

文章编号: 1000-0534(2009)02-0246-12

涡动相关仪和大孔径闪烁仪观测 通量的空间代表性

宫丽娟¹, 刘绍民^{1*}, 双喜¹, 蔡旭辉², 徐自为¹

(1. 北京师范大学 遥感科学国家重点实验室/地理学与遥感科学学院, 北京 100875;

2. 北京大学 环境科学系, 北京 100871)

摘要: 在对涡动相关仪和大孔径闪烁仪足迹模型进行敏感性分析的基础上, 利用北京密云站 2006 年 8 月至 2007 年 12 月期间的观测资料, 应用足迹模型对观测通量的空间代表性做了初步的分析。结果表明: 涡动相关仪和大孔径闪烁仪的源区对风向、 $M_{\text{onin}} - Obukhov$ 长度, 空气动力学粗糙度和观测高度/有效高度等因子比较敏感。密云站涡动相关仪的源区白天主要分布在仪器的西南与南面, 而夜间则在东北与北面。大孔径闪烁仪的源区为西南—东北向分布。涡动相关仪各月源区形状不同, 但大致分布在南北长 1000 m、东西宽 850 m 的范围内, 而 LAS 各月源区为西南—东北向分布, 长约 2060 m, 最宽处约为 620 m。对涡动相关仪通量有贡献的下垫面主要为园地(67%)和耕地(19%)。其中园地的通量贡献比例在夏、秋季比较大, 冬、春季稍小, 而耕地则相反。大孔径闪烁仪的主要通量贡献源区为园地、耕地和居民地, 通量贡献比例分别为 49%, 28% 和 11%。其中园地和耕地通量贡献率的变化趋势与涡动相关仪的观测结果一致, 但没有涡动相关仪的变化明显。

关键词: 涡动相关仪; 大孔径闪烁仪; 源区; 足迹

中图分类号: P41 **文献标识码:** A

1 引言

地表湍流通量是表征地—气间相互作用过程的重要物理量, 其变化特征对上层大气状态可能产生深远的影响^[1]。目前应用较为广泛的通量测量技术如涡动相关仪(EC)和大孔径闪烁仪(LAS), 是直接测量陆地和大气之间通量的有效工具^[2-3]。前者是单点观测, 后者的测量范围则可从几百米到十公里以上。由于二者的传感器都架设在一定的高度上, 其测量结果只是反映特定下垫面或某部分下垫面的物理过程, 这样由点到面或者由线到面的空间代表性就成为通量观测中不可忽视的问题。通量观测足迹和源区的提出正是解决这一问题的有效方法。借助于足迹(footprint)函数可以定量地分析观测信息与地面状况的关系, 而源区(source area)正是仪器测量结果所反映的下垫面信息。

早在 1983 年, Pasquill 等^[4]就提出了足迹的概

念, 指出足迹是测量值与地表—大气间一系列强迫项的传输函数。在随后的十几年中足迹理论和方法取得了较大进展, 并被广泛应用到微气象和大气污染扩散等领域。足迹模型主要通过大气扩散理论, 建立起仪器观测值与近地层表面源(汇)空间分布的传输关系, 对观测区域内的地气之间能量与物质交换进行定量的描述, 是通量观测站址的选择^[5]、观测通量的空间代表性分析^[6-7]与观测数据的质量评估^[8-9]以及遥感反演通量的验证等的有用工具^[10-11]。目前的足迹模型一般分为三类: (1)解析足迹模型^[12-15]; (2)拉格朗日随机足迹模型(LS)^[16-19]; (3)基于大涡模拟(LES)的足迹模型^[20]。理论上, 用边界层湍流闭合模式对扩散过程进行数值模拟也可以导出足迹函数, 然而这方面的工作开展较晚, 只是在近年才有一些报道^[21-22], 但仍然表明这种方法是令人鼓舞并具有发展前景的。Schmid^[23]系统地总结了这方面的研究成果。

收稿日期: 2008-03-31; 改回日期: 2008-12-17

基金项目: 公益性行业(气象)科研专项(GYHY200706046); 国家高技术研究发展计划课题(2007AA12Z175); 国家自然科学基金项目(40671128); 国家重点基础研究发展规划项目(2007CB714401)共同资助

作者简介: 宫丽娟(1982—), 女, 黑龙江人, 硕士研究生, 主要从事地表通量观测空间代表性研究。E-mail: gonglijuan820101@126.com

* 通信作者: 刘绍民。E-mail: smliu@bnu.edu.cn

解析足迹模型由于其机理简单和物理意义明确而得到了广泛的应用。最初的解析模型只适合于单点观测的足迹分析。经过十几年的发展，在通量观测站的足迹和源区分析中已有不同类型的解析模型得到应用。其中 Kormann 等^[24]模型在原有基础上给出了一个真正意义上的足迹解析解。本文根据文献[24]提出的原理对涡动相关仪观测通量的足迹和源区进行分析。

由于涡动相关仪通量观测的空间代表性较小，当前大孔径闪烁仪的发展很快，用它可测量非均匀下垫面一个较大尺度上的显热和潜热通量。2000年 Bastiaanssen 等^[25]在土耳其进行试验，利用 TM 遥感数据反演地表通量，并结合 LAS 观测和足迹函数分析进行地面验证。结果表明：离 LAS 光径较近地表的通量贡献大，而且在光径中间的地表通量贡献大于两端。2002年 Meijninger 等^[26]将原有的单点足迹解析模型与 LAS 光径的权重函数相结合，得到了 LAS 足迹解析函数。彭谷亮等^[27]根据 Meijninger 等^[26]提出的方法对 LAS 的源区和足迹进行了分析。

本文拟利用 2006 年 8 月—2007 年 12 月北京

地区密云观测站涡动相关仪和大孔径闪烁仪的通量观测数据以及气象数据与土地利用/覆盖图，开展足迹模型的敏感性分析，计算长时间序列的通量观测源区，分析涡动相关仪和大孔径闪烁仪观测通量的空间代表性，为今后通量观测数据的应用提供参考依据。

2 观测站与观测数据

2.1 测站概况

密云站(117° 19′ 23. 8″E, 40° 37′ 50. 8″N)于 2006 年 8 月开始观测。它位于一个西南—东北走向的山谷中。一套 LAS(Kipp& Zonen, 荷兰)的发射和接收端安装在南北两座小山顶，光径长度约 2420 m，与正北方向夹角成 29°，其中接收端在西南面。涡动相关仪架设在靠近 LAS 光径中间的一座铁塔上(高 31.5 m)，距离 LAS 接收端约 900 m。该铁塔上还有净辐射、地表辐射温度和两层风温湿以及气压、降水量等气象要素观测。塔下埋设有土壤热流量板(0.02 m)以及多层的土壤温度(0.05, 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 和 1 m)与土壤湿度传感器(0.05, 0.1, 0.2, 0.4, 0.6和 1 m)。图1是密云

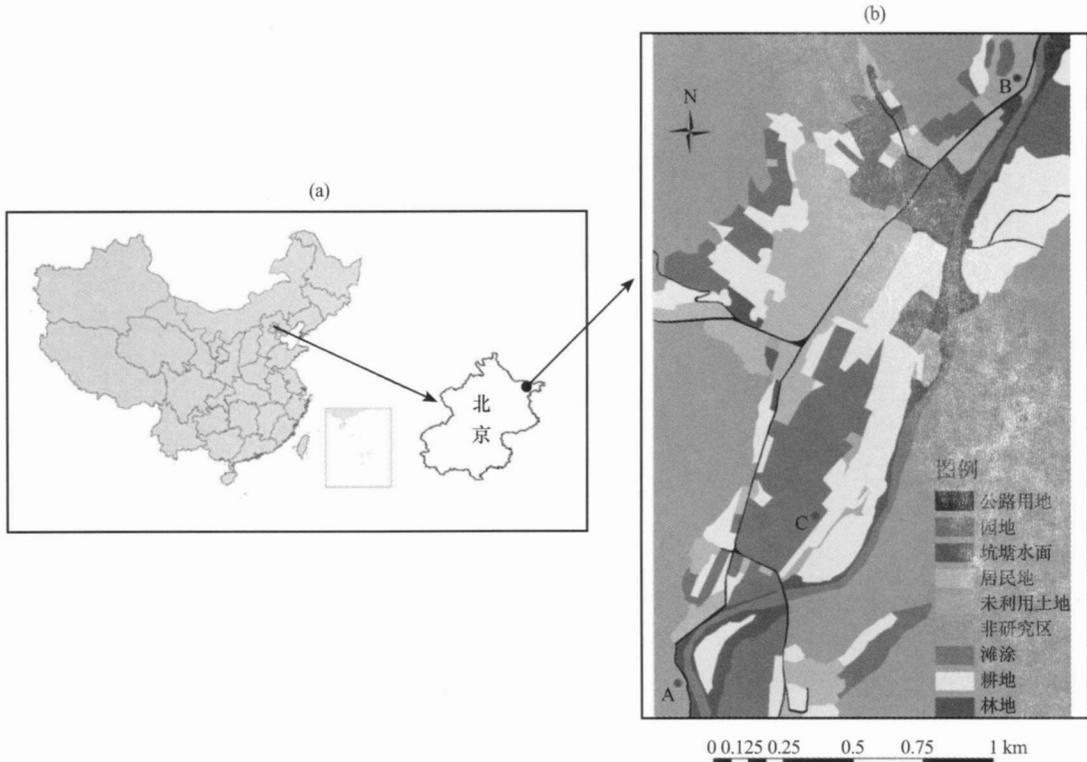


图 1 密云观测站示意图

A 点为 LAS 接收仪，B 点为 LAS 发射仪，C 点为涡动相关仪

Fig. 1 Map of the Miyun observation station. A: LAS receiver, B: LAS transmitter,

C: Eddy covariance system

表 1 密云观测站主要仪器型号和架高

Table 1 Main instrumentation at the Miyun observation station

站点	日期	下垫面	仪器型号及架高		
密云	2006年8月至 2007年12月	园地、耕地 及居民地等	LAS	型号 光径长度 有效高度	LAS, Kipp&Zonen, 荷兰 2420 m 35.86 m
			涡动相关仪	型号 架高	CSAT3, Campbell; Li7500, Campbell 26.66 m
			风速、风向	型号 架高	WS03001, 荷兰 30.56 m(上层), 10.66 m(下层)
			空气温、湿度	型号 架高	HMP45C, 芬兰 30.56 m(上层), 10.66 m(下层)
			净辐射	型号 架高	CNR-1, 荷兰 30.76 m
			降水量	型号 架高	Young-52203, 美国 31.46 m

观测站及下垫面类型示意图。表 1 为观测站的主要仪器型号与架高。

2.2 观测数据的处理与筛选

本文选取密云观测站 2006 年 8 月—2007 年 12 月期间涡动相关仪、大孔径闪烁仪的观测数据以及气象观测数据。涡动相关仪原始数据采集频率为 10 Hz, 采用英国爱丁堡大学开发的 EdiRe 软件对湍流原始资料进行后处理^[28], 包括野点值的剔除、坐标旋转处理、空气密度效应的修正(即 WPL 修正)等, 输出 30 min 平均数据。大孔径闪烁仪的采样频率为 2 s, 平均为 10 min 数据。

根据研究的需要, 利用以下标准对密云站的数据进行筛选: (1) 非降水(雨, 雪)天; (2) 剔除原始涡动相关仪 30 min 和大孔径闪烁仪 10 min 数据中记录不完整的时次; (3) 仅用白天不稳定层结时段(08:00~17:00)的 LAS 数据。

3 理论与方法

3.1 涡动相关仪观测通量的足迹解析模型

足迹解析模型一般使用 van Ulden^[29]的有关近地面单位点源扩散的侧向积分垂直分布的表达式。在满足地面均匀的条件下, 使用烟云反转假设, 根据近地面层的 Monin-Obukhov 相似理论推导出解析解。本文中涡动相关仪用到的解析足迹模型是根据 Kormann 等^[24]提出的足迹函数解析解而建立的。该方法主要应用了近地面层风速廓线、湍流扩散系数廓线和近地面层的相似理论来推导出通量足

迹的解析解。计算过程中首先假定水平风速 u 和湍流扩散系数 K 的垂直廓线是高度 z 的幂函数, 公式如下:

$$u = U z^m, \quad (1)$$

$$K = \alpha z^n, \quad (2)$$

式中 U 和 α 为常数。指数 m 和 n 为

$$m = \frac{z}{u} \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{u^*}{k} \frac{\Phi_m}{u}, \quad (3)$$

$$n = \frac{z}{K} \frac{\partial K}{\partial z}, \quad (4)$$

式中 u^* 为摩擦速度, k 为 von Karman 常数, Φ_m 为动量传输的普适函数。

再根据如下近地面层关系式:

$$u = \frac{u^*}{k} \left[\ln \frac{z}{z_{0m}} + \Phi_m \left(\frac{z}{L} \right) \right], \quad (5)$$

$$K = \frac{ku^* z}{\Phi_n}, \quad (6)$$

其中 L 为 Monin-Obukhov 长度, z_{0m} 是空气动力学粗糙度, Φ_n 为热量传输的普适函数, Φ_m 为动量传输的稳定度修正函数的积分形式。

由(3)~(6)式代入(1)和(2)式求出 U 和 α , 并导出通量的侧向积分足迹函数:

$$f^y(x, z) = \frac{1}{\Gamma(1+\mu)} \frac{\xi^\mu}{x^{1+\mu}} e^{-\xi x}, \quad (7)$$

其中 x 为上风向距离, Γ 为伽玛函数, $\mu = (1+m)/r$, $r = 2+m-n$, $\xi = \frac{Uz^r}{r\alpha}$ 。结合侧风向扩散函数

$D_y(x, y)$ 得到通量足迹函数 $f(x, y, z)$:

$$D_y(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{y^2}{2\sigma^2}}, \quad (8)$$

$$f(x, y, z) = \frac{1}{\Gamma(\mu)} \frac{\xi^\mu}{x^{1+\mu}} e^{-\xi x} \cdot D_y, \quad (9)$$

其中 σ 为侧风向风速的标准差。

3.2 大孔径闪烁仪观测通量的足迹解析模型

大孔径闪烁仪的足迹模型是将点通量的足迹函数与 LAS 沿光径方向的权重函数相结合, 计算 LAS 的源区分布。彭谷亮等^[27] 以此为基础, 建立了 LAS 通量的足迹模型, 其公式如下:

$$f_{LAS} = \int_{x_2}^{x_1} W(x) f(x - x', y - y', z_{LAS}) dx, \quad (10)$$

式中 f_{LAS} 表示 LAS 的通量足迹函数, x_1 和 x_2 分别表示 LAS 发射仪和接收仪的位置, x 和 y 表示 LAS 光径上每个点的坐标, x' 和 y' 表示 LAS 光径上每个点在上风方向的坐标, z_{LAS} 是 LAS 有效高度。其中单点足迹函数 f 以 (9) 式为基础, LAS 光径的权重函数 $W(x)$ 表达式为

$$W(x) = 4\pi^2 u_{LAS}^2 \int_0^\infty \phi(u) \sin^2 \left[\frac{u x (d - x)}{2u_{LAS} d} \right] \cdot \left[\frac{2J_1(m_1) 2J_1(m_2)}{m_1 m_2} \right]^2 du \quad (11)$$

其中:

$$m_1 = 0.5 \mathcal{W} \frac{x}{d}, \quad (12)$$

$$m_2 = 0.5 \mathcal{W} \left(1 - \frac{x}{d} \right), \quad (13)$$

$$\phi(u) = 0.033 \bar{v}^{\frac{4}{3}}, \quad (14)$$

式中 d 是 LAS 的光径长度, u_{LAS} 是 LAS 发射光的波数, u 是湍流谱空间的波数, D 是 LAS 光学镜面的直径, $J_1(m)$ 是第一类贝塞耳函数。

涡动相关仪是在一个点上对地气之间的通量进行观测, 而 LAS 是通过测量发射仪和接收仪之间的湍流强度来获取区域地表感热和潜热通量。在相同的大气稳定度和下垫面状况下, 涡动相关仪和 LAS 源区的形状和大小是不同的。图 2a, c 与图 2b, d 分别是风向 90° (以正北为 0° , 顺时针为正) 和风向 180° 时涡动相关仪和 LAS 源区的示意图 (输入参数见表 2 中不稳定条件)。

在其它条件不变时, 当风向发生改变 (由 90° 变为 180°) 时, 涡动相关仪源区的范围不变, 位置则

发生变化 (图 2a, b)。而 LAS 的源区无论大小和位置都发生了变化 (图 2c, d)。在风向为 90° 的时候, LAS 源区位于光径右侧 500 m 内, 通量贡献的最大点位于上风向距离光径中心 90 m 处。而当风向为 180° 的时候 (与光径平行), LAS 源区主要分布在光径的两侧, 通量贡献的最大点位于距光径中心偏南 210 m 处。LAS 源区在风向不同时有很大的差异, 这主要因为: 第一, LAS 沿光径方向的权重函数呈钟形分布, 在中间最大, 越往两边越小; 第二, 在计算 LAS 源区时将其光径长度离散为一定数量的点。当风向为 90° 时, 各离散点的源区主要在与光径垂直的区域; 而当风向为 180° 时, 各离散点的源区则主要与光径平行, 各点源区相互叠加, 主要分布在光径的两侧。

对于影响涡动相关仪和 LAS 源区的其它因子将在下面的敏感性分析中做进一步的说明。

4 敏感性分析

本文中使用的足迹模型包括涡动相关仪和大孔径闪烁仪观测通量的足迹模型。模型输入参数为 Monin-Obukhov 长度 L 、摩擦速度 u^* 、平均风速 u 、风向 VD 、侧向风速标准差 σ 、下垫面的空气动力学粗糙度 z_{0m} 、涡动相关仪观测高度 z_e / LAS 有效高度 z_{LAS} 等。本文根据密云站的观测数据选取 2 个典型特例 (表 2), 分别讨论 Monin-Obukhov 长度 L 、空气动力学粗糙度 z_{0m} 、涡动相关仪观测高度 z_e / LAS 有效高度 z_{LAS} 等对涡动相关仪和 LAS 足迹的影响。

4.1 涡动相关仪

4.1.1 Monin-Obukhov 长度 L

Monin-Obukhov 长度 L 可以反映近地层大气湍流状况, 是影响通量足迹的重要因子。以表 2 中 L 及所对应的参数计算通量足迹值作为参考值。表 3 为其它条件不变情况下, 当 L 变化为 ± 5 m 时, 计算得到通量足迹 f 与参考值比较的均方差 RMSD 和平均绝对百分比误差 MAPD。

从表 3 中可见: (1) L 从 $-41 \sim -31$ m 与 L 从 $95 \sim 105$ m, RMSD 和 MAPD 均增大, 即高估 L 会使得足迹的计算误差增大。(2) 不稳定下的 RMSD 和 MAPD 要大于稳定条件下的情况。在不稳定情况下, L 对通量源区的影响更大。 L 的变化会带来比较明显的足迹计算差异。

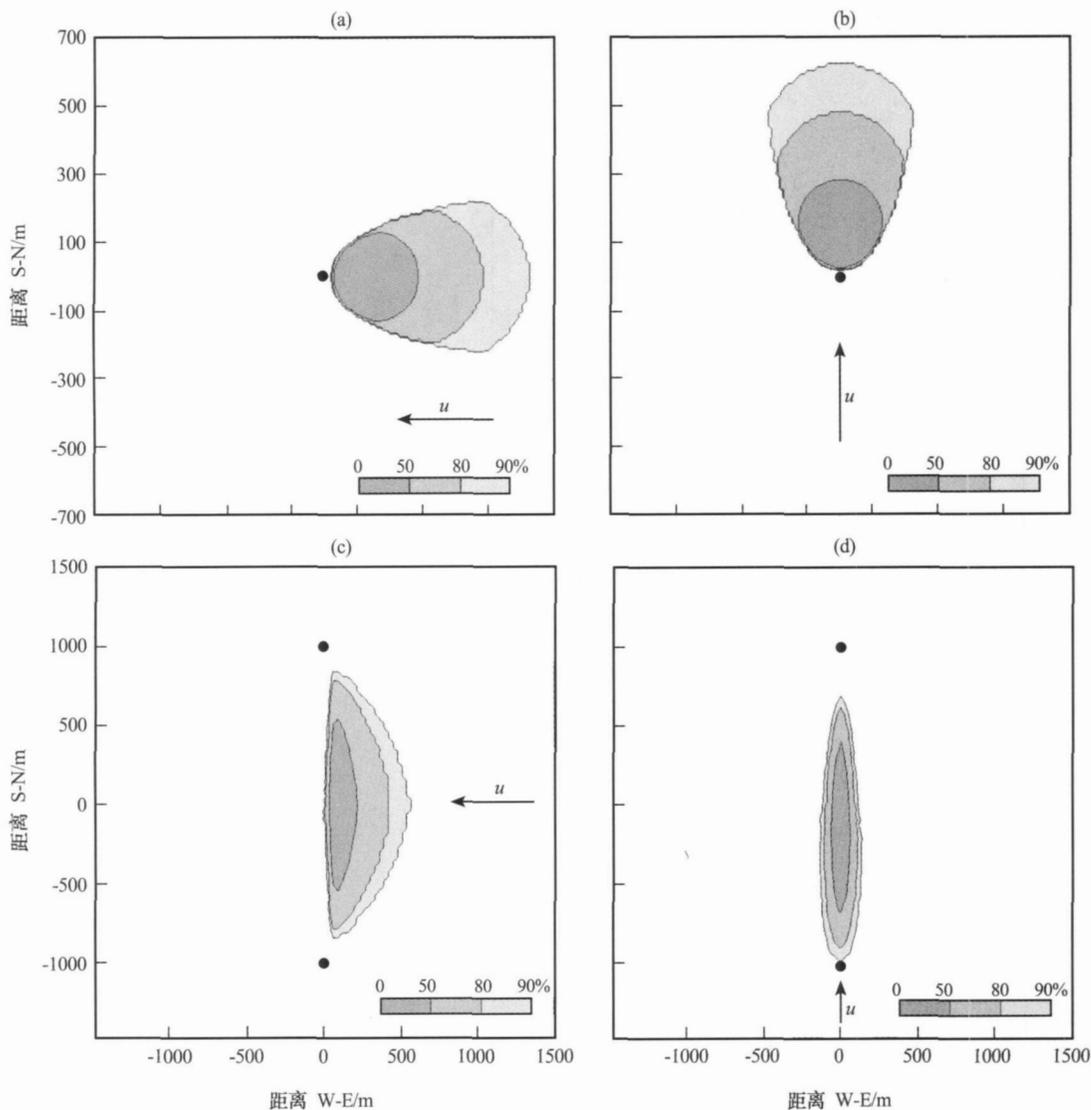


图 2 涡动相关仪和 LAS 源区

(a) 和 (b) 黑实心圆代表涡动相关仪位置, (c) 和 (d) 黑实心圆代表 LAS 发射仪和接收仪的位置, 箭头代表风向, 阴影区代表 90%、80% 和 50% 的通量贡献率, 下同

Fig. 2 Source areas for the eddy covariance system and LAS. The arrow stands for the wind direction.

Shaded areas represent 90%, 80% and 50% - level source area for respectively, the same below.

(a) and (b) black circle indicate the location of an eddy covariance system, (c) and (d) black circle stand for the location of LAS transmitter and LAS receiver

4. 1. 2 空气动力学粗糙度 z_{0m} 和观测高度 z_{ec}

空气动力学粗糙度 z_{0m} 和观测高度 z_{ec} 是计算通量足迹和源区的关键因子。Verhoef 等^[30]指出,

z_{0m} 的估算误差常可达 50%。因此, 在其它条件不变时, 将 z_{0m} 浮动 $\pm 50\%$ 后计算通量足迹, 并与参考值进行比较, 探讨 z_{0m} 的不确定性对通量足迹的

表 2 足迹模型的输入参数

Table 2 Input parameters of footprint models

	M- O 长度 / m	摩擦速度 $/(m \cdot s^{-1})$	平均风速 $/(m \cdot s^{-1})$	风向 $/^{\circ}$	侧向风速标准差 $/(m \cdot s^{-1})$	空气动力学粗糙度 / m	高度 / m
	L	u^*	u	VD	σ	z_{0m}	z_e / z_{LAS}
不稳定	- 36	0. 28	1. 88	90	0. 86	0. 74	26. 66/ 35. 86
稳定	100	0. 20	1. 71	90	0. 57	0. 74	26. 66/ 35. 86

表 3 Monin-Obukhov 长度 L 不同取值条件下得到的 EC 通量足迹 f 与参考值的比较

Table 3 Statistics of f estimated with different L against the reference value for EC

	L/m			
	- 41	- 31	95	105
RMSD/ m^{-2}	1.11×10^{-4}	1.38×10^{-4}	1.35×10^{-5}	1.41×10^{-5}
MAPD/%	6.3	7.6	2.0	2.2

注: $(RMSD) = 1/1/n \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2$, $MAPD = 100/n \sum_{i=1}^n \frac{|P_i - O_i|}{O_i}$, n 为样本数, P_i 取 L 不同取值条件下的计算值, O_i 为参考值, 下同

影响。对于观测高度 z_{ec} , 一般在观测站建立后, 其值已经确定, 但作为敏感性分析, 本文也将 z_{ec} 值浮动 $\pm 20\%$ 后与参考通量足迹进行了比较, 结果如表 4 所示。

表 4 z_{0m} 和 z_{ec} 不同取值条件下得到的 EC 通量足迹 f 与参考值的比较

Table 4 Statistics of f estimated under different conditions (z_{0m} , z_{ec}) against the reference value for EC

	$1.5z_{0m}$	$0.5z_{0m}$	$1.2z_{ec}$	$0.8z_{ec}$
RMSD/ m^{-2}	1.96×10^{-4}	2.46×10^{-4}	2.06×10^{-4}	2.97×10^{-4}
MAPD/%	14.9	20.3	18.9	25.4

从表 4 中可以看出: (1) 当 z_{0m} 变化 $\pm 50\%$ 时, 会对通量足迹产生较大影响。密云观测站的下垫面由园地、耕地和居民地等组成, 地表状况比较复杂, 因此需要仔细地确定空气动力学粗糙度 z_{0m} 。(2) 当 z_{ec} 变化时也会对通量足迹产生较大影响。Schmid 等^[5]的研究也指出, 为了获取距离观测点较远或较近特定下垫面的通量信息, 可以通过调整仪器的架设高度来达到目的, 这也是在观测站建立前需要进行足迹分析的主要原因之一。

4.2 大孔径闪烁仪(LAS)

下面是大孔径闪烁仪的敏感性分析。在这里假设 LAS 的光径为南北向, 风向为东风。

4.2.1 Monin-Obukhov 长度 L

由表 5 可见: 与涡动相关仪类似, LAS 的通量足迹不稳定条件时, RMSD 和 MAPD 较大, 稳定条件下较小。在稳定条件下, LAS 的源区较大, 与观测点相同距离处的通量足迹减小, RMSD 要比不稳定条件下小一个量级。所以在大气不稳定条件下, L 对 LAS 通量源区的影响较大。

表 5 Monin-Obukhov 长度 L 不同取值条件下得到的 LAS 通量足迹 f 与参考值的比较

Table 5 Statistics of f estimated with different L against the reference value for LAS

	L/m			
	- 41	- 31	95	105
RMSD/ m^{-2}	1.12×10^{-4}	1.35×10^{-4}	0.97×10^{-5}	1.38×10^{-5}
MAPD/%	7.1	8.4	2.8	3.9

4.2.2 空气动力学粗糙度 z_{0m} 和有效高度 z_{LAS}

从表 6 中可以看到, 空气动力学粗糙度 z_{0m} 在 $\pm 50\%$ 的变化范围内, LAS 的有效高度 z_{LAS} 在 $\pm 20\%$ 的变化范围内时, MAPD 均 $> 15\%$, 说明 LAS 的通量足迹对二者都很敏感。对于密云观测站来说, LAS 光径的有效高度已经确定, 因此空气动力学粗糙度 z_{0m} 需要进行准确地估算。

表 6 z_{0m} 和 z_{LAS} 不同取值条件下得到的 LAS 通量足迹 f 与参考值的比较

Table 6 Statistics of f estimated under different conditions (z_{0m} , z_{LAS}) against the reference value for LAS

	$1.5z_{0m}$	$0.5z_{0m}$	$1.2z_{LAS}$	$0.8z_{LAS}$
RMSD/ m^{-2}	1.45×10^{-4}	1.70×10^{-4}	1.38×10^{-4}	7.10×10^{-4}
MAPD/%	17.5	19.9	19.3	27.1

5 结果分析

5.1 风场分析

将观测站的风向分为 8 个方位, 风速分 5 个等级进行统计(数据为 2006 年 8 月至 2007 年 12 月, 图 3a)。由图 3a 可见, 风向沿山谷方向分布呈现南(西南)一北方向分布。观测站全天风向以北风向为主(34%), 西南风次之(15%)。 $1 m \cdot s^{-1}$ ($0.5 \sim 1.5 m \cdot s^{-1}$) 附近的风速最多, 其次为 $2 m \cdot s^{-1}$ ($1.5 \sim 2.5 m \cdot s^{-1}$), 仅在个别时次风速较大(最大约 $9 m \cdot s^{-1}$), 平均风速是 $1.8 m \cdot s^{-1}$ 。图 3b 为风向日变化(以 2006 年 8 月 3 日为例)。白天风向以西南风为主, 夜间以北风为主, 早晚过渡时刻风向发生改变, 一般出现时间是 08:00 和 18:00。

5.2 通量贡献源区的变化

长时间序列的足迹是用来研究不同时间段内的平均足迹状况, 时间段从一天、月、季到年^[31]。本文在计算时只保留强湍流条件下的观测数据, 即利用摩擦速度 u^* 作为大气湍流强弱的判断标准, 剔

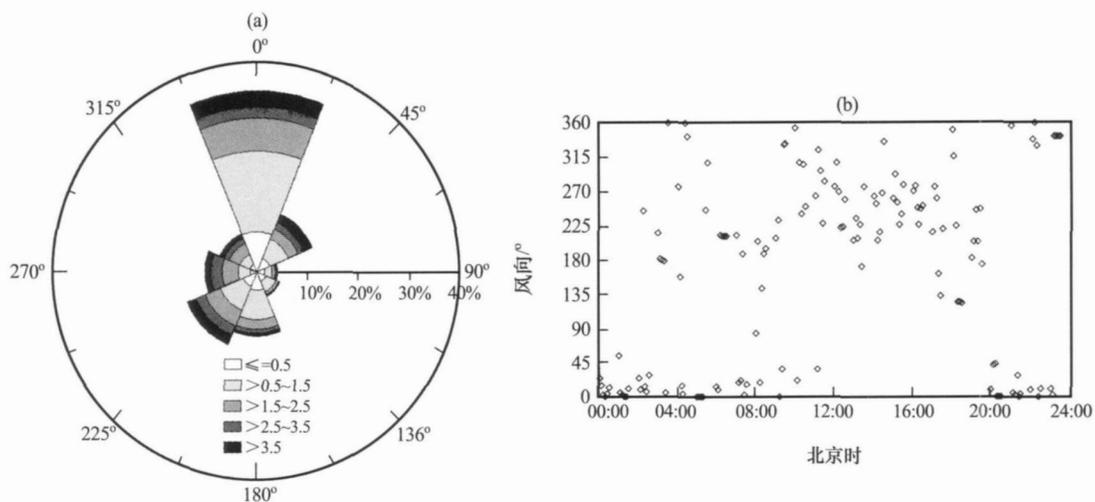


图3 风速、风向分布

(a) 风速、风向分布, (b) 风向的日变化

Fig. 3 Distributions of wind speed and wind direction. (a) distributions of wind direction and wind speed, (b) daily variation of wind direction

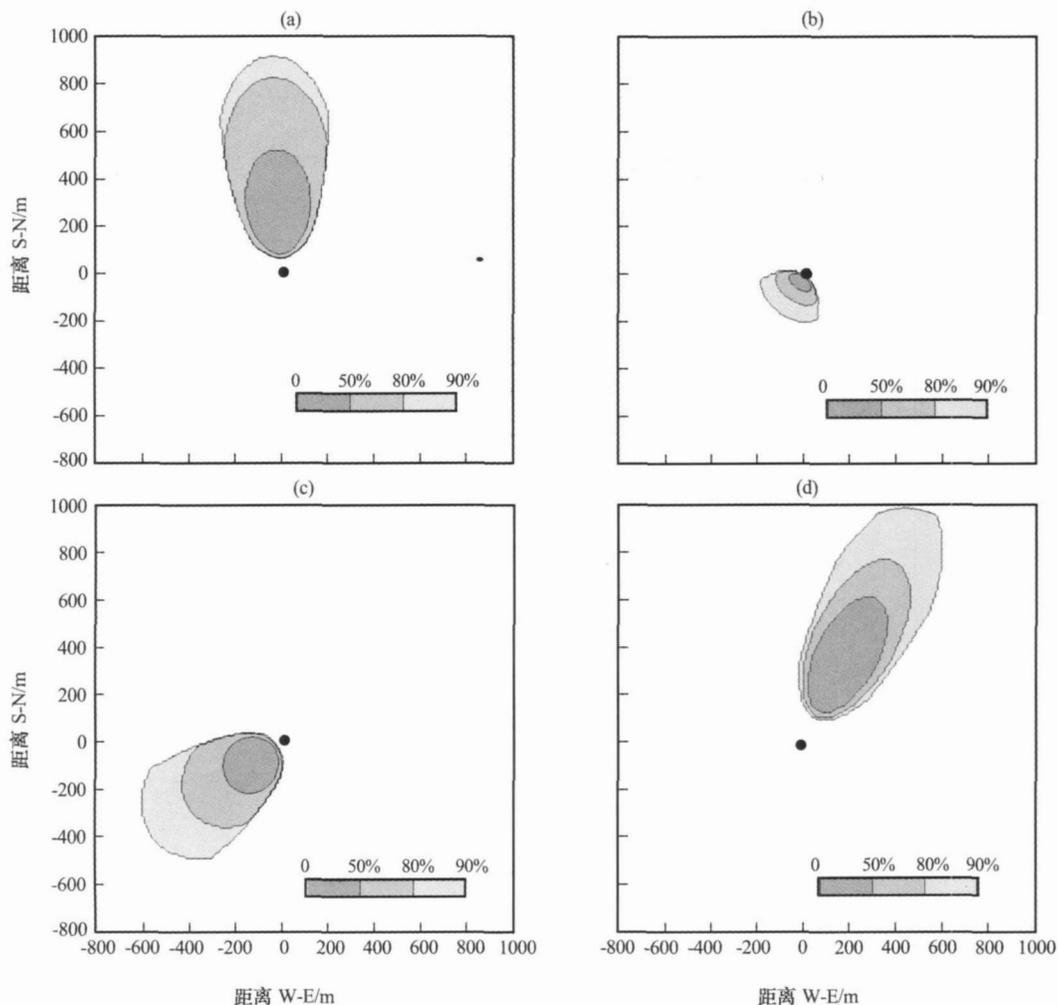


图4 涡动相关仪通量源区日变化

(a) 04:00, (b) 11:00, (c) 14:00, (d) 21:00, 黑实心圆代表涡动相关仪位置

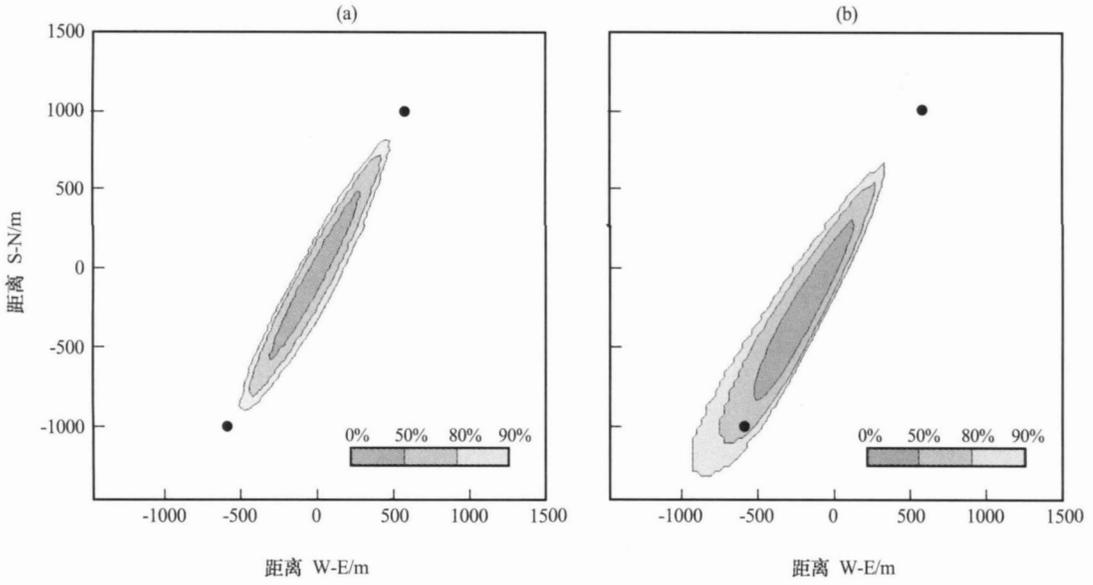


图 5 LAS 通量源区日变化

(a) 08:00, (b) 17:00, 黑实心圆代表 LAS 发射仪和接收仪的位置

Fig. 5 The daily variation of source area for LAS. Black circles stand for the location of LAS transmitter and LAS receiver

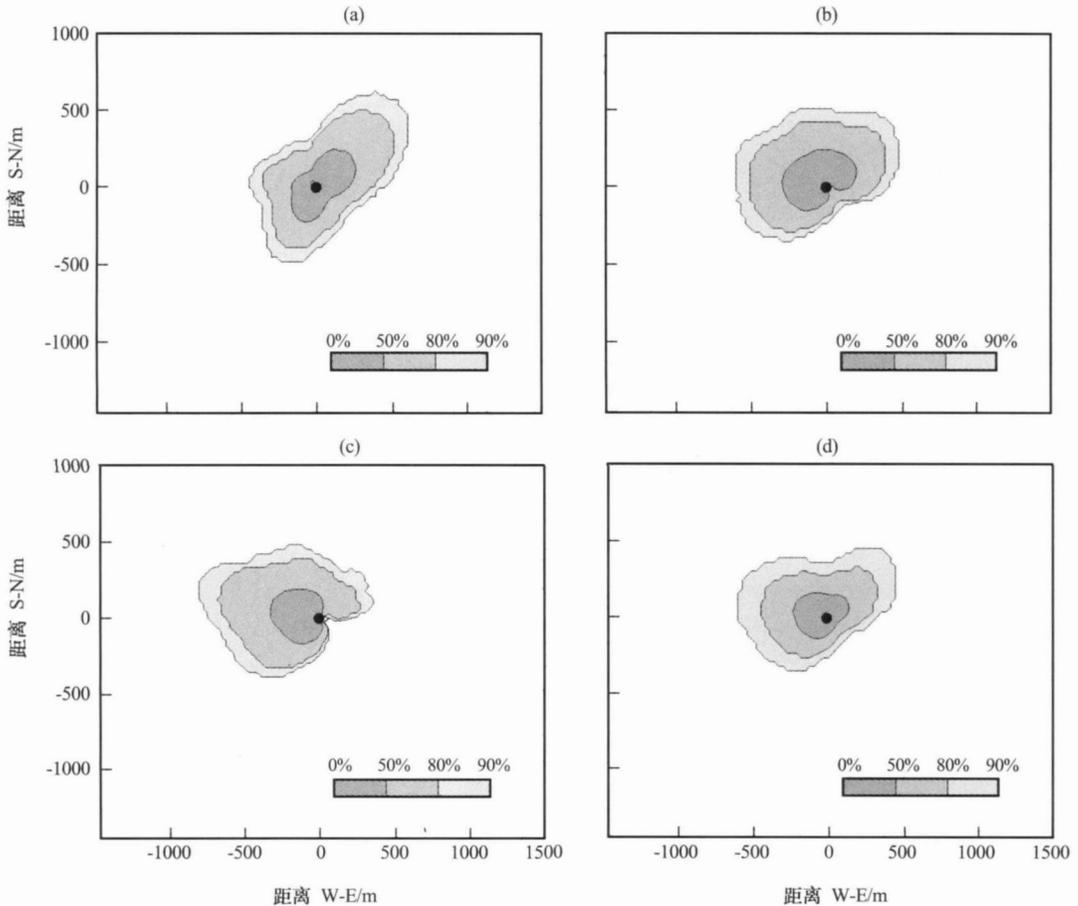


图 6 2007 年涡动相关仪通量源区月变化

(a) 1 月, (b) 4 月, (c) 7 月, (d) 10 月, 黑实心圆代表涡动相关仪位置

Fig. 6 Monthly variation of source area for the eddy covariance system. Black circles indicate the location of an eddy covariance system. (a) January, (b) April, (c) July, (d) October

除摩擦速度 u^* 小于某一个阈值以下的非湍流过程占主导地位的数据。对于摩擦速度 u^* 阈值的大小,不同的作者给出了不同确定方法^[32-34]。本文选取摩擦速度 u^* 的阈值为 $0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[33]。

另外,本文引入了通量足迹最大点 X_{max} ^[6] (即当通量足迹函数达到最大值(f_{max})时,投影于下表面的一点即为通量足迹最大的点 X_{max})。在计算长时间序列通量足迹时,增加一个 X_{max} 的限制条件,使通量足迹最大点落在感兴趣区域(Region of Interest, 简称为 ROI)内(非山体下垫面,即山谷中的平坦地表)。结合公式(9)和(10),可以计算通量观测的日、月或年平均的源区,公式为

$$f = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_i, \quad (15)$$

其中 n 代表样本数, f_i 表示第 i 个样本的足迹值,这里只取摩擦速度 $> 0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 并且足迹最大点落在感兴趣区内的样本。

5.2.1 通量源区的日变化

由于一天中大气稳定度、风速与风向会发生变化,故通量源区也随之变化。图4是2006年9月12日04:00, 08:00, 11:00, 14:00, 17:00和21:00时的涡动相关仪通量源区示意图。由图4可知,白天(08:00~17:00)的通量源区主要分布在涡动相关仪的西南与南面,而夜间的通量源区主要分布在东北与北面,涡动相关仪的主要通量贡献源区是园地,这与上面的风向分析是一致的。由于白天大气处于不稳定层结,通量源区范围(11:00 仅为 $250 \text{ m} \times 300 \text{ m}$) 小于夜晚稳定条件下的源区范围(04:00

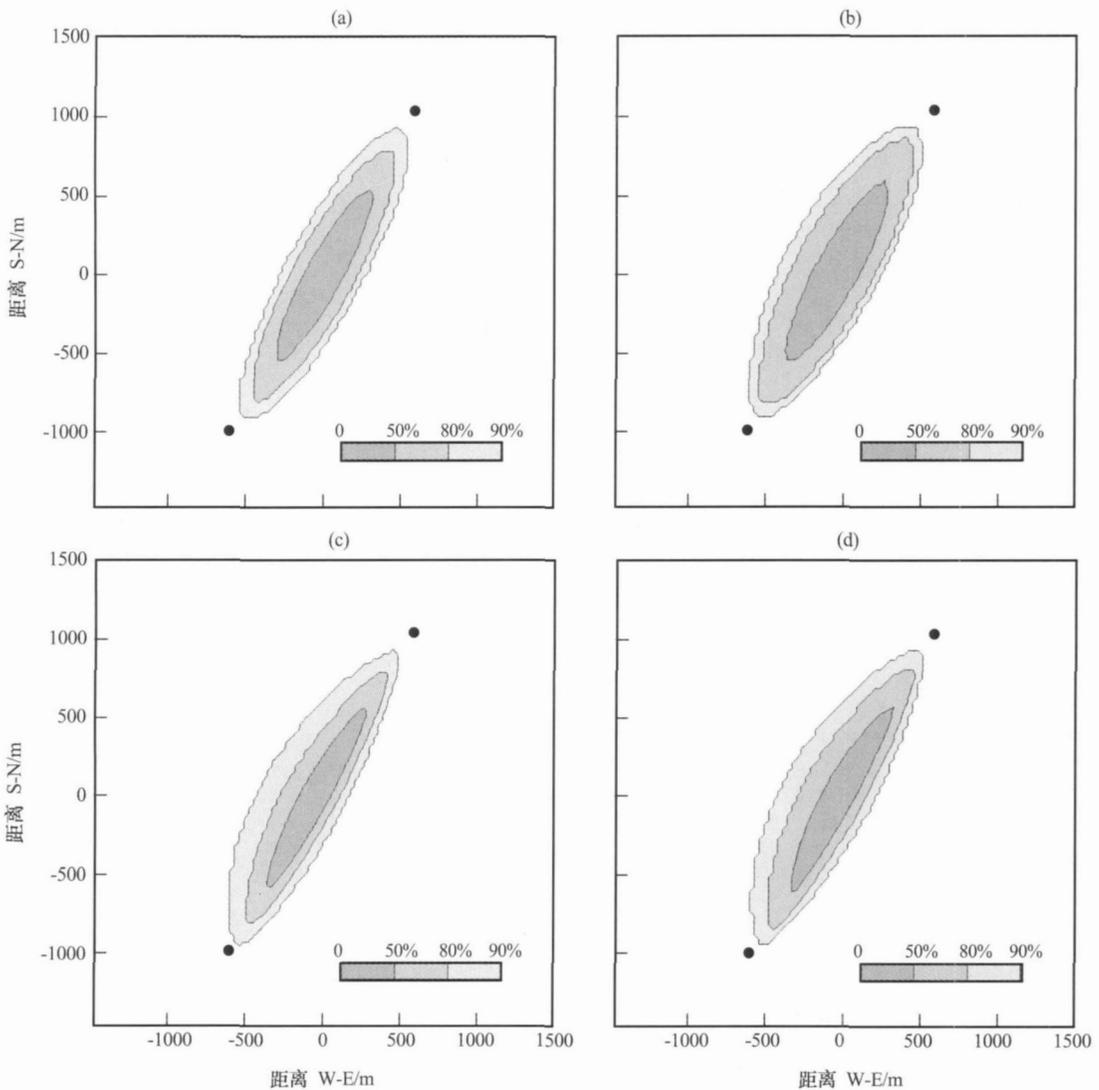


图7 2007年LAS通量源区的月变化

(a) 1月, (b) 4月, (c) 7月, (d) 10月, 黑实心圆代表LAS发射仪和接收仪的位置

Fig. 7 Monthly variation of source area for LAS in 2007. Black circles stand for the location of LAS transmitter and LAS receiver. (a) January, (b) April, (c) July, (d) October

为 900 m × 450 m)。

图 5 是 2006 年 9 月 12 日白天(08: 00 和 17: 00) 大气不稳定条件下 LAS 通量源区的变化。白天的主风向为西南风, 气流与 LAS 光径路线基本平行。LAS 的通量源区为西南—东北向分布。主要的通量贡献源区在园地, 其次为耕地。

5.2.2 通量源区的月变化

图 6 是 2007 年 1, 4, 7, 10 月涡动相关仪通量贡献源区的示意图。从图 6 中可知, 各月源区形状不同, 但大致分布在南北长 1000 m、东西宽 850 m 的范围内, 涉及园地、耕地与居民地等下垫面。

图 7 是 2007 年 1, 4, 7, 10 月的 LAS 通量贡献源区示意图。从图 7 中可知 LAS 各月通量源区为西南—东北向分布, 长约 2060 m, 最宽处约为 620 m, 涵盖了园地、耕地、居民地及林地等下垫面。

从图 6 和图 7 中可知, 涡动相关仪和 LAS 的通量源区范围有明显的不同。LAS 源区范围更大一些, 几乎涵盖了观测站的各种下垫面类型。本文将每月涡动相关仪和 LAS 的足迹值进行归一化处

理, 获取每个网格的相对贡献率, 并与密云站的土地覆盖/土地利用分类图叠加, 可得到各种下垫面类型的通量贡献比例(图 8)。

图 8 是 2006 年 8 月—2007 年 12 月期间不同类型下垫面通量贡献比例的变化。由图 8a 可见, 对涡动相关仪通量观测有影响的下垫面主要为园地(67%)和耕地(19%)。园地的通量贡献比例在夏、秋季比较大, 冬、春季稍小, 而耕地的贡献率则在冬、春季节略大于夏、秋季。这主要是由于在冬、春季节东北风出现的频次增多, 分布在涡动相关仪东北面的源区范围增多, 使得园地比例减小, 耕地增加。这从图 6 中也可以看出。

从图 8b 中可知, 园地、耕地和居民地为 LAS 的主要通量贡献源区, 通量贡献比例分别为 49%, 28%和 11%。其中园地和耕地通量贡献率的变化趋势与涡动相关仪一致, 但没有涡动相关仪的变化明显。园地在 2007 年 4 月占有比例最小(45%), 2007 年 7 月达最大(53%)。2007 年 1 月耕地占有比例最大(32%), 2007 年 6 月最小(25%)。密云站夏季西南风出现的频次多, 而冬季北风和东北风频

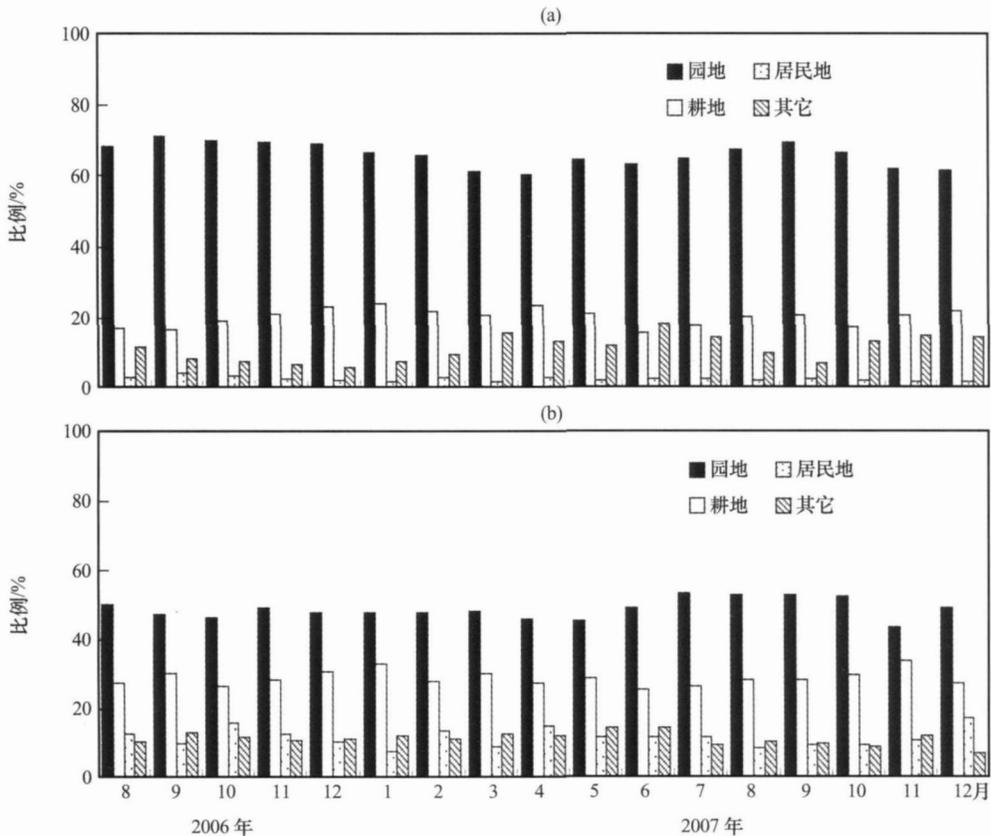


图 8 2006 年 8 月—2007 年 12 月期间不同类型下垫面通量贡献比例的变化

(a) 涡动相关仪, (b) LAS

Fig. 8 The origination of measured flux and its ratio from August 2006 to December 2007.

(a) the eddy covariance system, (b) LAS

次增多,使得观测站西南面园地在夏秋季的通量贡献率大于冬、春季,而北面和东北面的耕地的通量贡献率夏、秋季小于冬、春季。

6 结论

本文应用通量解析足迹模型,结合密云站2006年8月—2007年12月期间的观测数据,分别对涡动相关仪和大孔径闪烁仪通量观测的空间代表性做了初步研究。主要结论如下:

(1) 当风向发生改变时,涡动相关仪源区的范围不变,位置则发生变化,而LAS的源区无论大小和位置都发生了变化。Monin-Obukhov长度和空气动力学粗糙度对涡动相关仪和LAS的通量足迹影响明显,需要准确地计算。在大气不稳定的条件下,Monin-Obukhov长度的影响比稳定条件下大。涡动相关仪的架设高度/LAS的有效高度也是对通量足迹有影响的一个因子,需在建站点前合理地确定。

(2) 密云站涡动相关仪的源区白天主要分布在仪器的西南与南面,而夜间则在东北与北面。LAS的源区为西南—东北向分布。

(3) 涡动相关仪各月源区形状不同,但大致分布在南北长1000 m、东西宽850 m的范围内,涉及园地、耕地与居民地等下垫面。LAS各月源区为西南—东北向分布,长约2060 m,最宽处约为620 m,涵盖了园地、耕地、居民地及林地等下垫面。

(4) 对涡动相关仪通量有贡献的下垫面主要为园地(67%)和耕地(19%)。其中园地的通量贡献比例在夏、秋季比较大,冬、春季稍小,而耕地则相反。园地、耕地和居民地为LAS的主要通量贡献源区,通量贡献比例分别为49%、28%和11%。其中园地和耕地通量贡献率的变化趋势与涡动相关仪一致,但没有涡动相关仪的变化明显。

另外,本文通量贡献源区的分析没有考虑到地形起伏对源区的影响,这有待进一步深入研究。

参考文献

- [1] 余锦华,刘晶淼,丁裕国. 青藏高原西部地表通量的年、日变化特征[J]. 高原气象, 2004, 23(3): 353-359
- [2] 刘远永,文军,韦志刚,等. 黄土高原塬区地表辐射和热量平衡观测与分析[J]. 高原气象, 2007, 26(5): 928-937
- [3] 卢俐,刘绍民,孙敏章,等. 大孔径闪烁仪研究区域地表通量的进展[J]. 地球科学进展, 2005, 20(9): 932-938
- [4] Pasquill F, F B Smith. Atmospheric Diffusion[C]. 3rd Edition. Wiley, New York, 1983: 437

- [5] Schmid H P. Experimental design for flux measurements: matching the scales of observations and fluxes[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1997, 87: 179-200
- [6] 米娜,于贵瑞,温学发,等. 中国通量观测网络通量观测空间代表性初步研究[J]. 中国科学(D辑), 2006, 36(增刊1): 22-33
- [7] 赵晓松,关德新,吴家兵,等. 长白山阔叶红松林通量观测的 footprint 及源区分布[J]. 北京林业大学学报, 2005, 27(3): 17-23
- [8] Gckede M, C Rebmann, T Foken. A combination of quality assessment tools for eddy covariance measurements with footprint modeling for the characterization of complex sites[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2004, 127: 175-188
- [9] Rebmann C, Gckede M, T Foken, et al. Quality analysis applied on eddy covariance measurement at complex forest sites using footprint modeling[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2005, 80: 121-141
- [10] Kim J, Q Guo, D D Baldocchi, et al. Upscaling fluxes from tower to landscape: Overlaying flux footprints on high-resolution (IKONOS) images of vegetation cover[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2006, 136: 132-146
- [11] Liu Shaomin, Hu Guang, Lu Li, et al. Estimation of Regional Evapotranspiration by TM/ETM+ Data over Heterogeneous Surfaces[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2007, 10(73): 1169-1178
- [12] Haenel H D, Grunhage L. Footprint analysis: a closed analytical solution based on height-dependent profiles of wind speed and eddy viscosity[J]. Boundary-Layer Meteorology, 1999, 93: 395-409
- [13] Horst T W. Comment on footprint analytical solution based on height-dependent profiles of wind speed and eddy viscosity[J]. Boundary-Layer Meteorology, 2001, 101: 435-447
- [14] Schmid H P. Source areas for scalars and scalar fluxes[J]. Boundary-Layer Meteorology, 1994, 67: 293-318
- [15] Schuepp P H, M Y Leclerc, J I MacPherson, et al. Footprint prediction of scalar fluxes from analytical solutions of the diffusion equation[J]. Boundary-Layer Meteorology, 1990, 50: 355-373
- [16] Cai X H, M Y Leclerc. Forward-in-time and backward-in-time dispersion in the convective boundary layer: The concentration footprint[J]. Boundary-Layer Meteorology, 2006, 123: 201-218
- [17] Haene H D, L Grunhage. Footprint analysis: A closed analytical solution based on height-dependent profiles of wind speed and eddy viscosity[J]. Boundary-Layer Meteorology, 1999: 395-409
- [18] Reynolds A M. A two-dimensional Lagrangian stochastic dispersion model for convective boundary layers with wind shear[J]. Boundary-Layer Meteorology, 1998, 86: 345-352
- [19] Rotach M W, S E Gryning, C Tassone. A two dimensional stochastic dispersion model for daytime conditions[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 1996, 122: 367-389
- [20] Leclerc M Y, S H Shen, B Lamb. Observations and large-eddy

- simulation modeling of footprints in the lower convective boundary layer[J]. *J Geophys Res Atmos*, 1997, 102: 9323–9334
- [21] Sogachev A, G Menzhulin, M Heimann, et al. A simple three dimensional canopy- planetary boundary layer simulation model for scalar concentrations and fluxes[J]. *Tellus*, 2002, 54B: 784– 819
- [22] Sogachev A Y, J J Lloyd. Using a one-and-a-half order closure model of the atmospheric boundary layer for surface flux footprint estimation[J]. *Boundary-Layer Meteor*, 2004, 112: 467 – 502
- [23] Schmid H P. Footprint modeling for vegetation atmosphere exchange studies: A review and perspective[J]. *Agriculture and Forest Meteorology*, 2002, 113: 159– 183
- [24] Kormann R, F X Meixner. An analytic footprint model for non-neutral stratification[J]. *Boundary-Layer Meteor*, 2001, 99: 207– 224
- [25] Bastiaanssen W G M. SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey[J]. *J Hydrology*, 2000, 229: 87– 100
- [26] Meijninger W M L, O K Hartogensis, W Kohsiek, et al. Determination of area-average sensible heat fluxes with a large aperture scintillometer over a heterogeneous surface— Flevob and field experiment[J]. *Boundary-Layer Meteor*, 2002, 105: 37– 62
- [27] 彭谷亮, 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
- [28] 徐自为, 刘绍民, 宫丽娟, 等. 涡动相关仪观测数据的处理与质量评价的研究[J]. *地球科学进展*, 2008, 23(4): 357– 370
- [29] Van Ulden A P. Simple estimates for vertical diffusion from sources near the ground[J]. *Atmos Environ*, 1978, 12: 2125 – 2129
- [30] Verhoef A, De Bruin H A R, Van den Hurk B. Some practical notes on the parameter kB^{-1} for sparse vegetation[J]. *J Appl Meteor*, 1997, 36: 560– 572
- [31] B D Amiro. Footprint climatologies for evapotranspiration in a boreal catchment[J]. *Agricultural and Forest Meteor*, 1998, 90: 195– 201
- [32] Kljun N, P Calanca, M W Rotach, et al. A simple parameterization for flux footprint predictions [J]. *Boundary-Layer Meteor*, 2004, 112: 503– 523
- [33] 朱治林, 孙晓敏, 温学发, 等. 中国通量网(ChinaFLUX)夜间CO₂涡动相关通量数据处理方法研究[J]. *中国科学(D辑)*, 2006, 36(增刊I): 34– 44
- [34] 温学发, 于贵瑞, 孙晓敏, 等. 复杂地形条件下森林植被湍流通量测定分析[J]. *中国科学(D辑)*, 2004, 34(增刊II): 57– 66

Investigation of Spatial Representativeness for Surface Flux Measurements with Eddy Covariance System and Large Aperture Scintillometer

GONG Li-juan¹, LIU Shao-min¹, SHUANG Xi¹, CAI Xu-hui², XU Zi-wei¹

(1. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, School of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. Department of Environment Science, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Based on the analysis of sensitivity of analytical footprint models of an eddy covariance system (EC) and a Large Aperture Scintillometer (LAS), as well as the observation of EC and LAS at Miyun flux station of Beijing (from August 2006 to December 2007), the flux spatial representativeness of EC and LAS were preliminarily analyzed. The results are as follows: (1) The source areas of EC and LAS are sensitive to wind direction, Monin-Obukhov length, aerodynamic roughness length and measurement height. (2) The source areas of the eddy covariance system distribute in the southwest and south area during the daytime, while in the northeast and north area during the nighttime. The source areas of the LAS are in the direction from southeast to northwest. The source areas of the eddy covariance system are different in each month, but all locate in an area of 1000 m (S–N) by 850 m (W–E) area. The source areas of the LAS are in the direction from southeast to northwest in each month, about 2060 m long and 620 m wide. (3) The main types of land use to determine the measured fluxes of the eddy covariance system are orchard (67%) and farmland (19%). The flux contribution of orchard is larger in summer and autumn, but smaller in winter and spring. And it is contrary for farmland. The primary land use types of flux contribution for LAS are orchard (49%), farmland (28%) and residential area (11%). The seasonal variation of flux contribution of orchard and farmland is the same as the eddy covariance system, but it is not obvious.

Key words: Eddy Covariance system; Large Aperture Scintillometer; Source area; Footprint