

彭谷亮, 刘绍民, 蔡旭晖, 等. 非均匀下垫面湍流通量观测的印痕分析. 大气科学, 2008, 32 (5): 1064~1070

Peng Guliang, Liu Shaomin, Cai Xuhui, et al. Footprint analysis of turbulent flux measurement over heterogeneous surface. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2008, 32 (5): 1064~1070

## 非均匀下垫面湍流通量观测的印痕分析

彭谷亮<sup>1</sup> 刘绍民<sup>2</sup> 蔡旭晖<sup>1\*</sup> 卢俐<sup>2</sup> 徐自为<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 北京大学环境科学系, 北京 100871

<sup>2</sup> 北京师范大学国家遥感科学重点实验室, 地理学与遥感科学学院, 北京 100875

**摘 要** 利用 2005 年在北京昌平区小汤山开展的非均匀下垫面观测实验的观测数据, 分别处理了涡旋相关法和大孔径闪烁仪 LAS 测得的感热通量, 并运用印痕模型对数据进行“源区”分析。分析结果表明: 在复杂地表上, 涡旋相关的测量值由于混杂了其他下垫面的通量信息, 不能真实地反映其观测区域的湍流特征, 存在着观测误差。而 LAS 观测出现的低估问题则与掺混高度和“源区”有关。通过用印痕方法进行数据订正后, 以上问题均得到很好的改善, 订正结果与 LAS 观测通量的线性关系良好, 两者的相关系数达到 0.9。实验结果验证了印痕模型在非均匀下垫面的适用性。

**关键词** 印痕分析 非均匀下垫面 大孔径闪烁仪 (LAS) 感热通量 涡旋相关

**文章编号** 1006-9895 (2008) 05-1064-07 **中图分类号** P404 **文献标识码** A

## Footprint Analysis of Turbulent Flux Measurement over Heterogeneous Surface

PENG Guliang<sup>1</sup>, LIU Shaomin<sup>2</sup>, CAI Xuhui<sup>1</sup>, LU Li<sup>2</sup>, and XU Ziwei<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Environment Science, Peking University, Beijing 100871

<sup>2</sup> State Key Laboratory of Remote Sensing Science, School of Geography and Remote Sensing Science, Beijing Normal University, Beijing 100875

**Abstract** To test the applicability of the footprint model over complex surface, heat flux data measured from Beijing Xiao Tang Shan heterogeneous field experiment in May 2005 are used. The data from eddy covariance measurements and Large Aperture Scintillometer (LAS) are processed and analyzed by a footprint model, respectively. Because of heterogeneity, the measurement of eddy covariance method seems to be ambiguous, which contains turbulence information from other land covers. The LAS data have a problem of underestimation due to the blending height and ‘source area’ effect. After corrected by the footprint method, they are in good agreement. The results demonstrate that the footprint model is an effective and practical tool to solve the heterogeneous problem in the turbulence flux study.

**Key words** footprint, heterogeneity, large aperture scintillometer, heat flux, eddy covariance

## 1 引言

陆-气相互作用是地球系统圈层相互作用的关

键环节之一, 而近地面层内主要以动量、热量和水汽以及其他物质的湍流输送为主, 所以对近地面层进行通量观测, 是研究陆-气相互作用的最好途径。

**收稿日期** 2007-01-16, 2007-04-02 收修定稿

**资助项目** 国家自然科学基金资助项目 40675010、40671128, 国家重点基础研究发展规划项目 2002CB410802, 长江学者和创新团队发展计划 IRT0409

**作者简介** 彭谷亮, 男, 1982 年出生, 硕士研究生, 研究方向: 大气边界层, 污染气象学。E-mail: gordonpann@pku.edu.cn

\* 通讯作者 E-mail: xhcai@pku.edu.cn

但由于非均匀下垫面的复杂特性，使其一直成为研究难点。近年来，大孔径闪烁仪（Large Aperture Scintillometer，简称 LAS）的出现有效地解决了这个问题，LAS 是用于湍流量测量的新型仪器，它能准确地观测 500 m 到 10 km 范围内的感热通量。Beyrich 等<sup>[1]</sup>和 Hemakumara 等<sup>[2]</sup>通过实验证明了 LAS 适合用于非均匀下垫面的通量研究。

对于非均匀下垫面，由于内边界层的存在<sup>[3]</sup>，仪器观测的通量数据受到不同下垫面的影响，如何从这混合的湍流信息中提取出代表各个下垫面的通量特征，成为微气象界的一大热点研究问题。印痕模型应用大气传输和扩散理论，能很好地确定数据的“源区”，从而计算出不同下垫面对观测值的贡献。从 20 世纪 90 年代开始，印痕分析方法在国内外若干科学家的努力下得到快速发展<sup>[4~6]</sup>，成为分析湍流数据质量和判断数据空间代表性的有效工具，并广泛应用于国外很多大型观测实验上<sup>[7~9]</sup>。本文通过利用 2005 年 5 月北京师范大学国家遥感科学重点实验室应用 LAS 在北京昌平区小汤山国家精准农业研究示范基地开展的非均匀下垫面观测实验的感热通量数据，对印痕分析方法进行了验证。基于 LAS 观测的是区域平均通量，以 LAS 的观测结果为参考值，应用印痕模型分别对 LAS 和涡旋相关测量的结果进行分析和修正，并对二者进行相关性比较，探讨印痕模型在非均匀下垫面的适用性。

## 2 观测实验介绍

本次观测实验从 2005 年 5 月 1~31 日在北京昌平区小汤山国家精准农业研究示范基地进行。实验场是一块南北长 1000 m、东西宽 500 m 的平坦地表，中间的道路将其平均分成南北两个区域。南边主要是一片刚播种的裸地，北边以杂草地为主。LAS 的发射器和接收器分别安装在实验场的北塔和南塔顶上。两塔相距 1000 m，塔高 8 m。同时，为了测量不同下垫面的湍流情况，在裸地和杂草地中间又分别安装了两套涡旋相关测量系统，架高为 2 m。实验场地的示意图如图 1 所示。

LAS 仪器用来测量区域的感热通量，每十分钟输出一个空气折射指数的结构参数  $C_n^2$ ，并通过

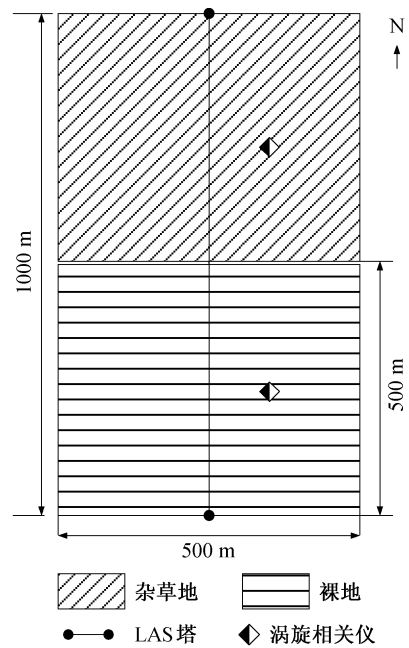


图 1 实验场地布局示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of the experimental area

程序计算出感热通量，详细的计算方法将在第 3 节介绍。涡旋相关测量系统由一个三维超声风温仪和一个  $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$  快速分析仪组成，其测量频率设为 10 Hz，测量数据通过处理得到 30 分钟平均的动量、感热和潜热通量。根据卢俐等<sup>①</sup>的研究发现，由于观测期间作物的生长，南北两侧的下垫面性质在观测前后两段时间内发生了变化，从 5 月 20 日开始，裸地的粗糙度由 0.006 m 增大到 0.008 m，杂草地的粗糙度也从 0.014 m 增大为 0.015 m。基于此考虑，本文分析的是后一时段的观测数据（即 5 月 20~31 日）。在这段观测时间内，天气状况以多云为主。此外，在本文中，选用每天 06 时至 19 时（北京时，下同）这段时间的湍流数据，主要为不稳定层结。

## 3 印痕模型

印痕的明确定义最早由 Pasquill 等<sup>[10]</sup>在 1983 年提出：

$$F(x, y, z_m) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^x F_0(x', y') \cdot f(x - x', y - y', z_m) dx' dy', \quad (1)$$

① 卢俐，刘绍民. 典型下垫面的动力学与粗糙度的研究. 第五届全国大气边界层研究战略研讨会. 广州，2005 年 9 月

其中,  $F(x, y, z_m)$  是高度为  $z_m$  的通量观测值,  $F_0(x, y)$  是上风向的地面源项,  $f$  是印痕函数。

目前, 国外流行的印痕分析模型主要有两种: 欧拉模型和拉格朗日随机模型。Schmid<sup>[11]</sup>和蔡旭晖<sup>[12]</sup>系统地介绍了这两种方法的理论和各自应用的优缺点。基于实用性和省机时的考虑, 本文选择欧拉解析方法进行印痕分析。由于传统的涡旋相关仪器与 LAS 的观测原理不同, 分别对其建立印痕模型<sup>[13, 14]</sup>。其中涡旋印痕模型的主要输入参数有: 奥布霍夫长度 ( $L_{MO}$ )、平均风速 ( $u$ )、风向 (Dir)、湍流侧向风速标准差 ( $\sigma_v$ )、观测区域的粗糙度 ( $z_0$ ) 以及风速计的观测高度 ( $z$ )。对于 LAS 印痕模型, 还需要输入 LAS 的架设高度 ( $z_{LAS}$ ) 和光程长度 (Path)。

## 4 观测数据处理

### 4.1 涡旋数据处理

为了得到 30 分钟的平均值, 首先从时间序列中剔除野点, 然后对数据进行温度订正和垂直方向订正<sup>[15~16]</sup>, 最后利用涡旋相关法计算有关的湍流通量。基本公式如下:

$$u_* = [\overline{u'w'^2} + \overline{v'w'^2}]^{1/4}, \quad (2)$$

$$H = c_p \rho \overline{w'\theta'}, \quad (3)$$

$$H_E = \rho L_v \overline{w'q'} = L_v \overline{w'\rho_v'}, \quad (4)$$

其中,  $u_*$ 、 $H$  和  $H_E$  分别是摩擦速度、感热和潜热通量。 $u'$ 、 $v'$  和  $w'$  分别代表横向、侧向和垂直方向的风速脉动。 $\rho_v$  是实测水汽浓度,  $\theta'$  和  $q'$  分别是脉动位温和脉动比湿。 $\rho$ 、 $c_p$  和  $L_v$  分别是空气密度、干空气定压热容和水汽的相变潜热。

### 4.2 LAS 数据处理

LAS 测量的是光线在传播时受大气湍流散射作用造成的光强脉动变化值, 仪器内部已利用王庭义等<sup>[17]</sup>提出的公式对测量值进行计算并转换成空气折射结构参数  $C_n^2$ 。本文需要处理的是从  $C_n^2$  计算感热通量。计算公式如下:

$$C_T^2 = C_n^2 \left( \frac{T^2}{-0.78 \times 10^{-6} p} \right)^2 \left( 1 + \frac{0.03}{\beta} \right)^{-2}, \quad (5)$$

$$\frac{C_T^2 (z_{LAS} - d)^{2/3}}{T_*^2} = f_T \left( \frac{z_{LAS} - d}{L_{MO}} \right), \quad (6)$$

$$u_* = \frac{ku}{\ln \left( \frac{z-d}{z_0} \right) - \Psi_m \left( \frac{z-d}{L_{MO}} \right) + \Psi_m \left( \frac{z_0}{L_{MO}} \right)}, \quad (7)$$

$$L_{MO} = \frac{u_*^2 T}{g k T_*}, \quad (8)$$

$$T_* = \frac{H}{\rho c_p u_*}, \quad (9)$$

其中,  $C_T^2$  是温度结构参数,  $T$ 、 $p$  和  $u$  分别是温度、气压和平均风速, 由于观测期间的气压变化不大, 本文近似取为 1013 hPa。 $\beta$  是波文比系数,  $z_{LAS}$ 、 $z$ 、 $z_0$  和  $d$  分别是 LAS 的架设高度、风速计高度、粗糙度和零值位移。 $T_*$  和  $L_{MO}$  分别是特征温度和奥布霍夫长度。 $k$  是 von Karman 常数,  $g$  是重力加速度, 取  $9.8 \text{ m/s}^2$ 。 $f_T$  和  $\Psi_m$  分别是稳定度普适函数和稳定度修正函数。通过 (6)、(7)、(8)、(9) 式, 迭代计算出感热通量  $H$ 、摩擦速度  $u_*$  和奥布霍夫长度  $L_{MO}$ 。

由于 LAS 的观测区域包括两个不同的下垫面, 这里的  $u$  和  $z_0$  分别取以下形式<sup>[18]</sup>:

$$u = \frac{2u_N u_S}{u_N + u_S}, \quad (10)$$

$$\ln(z_0) = 0.5 [\ln(z_{0N}) + \ln(z_{0S})], \quad (11)$$

其中, 下标 N 和 S 分别代表在北边和南边下垫面上测得的物理量。

## 5 观测结果与分析

### 5.1 感热通量的观测结果

大孔径闪烁仪测量的是区域感热通量, 由于其测量面积大, 观测数据具有较好的区域代表性, 因此比单点的涡旋相关仪适合用来反映非均匀下垫面地气交换的特征。这里用  $H_L$  表示 LAS 观测的感热通量,  $H_N$  和  $H_S$  分别表示杂草地和裸地观测的感热通量。图 2 是三者平均日变化曲线的比较, 特征量的平均日变化是通过逐日同时次的数值取平均得到。

图 2 中  $H_L$ 、 $H_N$  和  $H_S$  的日变化趋势与边界层的发展规律一致, 在日出后, 感热通量迅速增加, 在中午时候均达到极大值, 其中  $H_L$  约为  $110 \text{ W/m}^2$ ,  $H_S$  约为  $140 \text{ W/m}^2$ ,  $H_N$  约为  $80 \text{ W/m}^2$ , 随后三者开始下降, 并在晚上 18 时由正转为负, 标志着大气层结趋于稳定状态。由于反射率的关系, 裸地的感热最大, 杂草地的感热最小, 而 LAS 的结果处于两者之间, 表明 LAS 能很好地反映大面积区域的平均感热。在观测时间段内, 实验区域的感热通量并不大, 这主要与观测时间段内的天气状况以多云为主有关。

## 5.2 印痕模型的分析结果

为了解 LAS 观测数据的数据质量, 我们对其应用 LAS 印痕模型进行分析, 确定其“源区”分布, 结果如图 3 所示。LAS 印痕模型的模拟区域设为以 LAS 光程中点为中心的  $100 \times 100$  的网格矩阵, 水平分辨率为 20 m。

图 3 显示了观测数据的整体印痕结果, 可以看

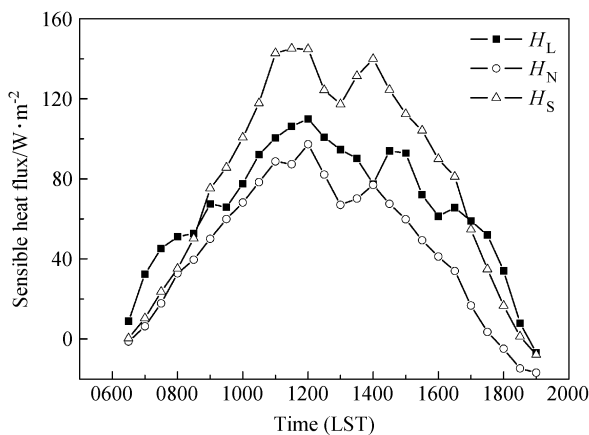


图 2 杂草地 ( $H_N$ )、裸地 ( $H_S$ ) 和 LAS ( $H_L$ ) 的感热通量平均日变化的比较

Fig. 2 Comparison of sensible heat fluxes observed in the weed ( $H_N$ ), the bare soil ( $H_S$ ) and with LAS ( $H_L$ )

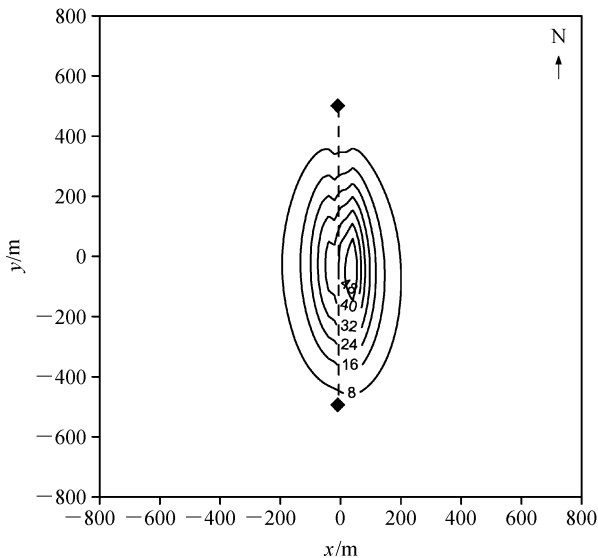


图 3 观测时间段的 LAS 印痕输出结果, 等值线是印痕 (footprint) 的计算值 (单位:  $10^{-7} \text{ m}^{-2}$ )。◆: LAS 发射机和接收机所在的位置; 虚线: 测量光程

Fig. 3 The footprint of LAS measurement during the experiment. The contour lines stand for the footprint result ( $10^{-7} \text{ m}^{-2}$ ). ◆: the locations of the transmitter and receiver; dash line: the beam of the scintillometer

出源区在南北方向的尺度达到 1 km, 在东西方向的尺度达到约 400 m, 几乎覆盖了整个实验场地。另外, 源区平均分配在南边和北边的下垫面, 所以总体看来, LAS 的测量数据能很好地代表该实验区域的通量特征。而对通量贡献最大的地方集中在测量光线右侧约 100 m 以内的区域, 这主要由于测量时间段内偏东风的出现频率大于偏西风所造成。

接着, 进一步分析 LAS 数据与涡旋数据的关系。我们认为该实验区域的平均感热通量可以由两种方法获得: 通过 LAS 直接测量或对各下垫面的通量值进行累加平均, 如果两者的线性关系良好, 则说明 LAS 的结果能代表复杂地形的感热通量; 如果经过印痕订正后, 两者的线性关系得到进一步提高, 则说明印痕分析方法适用于非均匀下垫面。

首先计算每 30 分钟南北涡旋感热通量的平均值  $H_{AVE}$ ,  $H_{AVE}$  与  $H_L$  在测量时间上一一对应, 其中  $H_L$  是 LAS 的测量值。图 4 是  $H_L$  与  $H_{AVE}$  的比较。 $H_L$  与  $H_{AVE}$  的线性拟合方程为  $y = 0.864x$ , 相关系数达到 0.85。但从图 4 中可以看到, 在  $H_L$  大于  $60 \text{ W/m}^2$  时,  $H_{AVE}$  比  $H_L$  偏大。根据 Meijninger 等<sup>[19]</sup>的研究, LAS 的低估现象主要受掺混高度 (blending height)<sup>[20]</sup>的作用影响。掺混高度是描述各不同地表的湍流充分混合, 各内边界层之间互相融合时所达到的高度, 其表达式<sup>[21]</sup>如下:

$$z_b \cong 2 \left( \frac{u_*}{U} \right)^2 L_h, \quad (12)$$

其中,  $z_b$  是掺混高度,  $u_*$  是摩擦速度,  $U$  是掺混高度所在高度的平均风速,  $L_h$  是水平非均匀尺度。Meijninger 等<sup>[19]</sup>提出, 当掺混高度低于 LAS 架设高度 ( $z_{LAS}$ ) 时, 由于湍流已经充分混合, LAS 观测的感热与  $H_{AVE}$  吻合较好; 高于  $z_{LAS}$  时, 则 LAS 观测值偏低, 此时需要考虑 LAS 数据的“源区”。基于以上考虑, 先估算 LAS 各观测时刻对应的掺混高度, 然后用 LAS 印痕模型确定 LAS 各时刻观测数据的“源区”分布, 分别计算出杂草地和裸地的通量贡献值, 最后对  $H_{AVE}$  进行修正。修正公式如下:

$$H_i = H_N f_{LN} + H_S f_{LS}, \quad z_b \geq z_{LAS}, \quad (13)$$

$$H_i = H_{AVE}, \quad z_b < z_{LAS}, \quad (14)$$

其中,  $H_i$  是  $H_{AVE}$  的修正值,  $f_{LN}$  和  $f_{LS}$  分别是 LAS 印痕计算的杂草地和裸地的通量贡献值。图 5 是  $H_L$  和  $H_i$  的比较结果。

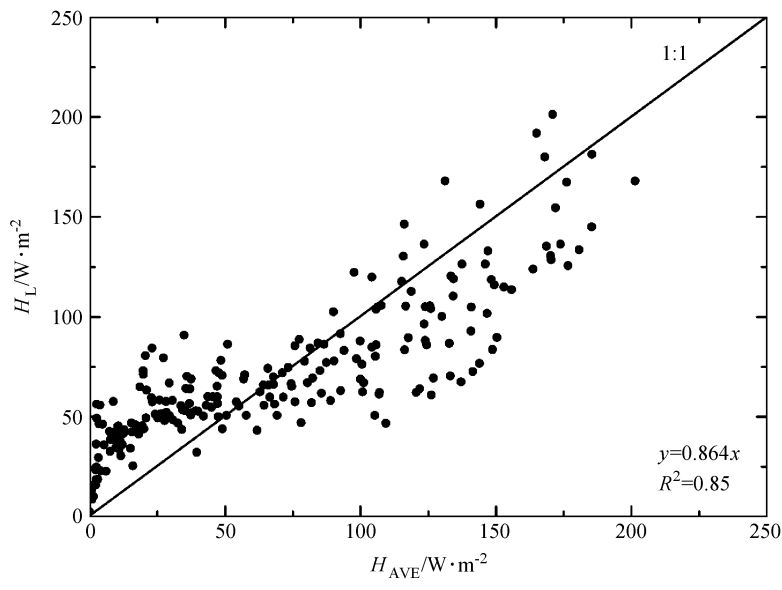


图 4 LAS 的  $H_L$  与用涡旋相关法测量的平均感热  $H_{AVE}$  的比较 ( $R$  表示两者的相关系数)  
Fig. 4 Comparison between  $H_L$  from LAS and  $H_{AVE}$  from eddy covariance measurement ( $R$  stands for the correlation coefficient)

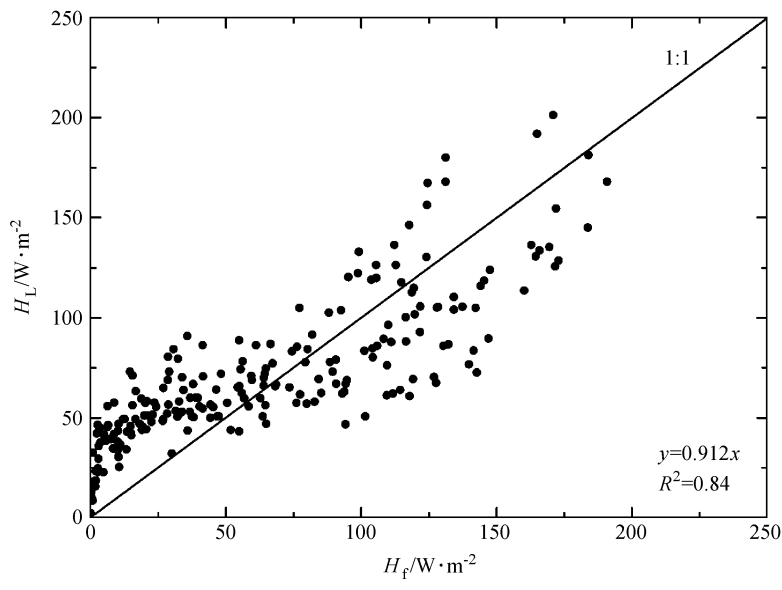
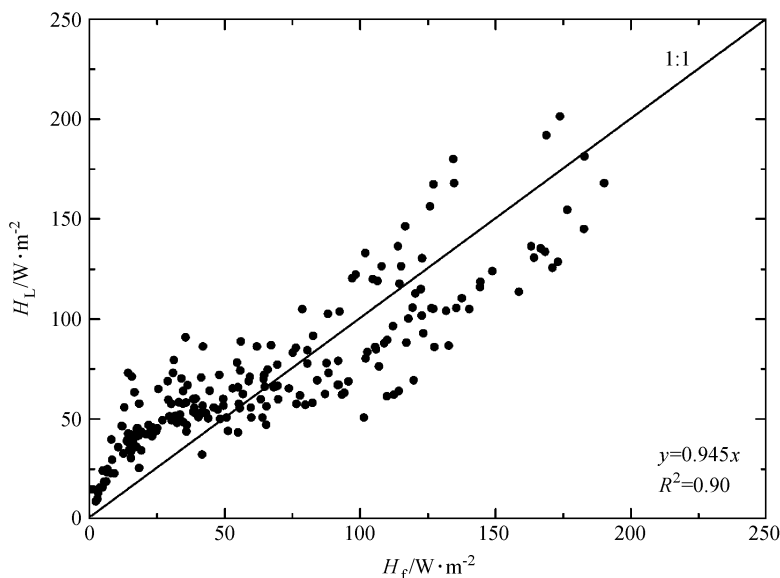


图 5 LAS 的  $H_L$  与  $H_f$  的比较  
Fig. 5 Comparison between  $H_L$  and  $H_f$

从图 5 可以看出,考虑“源区”后,  $H_L$  与  $H_f$  的线性关系更好,掺混高度造成的 LAS 数据偏低的现象得到很好的改善。经过 LAS 印痕模型处理后, LAS 观测数据与区域平均通量  $H_f$  吻合得较好,但数据较离散,分析认为这主要是由涡旋相关的观测误差造成的。由于南北两下垫面性质差别大,在内边界层内,各自的湍流通量互相影响,使得涡旋相关的观测数据包含了其他下垫面的湍流信

息,不能真实地反映其所在地表的通量特征。当大气层结为弱不稳定和稳定时,根据印痕理论,观测数据的“源区”范围更大,这种影响更加明显。对于本实验场地来说,当风向为偏北风时,裸地的通量值混杂了杂草地的通量;当风向为偏南风时,情况则相反。为了获得准确反映各不同地表的通量值,应用涡旋印痕模型对涡旋测量数据进行修正,修正方案如下:

图 6 LAS 的  $H_L$  与修正后的  $H_f$  的比较Fig. 6 Comparison between  $H_L$  and revised  $H_f$ 

$$H_{N,M} = H_{N,r}f_{EN} + H_{S,M}f_{ES} \text{ (偏南风)}, \quad (15)$$

$$H_{S,M} = H_{N,M}f_{EN} + H_{S,r}f_{ES} \text{ (偏北风)}, \quad (16)$$

其中,  $H_{N,M}$  和  $H_{S,M}$  分别表示杂草地和裸地的实测值,  $H_{N,r}$  和  $H_{S,r}$  分别表示杂草地和裸地的真实值,  $f_{EN}$  和  $f_{ES}$  是涡旋印痕模型计算的杂草地和裸地的通量贡献值。通过 (15)、(16) 式计算出涡旋的真实值, 再代入 (13)、(14) 式重新计算  $H_f$ 。图 6 是  $H_L$  与修正后的  $H_f$  的比较结果。

从图 6 可以看出, 经过涡旋印痕订正后,  $H_L$  与  $H_f$  的相关性得到了进一步的提高, 数据分布变得更紧凑, 相关系数达到 0.9, 而且两者的线性关系更好, 其线性回归方程为  $y=0.945x$ 。有理由认为订正后的涡旋数据能真实地反映各自下垫面的湍流通量特征。另外, 需要注意的是, 当感热通量处于 0 和  $60 \text{ W/m}^2$  之间时, LAS 得到的  $H_L$  仍然比订正后的  $H_f$  偏大, 经过分析发现, 这些数据大多在上午 06~08 时和晚上 17~19 时测得, 这种情况在图 2 也有体现, 而且对应这些时刻记录的平均风速均在  $1 \text{ m/s}$  左右, 故认为其可能的原因有两个: 第一是 LAS 的测量误差所造成, 当大气从稳定层结转向不稳定层结时, 空气的折射参数  $C_n^2$  发生跃变, 此时 LAS 的观测值不稳定, 易偏离真实情况; 第二是由涡旋相关法测定湍流通量的不闭合问题所造成。根据陈家宜等<sup>[22]</sup>的研究发现, 在不稳定层结内, 涡旋相关法测算通量的低估程度在低风条件

下比较显著, 由于涡旋测量结果存在低估, 故造成它偏小于  $H_L$ 。关于涡旋相关法的能量不平衡问题, 不少大型观测实验已作出报道<sup>[23, 24]</sup>。

## 6 总结

本文通过分析小汤山非均匀下垫面的观测实验数据, 分别处理了不同下垫面上涡旋相关测量的湍流通量和大孔径闪烁仪测量的感热通量, 并进行比较, 在运用印痕模型对观测数据订正后, 两者的线性关系和相关性得到提高, 其中线性关系从  $y=0.864x$  提高到  $y=0.945x$ , 相关系数也从 0.85 提高到 0.90。

实验结果表明, 应用于非均匀下垫面通量观测时, 对于 LAS 仪器, 当掺混高度大于观测高度时, 其观测数据会出现低估现象。而对于涡旋相关仪器, 由于内边界层的存在, 混杂了其他下垫面的湍流信息, 其结果存在测量误差。用印痕方法进行“源区”计算和订正后, 这些问题得到改善, 两种测量方法得到的区域感热通量吻合得较好, 证实了印痕理论适用于非均匀下垫面的湍流数据分析。

## 参考文献 (References)

- [1] Beyrich F, De Bruin H, Meijninger W, et al. Results from one-year continuous operation of a large aperture scintillometer over a heterogeneous land surface. *Bound.-Layer Mete-*

- or., 2002, **105**: 99~117
- [2] Hemakumara H, Lalith C, Arnold F. Evapotranspiration fluxes over mixed vegetation areas measured from large aperture scintillometer. *Agric. For. Meteor.*, 2003, **58**: 109~122
- [3] 盛裴轩, 毛节泰, 李建国, 等. 大气物理学. 北京: 北京大学出版社, 2003. 273~277  
Sheng Peixuan, Mao Jietai, Li Jianguo, et al. *Atmospheric Physics* (in Chinese). Beijing: Peking University Press, 2003. 273~277
- [4] Leclerc M Y, Thurtell G W. Footprint prediction of scalar fluxes using a Markovian analysis. *Bound.-Layer Meteor.*, 1990, **52**: 247~258
- [5] Horst T W, Weil J C. Footprint estimation for scalar flux measurements in the atmospheric surface-layer. *Bound.-Layer Meteor.*, 1992, **59**: 279~296
- [6] Horst T W, Weil J C. How far is far enough. The fetch requirements for micrometeorological measurement of surface fluxes. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 1994, **11**: 1018~1025
- [7] Luhar A, Rao K. Lagrangian stochastic dispersion model simulations of tracer data in nocturnal flows over complex terrain. *Atmos. Environ.*, 1994, **28**: 3417~3431
- [8] Rannik Ü, Aubinet M, Kurbanmuradov O, et al. Footprint analysis for measurements over a heterogeneous forest. *Bound.-Layer Meteor.*, 2000, **97**: 137~166
- [9] Göckede M, Rebmann C, Foken T. A combination of quality assessment tools for eddy covariance measurements with footprint modelling for the characterisation of complex sites. *Agric. For. Meteor.*, 2004, **127**: 175~188
- [10] Pasquill F, Smith F. *Atmospheric Diffusion*. England, West Sussex Press, 1983. 437pp
- [11] Schmid H P. Footprint modeling for vegetation atmosphere exchange studies, a review and perspective. *Bound.-Layer Meteor.*, 2002, **113**: 159~183
- [12] 蔡旭晖. 湍流微气象观测的印痕分析方法及其应用拓展. 大气科学, 2008, **32**: 123~132  
Cai Xuhui. Footprint analysis in micrometeorology and its extended applications. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 2008, **32**: 123~132
- [13] Cai Xuhui, Leclerc M Y. Forward-in-time and backward-in-time dispersion in the convective boundary layer and their equivalence on concentration footprint. *Bound.-Layer Meteor.*, 2007, **123**: 201~218
- [14] 彭谷亮, 蔡旭晖, 刘绍民, 等. 大孔径闪烁仪的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), 2007, **43** (6): 822~827  
Peng Guliang, Cai Xuhui, Liu Shaomin, et al. A flux footprint model for large aperture scintillometer. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis* (in Chinese), 2007, **43** (6): 822~827
- [15] Webb E, Pearman G, Leuning R. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1980, **106**: 85~100
- [16] Schotanus P, Nieuwstadt F, De Bruin H. Temperature measurement with a sonic anemometer and its application to heat and moisture fluxes. *Bound.-Layer Meteor.*, 1983, **26**: 81~93
- [17] Wang T, Ochs G, Clifford S. A saturation-resistant optical scintillometer to measure  $C_n^2$ . *J. Opt. Soc. Amer.*, 1978, **69**: 334~338
- [18] Lagouarde J, Bonnefond J, Kerr Y, et al. Integrated sensible heat flux measurements of a two-surface composite landscape using scintillometry. *Bound.-Layer Meteor.*, 2002, **105**: 5~35
- [19] Meijninger W M L, Hartogensis O K, Kohsiek W, et al. Determination of area-average sensible heat fluxes with a large aperture scintillometer over a heterogeneous surface—Flevoland field experiment. *Bound.-Layer Meteor.*, 2002, **105**: 37~62
- [20] Wieringa J. An objective exposure correction method for average wind speeds measured at a sheltered location. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1976, **102**: 241~253
- [21] Wood N, Manson P. The influence of static stability on the effective roughness lengths for momentum and heat transfer. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1991, **117**: 1025~1056
- [22] 陈家宜, 范邵华, 赵传峰, 等. 涡旋相关法测定湍流通量偏低的研究. 大气科学, 2006, **30** (3): 423~432  
Chen Jiayi, Fan Shaohua, Zhao Chuanfeng, et al. The underestimation of the turbulent fluxes in eddy correlation techniques. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 2006, **30** (3): 423~432
- [23] Mahrt L. Flux sampling errors for aircraft and towers. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 1998, **15**: 416~429
- [24] Wang Jiemin. Surface flux measurements in GAME-Tibet. The Second Session of International Workshop on TIPEX-GAME/TIBET (Preprint Volume), JCC with TIPEX-GAME/Tibet, Kunming, China, 1998