

文章编号: 1001-8166(2010)11-1166-09

大孔径闪烁仪的通量印痕分析与应用

蔡旭晖¹, 朱明佳², 刘绍民², 徐自为²

(1. 北京大学环境科学系, 北京 100871;

2. 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: 针对北京密云站的长期通量观测进行大孔径闪烁仪的平均印痕区域分析。首先从 2008 年全年 8 152 组湍流观测资料, 以整体湍流特征量 σ_w / u_w 以及其他数据合理性判据进行质量控制, 获得 6 806 组有效数据; 然后用一个解析解模型逐时次计算大孔径闪烁仪的二维印痕, 并进行统计平均, 获得各季平均印痕分布; 将当地气象条件根据风向、风速和稳定度分为 12 类, 分别统计各类条件的平均印痕分布。最后, 以实测感热通量为例, 计算当地实际湍流通量的气候平均印痕区域。结果表明, 当地大孔径闪烁仪的平均通量印痕季节变化不大; 各类气象条件中, 稳定度和风向是影响印痕区域大小和方向的重要因素, 风速影响相对较小; 以实际湍流通量为权重的气候平均印痕可更准确反映观测结果的空间代表性, 其分布与简单平均的印痕分布有所不同。

关 键 词: 大孔径闪烁仪; 通量观测; 印痕; 气候平均

中图分类号: P456

文献标志码: A

1 引 言

用大孔径闪烁仪观测地表湍流通量, 相比传统的涡旋相关法, 可以获得更大面积上的测量结果。正是由于这一优势, 近年来这一方法获得了日益广泛的应用。主要应用领域如: 用大孔径闪烁仪的面积观测结果验证卫星遥感结果^[1], 以实现观测的尺度拓展 (up-scaling); 以大孔径闪烁仪构成观测网, 实现对区域通量的监测, 为模式提供地面网格尺度的观测通量^[2]; 尝试用大孔径闪烁仪对非均匀地面进行通量观测^[2]等。与涡旋相关法类似的是, 在分析和解释大孔径闪烁仪观测结果时也有所谓印痕问题^[4-6]。而且由于观测代表的面积较大, 不可避免地遇到地面非均匀分布的情况, 或者正是希望研究非均匀地表的通量, 其印痕问题因此显得更为重要。另一方面, 由于大孔径闪烁仪观测的是一条线状路

径上的结果, 同时该线状路径上的不同点对结果又具有不同的权重, 这也使大孔径闪烁仪的通量印痕分析更具有自身特点。

最先具体探讨大孔径闪烁仪通量印痕问题的是 Meijninger 等^[7]。他们以一个适用于单点观测的隐式解析印痕模型为基础^[8], 扩展为适用于大孔径闪烁仪线状路径观测的印痕模型。此后多数应用工作基本按此技术路线进行^[9-10]。随着新的研究成果的出现, 一些研究更倾向于使用全显式的解析印痕模型^[11]作为大孔径闪烁仪印痕分析的基础^[12], 以使模型构建和计算过程更为简练。

大多数有关大孔径闪烁仪印痕问题的应用研究, 重点在于分析观测区域内不同地块对通量观测结果的贡献, 亦即分析观测的空间代表性。特别在涉及到不同观测仪器所获结果间的相互比较和检验时, 这类分析显得尤为重要^[7, 10, 13]。另一方面, 在研

收稿日期: 2010-08-03 修回日期: 2010-09-07

* 基金项目: 公益性行业 (气象) 科研专项“大尺度水热通量观测系统的研制与应用研究” (编号: GYHY200706046); 国家高技术研究发展计划项目“区域大气污染源识别与动态清单技术及应用” (编号: 2006AA06A305) 和“区域大气复合污染的模拟、预测技术及应用” (编号: 2006AA06A306) 资助。

作者简介: 蔡旭晖 (1962-), 男, 江西九江人, 教授, 主要从事大气物理与大气环境研究, E-mail: xhcai@pku.edu.cn

究非均匀地面的通量时, 使用印痕分析考虑不同地块对大孔径闪烁仪光学路径上测量信号的影响^[3], 也是一种很有意义的工作。这样可以部分消除观测高度在掺混厚度 (blending height) 以下的应用限制, 从而有利于充分发挥大孔径闪烁仪的大面积观测优势。

本文对一个山谷复杂地形站点大孔径闪烁仪的长期观测进行印痕分析, 获取平均印痕分布特性, 及其与当地不同气象类型的关系。对分析过程中湍流资料的筛选方法以及大孔径闪烁仪感热通量观测的气候学平均分布进行初步探讨。

2 通量印痕模型

本文所用大孔径闪烁仪的二维印痕分析模式^[11]是基于一维显式解析印痕模型^[12]建立的。虽然该模式的一维基础模型相对简单, 但数值计算仍涉及诸多环节, 其正确性直接影响到二维印痕模式的最终结果。为此将一维显式解析印痕模型^[12]的计算结果与 2 个隐式计算模型^[14 15]以及 1 个拉格朗日粒子模型进行了详细对比。结果表明, 从很稳定到很不稳定的大气条件, 各种方法表现出良好的一致性^[16]。因此可以确信本文所用的一维印痕计算结果是可靠的。由此一维印痕结果进一步计算大孔径闪烁仪的二维印痕分布, 还需以下 3 个步骤:

(1) 确定该一维印痕的侧向分布。一般假设侧向服从高斯分布, 其标准差与点源排放的烟流浓度扩散的标准差相同, 即短时间内与侧向湍流速度的标准差以及扩散时间成正比。

(2) 针对实际观测的风向, 计算大孔径闪烁仪光学路径上一个单元点对应的二维印痕分布。

(3) 按照大孔径闪烁仪光学路径上不同点对测量信号的响应权重, 对每一个单元点对应的二维印痕分布进行加权求和, 获得整个光学路径的二维印痕分布。模式建立的具体情况可参看文献[11]。模式使用时的输入参数包括: 观测高度、地表粗糙度、计算范围和水平分辨率、大孔径闪烁仪发射和接收点的位置、工作光束的波长和仪器口径等; 输入的观测变量则有: 观测高度的风向、风速、侧向湍流速度标准差、摩擦速度、Obukhov 长度等。

3 密云站实验观测与资料

实验站点位于北京密云县新城子镇太古石村, 包括大孔径闪烁仪 (LAS) 及气象塔观测。整个站点三面环山, 南北两侧分布有杨树林, 西面有居民地。整个实验场下垫面主要为杨树、玉米地、李子林、苹

果林以及城镇。山谷内下垫面较为平坦均一。LAS 南北设置, 接收与发射装置具体位置为: ($40^{\circ}37'31.42743''N$, $117^{\circ}19'02.76170''E$) 和 ($40^{\circ}38'40.48846''N$, $117^{\circ}19'54.80301''E$), 对应高度分别为 29.7 和 37.1 m, 两点之间距离约 2 420 m, 两点连线与正北夹角约 29° 。LAS 光径距地面有效高度为 35.9 m。LAS 观测系统 (LAS150) 包括 1 套大孔径闪烁仪 (发射、接收)、1 套 CR1000 (SQ2040) 型数据采集器。输出资料包括 2 s 及 10 min 平均结果, 采集频率为 2 s。采集信号为空气折射指数的结构参数 C_n^2 (以反对数形式存储), 同时记录信号强度和电池电压等信息。LAS 孔径为 0.152 m, 有效直径 0.145 m。LAS 所用光为近红外光源, 光学波长 880 nm。

本文使用气象塔 2008 年全年的湍流涡旋相关观测资料, 分析密云站 LAS 观测的长期平均印痕分布。涡旋相关观测高度为 26.7 m, 数据为每半小时一组, 覆盖全年, 仅有几天由于仪器观测原因缺失。我们这里取每小时整点 (整点半小时平均) 的数据进行分析, 共有 8 152 组观测数据。

为了进行印痕计算, 首先对使用的湍流观测资料进行质量控制筛选。整体湍流特征 (integral turbulent characteristics) 是用来检验近地面流动是否符合莫林—奥布霍夫 (Monin-Obukhov) 相似性的常用参量^[17 18]。这里使用较不易受外部因子干扰的 σ_w/u_* 作为判断参量。根据前人的工作, 平坦地形条件下, σ_w/u_* 与稳定度的相似性关系可取为^[19 20]:

$$\sigma_w/u_* = \begin{cases} 1.3(1 - 3Z/L)^{1/3} & (\text{不稳定}) \\ 1.3 & (\text{中性}) \\ 1.25/(1 + 0.2Z/L) & (\text{稳定}) \end{cases} \quad (1)$$

这里 L 为 Obukhov 长度, Z 为观测高度。将全年实测 σ_w/u_* 结果与上式比较发现, 虽然密云站观测数据总体服从近地面相似性, 但数据离散也很明显, 部分数据偏离较大 (图 1)。作为初步数据筛选, 我们将对数坐标中与上式结果相差 2 倍以上的点去掉 (即小于 0.5 倍和大于 2 倍, 图 1 中虚线之外)。另外, 对下列明显有误的数据组也舍去: ① $\sigma_w/u_* > 10$ ④感热通量 $H > 500 \text{ W/m}^2$ 或 $H < -100 \text{ W/m}^2$ 。最后获得 6 806 组有效数据。

4 结果与分析

4.1 季平均印痕分布

使用筛选后的数据逐次计算 LAS 的通量印痕。对结果按春 (2~4 月)、夏 (5~8 月)、秋 (9~11 月)、冬 (1~2 月和 12 月) 进行统计平均, 获得 LAS

的季节平均印痕分布如图 2。图 2 为模式区域内 30%、50%、70% 和 90% 印痕贡献率区域 (源区) 的等值线, 底图为地形高度影像。可见 LAS 印痕的季

节变化不大, 主要为春、夏季偏西南的贡献多些, 秋、冬季偏东北的成分略增。而且这种变化主要反映在 90% 和 70% 印痕贡献率的等值线上, 对于 50% 贡献

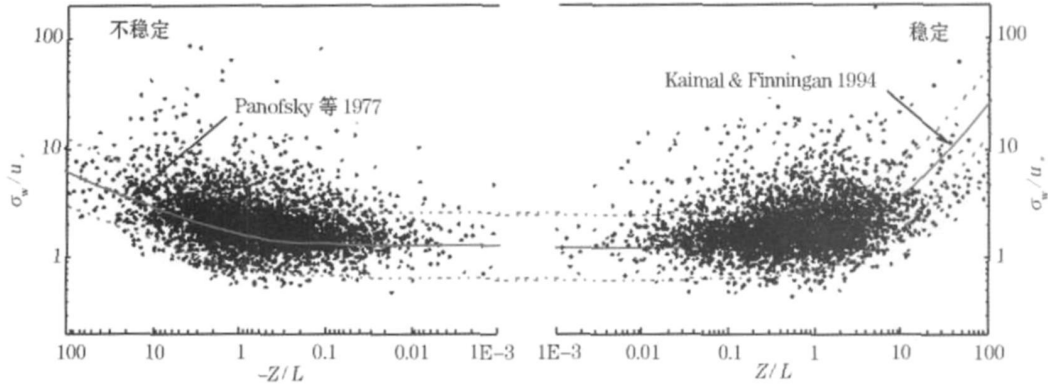


图 1 整体湍流特征参数 σ_w/u_* 随稳定度的变化

Fig. 1 Variation of σ_w/u_* with stability

图中实线为式(1)的相似性经验关系, 虚线标出 0.5~2 倍的变化范围
Solid lines are from Eq. (1), dashed lines denote 0.5~2 times variation

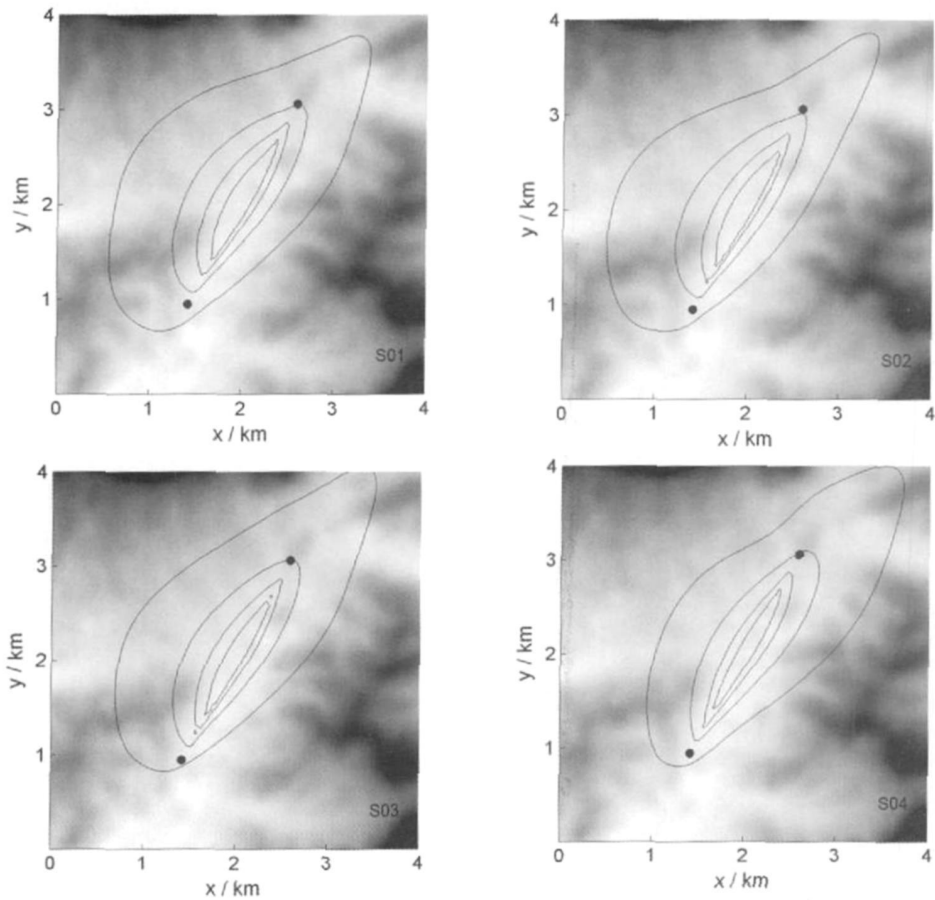


图 2 LAS 的季节平均印痕分布

Fig. 2 Seasonal mean footprint of the LAS measurement

等值线为 30%、50%、70% 和 90% 印痕贡献率区域, S01~S04 对应春夏秋冬, 底图为地形高度影像
Contours denote 30%, 50%, 70% and 90% footprint contribution, S01 to S04 indicate four seasons
from spring to winter. The gray base map is a terrain image

率区域, 各季变化很小。从平均印痕覆盖区域来看, 其主体显然落在 LAS 光径所处的山谷及周边山坡地带。此外, 山谷的东北开口处是一个较重要的印痕影响区, 向西开口的另一条山谷也经常落入印痕影响范围, 特别是春、夏季节。

4 2 气象条件分类

季节平均印痕反映了 LAS 通量观测的总体贡献源区情况。给出当地不同气象条件或类型的印痕分布有利于全面了解 LAS 通量观测的时空代表性。影响印痕分布的主要因子是风向、风速、稳定度、地面粗糙度等^[4]。已知密云站涡旋相关观测塔附近全年地面粗糙度约为 1.0 m^[21], 这里在长期平均印痕计算中取为 0.98 m 不变, 因此印痕分布完全由气象条件决定。

分析气象数据发现, 当地风向风速的日变化规律明显。一般夜里和早上风速较小, 午后风速增大。相伴随的风向变化则是, 夜间和早上为东北风, 中午前后转为西南风。全年偏东北出现最多的风向角度大约为 40°, 而偏西南出现最多的风向角度大约为 240°。可见当地风向一天中几乎反转。结合地形情况来看, 此处山谷走向大致与正北呈 30~ 40°的夹角, 另外山谷的北端和东北上游方向有海拔 900~ 1 200 m 的高山, 与谷底形成 500~ 800 m 的地形高差。因此可以认为, 当地风向的日变化实际反映的是山谷风日夜演变的结果。另外我们注意到, 偏东北风出现的频数明显较多, 风向的转变主要以西北方向为主, 东南和偏南风出现的情况都很少。因此我们在南面以 180°为界、北面以 0°为界, 将该山谷的流动分为偏西南和偏东北的 2 种主要流动。

稳定度是影响印痕分布的另一个重要因子, 我们根据涡旋相关观测的稳定度参数 Z/L 进行判断。这里 $Z = 26.6$ m, 为涡旋相关观测的高度; L_{MO} 为莫宁—奥布霍夫长度, 由涡旋相关湍流观测确定。按 $Z/L_{MO} > 0.1$, $Z/L_{MO} < -0.1$ 和 $|Z/L_{MO}| < 0.1$, 可将资料划分为稳定、不稳定和近中性三大类。

最后考虑风速情况。当地全年风速不大。对上

述稳定和不稳定类型, 大致可按 1.5 m/s 以上和以下划分为大风和小风 2 类。上述近中性情况通常风速较大, 其大风和小风可大致按 2.5 m/s 以上和以下划分。

按以上风向、风速、稳定度的分类最后可获得 12 种气象条件类型, 基本覆盖当地所有可能出现的情况。12 种条件在全年 6 806 个筛选数据时段中的出现频次、频率及日变化分别见表 1 和图 3。由表 1 可见, 中性条件的出现频率较小, 不同风向、风速的频率都小于 3%。稳定和不稳定条件下不同风向都是小风频率较高。从图 3 可进一步看出, 稳定条件, 不论何种风向、风速都主要出现在夜间和凌晨, 白天正午前后几乎不出现。这符合近地面大气的一般规律。注意到稳定西南大风的情况总体出现较少, 但在傍晚前后可较多出现。对不稳定情况, 以西南大风条件出现最多, 且出现频率符合一般规律: 正午最多, 清晨和傍晚减少至接近于 0。不稳定东北大风条件出现的规律性也甚好, 但总体出现较少。较为特别的是不稳定西南小风的情况, 虽然也是在白天出现频率大, 但却在上午达到最大, 之后一直减小。这类情况在午夜和凌晨也有不可忽略的频次出现, 是较为特别的。更为特别的是不稳定东北小风的情况, 它在白天出现的频次较少, 而在夜间较多。鉴于 2 类小风不稳定情况的出现频率相当高, 我们将全年不稳定条件 ($-Z/L_{MO} > 0.1$) 感热通量的时间日变化分小风和大风情况画出, 发现此处夜间的确实大量出现正的感热通量, 数值多为 10 W/m² 以下, 小风时尤其明显。这似乎是此处特有的现象, 其意义不甚明确, 值得在今后的分析中留意。近中性的情况包含了弱稳定和弱不稳定个例, 总体出现频率低, 在一日中出现频率的分布也较均匀, 只是西南风 (大风和小风) 条件在傍晚前后出现较多。

4 3 分类平均印痕

将上述 12 类气象条件对应的印痕分布分别求平均, 所获结果示于图 4。由图 4 看出, 稳定度对印痕区域的大小有决定性的作用, 稳定条件的印痕区

表 1 各气象类型的出现频次、频率 (%) 和平均感热通量 (W/m²)

	东北风						西南风					
	小风			大风			小风			大风		
	频次	频率	感热	频次	频率	感热	频次	频率	感热	频次	频率	感热
稳定	982	14	- 9.6	588	9	- 26.2	792	12	- 10.6	303	4	- 24.9
中性	227	4	- 3.5	169	2	- 10.2	277	4	- 2.6	316	5	11.1
不稳定	753	11	26.9	345	5	89.4	1 159	17	46.9	895	13	95.6

域最大,中性的次之,不稳定的最小。风向则不仅决定印痕影响区域的方位,也决定着 LAS观测的印痕面积。东北风条件由于与 LAS光径的走向相近,印痕区域较窄,并沿东北山谷延伸出计算区域。西南风条件与 LAS光径交角较大,所包含的风向变化幅度也较大(包含偏西南到西北的实际风向),印痕区域以偏西为主,面积较大。相对而言,这里将风速划分的所谓“小风”和“大风”,对平均印痕区域的影响较小,而且影响也不太确定。如不稳定条件下,偏东北大风和小风类型的印痕区域几乎没什么差别(图 4c d);偏西南大风的印痕区域则比小风的要大(图 4i j)。另一方面,稳定条件下,大风类型的印痕源区似乎都比对应小风类型的要小,而不论是东北风还是西南风(图 4a h 图 4g h)。这可能与风速较大时风向较为恒定、风向摆动较小有关。

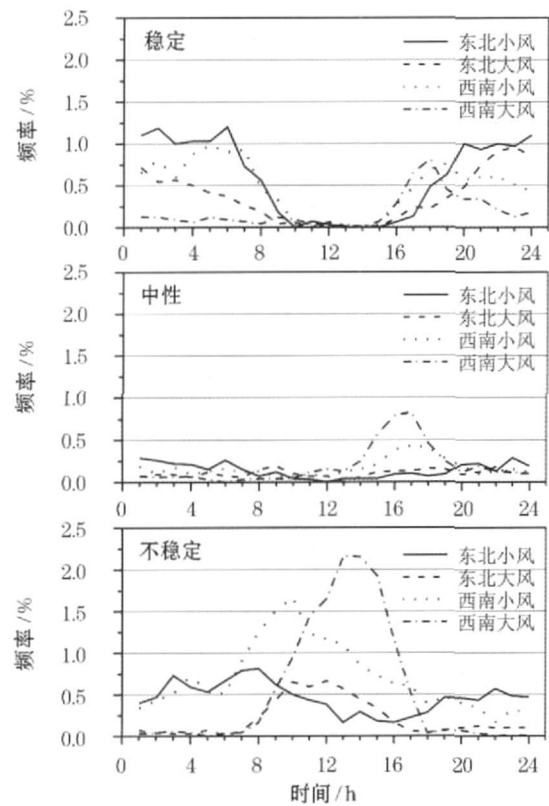


图 3 不同气象类型出现频率的日变化
Fig 3 Diurnal variation of appearance frequency for each weather condition

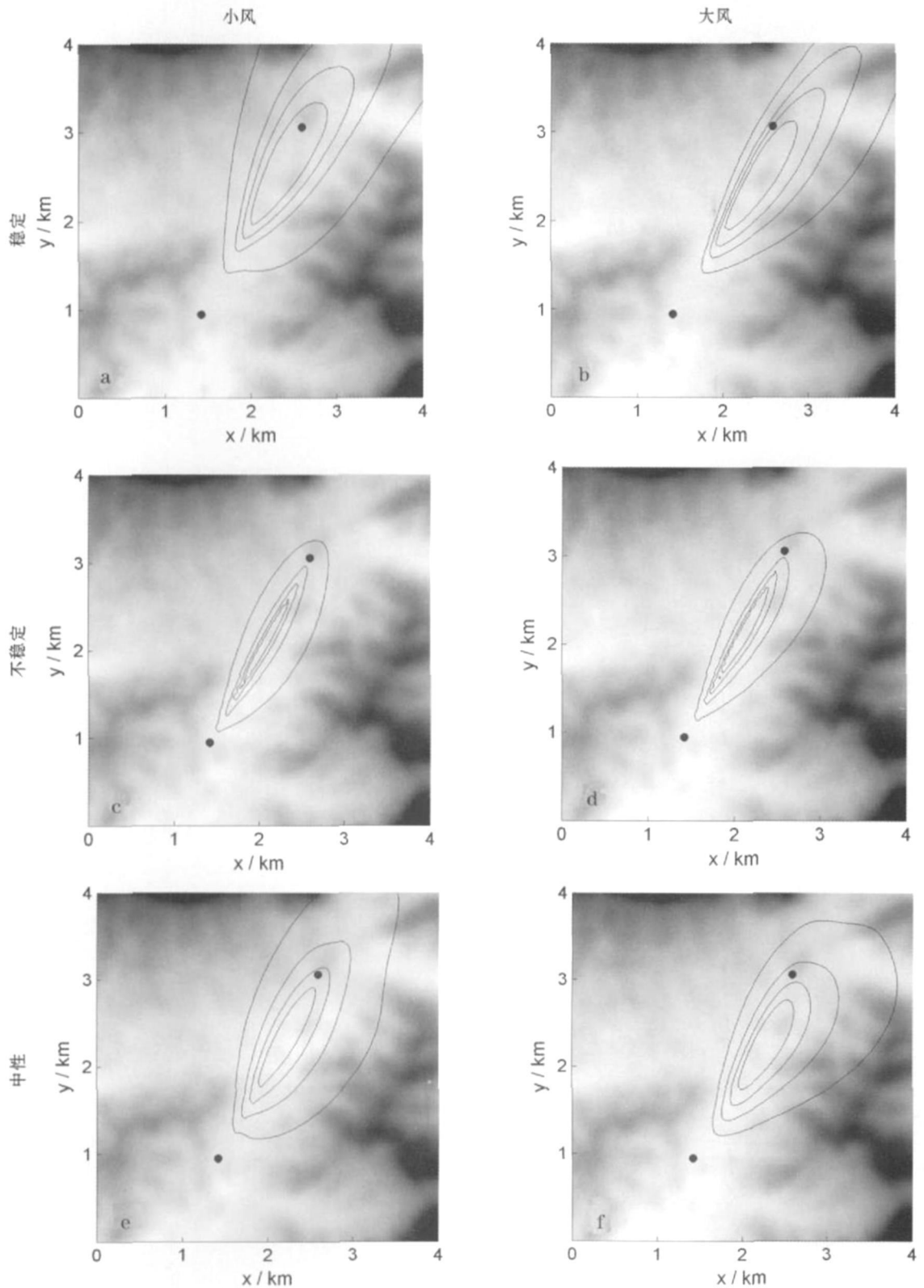
图 4 给出的分类平均印痕的意义在于,我们可以据此初步判断一些关心的气象类型或观测数据的印痕影响区域。如 LAS观测的白天不稳定条件的感热通量,据认为是较可靠的。从图 4c d i j 则可以看出,这类观测的通量印痕区域主要分布在 LAS所

在山谷的东西两侧,南北方向很少越过 LAS的发射点和接收点。山谷东边山坡地和山谷西侧突出的山脊都可能对 LAS观测结果有影响,因此可进一步对这些风向的观测数据进行质量分析。又如,从前述气象条件分析已知,该山谷大气流动的典型日变化符合山谷风环流的一般规律,因此典型日变化条件下,白天为风速较大的西南风不稳定大气情况,夜间为风速较小的东北风稳定大气情况,所对应的通量印痕区域则应该在图 4 j和图 4a之间转换。

需要注意的是,本研究中印痕分析只是定性地显示通量观测覆盖不同地形的区域。由于使用的解析解印痕模式并没有包含实际地形的影响,其结果仅代表地形随动的气流以及水平均匀湍流的假设情况。因此对密云站这样的复杂地形,计算结果必然会与真实印痕的结果有较大的偏差。这一问题有待今后用实际流场资料和高级印痕模式(如拉格朗日印痕模式)解决。另外,对图 4c和图 4i虽然由前面的气象条件分析得知,这 2类不稳定小风条件包含了许多出现在夜间的情况,是较为特殊的,但这 2幅平均印痕图表现合理,看起来并未受到当地这一特有现象的影响。

4 4 印痕气候学 (footprint clim atology)

在以上分析中没有考虑实际通量观测值的变化,所获平均印痕反映的是通量观测的潜在影响区域。这些结果对实验设计、观测站点空间代表性评价是很有价值的。对于实际观测数据的分析而言,以通量观测值为权重对印痕函数求长期平均,可获得该观测量的气候学平均印痕。其意义是,可反映通量观测气候平均值的实际地面贡献源区分布^[22]。因此,气候学平均印痕提供这样一套空间权重信息,使平均湍流通量观测结果可以与其他遥感方法获得的对应区域的加权平均通量结果定量比较。当然,对不同的观测量,气候学平均印痕的结果是不同的。这里以前述 12类气象条件的感热通量为例,计算对应的气候学平均印痕。计算中假设 LAS观测结果与同时刻涡旋相关观测结果一致,因此使用涡旋相关观测的逐时次的感热通量值,以避免夜间 LAS观测结果的不确定性。各类型的平均感热通量值见表 1。将计算的气候学平均印痕与图 4显示的简单平均印痕相比,稳定与不稳定条件下的结果形态变化不大,但稳定条件下的范围更小些,不稳定时范围基本不变或略大。图 5显示了当地山谷风环流典型日变化条件下,夜间类(稳定、偏东北小风)与白天类(不稳定、偏西南大风)感热通量的全年气候平均印



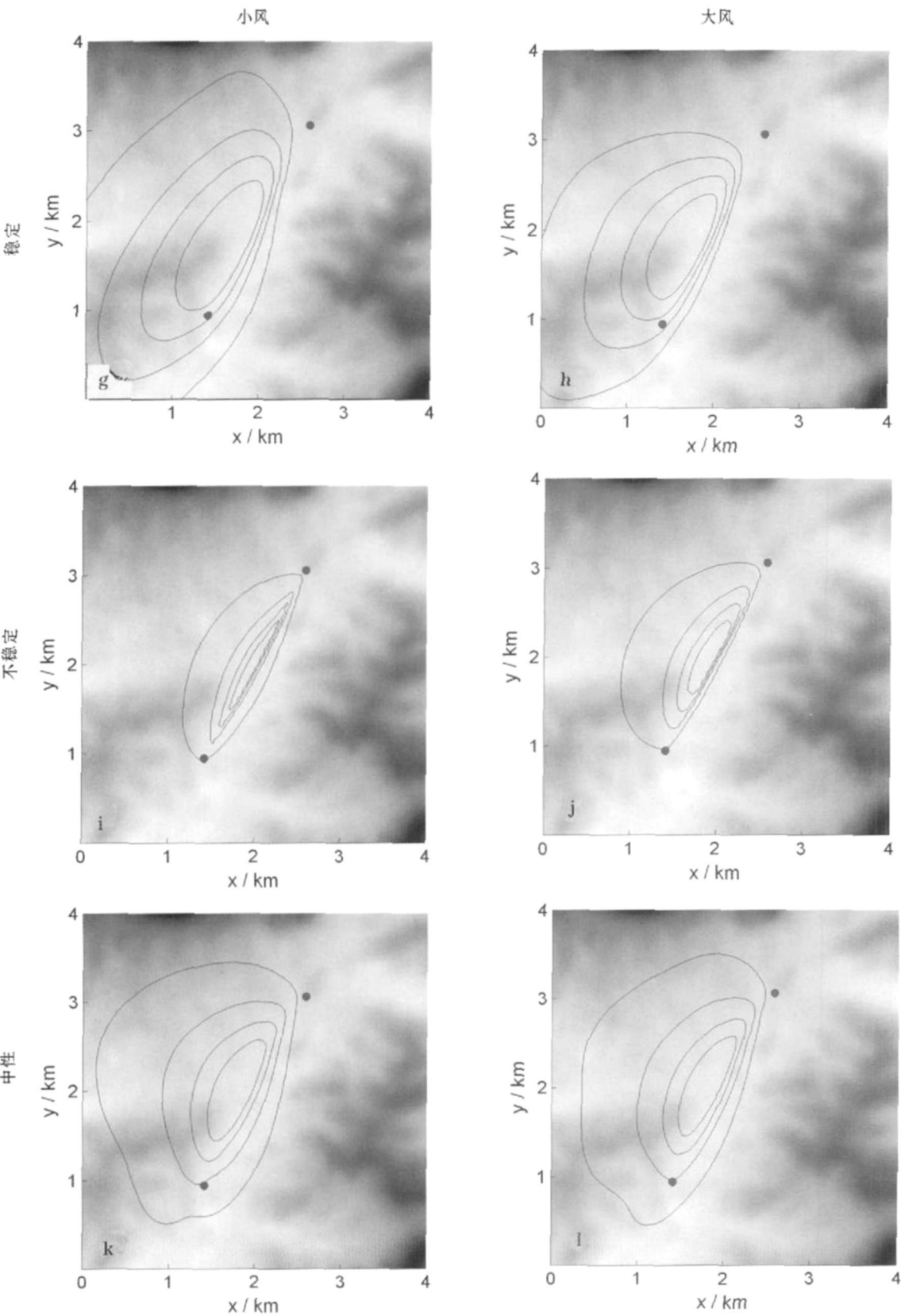


图 4 a~f 为偏东北风情况, g~l 为偏西南风情况; 等值线由内到外分别为 30%、50%、70% 和 90% 印痕贡献率区域
Mean footprints for weather conditions of northeasterly winds (a~f), and southwesterly winds (g~l)

Contours from outer to inner denote 30%, 50%, 70% and 90% footprint contributions

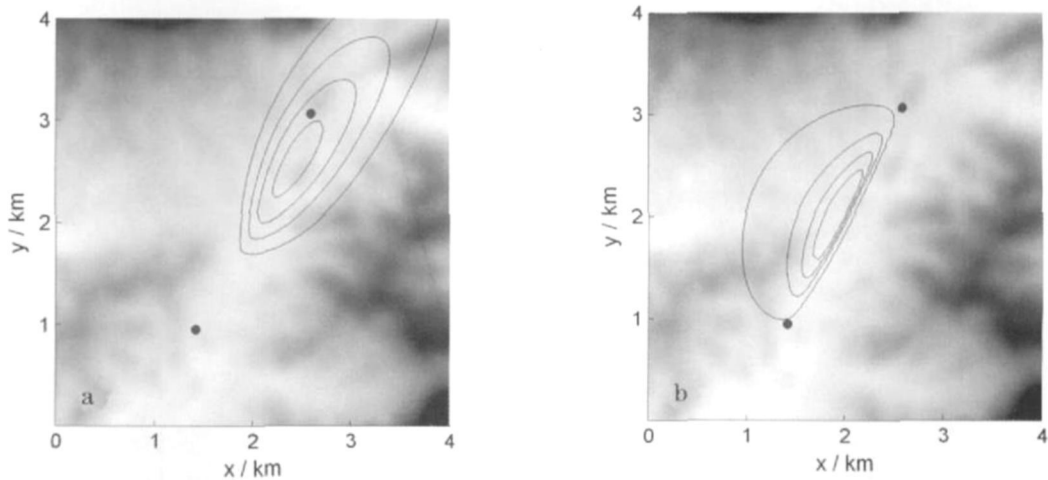


图 5 感热通量的气候学平均印痕分布

Fig 5 Climatological mean footprint for sensible heat flux

a 典型夜间类型 (稳定、偏东北小风); b 典型白天类型 (不稳定、偏西南大风)

a Nocturnal case; b Daytime case

痕。可见, 全年 LAS 观测到的典型夜间感热通量仍然主要来自模式范围内, 典型白天感热通量则来自 LAS 光径西侧。注意图 5a 比图 4a 的简单平均印痕范围缩小, 而图 5b 与图 4j 的结果几乎相同。当然, 感热通量反映的只是地—气间能量交换的一个分量。其他物理量如二氧化碳通量、蒸散量等, 也可使用类似方法计算气候平均印痕分布。

5 总结与结论

本文对北京密云站大孔径闪烁仪的长期观测进行了平均印痕分析。以 2008 年的全年湍流观测资料为基础, 结合整体湍流特征量以及其他数据合理性判据对观测数据进行了筛选, 使所用数据较符合近地面层相似性。使用一个解析解模型逐时次计算大孔径闪烁仪的二维通量印痕, 并进行数学平均, 获得各季平均印痕分布。结果表明, 当地大孔径闪烁仪的平均通量印痕季节变化不大, 春、夏季偏西南的成分略大, 秋、冬季则略偏东北。平均印痕覆盖区域主要落在大孔径闪烁仪光径所处的山谷及周边山坡地带。

将当地气象条件按风向、风速和稳定度分为 12 类, 分别统计各类条件的全年出现频率以及对应的平均印痕分布。结果显示, 各类气象条件中, 稳定度和风向是影响印痕区域大小和方向的重要因素, 风速的影响相对较小。分析显示了平均印痕区域的典型日夜变化情况。同时显示, 大孔径闪烁仪观测较为有效的白天不稳定条件的平均印痕区域集中于光

径的东西两侧。

以实际湍流通量为权重对逐时印痕结果进行气候学统计平均, 可反映具体观测量的空间代表性。本文以实测感热通量为例计算了大孔径闪烁仪通量观测对应的气候平均印痕区域。结果显示, 与简单平均的印痕分布相比, 感热通量气候平均印痕在不稳定条件下几乎不变, 稳定条件下范围缩小。

参考文献 (References):

- [1] Jia Zhenzhen, Liu Shaomin, Mao Defa, *et al.* A study of the validation method of remotely sensed evapotranspiration based on observation data [J]. *Advances in Earth Science*, 2010, 25 (11): 1248-1260 [贾贞贞, 刘绍民, 毛德发, 等. 基于地面观测的遥感监测蒸散量验证方法研究 [J]. *地球科学进展*, 2010, 25 (11): 1248-1260]
- [2] Kiehl J, Hong S H, Hendricks J M H. New Mexico scintillometer network-Supporting remote sensing and hydrologic and meteorological models [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2009, 90: 207-218.
- [3] Timmermans W J, Su Z, Orlowski A. Footprint issues in scintillimetry over heterogeneous landscapes [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2009, 13 (11): 2179-2190.
- [4] Schmid P. Footprint modeling for vegetation-atmosphere exchange studies: A review and perspective [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2002, 113: 159-183.
- [5] Vesak T, Kljun N, Rannik U, *et al.* Flux and concentration footprint modelling: State of the art [J]. *Environmental Pollution*, 2008, 152: 653-666.
- [6] Cai Xuhui. Footprint analysis in micrometeorology and its extended applications [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2008, 32 (1): 123-132 [蔡旭晖. 湍流微气象观测的印痕分析方法及其应用拓展 [J]. *大气科学*, 2008, 32 (1): 123-132]
- [7] Meijninger W, Hartogensis O, Kohsiek W, *et al.* Determination of area-averaged sensible heat fluxes with a large aperture scintillimetry

- ter over a heterogeneous surface: Flevoland field experiment[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2002, 105: 63-83.
- [8] Horst T W, Weil J C. Footprint estimation for scalar flux measurements in the atmospheric surface-layer[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1992, 59: 279-296.
- [9] Ezzahar J, Chehbouni A. The use of scintillometry for validating aggregation schemes over heterogeneous grids[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, 149(12): 2 098-2 109.
- [10] Ezzahar J, Chehbouni A, Hoedjes J *et al*. Combining scintillometer measurements and an aggregation scheme to estimate area-averaged latent heat flux during the AMMA experiment[J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 375(1/2): 217-226.
- [11] Peng Guliang, Cai Xuhui, Liu Shaomin. A flux footprint model for large aperture scintillometry[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2007, 43(6): 822-827. [彭光亮, 蔡旭晖, 刘绍民. 大孔径闪烁仪湍流通量印痕模型的建立与应用[J]. 北京大学学报, 2007, 43(6): 822-827.]
- [12] Komann R, Meikner F X. An analytic footprint model for non-neutral stratification[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2001, 99: 207-224.
- [13] Wang Weizhen, Xu Ziwei, Liu Shaomin, *et al*. The characteristics of heat and water vapor fluxes over different surfaces in the Heihe river basin[J]. *Advances in Earth Science*, 2009, 24(7): 714-723. [王维真, 徐自为, 刘绍民, 等. 黑河流域不同下垫面水热通量特征分析[J]. 地球科学进展, 2009, 24(7): 714-723.]
- [14] van Ulden A P. Simple estimates for vertical diffusion from sources near the ground[J]. *Atmospheric Environment*, 1978, 12: 2 125-2 129.
- [15] Gryning S E, Holtslag A A M, Ijm J S *et al*. Applied dispersion modelling based on meteorological scaling parameters[J]. *Atmospheric Environment*, 1987, 21: 79-89.
- [16] Cai X H, Peng G L, Guo X F, *et al*. Evaluation of backward and forward lagrangian footprint models in the surface layer[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2008, 93: 207-223.
- [17] De Bruin H A R, Bink N J, Kroon L J. Fluxes in the surface layer under advective conditions[C] // Schugge T J, Andre J C, eds. Workshop on Land Surface Evaporation Measurement and Parametrization. New York: Springer, 1991: 157-169.
- [18] Gockede M, Reimann C, Foken T. A combination of quality assessment tools for eddy covariance measurements with footprint modelling for the characterisation of complex sites[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, 127: 175-188.
- [19] Panofsky H A, Tennekes H, Lenschow D H, *et al*. The characteristics of turbulent velocity components in the surface layer under convective conditions[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1977, 11: 355-361.
- [20] Kaimal J C, Finnigan J. Atmospheric Boundary Layer Flows: Their Structure and Measurement[M]. New York: Oxford University Press, 1994: 304.
- [21] Gu Xiaoxiao. Micrometeorological Characteristics and Surface Parameters over Inhomogeneous Landscape of Haihe River Basin[D]. Beijing: Beijing Normal University, 2010: 89. [顾笑筱. 海河流域不同下垫面微气象与地表参数特征分析[D]. 北京: 北京师范大学, 2010: 89.]
- [22] Chen B Z, Black T A, Coops N C, *et al*. Assessing tower flux footprint climatology and scaling between remotely sensed and eddy covariance measurements[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2009, 130: 137-167.

Flux Footprint Analysis and Application for the Large Aperture Scintillometer

CAI Xuhui¹, ZHU Mingjia², LIU Shaomin², XU Ziwei²

(1. Department of Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China; 2. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, School of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract Mean flux footprints were analyzed for long-term measurements of a large aperture scintillometer (LAS) in Miyun county, Beijing. A set of half-hourly mean full-year turbulence data in 2008 was used for the analysis. As a quality control, one of the integral turbulent characteristics, σ_w/\bar{u}_* , was used to exclude that part of data which may violate the Monin-Obukhov similarity, in combining with other reasonability assessments. We yielded a sub-set data of 6 806 available from the total of 8 152 in the year. A footprint model based on an analytical solution was applied to calculate the 2-dimensional footprints for the LAS measurements. Accordingly, seasonal mean footprints, as well as the mean footprints for 12 types of meteorological conditions at this site, were calculated. Wind direction, wind speed and atmospheric stability were used to determine the meteorological type. Finally, as an example, footprint climatology for sensible heat flux was derived, by averaging the footprints with the real flux measurements as the weight function. Results showed that the mean footprint at this site varied little seasonally, stability and wind direction influenced the footprint size and location significantly while the wind speed played a relatively weak role in it. Long-term mean turbulent fluxes and their spatial representativeness can be expressed better by the flux-weighted mean footprint, which differed from the simple mean footprint slightly at this site, for the case of sensible heat flux.

Key words Large aperture scintillometer; Flux measurement; Footprint; Climatology