原因与湍流通量的垂直辐散效应以及夹卷层向下的水汽输送有关^[13,32];同时无人机观测结果表现出了更大的变异性(即 1 个架次 4 个通量观测结果的方差更大),这可能与无人机有着更大的源区及源区内部的地表异质性影响有关。以上结果也与其他研究开展的机载与地面通量对比试验的结果保持一致^[13]。

3.4 对比结果的分析与讨论

造成无人机与地面通量观测结果差异的潜在主要原因包括以下四个方面:

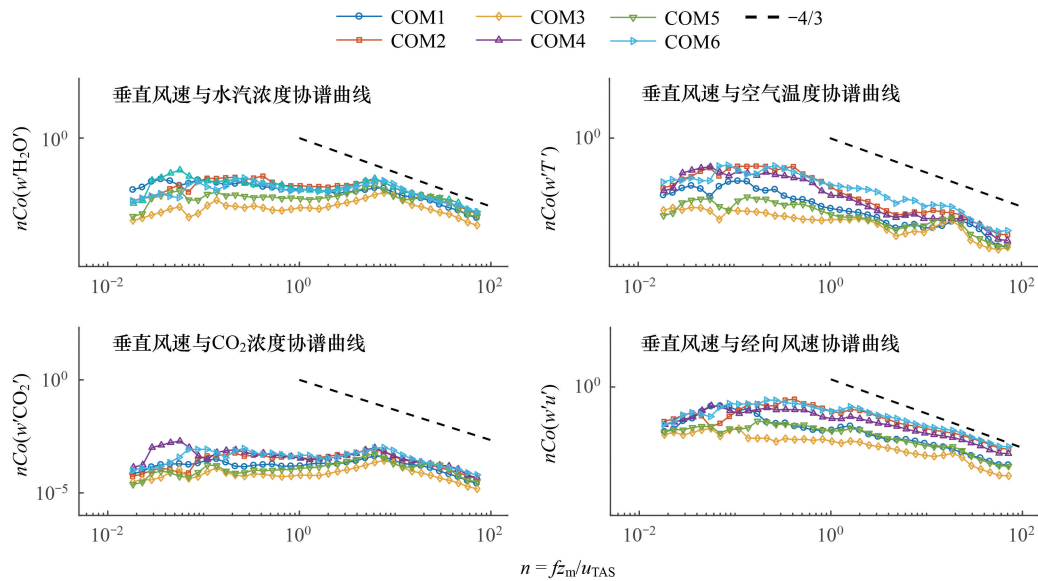


图 6 平均后的无人机各观测架次垂直风速与湍流观测变量的协谱曲线

Fig.6 Mean cospectra between the vertical wind speed and the turbulent variables measured by UAV

COM1—6 表示与表 2 对应的不同无人机飞行架次标识,“-4/3”表示协谱与频率的乘积在惯性子区内的理论参考斜率

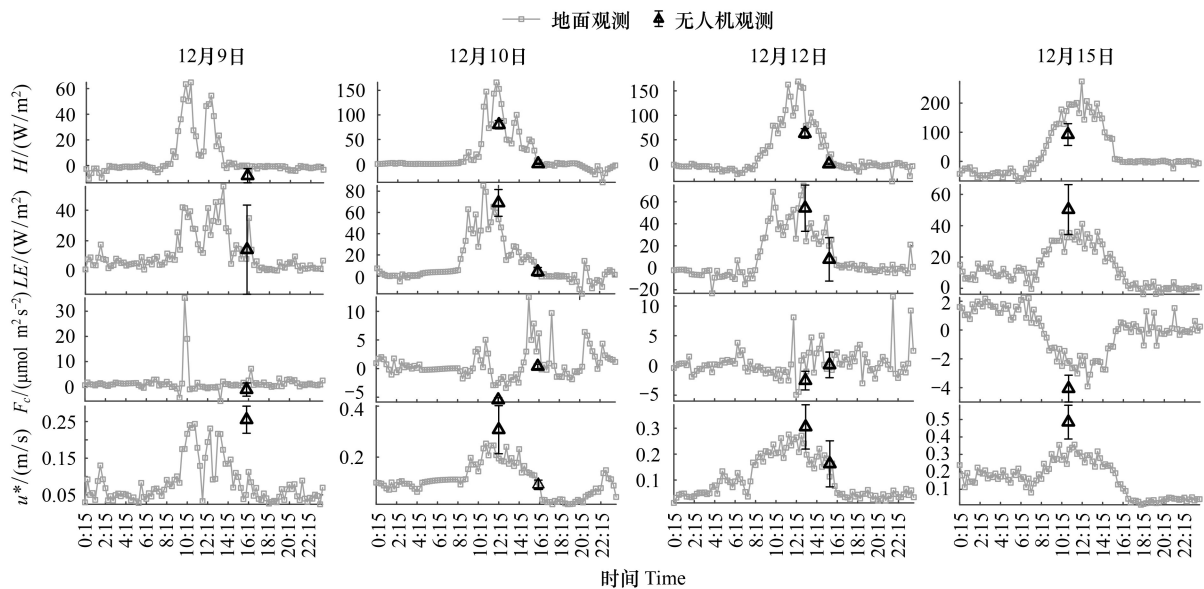


图 7 地面时间序列感热(H)、潜热(LE)、 CO_2 (F_c) 通量及摩擦风速(u^*) 观测值与无人机每个对比观测架次通量均值及方差的对比

Fig.7 Comparison between the time series from ground and the mean and variance from UAV for the fluxes of sensible heat (H), latent heat (LE) and CO_2 (F_c) as well as friction velocity (u^*)

无人机观测时间取各观测架次的中间时间,地面采用 15 min 时间间隔进行通量计算

3.4.1 无人机通量观测的误差

无人机通量观测的主要误差来源包括与湍流随机特性有关的随机误差和与观测仪器及湍流采样不充分有关的系统误差。本文主要对系统误差进行描述,采用 Mann 和 Lenschow^[33]的方法计算无人机观测湍流通量的系统误差:

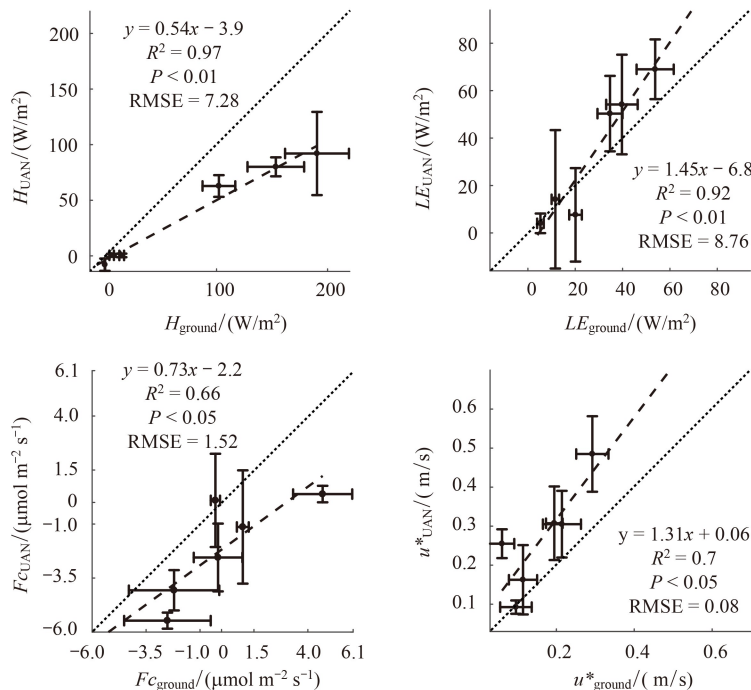


图 8 无人机与地面观测的感热通量(H)、潜热通量(LE)、 CO_2 通量(F_c)及摩擦风速(u^*)的回归分析结果

Fig.8 Regression results of the sensible (H) and latent (LE) heat flux as well as CO_2 flux (F_c) and friction velocity (u^*) between the UAV and the ground EC measurement

横坐标为地面通量观测值,纵坐标为无人机通量观测值,点划线为 1:1 线段,粗虚线为最佳拟合线段

$$F - \langle F(L) \rangle \approx \frac{2FL_{ws}}{L} \quad (2)$$

其中: F 为真实值, $\langle F(L) \rangle$ 为观测值 $F(L)$ 的平均, L 为计算湍流通量所采用的窗口长度, L_{ws} 为与飞行高度有关的湍流长度尺度的积分,可以采用公式 $L_{ws} \approx (L_w L_s)^{1/2}$ 进行估算,其中 L_w 和 L_s 分别为观测变量 w 和 s 的积分长度,通过自相关函数进行计算。

本文计算了不同湍流通量的长度尺度积分,分别为:感热通量(L_{wt}) 在 107 m 至 275 m 之间、潜热通量(L_{wq}) 在 13 m 至 199 m 之间、 CO_2 通量(L_{wc}) 在 14 m 至 229 m 之间、摩擦速度(L_{wu}) 在 67 m 至 255 m 之间。无人机湍流通量计算的窗口长度约为 5000 m,可以得出不同湍流通量计算的系统误差分别为:感热通量在 4.3% 至 11% 之间、潜热通量在 0.5% 至 8% 之间、 CO_2 通量在 0.6% 至 9.2% 之间、摩擦速度在 2.7% 至 10.2% 之间。

此外,通过湍流(协)谱分析可以确定无人机观测的原始湍流脉动数据仍受无人机发动机高频噪声影响,对温度脉动的观测影响最为明显。这种高频噪声直接淹没了部分高频温度脉动信号,导致观测感热通量的低估及系统误差的增大,而对原始观测数据的任何平滑滤波处理,均会在一定程度上损失真实的观测特征。因此本研究并未对这种高频噪声进行处理,后期计划通过对发动机进行减震处理并采用对震动不敏感的热电偶替代现有温度测量方式进行解决。

3.4.2 观测平台及观测仪器的不一致

基于地面固定点位的湍流通量观测与无人机快速主动式的湍流通量观测在基本观测方式上也明显不同:前者以局地斑块尺度的陆面湍流交换过程观测为主,表征一定时间段内的累积湍流通量值,观测易受湍流时间变化趋势影响;后者以更大空间尺度的陆面湍流交换过程观测为主,观测结果表征空间上瞬时的平均湍流通量值,易受湍流的空间变化趋势影响。

此外,地面和无人机所采用的主要观测仪器也不尽相同。地面涡动相关观测采用三维超声风速仪观测三

维风速,无人机则是采用多孔湍流探头结合无人机的速度和姿态修正来计算三维风速。虽然早期地面对比试验表明二者具有相似的观测精度^[24],但在实际飞行中无人机的观测高度、速度以及姿态等受大气湍流影响而无法始终保持稳定,这也是造成二者之间观测差异的一个潜在因素。在相同的观测条件下(地面固定台站或移动平台)开展无人机与传统地面通量观测的对比试验,是真实评估无人机通量观测系统观测能力的一个重要手段,而当前研究并未考虑观测仪器不同导致的观测差异。

3.4.3 垂直通量辐散及逆温层的影响

湍流通量的垂直辐散效应以及逆温层的影响也是造成地面与无人机通量观测差异的潜在主要原因。无人机通量观测高度一般远高于地面,观测结果受地表和夹卷层或逆温层的共同影响;感热和 CO_2 的主要驱动力来自于地表,空气温度和 CO_2 浓度一般随高度增加而降低,在对流条件下可能会造成无人机观测感热和 CO_2 通量的低估;而潜热通量的观测受夹卷层自下而上水汽输送过程的影响相对更大,在边界层高度较低的情况下,可能会导致无人机观测潜热通量的高估;对于摩擦风速,由于高空观测受地表摩擦作用更小,可能会导致一定程度的高估^[34–35]。本研究由于缺少对边界层高度的廓线观测,无法准确评估大气边界层对无人机观测的影响。但由于观测是在冬季进行,一般大气边界层高度较低,而平均对地飞行观测高度为 94 m,可能高于了近地层,在一定程度上增加了无人机与地面观测通量的系统性差异。

如何有效降低或避免垂直通量辐散和大气边界层条件对湍流通量观测的影响,提高观测通量的地面代表性是机载通量观测一直以来的研究重点,主要与近地层湍流通量的混合过程有关。目前主要采取两种方式:第一种方式假定大气边界层内通量的垂直变化是线性的,通过边界层内多个高度的观测(至少两个高度),采用线性插值将不同高度观测的湍流通量插值到地表,获得较为真实的地表通量观测值。相关研究指出,这种方式能够有效弥补对感热通量的低估问题,但对潜热和 CO_2 通量的补偿效果并不明显^[35]。第二种方式是使观测高度(z_m)尽量保持在近地层内,同时考虑到地表不同组分特征湍流通量的混合过程,飞行高度一般需要高于掺混高度(h_b)(即 $h_b < z_m < 10\%z_i$)。这是由于在掺混高度以下,湍流没有达到局地平衡条件,可认为不满足相似理论所需条件^[36–37],只有在掺混高度以上的近地层区域相似理论才能成立。

3.4.4 地面源区及地表异质性影响

不同的地面源区及源区内地表异质性影响可能会造成机载平台观测湍流通量结果的离散程度增大。本研究采用 Kljun 等^[38]建立的二维参数化拉格朗日足迹模型对无人机和地面的通量观测进行源区分析,输入参数包括观测高度(z_m)、观测高度处的平均风速($\bar{u}$)、大气边界层高(z_i)、莫宁-奥布霍夫长度(L_*)、侧向风速标准差(σ_v)、摩擦速度(μ^*)、风速方向(Dir)以及指定通量贡献率($R=80\%$)的足迹范围。以 COM4 观测架次的平均足迹覆盖范围为例,如图 9 所示,无人机通量观测源区平均覆盖面积约为 6.9 km^2 ,内部包括了芦苇、阔叶林、互花米草以及水体等多种下垫面;同观测时段的地面源区覆盖面积仅约 0.02 km^2 ,且下垫面均一(芦苇)。

为了分析无人机通量观测源区内不同下垫面对无人机与地面对比结果的影响,本研究选择了湍流通量发展较为显著期间的无人机观测数据(COM2、COM4、COM6)进行了足迹分析,并统计了无人机足迹区域内不同下垫面足迹权重的均值,忽略了平均足迹权重小于 0.05 的地类,结果如表 3 所示。可以发现,当足迹区域内芦苇占主要贡献时(COM4),无人机相对地面观测感热通量的相对差异最小(38%),地面和无人机观测均表明芦苇仍是微弱的碳汇;当冬小麦的足迹权重增加后(COM2、COM6),无人机观测的 CO_2 通量的碳汇强度明显高于地面观测,与观测时期处于冬小麦生长期的特征一致;对于潜热通量,在无人机飞行高度上可能由于地-气间的水汽混合过程及夹卷层的共同影响,降低了下垫面对潜热通量的直接影响^[34],因此并没有明显表现不同下垫面特征对二者观测差异的影响。

此外,本研究临时架设的地面涡动相关观测站的位置、地面通量的计算方式(15 min 平均)、朝向以及观测高度等条件也可能存在不恰当的情况,地面观测本身也存在一定程度的不确定性影响。同时,其他诸如云覆盖以及天气条件变化带来的不确定性也是导致地面和无人机观测差异的一个主要来源^[27];观测期间以阴

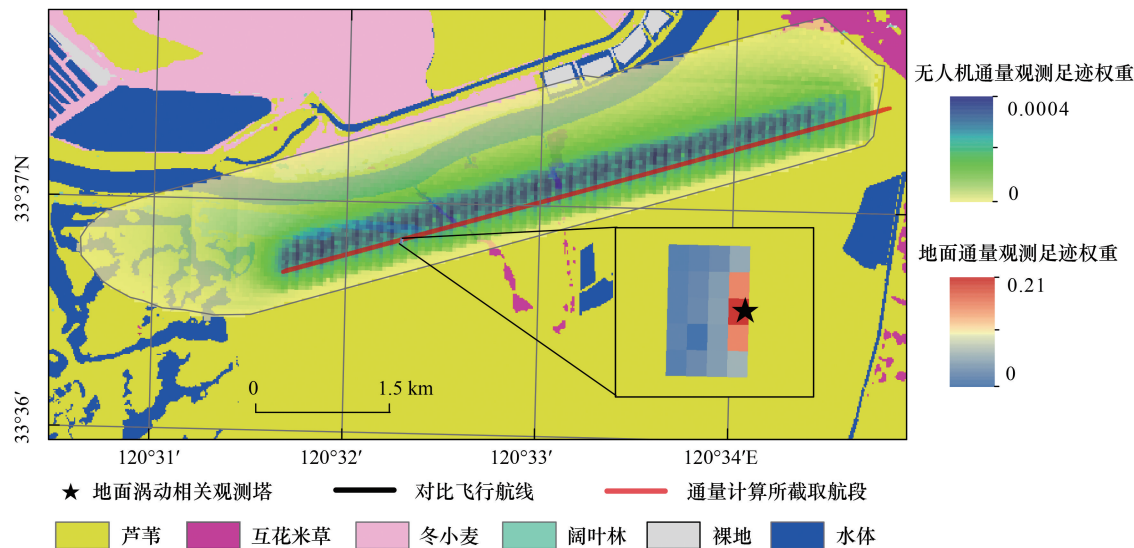


图 9 无人机与地面通量观测的足迹源区对比

Fig.9 The comparison of the footprint area between the UAV and the ground flux measurements

无人机足迹范围为 COM4 各航段通量足迹结果的平均,地面观测采用 12 日下午 13:00 至 13:15 之间的观测数据进行足迹计算

天和多云天气为主,云的存在会导致地面净辐射的巨大变化,而地表净辐射是陆面过程的主要驱动力;复杂天气系统的随机变化也会对地面和无人机的观测造成不同程度的影响。

表 3 典型观测架次无人机与地面通量观测结果对比与无人机通量足迹源区内主要地类的足迹权重统计

Table 3 The comparison of the fluxes results between the ground and UAV over the typical UAV flights, and the statistics of the footprint weight of the main land cover type in the area of the UAV footprint region

标识 Identification	平台 Platform	通量观测结果 Results of fluxes measurement			无人机观测主要下垫面足迹权重均值 Footprint weight of the main land cover type in the footprint area		
		$F_c/$ ($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$)	$H/$ (W/m^2)	$LE/$ (W/m^2)	芦苇 <i>Phragmites australis</i>	冬小麦 Winter wheat	水体 Water
COM2	地面	-2.51 ± 2.01	153.39 ± 25.51	53.76 ± 7.85	0.54	0.23	0.18
	UAV	-5.47 ± 0.37	80.07 ± 8.51	69.00 ± 12.60			
COM4	地面	-0.16 ± 1.13	102.12 ± 14.75	39.72 ± 6.66	0.84	0.03	0.08
	UAV	-2.55 ± 1.57	62.82 ± 9.76	54.16 ± 21.00			
COM6	地面	-2.20 ± 2.10	190.48 ± 28.77	34.69 ± 5.30	0.50	0.24	0.19
	UAV	-4.07 ± 0.93	92.04 ± 37.41	50.32 ± 15.91			

F_c :CO₂通量 CO₂ flux; H :感热通量 sensible heat flux; LE :潜热通量 latent heat flux;UAV:无人驾驶飞行器 Unmanned Aerial Vehicle

4 结论与展望

基于无人机平台的涡动相关通量观测技术是机载通量观测方法的最新发展方向,在区域尺度地表生态系统通量的直接观测方面极具优势。本文通过以 2020 年 12 月在江苏省盐城市湿地珍禽国家级自然保护区开展的无人机与地面通量观测对比试验,对试制的无人机通量观测系统的湍流通量观测能力进行了初步应用评价。主要结论如下:

(1) 无人机观测湍流变量的功率谱和协谱分析结果表明:无人机涡动相关通量观测系统能够实现对大气高频湍流信号的采样,满足涡动相关方法观测的基本要求。气温脉动的观测受发动机高频噪声影响较为显著,后期可通过优化无人机减震措施并改善气温脉动的观测方式予以解决。

(2) 无人机观测湍流通量与地面观测相比具有较好的一致性,其中无人机观测的感热与 CO_2 通量相比地面观测出现了低估,潜热通量和摩擦风速出现了高估。无人机观测本身的系统误差、地面和无人机采取的不同观测方式、观测仪器之间的差异、不同的地面源区、地表异质性以及垂直通量辐散和逆温层的影响可能是造成二者差异的潜在主要因素。

当前,我国正处于机载通量观测技术发展的早期阶段,开展基于无人机平台的机载通量观测技术在相关软硬件系统、数据处理分析以及野外应用等方面的研究能够有效提升我国在区域尺度生态系统通量观测与模拟等领域的研究能力,服务于我国碳监测、全球气候变化等重大需求。最后,根据当前研究不足,未来还将从以下两个方面进一步提升无人机涡动相关通量观测系统的实用性和可靠性:

(1) 在观测系统方面,进一步降低并消除无人机自身运行对科学观测仪器的影响,提高观测系统的集成性及可扩展性;进一步降低无人机通量观测系统的操作复杂性,实现易操作、易部署、最低人员保障的应用需求。开展更为全面的无人机通量观测误差分析,研究不同观测变量误差对无人机通量观测的影响,并对观测中存在的系统误差(包括观测仪器本身的系统误差以及采样过程中的系统误差)和随机误差进行评估。在地面移动平台上开展无人机通量观测系统与传统地面通量观测的对比试验,整体评估无人机与传统通量观测手段由于平台与观测仪器不同造成的差异水平。

(2) 在观测机理方面,针对垂直通量辐散、大气边界层条件以及地表异质性等对机载通量观测具有显著影响的关键问题,通过结合地面通量观测网络、闪烁仪以及地基遥感垂直观测系统等不同观测方式开展协同试验,厘清垂直通量辐散、大气边界层以及地表异质性等因素对机载通量观测影响的过程机制,提升观测结果的可靠性及可分析性。

致谢:感谢江苏盐城国家级珍禽自然保护区管理处在野外观测试验实施中给予的帮助。

参考文献 (References):

- [1] 吕一河, 卫伟. 区域生态学时代来临——第十八届中国生态学大会区域生态专题研讨会述评. 生态学报, 2020, 40(3): 1125-1127. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx? filename=STXB202003036&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>
- [2] 于贵瑞, 张雷明, 张扬建, 杨萌. 大尺度陆地生态系统状态变化及其资源环境效应的立体化协同联网观测. 应用生态学报, 2021, 32(6): 1903-1918. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx? filename=YYSB202106001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>
- [3] 李新, 晋锐, 刘绍民, 葛咏, 肖青, 柳钦火, 马明国, 冉有华. 黑河遥感试验中尺度上推研究的进展与前瞻. 遥感学报, 2016, 20(5): 921-932. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx? filename=YGXB201605021&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>
- [4] 张圆, 贾贞贞, 刘绍民, 徐自为, 徐同仁, 姚云军, 马燕飞, 宋立生, 李相, 胡晓, 王泽宇, 郭枝虾, 周纪. 遥感估算地表蒸散发真实性检验研究进展. 遥感学报, 2020, 24(8): 975-999. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx? filename=YGXB202008004&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>
- [5] Jia Z Z, Liu S M, Xu Z W, Chen Y J, Zhu M J. Validation of remotely sensed evapotranspiration over the Hai River Basin, China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2012, 117(D13). <https://doi.org/10.1029/2011jd017037>
- [6] 张功, 郑宁, 张劲松, 孟平. 光闪烁方法测算区域蒸散研究进展. 生态学报, 2018, 38(8): 2625-2635. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx? filename=STXB201808003&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>
- [7] Li X, Liu S M, Li H X, Ma Y F, Wang J H, Zhang Y, Xu Z W, Xu T R, Song L S, Yang X F, Lu Z, Wang Z Y, Guo Z X. Intercomparison of six upscaling evapotranspiration methods: from site to the satellite pixel. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, 123(13): 6777-6803. <https://doi.org/10.1029/2018jd028422>
- [8] Zhao J B, Olivas P C, Kunwor S, Malone S L, Staudhammer C L, Starr G, Oberbauer S F. Comparison of sensible heat flux measured by large aperture scintillometer and eddy covariance in a seasonally-inundated wetland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 259: 345-354. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.05.026>
- [9] Liu S M, Xu Z W, Song L S, Zhao Q Y, Ge Y, Xu T R, Ma Y F, Zhu Z L, Jia Z Z, Zhang F. Upscaling evapotranspiration measurements from multi-site to the satellite pixel scale over heterogeneous land surfaces. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2016, 230/231: 97-113. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.04.008>
- [10] 陈琪婷. 地表水热通量模拟尺度效应研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院遥感与数字地球研究所), 2017. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx? dbcode=CDFD&filename=1017720988.nh>
- [11] Gioli B, Miglietta F, Vaccari F P, Zaldei A, De Martino B. The Sky Arrow ERA, an innovative airborne platform to monitor mass, momentum and energy exchange of ecosystems. *Annals of Geophysics*, 2009, 49(1): 109-116. <https://doi.org/10.4401/ag-3159>
- [12] Desjardins R L, Worth D E, MacPherson J I, Bastian M, Srinivasan R. Flux measurements by the NRC Twin Otter atmospheric research aircraft: 1987-2011. *Advances in Science and Research*, 2016, 13: 43-49. <https://scholar.cnki.net/Detail/index/undefined/SJCOBFD848E16087FC8908B4F2978969F67E>
- [13] Gioli B, Miglietta F, de Martino B, Hutjes R W A, Dolman H A J, Lindroth A, Schumacher M, Sanz M J, Manca G, Peressotti A, Dumas E J.

- Comparison between tower and aircraft-based eddy covariance fluxes in five European regions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, 127(1/2): 1-16. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2004.08.004>
- [14] Moene A, Meijninger W, Kohsiek W. Validation of fluxes of an extra large aperture scintillometer at Cabauw using sky arrow aircraft flux measurements. *Proceedings of 17th*, 2006 https://www.researchgate.net/profile/F-Miglietta/publication/40114815_Validation_of_fluxes_of_an_extra_large_aperture_scintillometer_at_Cabauw_using_Sky_Arrow_aircraft_flux_measurements/links/0fcfd50f34e9383fbb000000/Validation-of-fluxes-of-an-extra-large-aperture-scintillometer-at-Cabauw-using-Sky-Arrow-aircraft-flux-measurements.pdf
- [15] Culf A D, Fisch G, Malhi Y, Nobre C A. The influence of the atmospheric boundary layer on carbon dioxide concentrations over a tropical forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1997, 85(3/4): 149-158. [http://dx.doi.org/10.1016/S0168-1923\(96\)02412-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0168-1923(96)02412-4)
- [16] 孙义博, 苏德, 全占军, 商豪律, 耿冰, 林兴稳, 荆平平, 包扬, 赵艳华, 杨巍. 无人机涡动相关通量观测技术研究综述. *地球科学进展*, 2019, 34(8): 842-854. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=DXJZ201908009&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>
- [17] Kral S, Reuder J, Vihma T, Suomi I, O'Connor E, Kouznetsov R, Wrenger B, Rautenberg A, Urbancic G, Jonassen M, Båserud L, Maronga B, Mayer S, Lorenz T, Holtslag A, Steeneveld G J, Seidl A, Müller M, Lindenberg C, Langohr C, Voss H, Bange J, Hundhausen M, Hilsheimer P, Schygulla M. Innovative strategies for observations in the Arctic atmospheric boundary layer (ISOBAR)—the hailuoto 2017 campaign. *Atmosphere*, 2018, 9(7): 268. <https://doi.org/10.3390/atmos9070268>
- [18] Jacob J, Chilson P, Houston A, Smith S. Considerations for atmospheric measurements with small unmanned aircraft systems. *Atmosphere*, 2018, 9(7): 252. <https://doi.org/10.3390/atmos9070252>
- [19] Elston J, Argrow B, Stachura M, Weibel D, Lawrence D, Pope D. Overview of small fixed-wing unmanned aircraft for meteorological sampling. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2015, 32(1): 97-115. <https://doi.org/10.1175/jtech-d-13-00236.1>
- [20] Reineman B D, Lenain L, Statom N M, Melville W K. Development and testing of instrumentation for UAV-based flux measurements within terrestrial and marine atmospheric boundary layers. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2013, 30(7): 1295-1319. <https://doi.org/10.1175/jtech-d-12-00176.1>
- [21] Bärffuss K, Pätzold F, Alstädter B, Kathe E, Nowak S, Bretschneider L, Bestmann U, Lampert A. New setup of the UAS ALADINA for measuring boundary layer properties, atmospheric particles and solar radiation. *Atmosphere*, 2018, 9(1): 28. <https://doi.org/10.3390/atmos9010028>
- [22] 孙义博. 机载涡动相关区域湍流水热通量观测方法研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院遥感与数字地球研究所), 2018. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CDFD&filename=1018995601.nh>
- [23] Sun Y B, Sude B, Geng B, Ma J Y, Lin X W, Hao Z Z, Jing W J, Chen Q T, Quan Z J. Observation of the winter regional evaporative fraction using a UAV-based eddy covariance system over wetland area. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2021, 310: 108619. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108619>
- [24] Sun Y B, Ma J Y, Sude B, Lin X W, Shang H L, Geng B, Diao Z Y, Du J Q, Quan Z J. A UAV-based eddy covariance system for measurement of mass and energy exchange of the ecosystem: preliminary results. *Sensors*, Basel, Switzerland, 2021, 21(2): 403. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33430163/>
- [25] Crawford T L, McMillen R T, Dobosy R J, MacPherson I. Correcting airborne flux measurements for aircraft speed variation. *Boundary-Layer Meteorology*, 1993, 66(3): 237-245. <http://dx.doi.org/10.1007/BF00705476>
- [26] Sun Y B, Jia L, Chen Q T, Zheng C L. Optimizing window length for turbulent heat flux calculations from airborne eddy covariance measurements under near neutral to unstable atmospheric stability conditions. *Remote Sensing*, 2018, 10(5): 670. <https://doi.org/10.3390/rs10050670>
- [27] Hannun R A, Wolfe G M, Kawa S R, Hanisco T F, Newman P A, Alfieri J G, Barrick J, Clark K L, DiGangi J P, Diskin G S, King J, Kustas W P, Mitra B, Noormets A, Nowak J B, Thornhill K L, Vargas R. Spatial heterogeneity in CO₂, CH₄, and energy fluxes: insights from airborne eddy covariance measurements over the Mid-Atlantic region. *Environmental Research Letters*, 2020, 15(3): 035008. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab7391>
- [28] Hutjes R W A, Vellinga O S, Gioli B, Miglietta F. Dis-aggregation of airborne flux measurements using footprint analysis. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2010, 150(7/8): 966-983. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2010.03.004>
- [29] Kustas W P, Anderson M C, French A N, Vickers D. Using a remote sensing field experiment to investigate flux-footprint relations and flux sampling distributions for tower and aircraft-based observations. *Advances in Water Resources*, 2006, 29(2): 355-368. <http://dx.doi.org/10.1016/j.advwatres.2005.05.003>
- [30] Mauder M, Desjardins R L, MacPherson I. Creating surface flux maps from airborne measurements: application to the Mackenzie area GEWEX study MAGS 1999. *Boundary-Layer Meteorology*, 2008, 129(3): 431-450. <http://dx.doi.org/10.1007/s10546-008-9326-6>
- [31] Kolmogorov A N, Levin V, Hunt J C R, Phillips O M, Williams D. The local structure of turbulence in incompressible viscous fluid for very large Reynolds numbers. *Proceedings of the Royal Society of London Series A: Mathematical and Physical Sciences*, 1991, 434(1890): 9-13. <https://doi.org/10.1098/rspa.1991.0075>
- [32] Mahrt L, Vickers D, Sun J L. Spatial variations of surface moisture flux from aircraft data. *Advances in Water Resources*, 2001, 24(9/10): 1133-1141. [http://dx.doi.org/10.1016/S0309-1708\(01\)00045-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0309-1708(01)00045-8)
- [33] Mann J, Lenschow D H. Errors in airborne flux measurements. *Journal of Geophysical Research*, 1994, 99(D7): 14519. <https://doi.org/10.1029/94jd00737>
- [34] Mahrt L. Flux sampling errors for aircraft and towers. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1998, 15(2): 416-429. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(1998\)015%3c0416:fsefaa%3e2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(1998)015%3c0416:fsefaa%3e2.0.co;2)
- [35] Bange J, Zittel P, Spieß T, Uhlenbrock J, Beyrich F. A new method for the determination of area-averaged turbulent surface fluxes from low-level flights using inverse models. *Boundary-Layer Meteorology*, 2006, 119(3): 527-561. <http://dx.doi.org/10.1007/s10546-005-9040-6>
- [36] Mahrt L. Surface heterogeneity and vertical structure of the boundary layer. *Boundary-Layer Meteorology*, 2000, 96(1): 33-62. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1002482332477>
- [37] 周成, 陈家宜, 蔡旭晖. 非均匀地表的湍流通量和掺混高度. *北京大学学报: 自然科学版*, 2006, 42(3): 315-319. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=BJDZ200603005&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>
- [38] Kljun N, Calanca P, Rotach M W, Schmid H P. A simple two-dimensional parameterisation for Flux Footprint Prediction (FFP). *Geoscientific Model Development*, 2015, 8(11): 3695-3713. <https://doi.org/10.5194/gmd-8-3695-2015>