

南京地区大口径闪烁仪与涡动相关仪感热通量观测对比

王亮^{1,2} 胡凝^{1,2} 王咏薇^{1,2} 王璐瑶^{1,2} 赵翔^{1,2} 刘寿东^{1,2*}

(¹南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044; ²南京信息工程大学大气环境中心, 南京 210044)

摘要 湍流是地表与大气间物质与能量交换的主要形式,因而准确观测湍流通量历来是城市边界层研究的重要问题。本研究基于架设在南京信息工程大学内的大口径闪烁仪 (large aperture scintillometer, LAS) 和涡动相关仪 (eddy covariance, EC) 的同步观测,对比了 LAS 测得的感热通量和 EC 测得的感热通量的差异,结合归一化植被指数 (NDVI) 和归一化建筑指数 (NDBI),分析了下垫面不均匀性对于两种仪器测得感热通量的影响。结果表明:城市地区 LAS 与 EC 具有较好的相关性 ($R^2=0.76$),拟合线斜率为 0.95;白天, LAS 的感热通量大于 EC 的感热通量,二者差值为 $18.8\sim 39.4\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$;夜间,二者均在零值附近波动,差值为 $4.8\sim 28.7\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$;月尺度上两种仪器的差值 8 月最大,其次为 7 月、4 月、6 月最小;差异产生的主要原因是风向造成的通量源区不同;通量源区内的 NDVI 值越大,感热通量与净辐射之比越小,二者呈显著负相关 ($k=-0.34, P<0.05$);NDBI 值越大,感热通量与净辐射之比越大,二者呈显著正相关 ($k=1.15, P<0.05$)。

关键词 大口径闪烁仪; 涡动相关; 感热通量; 不均匀下垫面; 通量源区

Comparative analysis of sensible heat flux observed by large aperture scintillometer and eddy-covariance system in Nanjing. WANG Liang^{1,2}, HU Ning^{1,2}, WANG Yong-wei^{1,2}, WANG Lu-yao^{1,2}, ZHAO Xiang^{1,2}, LIU Shou-dong^{1,2*} (¹Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; ²Yale-NUIST Center on Atmospheric Environment, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China).

Abstract: Turbulence is one of the key processes for energy exchange between land surface and atmosphere. Accurate observation on turbulent fluxes has been an important issue in the researches on urban boundary layer. Based on simultaneous observation of a large aperture scintillometer (LAS) and an eddy covariance system (EC) installed in the campus of Nanjing University of Information Science and Technology, we compared sensible heat flux measured by those two systems. The effects of underlying surface heterogeneity on the sensible heat flux were analyzed combined with the normalized vegetation index (NDVI) and the normalized building index (NDBI). The results showed that LAS and EC had a good correlation ($R^2=0.76$), with a regression slope of 0.95. During the daytime, sensible heat flux obtained from LAS was larger than that by EC, and their difference varied between 18.8 and $39.4\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. At night, both of them fluctuated around zero, and the difference varied between 4.8 and $28.7\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. On the monthly scale, the difference between LAS and EC was the largest in August, followed by July and April, and the least in June. The difference attributed to the different footprints caused by the changes of wind direction. NDVI in the footprint was negatively correlated with sensible heat flux to net radiation ($k=-0.34, P<0.05$). NDBI in the footprint was significantly positively correlated with ratio of

sensible heat flux to net radiation ($k=1.15$, $P<0.05$).

Key words: large aperture scintillometer (LAS); eddy covariance (EC); sensible heat flux; heterogenous underlying surface; footprint.

准确测量地表湍流通量对于提高未来天气、空气质量、洪水风险评估和城市规划等方面的预测能力至关重要。地表湍流通量的测量方法主要分为两类:第一类是基于单点的测量,比如涡度相关法(王春林等,2007;Jung *et al.*,2015)、波文比法(吴家兵等,2005)以及空气动力学方法(黄妙芬,2003)等;第二类是基于区域的测量,比如光闪烁测量法(Liu *et al.*,2013)、遥感图像的反演(王丽娟等,2012)等。目前,涡度相关系统(eddy covariance,EC)是测量地表湍流通量应用最为广泛的技术。EC利用安装在距离地表数米的超声波风速仪和红外气体分析仪,通过测量风速、声波温度以及气体浓度(通常为水蒸气和 CO_2)来计算得到感热通量。但涡度相关法要求下垫面平坦均一,这在城市下垫面是很难实现的,从而导致了城市地区涡度相关法的基本假设并不能完全满足。与涡度相关法不同,光闪烁测量法是区域测量方法,其测量范围从几百米延伸至几十千米。大口径闪烁仪(Large Aperture Scintillometer, LAS)作为光闪烁测量法的代表性仪器,不仅可以获取非均一下垫面的湍流热通量,而且也能实现传统地面通量的尺度扩展与遥感监测通量的地面验证(徐安伦等,2017)。

最早开展的LAS观测试验是在均匀的农业下垫面上进行的(Chehbouni *et al.*,1999)。其后,许多研究者将LAS与EC、遥感等方法进行对比,发现 H_{LAS} 与其他方法的相关系数为0.82~0.97,拟合线的斜率在0.98~1.07之间变化(Watts *et al.*,2000;Hoedjes *et al.*,2002;刘绍民等,2010)。而城市地区LAS的首次实践要追溯到2006年Largouarde等(2006)在马赛市区进行的 H_{LAS} 与 H_{EC} 对比试验。该地区建筑物高度基本一致,结果表明 H_{LAS} 和 H_{EC} 拟合线斜率在0.96~1.09。其后,国内外学者又陆续在城市地区开展了一系列LAS和EC的对比试验(Ward *et al.*,2014;Zhang *et al.*,2015)。发现,尽管 H_{LAS} 和 H_{EC} 的一致性较好,但LAS要比EC高估2%~17%不等。产生这种差异的一个重要原因是LAS环境因子和地表参数的设置。为此,Crawford等(2017)在伦敦城区研究了不同参数设置对 H_{LAS} 的敏感性,结果表明,有效高度和风速对两种仪器一

致性好坏的影响最大。除此之外,研究者普遍认为,不同观测方法的空间代表性是有差异的。由于安装位置不同,LAS、EC的通量源区大小、源区内的地物类型及其占比是不同的,它是造成感热通量差异的主要因素(Ward *et al.*,2014)。但是,在复杂下垫面条件下,通量源区对 H_{LAS} 的影响一直没有被定量化。

本研究通过由安装在南京城市下垫面的LAS和EC得到的同步观测数据,比较两种仪器感热通量的异同,并结合遥感手段探究LAS和EC的感热通量差异与下垫面状况的关系。

1 材料与方法

1.1 试验概况

试验区位于江苏省南京市浦口区南京信息工程大学校园内(118°72'E,32°20'N,海拔32 m),属于亚热带季风气候,降水充沛。观测期间2018年4月、6—8月受季风影响,降水量占年总量的60%以上。试验点下垫面十分复杂(图1),建筑、水泥地面等不透水层占比很大,占到42.85%;植被占比35.82%,主要以水杉(*Metasequoia glyptostroboides*)、法国梧桐(*Platanus orientalis*)等落叶乔木和樟树(*Cinnamomum bodinieri*)等常绿乔木为主。

大口径闪烁仪LAS(MKII, Kipp&Zonen, 荷兰)的安装位置如图1所示:LAS发射端和接收端呈东北-西南方向,光束路径与夏季盛行风向的夹角较大,以保证感热通量值的代表性。LAS发射端高度为36 m,接收端高度为26 m,光路长度为1010 m。由于闪烁仪的光路高度沿路径不恒定,因此计算过程中要使用有效高度 Z_{LAS} 来代替光路上每个点的高度(Hartogensis *et al.*,2003)。 Z_{LAS} 是整个光束路径的加权值,表示折射率结构参数 C_n^2 的测量高度。本文利用Evation中的数字地形模块求得 Z_{LAS} 为17 m。

EC系统由超声风速仪(CSAT3, Campbell, 美国)和红外气体分析仪(LI-7500, LI-COR, 美国)组成。它们架设在LAS光路西北方向的一座铁塔上,与光路的垂线距离约为420 m,安装高度为60 m,仪器采样频率为10 Hz。铁塔上还架设了三层(10、30和60 m高度)温度、风速和风向的传感器,用于LAS稳定度的判断以及两种仪器通量源区的确定。

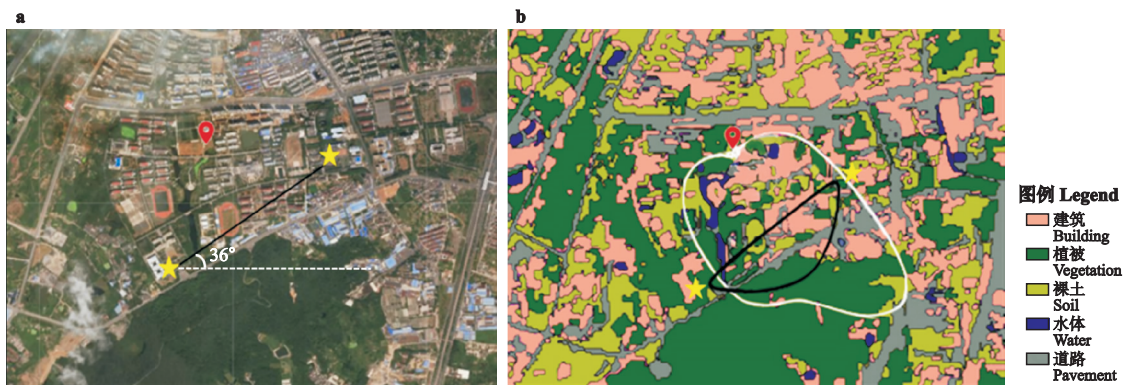


图1 仪器位置示意图

Fig.1 Instrument location distribution at the test site

注: 图a黄色星号表示LAS接收端和发射端,红色标记表示EC站,白线和黑线区域分别是风向 144° 、风速 $2.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时EC和LAS的80%通量源区。

Note: Figure a, the yellow asterisk indicates the LAS receiver and transmitter, the red marker indicates the EC station, the white line and the black line area are the EC and LAS source area when wind direction is 144° and velocity is $2.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, respectively. The outermost circle is 80% footprint area.

1.2 LAS的测量原理

LAS发射端在发出一定波长的光束后,由于大气温度、湿度和气压波动引起大气折射系数的波动,光束强度会发生改变。接收到的光强信号(I)与空气折射率的结构参数(C_n^2)之间的关系为(Wang *et al.*, 1978):

$$C_n^2 = 1.12 \sigma_{\text{int}}^2 D^{7/3} \quad (1)$$

式中: σ_{int}^2 为接收端光强信号的自然对数的方差, D 和 L 表示发射仪和接收仪的光学孔径和光径长度。

波长位于近红外波段的大口径闪烁仪对温度变化相对于湿度等物理量变化更加敏感。折射率结构参数 C_n^2 可转变为温度结构参数 C_T^2 (Wesely *et al.*, 1976),即:

$$C_T^2 = C_n^2 \left(\frac{T_a^2}{-0.78 \times 10^{-6} P} \right)^2 \left(1 + \frac{0.03}{\beta} \right)^2 \quad (2)$$

式中: T_a 是空气温度,采用30 m高度处温度传感器值; p 是大气压强,采用涡度相关系统的输出值; β 是波文比。由于LAS发射的波长为880 nm的电磁波主要受气温影响,水汽影响不大,所以在计算 H_{LAS} 时, β 可假设为定值。

根据Monin-Obukhov相似理论(MOST),由式(2)~(4)式迭代计算可以得到温度尺度 T_* (Wyn-gaard *et al.*, 1971; De Bruin *et al.*, 1995):

$$L = \frac{u_*^2 T_a}{g \kappa T_*} \quad (3)$$

$$T_*^2 = \frac{C_T^2 (Z_{\text{LAS}} - d)^{2/3}}{f_T(\zeta)} \quad (4)$$

式中: u_* 是摩擦风速; k 是卡曼常数,一般取0.4;

Z_{LAS} 是闪烁仪有效高度(Hartogensis *et al.*, 2003); d 是零平面位移,由风廓线计算得出; $f_T(\zeta)$ 是稳定度普适函数, $\zeta = z/L$ 为层结参数。当大气不稳定时, $f_T(\zeta) = 4.9(1 - 6.1\zeta)^{-2/3}$;当大气稳定时, $f_T(\zeta) = 4.9(1 + 2.2\rho\zeta^{2/3})$ (Andreas, 1988; Frezen *et al.*, 1992; Hill *et al.*, 1992; Thiermann *et al.*, 1992)。

最后,感热通量 H_{LAS} 可由下式得出:

$$H_{\text{LAS}} = -\rho C_p u_* T_* \quad (5)$$

式中: ρ 和 C_p 分别表示空气密度和空气定压比热。

1.3 LAS通量源区的确定

Meijninger等(2002)首次将通量源区应用于LAS,该方法是在单点通量印痕函数基础上接合沿LAS光路方向的权重函数来计算的。结合彭谷亮等(2007)的研究可得LAS印痕函数的表达式如下:

$$f_{\text{LAS}}(x', y', Z_m) = \int_{x_2}^{x_1} w(x) f(x - x', y - y', Z_m) dx \quad (6)$$

式中: f_{LAS} 是LAS的通量印痕函数; f 是单点观测的通量印痕函数,结合Kormann等(2001)提出的印痕函数解析解,侧向积分的通量印痕函数表示为 $f = \frac{1}{\Gamma(L)} \frac{N^L}{x^{1+L}} e^{-N/x}$; Z_m 表示观测高度; x_1 和 x_2 表示LAS发射端和接收端的位置; x 和 y 表示光路上每个点的坐标; x' 和 y' 表示光路上每个点上风方向各点的坐标; $w(x)$ 表示权重函数。基于以上理论利用Surfer绘制出LAS的通量源区。

1.4 EC通量源区的确定

EC通量源区是利用Kljun等(2015)建立的KL

模型来确定的。KL 模型利用粒子随机逆向轨迹来表征气体扩散规律。该模型主要定义了迎风方向的估计函数 x_* 和侧风向足迹函数 F_* , 表达式如下(冯俊婷等, 2017):

$$x_* = \left(\frac{\sigma_w}{u_*} \right)^{\alpha_1} \frac{x}{Z_m'} \tag{7}$$

式中: σ_w 是垂直风速脉冲标准差; x 是贡献源区下垫面点源到观测点上风方向的距离; Z_m' 是塔高 Z_m 与零平面位移 d 的差值; α_1 是常数。

$$F_* = \left(\frac{\sigma_w}{u_*} \right)^{\alpha_2} \left(1 - \frac{Z_m'}{h} \right)^{-1} Z_m \bar{f} \tag{8}$$

式中: $\bar{f}$ 是侧向积分通量贡献函数; h 是边界层高度; α_2 是常数。图 1 中 EC 通量源区是利用 Tovi 软件来确定的。

1.5 LAS 和 EC 测得感热通量的数据后处理

为了确保 LAS 观测数据的可靠性, 首先剔除降水期间的数据。此外, 原始的观测数据 C_n^2 还受饱和效应以及信号强度较小的影响, 因此剔除了超过 C_n^2 饱和上限 (3.88×10^{-13}) 和信号强度较小的 C_n^2 值 (1.02×10^{-17}) (白洁等, 2010)。最后采用 LAS 系统数据处理软件 Evation 来计算感热通量。

EC 数据选用 Eddypro 6.2.1 软件进行处理。原始数据经过去野点、坐标旋转、频率响应校正、超声虚温校正以及 WPL 校正等步骤后, 输出感热通量的 30 min 平均值(庄金鑫等, 2013)。Eddypro 处理结果以湍流稳定性等参数为指标, 将通量数据的质量划分为“0, 1, 2”(高, 中, 低) 3 个等级, 在接下来的研究中仅选取高质量数据进行对比分析。

1.6 NDVI、NDBI 的计算与遥感影像的处理

当前被广泛认可的用来表征植被生长状态、植被覆盖度的指数为归一化植被指数 NDVI(何月等, 2012), 即:

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \tag{9}$$

归一化建筑指数(NDBI)是量化研究区域内建筑物密集程度的指标(陈志强等, 2006), 即:

$$NDBI = \frac{MIR - NIR}{MIR + NIR} \tag{10}$$

式中, R 为红光波段, NIR 为近红外波段, MIR 为中红外波段。

这里选择了 30 m 空间分辨率的 Landsat 8 遥感影像, 在 ENVI 中经过辐射定标、大气校正等处理

后, 计算得到 NDVI 和 NDBI。由于 Landsat 8 卫星每个月仅过境南京两次, 且 4—8 月南京地区云量较大、降水频发, 所以从 4 月和 6 月各挑选了一幅清晰的遥感影像来计算通量源区内的 NDVI 和 NDBI。

2 结果与分析

2.1 LAS 和 EC 测得感热通量的比较分析

对比 2018 年 4 月和 6—8 月期间 LAS 和 EC 两种仪器测得的感热通量可以看出(图 2), 二者具有较好的一致性。 H_{LAS} 和 H_{EC} 之间拟合公式的斜率为 0.95, 拟合优度 $R^2 = 0.76$, 均方根误差 $RMSE = 36.3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。值得注意的是, 图 2 中有部分夜间观测值位于 $y=0$ 这条线上, 即 $H_{LAS} = 0$, H_{EC} 不为 0。这是因为, 夜间大气稳定度基本为近中性或者稳定状态, 折射率结构参数 C_n^2 非常小。此时, 相似性原理(MOST)往往不再适用, 最终导致 H_{LAS} 近似为 0。

图 3 是 LAS 和 EC 在 2018 年 4 月和 6—8 月感热通量的日变化情况。需要说明的是, 由于仪器的偶发故障以及南京地区 7、8 月降水多发, 因此从每月挑选 2 周的高质量数据集来进行分析。图 3 表明, H_{LAS} 和 H_{EC} 具有相同的日变化特征。日出后, 随着净辐射不断增大, 地面升温, 感热通量也不断增大, 其中 H_{LAS} 的增速更快, 比 H_{EC} 提前约 2~3 h 为正, 因此 H_{LAS} 和 H_{EC} 的差值越来越大, 两者的差值在 $18.8 \sim 39.4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。感热通量在中午达到峰值。下午, 随着净辐射不断减小, 地面对大气的加热作用减弱, 感热通量在不断减小, H_{LAS} 和 H_{EC} 的差值也逐渐减小, 傍晚 H_{LAS} 比 H_{EC} 滞后约 2 h 为负值。

夜间两种仪器观测结果在零值附近变化, 差值为 $4.8 \sim 28.7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。但夜间 H_{LAS} 和 H_{EC} 一致性较

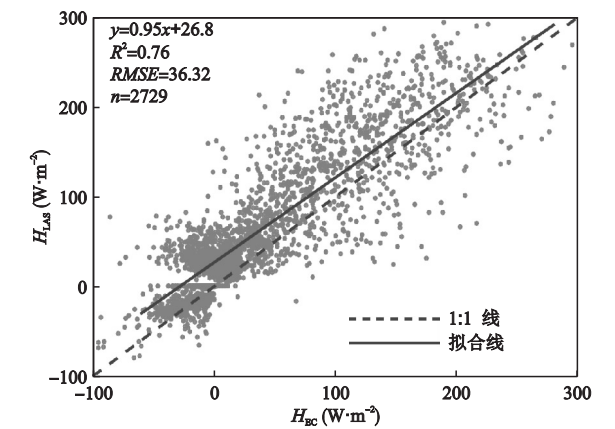


图 2 2018 年 4 月、6—8 月期间 H_{EC} 和 H_{LAS} 的一致性分析
Fig.2 Consistency analysis of H_{EC} and H_{LAS} during April, June and August in 2018

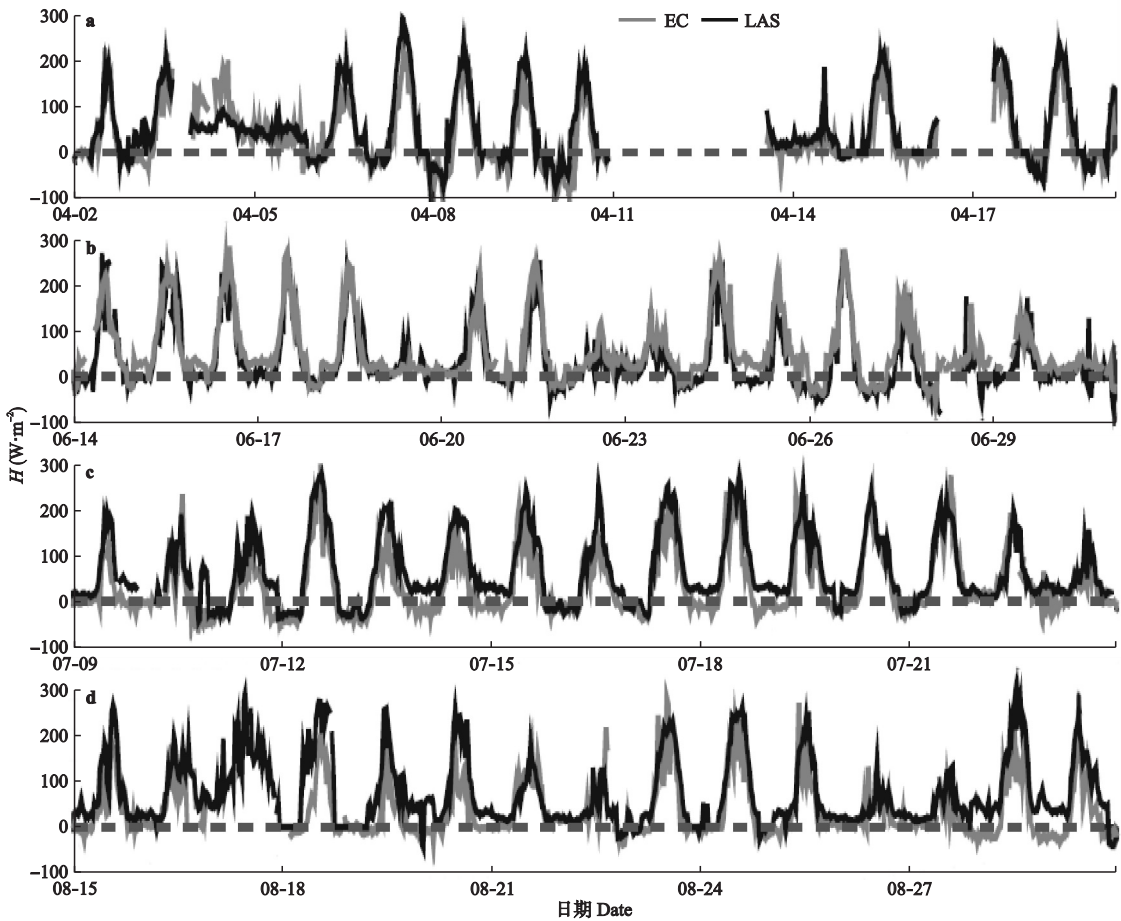


图 3 2018 年 4 月 2—19 日 (a)、6 月 14—30 日 (b)、7 月 9—23 日 (c) 以及 8 月 15—29 日 (d) 南京信息工程大学观测点 H_{EC} 、 H_{LAS} 变化
Fig.3 The variation of the H_{EC} and H_{LAS} at NUIST site on April 2–19 (a), June 14–30 (b), July 9–23 (c), and August 15–29 (d)

差,尤其在稳定度转换期间 H_{LAS} 和 H_{EC} 经常符号不同。主要有以下原因:①大气稳定度的转换时间随着位置的变化而变化,即使沿着闪烁仪的光路方向,不同点在相同时刻的稳定性也可能不同。所以在某一时刻两种仪器得到的感热通量符号就有可能不同。②由于两种仪器通量源区有所差异,而源区内下垫面特征对稳定度影响很大,因此在某一时间段内 LAS 和 EC 稳定度转换的次数就可能不相同,比如 7 月 15 号全天 H_{LAS} 稳定度转化一次(夜间)而 H_{EC} 转化两次(凌晨和夜间均发生转换)。③LAS 判断感热通量方向的依据是两层温差,而温度传感器架设在 EC 塔上,与 LAS 光路的水平距离为 420 m。所以使用 EC 站的温度数据可能会误判夜间 LAS 周围实际大气稳定度,导致夜间 H_{LAS} 不准确。④夜间和白天的波文比 β 可能不一致,而 β 对莫宁-奥布霍夫长度影响较大,最终影响夜间感热通量的计算。

图 4 是观测期间不同月份感热通量的日平均变化情况。 H_{LAS} 、 H_{EC} 和 R_n 日变化趋势一致表明净辐射是感热通量的决定因子。月变化表现为 7 月感热通量水平最高, H_{LAS} 和 H_{EC} 的最大值分别为 185.1 和 146.7 $W \cdot m^{-2}$;4、6 月感热通量值接近,仅次于 7 月;8 月感热通量水平最低, H_{LAS} 为 162.9 $W \cdot m^{-2}$, H_{EC} 为 119.8 $W \cdot m^{-2}$ 。这是因为南京地区 2018 年 7 月降水非常集中,温度很高,净辐射达到观测期间最高水平($R_{nmax}=556.6 W \cdot m^{-2}$)。而 4 月春雨连绵,6 月江淮梅雨使得感热通量稍小;8 月虽然温度较高,但由于云量较大,净辐射相对其他 3 个月偏小($R_{nmax}=452.3 W \cdot m^{-2}$),因此感热通量最小。从图 4 还能看出,不同月份 H_{LAS} 与 H_{EC} 的差值具有一定差异。8 月 H_{LAS} 和 H_{EC} 差值最大,变化幅度为 8.6~67.3 $W \cdot m^{-2}$;其次为 7、4 月;6 月二者差异最小,为 8.9~25.5 $W \cdot m^{-2}$ 。原因可能如下:①2018 年 8 月观测

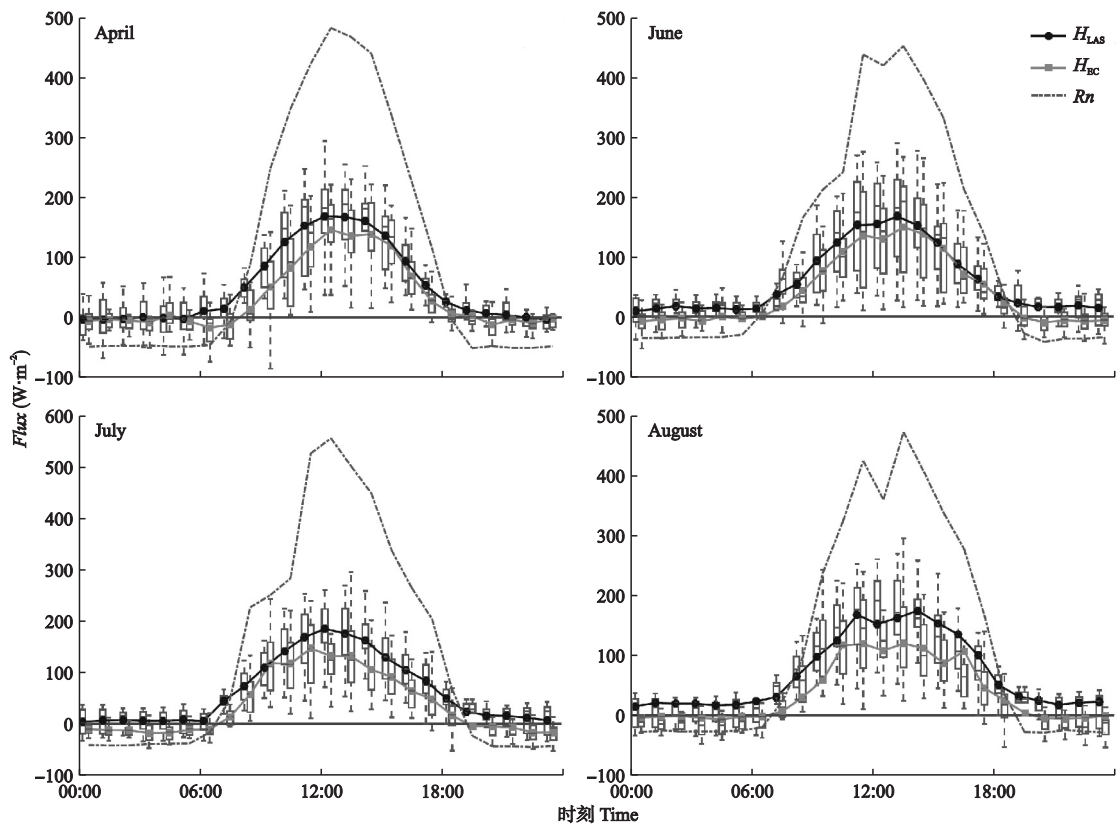


图 4 2018 年 4 月、6—8 月 LAS 和 EC 测量感热通量、净辐射的月平均日变化
Fig.4 The average daily variation of sensible heat flux and net radiation measured by LAS and EC in April, June, July and August in 2018

地区上空对流云发展旺盛,由云遮蔽导致的通量源区内净辐射的空间分布不均进而会影响地表能量分配;②8 月光路附近新建筑的建成导致有效高度 Z_{LAS} 降低,由于 Z_{LAS} 与 H_{LAS} 正相关,所以采用原先的有效高度可能会高估 LAS 的测量值。

2.2 通量源区及其特征对感热通量的影响

2.2.1 源区重叠度对感热通量的影响 为了进一步量化下垫面对 H_{LAS} 和 H_{EC} 的影响,这里根据 LAS 的光路方向(与东西向夹角约为 36°),将风向划分为 $54^\circ \pm 45^\circ$ 、 $144^\circ \pm 45^\circ$ 、 $234^\circ \pm 45^\circ$ 、 $324^\circ \pm 45^\circ$ 四组。图 5 是 4 种风向区间内 H_{LAS} 和 H_{EC} 的对比,可以看出,4 种情况下 H_{LAS} 与 H_{EC} 的一致性各不相同。如图 5 所示,4 种风向条件下 H_{LAS} 和 H_{EC} 差异最小的是风向为 $54^\circ \pm 45^\circ$ 的情况(斜率为 0.83, $R^2 = 0.69$)。此时,即使通量源区只有部分重叠,但 LAS 和 EC 源区内建筑物均较多,源区内部下垫面十分类似,因此表现出最好的一致性。 H_{LAS} 和 H_{EC} 差异最大是风向为 $234^\circ \pm 45^\circ$ 的情况(斜率为 0.74, $R^2 = 0.78$)。此时, LAS 的通量源区主要是学校内北部的建筑群,而 EC 的通量源区包含了学校西部大面积的植被和裸土

(图 1),因此 H_{LAS} 会偏大,而 H_{EC} 会偏小。此外,当风向为 $324^\circ \pm 45^\circ$ 时, H_{LAS} 和 H_{EC} 的一致性介于上述两者之间,这是因为当此时 EC 源区主要为学校西北部大面积不透水层(建筑物、水泥路面和柏油路等),而 LAS 的源区主要为学校中部的建筑群,二者下垫面的一致性相较于风向为 $234^\circ \pm 45^\circ$ 的情况更好。

综上可知,当源区有重叠时($54^\circ \pm 45^\circ$ 和 $144^\circ \pm 45^\circ$),两种仪器的下垫面构成接近,此时感热通量的一致性要优于源区基本不重叠的情况($234^\circ \pm 45^\circ$ 和 $324^\circ \pm 45^\circ$)。由于观测期间南京地区为春夏季,偏北风的样本数很少($n = 292$),因此风向为 $324^\circ \pm 45^\circ$ 的情况下 H_{LAS} 和 H_{EC} 的一致性需要进一步的观测和探究。

2.2.2 源区内下垫面类型与两种仪器感热通量差异的关系 由上可见,下垫面的状况尤其是建筑物密集程度、不透水层占比、植被的茂盛程度对于能量分配具有很大的影响。在本次研究的南京信息工程大学及周边地区(图 1),下垫面面积占比最大的两种地物类型就是建筑(22.94%)和植被(35.82%)。因此这两项对于感热通量的影响至关重要。为此,

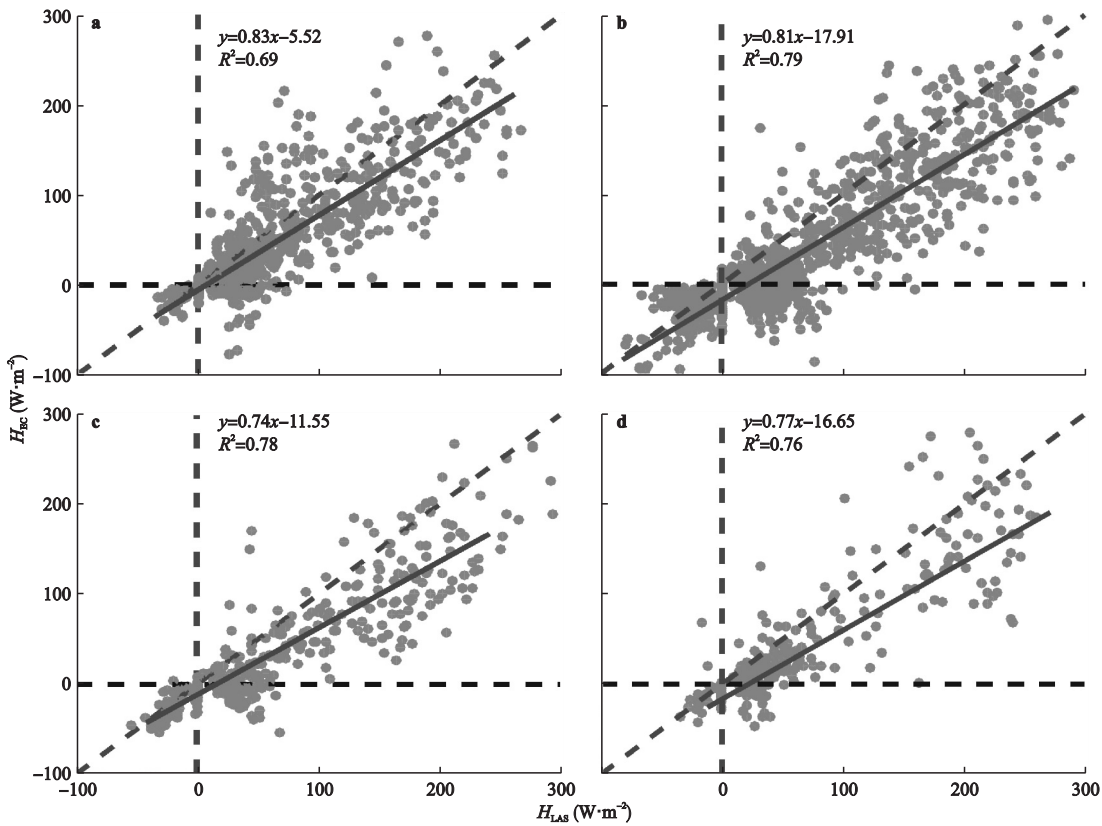


图 5 2018 年 4 月、6—8 月间的 $54^{\circ}\pm 45^{\circ}$ (a)、 $144^{\circ}\pm 45^{\circ}$ (b)、 $234^{\circ}\pm 45^{\circ}$ (c)、 $324^{\circ}\pm 45^{\circ}$ (d) 四种情况下 H_{LAS} 和 H_{EC} 的一致性分析

Fig.5 Consistency analysis of H_{LAS} and H_{EC} in $45^{\circ}\pm 45^{\circ}$ (a), $144^{\circ}\pm 45^{\circ}$ (b), $234^{\circ}\pm 45^{\circ}$ (c), and $324^{\circ}\pm 45^{\circ}$ (d) during April and from June to August in 2018

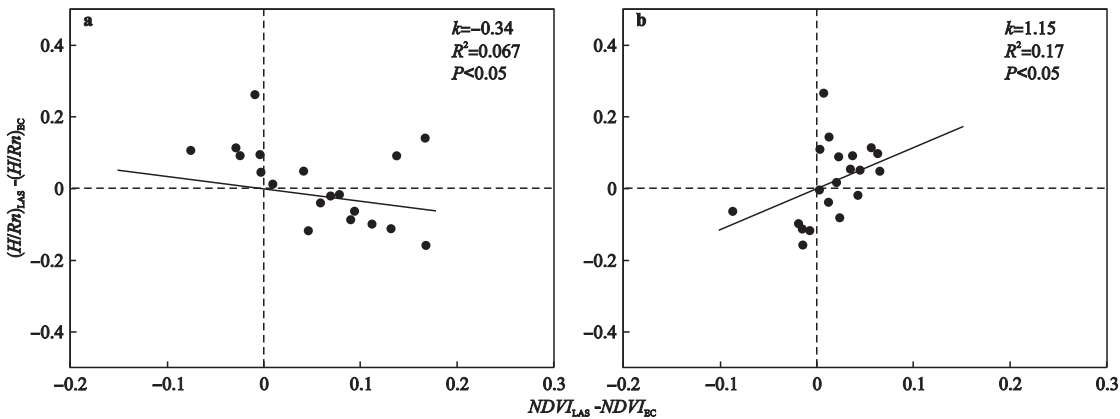


图 6 LAS 和 EC 通量源区内平均 NDVI 之差 (a)、NDBI 之差 (b) 与地表能量分配的关系

Fig.6 The relationship between the difference of the average NDVI (a), NDBI (b) in LAS and EC and the difference in H_{LAS}/R_n and H_{EC}/R_n

这里比较了 2018 年 4 月和 6 月两种仪器的通量源区内 NDVI、NDBI 差值与地表通量分配的关系。

从图 6a 可以看出, LAS 与 EC 的 NDVI 的差值与地表能量分配为显著负相关关系 (斜率为 -0.34 , $P<0.05$), 即 NDVI 值越大, 感热通量越小。这表明当源区内植被生长越旺盛, 也就是地表越湿润、土壤

含水量越高时, 此时感热通量在地气能量交换的比例就降低, 潜热通量占比增大, 波文比 $\beta(H/LE)$ 减小。图 6b 是两种仪器 NDBI 的差值与地表能量分配的关系, 可以看出较为明显的正相关关系 (斜率为 1.15 , $P<0.05$), 即 NDBI 值越大, 感热通量越大。这表明当城市建筑物越密集, 源区内城市化水平越

高时,地面相对湿度就越低,感热通量在能量分配中占比增加,因此,感热通量较大,潜热通量较小,波文比 β 增大。此外,由于建筑、水泥路面等不透水层本身就会吸收大量太阳辐射并转化为城市热储存项 Q_s ,从而导致地表温度升高,形成城市热岛效应,因此经常会使感热通量在全天都为正值且最大值相对于植被占比较大,建筑物占比较小的情况更大。可见,正是两种仪器不同尺度引起的通量源区内建筑和植被占比不同,造成了不同方法得到的地表感热通量的差异。

3 讨论

3.1 两种仪器测得感热通量的时间变化特征

本文基于架设在南京信息工程大学内大口径闪烁仪(LAS)以及涡动相关仪(EC)的观测数据,对比了两种方法观测到的感热通量的差异。研究结果表明, H_{LAS} 和 H_{EC} 日变化规律基本一致,其主导因子为净辐射。由于观测期间南京地区云量变化很大,因此感热通量变化与净辐射变化相似均表现为锯齿状分布,但总体而言仍然是单峰型。这点与已有的在城市(Zieliński *et al.*, 2013; Ward *et al.*, 2014; Zhang *et al.*, 2015)、草地(孙根厚等, 2016)等下垫面的结果一致。

研究显示,夜间由于城市人为热排放,导致 H_{LAS} 和 H_{EC} 经常为正值,这与Zieliński等(2018)在波兰罗兹市区的观测结果一致;白天,与 H_{EC} 相比,LAS给出的感热通量往往会偏大。这与Ward等(2014)和Zhang等(2015)的试验结果类似。 H_{LAS} 大于 H_{EC} 主要有以下原因:①稳定度普适函数本身存在不确定性。目前应用最广的普适函数是AN88(Andreas *et al.*, 1988)和DB93(De Bruin *et al.*, 1993),但试验证明(Ezzahar *et al.*, 2009; Guyot *et al.*, 2009)使用这两种普适函数往往会高估感热通量。②观测尺度不同导致两种仪器通量源区及其特征不一致。LAS的通量源区主要是临近的建筑群和水泥路面;而EC的通量源区往往包含学校西部的草地和裸土。源区内不透水层占比越大,分配给感热通量的净辐射能量就越多。

在月时间尺度上,7月的平均感热通量要大于4、6和8月,这与Ward等(2014)在伦敦以西的研究结果略有不同。这是因为后者研究区域为温带海洋性气候,观测期间4—6月干燥而7、8月较为湿润,因此4—6月平均感热通量要高于7、8月。而本研

究区域地处亚热带季风区,7月温度和净辐射均为观测期间最高水平。

3.2 两种仪器测得感热通量的误差来源

将LAS和EC进行对比观测是检验LAS适用性的常用方法,在国内外已经广泛应用。表1收集了各种下垫面条件下的LAS与EC的对比观测。结果显示,LAS与EC的一致性都较好,相关系数在0.47以上。但是它们的拟合结果显示,除了刘绍民等(2010)在那曲地区试验和Hoedjes等(2002)在墨西哥农田的试验以外,LAS普遍比EC高估2%~17%不等。造成这种差异的主要原因是:(1)两种仪器之间的系统误差;(2)通量源区的下垫面差异。

为了量化不同观测条件下观测结果的差异来源,这里将研究区域分为均匀下垫面和非均匀下垫面。当研究区域为草地、农田、灌木等均匀下垫面时, H_{LAS} 和 H_{EC} 的平均斜率为1.03,即LAS约比EC高估3%。在均一下垫面条件下,尽管两种仪器的通量源区不同,但是它们的下垫面特征一致,因而对感热通量的影响很小,此时可以假设 H_{LAS} 和 H_{EC} 的差异仅来源于两种仪器之间的系统误差,故这两种仪器之间的系统误差为3%。

当下垫面为农业、草地、建筑物等混合下垫面或为高低不同、间距不一的建筑物时,两种仪器之间的差异明显高于均匀下垫面。表1显示, H_{LAS} 和 H_{EC} 的斜率在1.04~1.17,此时两种仪器观测结果的差异为4%~17%。由于仪器本身的系统误差相对稳定,可以假设此时仪器之间的系统误差仍为3%,将观测结果的差异扣除系统误差后仍存在1%~14%的差异,那么这部分差异就是来自于通量源区的下垫面差异。类似地,本研究中 H_{LAS} 和 H_{EC} 的斜率为1.16,即二者的差异为16%,其中3%是来自于两种仪器之间的系统误差,剩下的13%是由于通量源区的下垫面差异造成的。

3.3 通量源区对感热通量的影响

研究结果表明,不同风向下, H_{LAS} 和 H_{EC} 一致性各不相同。一致性最好的不是LAS和EC通量源区完全重叠($144^\circ \pm 45^\circ$)的情况,而是风向为 $54^\circ \pm 45^\circ$ 的情况。一致性最差的不是LAS和EC完全不重叠($324^\circ \pm 45^\circ$)的情况,而是风向为 $234^\circ \pm 45^\circ$ 的情况。这与孙根厚等(2016)在那曲地区得到的 H_{LAS} 与 H_{EC} 一致性的好坏与源区重叠度呈正相关的结论有差异。这是因为后者下垫面为高寒草地,均质性很好,下垫面类型对 H_{LAS} 和 H_{EC} 影响很小,此时观测差异

表 1 不同下垫面大口径闪烁仪和涡度相关法的感热通量相关性的比较
Table 1 Comparison of sensible heat flux correlation between large aperture scintillometer and eddy covariance method of different underlying surfaces

下垫面特征 Underlying surface features	研究地点 Locations	地面覆盖类型 Land covers	拟合线/平均斜率 Fitting formula/ Average slope	R^2
均一性好 High homogeneity	中国那曲 Naqu(孙根厚等, 2016; 刘绍民等, 2010)	高寒草地 Alpine meadow	$y = 1.00x$ (EC_1)	0.67
			$y = 1.05x$ (EC_2)	0.79
	美国 USA(Kleissl <i>et al.</i> , 2009)	草地,灌木丛 Grassland, bush	$y = 1.04x$	0.84
	加纳 Ghana/Tamala(Schüttemeyer <i>et al.</i> , 2006)	草地 Grassland	$y = 1.07x$	0.87
	墨西哥 Mexico(Hoedjes <i>et al.</i> , 2002)	农田 Farmland	$y = 0.98x$	0.94
均一性较差 Poor homogeneity	墨西哥 Mexico(Watts <i>et al.</i> , 2000)	草地 Grassland	$y = 1.02x$ ($\bar{k} = 1.03$)	–
	荷兰 Netherlands(Meijninger <i>et al.</i> , 2002)	农业混合下垫面 Agricultural mixed surface	$y = 1.16x$	0.8
	德国 Germany(Meijninger <i>et al.</i> , 2006)	农田草地等混合下垫面 Mixed surface of farmland and grassland	$y = 1.15x$	0.8
	加纳 Ghana/Ejura (Schüttemeyer <i>et al.</i> , 2006)	果树灌木混合下垫面 Mixed surface of fruit trees and bushes	$y = 1.05x$	–
	英国斯温顿 Swindon(Ward <i>et al.</i> , 2014)	城郊,植被覆盖面积达 53% Suburbs, vegetation cover of 53%	$y = 1.04x$	0.87
异质性高 High heterogeneity	中国溧水 Lishui(Zhang <i>et al.</i> , 2015)	建筑、植被均稀疏 Sparse buildings and vegetation	$y = 1.17x$ ($\bar{k} = 1.11$)	0.47
	英国伦敦 London(Crowford <i>et al.</i> , 2017)	建筑密集高耸 Intensive towering buildings	–	0.5
	波兰罗兹 Lodz(Zieliński <i>et al.</i> , 2018)	建筑密集,但高度一致 Intensive but height-consistent buildings	$y = 1.11x - 15.6$ (EC_1)	0.84
			$y = 1.15x - 18.1$ (EC_2)	0.88
	中国常州 Changzhou(Zhang <i>et al.</i> , 2015)	建筑间距相当一致 Consistent space between buildings	$y = 1.14x$	0.82
	中国南京 Nanjing(本研究)	建筑高度不一,不透水层占比大	$y = 0.95x + 26.8$	0.76
		Various heights of buildings, large proportion of impervious layers	$y = 1.16x$ ($\bar{k} = 1.14$)	0.67

的主导因素是源区重叠度。而城市地区由于下垫面异常复杂,建筑、植被等错落分布,即使源区重叠,但源区内各种下垫面占比不同,所以导致 H_{LAS} 与 H_{EC} 一致性较差。因此,城市地区仅考虑源区重叠度还不够,必须要深入探讨源区内地物类型对感热通量的影响。

在城市生态环境中,建筑物和植被是对地表能量分配影响最为显著的两项(历华等,2009;Subhanil *et al.*,2018)。本文利用 NDVI 指数来衡量源区内植被覆盖和茂盛程度。结果表明,当源区内 NDVI 越大,地表越湿润时,此时有更多能量转化为潜热通量。这与孙根厚等(2016)在那曲地区的研究结果一致。此外,本研究利用 NDBI 指数发现,城市密集程度与感热通量之间存在显著正相关关系,这与 Ward 等(2014)、Crawford 等(2017)直接计算源区内建筑面积占比得到的结论类似,但是源区内 NDBI 之差与地表能量分配之间的正相关关系相比于后者更加显著。

除了通量源区及其下垫面状况这两个因素,其他环境因子在本研究中尚未考虑,比如大气稳定度、土壤含水量、垂直风速以及饱和水汽压差(徐安伦

等,2017)对两种仪器感热通量的影响。此外, H_{LAS} 和 H_{EC} 夜间一致性较差,不确定性的来源还不明确。因此,未来拟了解各因素对感热通量值的影响并尝试找出其与感热通量的拟合关系,评估不同相似性函数在夜间的适用性并改善相关参数,旨在获得城市地区更加准确的感热通量值。

4 结 论

本研究基于南京信息工程大学观测点 2018 年 4 月、6—8 月大口径闪烁仪(LAS) 与涡度相关系统(EC)同步观测的湍流感热通量数据,对比了二者测得的感热通量的差异,并结合 NDVI 和 NDBI 遥感指数,分析了下垫面不均匀性对于 H_{LAS} 和 H_{EC} 影响。结果表明,两种仪器测得的感热通量日变化趋势基本一致且相关性较好($R^2 = 0.76$),说明即使在下垫面异质性较高的城市地区 LAS 也能给出可靠的感热通量值。 H_{LAS} 和 H_{EC} 日变化情况表明二者在同一时刻的差值往往不同。日出前 H_{LAS} 比 H_{EC} 早 2~3 h 达到正值,而傍晚 H_{LAS} 会比 H_{EC} 滞后约 2 h 变为负值。 H_{LAS} 和 H_{EC} 夜间一致性较差,原因可能是大气稳定度的转换时间随着位置的变化以及 H_{LAS} 计算时存

在稳定度误判的情况。月尺度上 H_{LAS} 与 H_{EC} 的差值8月最大,其次为7、4月,6月最小。风向造成的通量源区不同是引起 H_{LAS} 和 H_{EC} 差异的主要原因。通量源区内的 NDVI 值越大,感热通量与净辐射之比越小,二者呈显著负相关 ($P<0.05$); NDBI 值越大,感热通量与净辐射之比越大,二者呈显著正相关 ($P<0.05$)。

参考文献

- 白洁,刘绍民,丁晓萍,等. 2010. 大孔径闪烁仪观测数据的处理方法研究. 地球科学进展, **25**(11): 1148–1165. [Bai J, Liu SM, Ding XP, *et al.* 2010. A study of the processing method of large aperture scintillometer observation data. *Advances in Earth Science*, **25**(11): 1148–1165.]
- 陈志强,陈健飞. 2006. 基于 NDBI 指数法的城镇用地影像识别分析与制图. 地球信息科学学报, **8**(2): 137–140. [Chen ZQ, Chen JF. 2006. Investigation on extracting the space information of urban land-use from high spectrum resolution image of ASTER by NDBI method. *Geo-information Science*, **8**(2): 137–140.]
- 冯俊婷,胡振华,张宝忠,等. 2017. 涡度相关技术实测农田的通量贡献区范围分析. 灌溉排水学报, **36**(6): 49–56. [Feng JT, Hu ZH, Zhang BZ, *et al.* 2017. Analyzing flux footprint of agro-ecosystem measured by the eddy covariance system. *Journal of Irrigation and Drainage*, **36**(6): 49–56.]
- 何月,樊高峰,张小伟,等. 2012. 浙江省植被 NDVI 动态及其对气候的响应. 生态学报, **32**(14): 4352–4362. [He Y, Fan GF, Zhang XW, *et al.* 2012. Variation of vegetation NDVI and its response to climate change in Zhejiang Province. *Acta Ecologica Sinica*, **32**(14): 4352–4362.]
- 黄妙芬. 2003. 地表通量研究进展. 干旱区地理, **26**(2): 159–165. [Huang MF. 2003. Advance of research on surface flux. *Arid Land Geography*, **26**(2): 159–165.]
- 历华,柳钦火,邹杰. 2009. 基于 MODIS 数据的长株潭地区 NDBI 和 NDVI 与地表温度的关系研究. 地理科学, **29**(2): 262–267. [Li H, Liu QH, Zou J. 2009. Relationships of LST to NDBI and NDVI in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan Area based on MODIS data. *Scientia Geographica Sinica*, **29**(2): 262–267.]
- 刘绍民,李小文,施生锦,等. 2010. 大尺度地表水热通量的观测分析与应用. 地球科学进展, **25**(11): 1113–1127. [Liu SM, Li XW, Shi SJ, *et al.* 2010. Measurement, analysis and application of surface energy and water vapor fluxes at large scale. *Advances in Earth Science*, **25**(11): 1113–1127.]
- 彭谷亮,蔡旭晖,刘绍民. 2007. 大孔径闪烁仪湍流通量印痕模型的建立与应用. 北京大学学报: 自然科学版, **43**(6): 822–827. [Peng GL, Cai XH, Liu SM. 2007. A flux footprint model for large aperture scintillometer. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, **43**(6): 822–827.]
- 孙根厚,胡泽勇,王介民,等. 2016. 那曲地区两种空间尺度感热通量的对比分析. 高原气象, **35**(2): 285–296. [Sun GH, Hu ZY, Wang JM, *et al.* 2016. Comparison analysis of sensible heat fluxes at two spatial scales in Naqu Area. *Plateau Meteorology*, **35**(2): 285–296.]
- 王春林,周国逸,王旭,等. 2007. 复杂地形条件下涡度相关法通量测定修正方法分析. 中国农业气象, **28**(3): 233–240. [Wang CM, Zhou GY, Wang X, *et al.* 2007. Analysis of correction method on eddy flux measurement over complex terrain. *Chinese Journal of Agrometeorology*, **28**(3): 233–240.]
- 王丽娟,左洪超,陈继伟,等. 2012. 遥感估算绿洲-沙漠下垫面地表温度及感热通量. 高原气象, **31**(3): 646–656. [Wang LJ, Zuo HC, Chen JW, *et al.* 2012. Land surface temperature and sensible heat flux estimated from remote sensing over oasis and desert. *Plateau Meteorology*, **31**(3): 646–656.]
- 吴家兵,关德新,张弥,等. 2005. 涡动相关法与波文比-能量平衡法测算森林蒸散的比较研究——以长白山阔叶红松林为例. 生态学杂志, **24**(10): 1245–1249. [Wu JB, Guan DX, Zhang M, *et al.* 2005. Comparison of Eddy Covariance and BREB methods in determining forest evapotranspiration—Case study on broad-leaved Korean pine forest in Changbai Mountain. *Chinese Journal of Ecology*, **24**(10): 1245–1249.]
- 徐安伦,李建,彭浩,等. 2017. 洱海湖滨农田下垫面大口径闪烁仪与涡动相关仪测量的湍流通量对比分析. 高原气象, **36**(1): 98–106. [Xu AL, Li J, Peng H, *et al.* 2017. Comparison of sensible and latent heat fluxes over farmland underlying surface of Erhai Lakeside region measured from large aperture scintillometer and eddy-covariance system. *Plateau Meteorology*, **36**(1): 98–106.]
- 庄金鑫,王维真,王介民. 2013. 涡动相关通量计算及三种主要软件的比较分析. 高原气象, **32**(1): 78–87. [Zhuang JX, Wang WZ, Wang JM. 2013. Flux calculation of eddy-covariance method and comparison of three main softwares. *Plateau Meteorology*, **32**(1): 78–87.]
- Andreas EL. 1988. Estimating C_n^{-2} over snow and sea ice from meteorological data. *Journal of the Optical Society of America A*, **5**: 481–495.
- Andreas EL, Hill RJ, Gosz JR, *et al.* 1998. Statistics of surface-layer turbulence over terrain with metre-scale heterogeneity. *Boundary-Layer Meteorology*, **86**: 379–408.
- Chehbouni A, Kerr YH, Watts C, *et al.* 1999. Estimation of area-average sensible heat flux using a large-aperture scintillometer during the Semi-Arid Land-Surface-Atmosphere (SALSA) experiment. *Water Resources Research*, **35**: 2505–2511.
- Crawford B, Grimmond CSB, Ward HC, *et al.* 2017. Spatial and temporal patterns of surface-atmosphere energy exchange in a dense urban environment using scintillometry. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **143**: 817–833.
- De Bruin HAR, Kohsiek W, Van Den Hurk BJJM. 1993. A verification of some methods to determine the fluxes of momentum, sensible heat, and water vapor using standard deviation and structure parameter of scalar meteorological quanti-

- ties. *Boundary-Layer Meteorology*, **63**: 231–257.
- De Bruin HAR, Van Den Hurk BJJM, Kohsiek W. 1995. The scintillation method tested over a dry vineyard area. *Boundary-Layer Meteorology*, **76**: 25–40.
- Ezzahar J, Chehbouni A, Hoedjes J, *et al.* 2009. Combining scintillometer measurements and an aggregation scheme to estimate area-averaged latent heat flux during the AMMA experiment. *Journal of Hydrology*, **375**: 217–226.
- Frenzen P, Vogel CA. 1992. The turbulent kinetic energy budget in the atmospheric surface layer: A review and an experimental reexamination in the field. *Boundary-Layer Meteorology*, **60**: 49–76.
- Guyot A, Cohard JM, Anquetin S, *et al.* 2009. Combined analysis of energy and water balances to estimate latent heat flux of a Sudanian small catchment. *Journal of Hydrology*, **375**: 227–240.
- Hartogensis OK, Watts CJ, Rodriguez JC, *et al.* 2003. Derivation of an effective height for scintillometers; La Poza Experiment in Northwest Mexico. *Journal of Hydrometeorology*, **4**: 915–928.
- Hill RJ, Ochs GR, Wilson JJ. 1992. Measuring surface-layer fluxes of heat and momentum using optical scintillation. *Boundary-Layer Meteorology*, **58**: 391–408.
- Hoedjes JCB, Zuurbier RM, Watts CJ. 2002. Large aperture scintillometer used over a homogeneous irrigated area, partly affected by regional advection. *Boundary-Layer Meteorology*, **105**: 99–117.
- Jung M, Reichstein M, Margolis HA, *et al.* 2015. Global patterns of land-atmosphere fluxes of carbon dioxide, latent heat, and sensible heat derived from eddy covariance, satellite, and meteorological observations. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, **116**: 245–255.
- Kleissl J, Hong SH, Hendrickx MJM. 2009. New Mexico scintillometer network: Supporting remote sensing and hydrologic and meteorological models. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **90**: 207–218.
- Kljun N, Calanca P, Rotach MW, *et al.* 2015. A simple two-dimensional parameterisation for Flux Footprint Prediction (FFP). *Geoscientific Model Development*, **8**: 3695–3713.
- Kormann R, Meixner FX. 2001. An analytical footprint model for non-neutral stratification. *Boundary-Layer Meteorology*, **99**: 207–224.
- Lagouarde JP, Irvine M, Bonnefond JM, *et al.* 2006. Monitoring the sensible heat flux over urban areas using large aperture scintillometry: Case study of Marseille city during the Escompte Experiment. *Boundary-Layer Meteorology*, **118**: 449–476.
- Liu SM, Xu ZW, Zhu ZL, *et al.* 2013. Measurements of evapotranspiration from eddy-covariance systems and large aperture scintillometers in the Hai River Basin, China. *Journal of Hydrology*, **487**: 24–38.
- Meijninger WML, Beyrich F, Lüdi A, *et al.* 2006. Scintillometer-based turbulent fluxes of sensible and latent heat over a heterogeneous land surface—a contribution to Litfass-2003. *Boundary-Layer Meteorology*, **121**: 89–110.
- Meijninger WML, Green AE, Hartogensis OK, *et al.* 2002. Determination of area-averaged water vapour fluxes with large aperture and radio wave scintillometers over a heterogeneous surface-Flevoland field experiment. *Boundary-Layer Meteorology*, **105**: 63–83.
- Schüttemeyer D, Moene AF, Holtslag AAM, *et al.* 2006. Surface fluxes and characteristics of drying semi-arid terrain in west Africa. *Boundary-Layer Meteorology*, **118**: 583–612.
- Subhanil G, Himanshu G, Anindita D, *et al.* 2018. Analytical study of land surface temperature with NDVI and NDBI using Landsat 8 OLI and TIRS data in Florence and Naples city, Italy. *European Journal of Remote Sensing*, **51**: 667–678.
- Thiermann V, Grassl H. 1992. The measurement of turbulent surface-layer fluxes by use of bichromatic scintillation. *Boundary-Layer Meteorology*, **58**: 367–389.
- Wang T, Ochs GR, Clifford SF. 1978. A saturation-resistant optical scintillometer to measure C_n^2 . *Journal of the Optical Society of America*, **68**: 334–338.
- Ward HC, Evans JG, Grimmond CSB. 2014. Multi-scale sensible heat fluxes in the suburban environment from large-aperture scintillometry and eddy covariance. *Boundary-Layer Meteorology*, **152**: 65–89.
- Watts CJ, Chehbouni A, Rodriguez JC, *et al.* 2000. Comparison of sensible heat flux estimates using AVHRR with scintillometer measurements over semi-arid grassland in northwest Mexico. *Agricultural and Forest Meteorology*, **105**: 81–89.
- Wesely ML. 1976. The combined effect of temperature and humidity fluctuations on refractive index. *Journal of Applied Meteorology*, **15**: 43–49.
- Wyngaard JC, Coté OR. 1971. The budgets of turbulent kinetic energy and temperature variance in the atmospheric surface layer. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **28**: 190–201.
- Zhang H, Zhang H. 2015. Comparison of turbulent sensible heat flux determined by large-aperture scintillometer and eddy covariance over urban and suburban areas. *Boundary-Layer Meteorology*, **154**: 119–136.
- Zieliński M, Fortuniak K, Pawlak W, *et al.* 2013. Turbulent sensible heat flux in Łódź, Central Poland, obtained from scintillometer and eddy covariance measurements. *Meteorologische Zeitschrift*, **22**: 603–613.
- Zieliński M, Fortuniak K, Pawlak W, *et al.* 2018. Long-term turbulent sensible-heat-flux measurements with a large-aperture scintillometer in the centre of Łódź, central Poland. *Boundary-Layer Meteorology*, **167**: 469–492.

作者简介 王 亮,男,1996年生,硕士研究生,主要从事城市生态学方面的研究。E-mail: 2397518864@qq.com
责任编辑 魏中青
