

文章编号:1001-8166(2009)07-0724-10

# 黑河流域观测通量的空间代表性研究<sup>\*</sup>

双喜<sup>1</sup>, 刘绍民<sup>1\*</sup>, 徐自为<sup>1</sup>, 王维真<sup>2</sup>

(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. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:**地表湍流通量包括显热通量和潜热通量, 它的准确测定对天气气候预报、农业节水和水资源管理等意义重大。目前应用较为广泛的通量测量技术有涡动相关仪(EC)和大孔径闪烁仪(LAS), 前者是单点观测, 观测范围通常只有几百米; 后者近年来得到长足的发展, 可以观测从几百米到十几公里尺度上的区域湍流通量。建立了EC和LAS通量解析足迹模型, 详细介绍了足迹模型的理论依据和建立方法, 并对二者模型的异同进行了阐释。在黑河流域遥感—地面观测同步试验中, 以高寒与干旱区伴生的黑河流域为试验区, 包括寒区水文试验、森林水文试验和干旱区水文试验, 使用足迹模型分别分析了临泽草地站、阿柔冻融观测站的EC、LAS观测通量的源区, 结合风向变化规律, 对二者通量观测差异进行分析解释; 分析了盈科灌区绿洲站、大野口关滩森林站的EC观测数据, 以及阿柔冻融观测站的EC、LAS观测数据, 选择具有代表性的月份, 进行观测站点的空间代表性分析。结果表明: 对通量观测站点进行空间代表性分析是十分必要的, 可得到观测站点通量源区的时空变化特征, 同时足迹模型在通量观测数据的分析中有很大的实用价值, 可为今后通量观测数据的应用提供参考。

**关键词:**黑河流域; 大孔径闪烁仪; 涡动相关仪; 解析足迹模型; 空间代表性

**中图分类号:**TP79; P334

**文献标志码:**A

## 1 引言

地表与大气之间的能量、水分和CO<sub>2</sub>的输送和转化过程对区域乃至全球的气候都有重要影响, 越来越受到人们的关注<sup>[1]</sup>。涡动相关仪(EC)和大孔径闪烁仪(LAS)是目前应用较为广泛的通量测量技术, 前者是单点观测, 观测范围通常只有几百米; 后者的测量范围则可从几百米到十几公里, 其测量尺度与大气模式的网格尺度以及卫星遥感的像元尺度匹配较好, 具有广阔的应用前景<sup>[2]</sup>。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<sup>[3]</sup>。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。足迹(footprint)又称源权重函数(source weight function), 是描述近地面层表面源或汇的空间分布和仪器观测通量值之间关系的函数, 对通量观测值有主要贡献的区域称之为通量贡献区或源区(source area)<sup>[4]</sup>。

Pasquill有关非均一下垫面的有效风浪区(the effective fetch)的讨论成为足迹问题研究的序曲, 其中有效风浪区的边界定义为等于最大浓度值的一半, 大小与观测高度、表面粗糙度、大气稳定度有关系, 第一次正式阐述了二维无规则斑块湍流交换观

<sup>\*</sup> 收稿日期:2009-03-12; 修回日期:2009-06-11.

<sup>\*</sup> 基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目“陆表生态环境要素主被动遥感协同反演理论与方法”(编号:2007CB714401); 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); 中国科学院西部行动计划(二期)项目“黑河流域遥感—地面观测同步试验与综合模拟平台建设”(编号:KZCX2-XB2-09)资助。

作者简介: 双喜(1982-), 男, 内蒙古呼伦贝尔人, 硕士研究生, 主要从事水文气象遥感研究。E-mail: shuangxi2005@163.com

<sup>\*</sup> 通讯作者: 刘绍民(1967-), 男, 浙江绍兴人, 教授, 主要从事陆面过程观测与遥感应用研究。E-mail: smliu@bnu.edu.cn

测的空间信息。基于经验关系的风浪区长度与测量高度之间的 100:1 的法则逐渐被具有物理意义的方法代替。Gash 等<sup>[5]</sup>对平流扩散方程采用解析解,第一次涉及到“通量足迹”的计算。在 Pasquill 和 Gash 研究的基础上,Schmid 等<sup>[6]</sup>引入了“源区”的概念,试图确定影响观测结果的上风向的“源区”,不过,此时的足迹和源区都是对于浓度来说,对通量还是不适用的。Schmid<sup>[7]</sup>采用 Horst 等<sup>[8]</sup>的通量足迹解析表达式推出了通量源区的表示方法,同时指出通量的源区小于浓度的源区,而且二者都受仪器架设高度和大气稳定度的影响。目前,足迹模型主要用于通量观测站址的选择<sup>[4]</sup>、观测数据的质量评价<sup>[9,10]</sup>、观测通量的空间代表性分析<sup>[3,11]</sup>、观测通量的尺度转换<sup>[12]</sup>以及遥感反演通量的验证<sup>[13]</sup>等方面。

黑河流域遥感—地面观测同步试验,是一次在流域尺度上展开的,以水循环及与之密切联系的生态过程为主要研究对象的大型航空、卫星遥感与地面同步观测科学试验,以具备鲜明的高寒与干旱区伴生为主要特征的黑河流域为试验区,以水循环为主要研究对象,由 3 个重点试验区组成:上游寒区水

文试验区、森林水文试验区和中游干旱区水文试验区<sup>[14]</sup>。在黑河流域已有的观测网络的基础上,黑河流域遥感—地面观测同步试验区在 3 个重点试验区依据不同景观类型新建了 7 个自动气象站、4 套涡动相关仪和 2 套大孔径闪烁仪。

本文拟利用解析的足迹模型分析阿柔冻融观测站、盈科灌区绿洲站、大野口关滩森林站以及临泽草地站观测通量源区的时空变化特征,并且研究涡动相关仪、大孔径闪烁仪观测通量的差异,为今后通量观测数据的应用提供参考。

## 2 观测站点介绍与数据处理

### 2.1 观测站点介绍

阿柔冻融观测站位于黑河上游八宝河流域中部河谷地带,地势开阔平坦,下垫面为高山草原;大野口关滩森林站位于大野口流域,下垫面为森林,树种为青海云杉;盈科灌区绿洲站位于张掖市以南 8 km,是典型的农田生态系统,主要作物为玉米和小麦;临泽草地站位于兰州大学临泽草地生态实验站周边,土地覆盖类型为芦苇和盐碱地。各站点涡动相关仪和大孔径闪烁仪观测概况见表 1。

表 1 各站点涡动相关仪和大孔径闪烁仪观测概况  
Table 1 Description of EC and LAS observation at each site

站名	位置	观测时间段及仪器型号		下垫面
		EC	LAS	
临泽草地站	100°04'E, 39°15'N	2008.05.18-05.25	2008.05.19-08.31	芦苇地、盐碱地
	1 394 m	Li7500 & KH2O	(LAS, Kipp & Zonen)	
阿柔冻融观测站	100°27'E, 38°03'N	2008.03.11-04.02	2008.03.11-10.31	高山草原
	3 033 m	Li7500 & KH2O	(BLS450, Scintec)	
		2008.06.10-12.31		
大野口关滩森林站	100°15'E, 38°32'N	2008.01.01-12.31	无	森林 (青海云杉)
	2 835 m	Li7500 & CSAT3		
		2008.01.01-12.31	无	
盈科灌区	100°25'E, 38°51'N			农田
绿洲站	1 519 m	Li7500 & CSAT3		(小麦、玉米)

注:阿柔冻融观测站 LAS 有效高度 9.5 m,光径长度 2 390 m;临泽草地站 LAS 有效高度 9.2 m,光径长度 1 550 m

### 2.2 数据处理

涡动相关仪测量的原始数据是风速、湿度、温度等气象要素的湍流脉动资料(10 ~ 20 Hz)。要从这些脉动值得到最后 30 min 的平均显热、潜热以及 CO<sub>2</sub>通量,需要经过一系列的数据处理和计算,由于涡动相关仪的广泛使用,近年来也出现了一些专门的涡动相关资料处理软件。如:EdiSol、TK2、EdiRe 和 Ecpeck 等,不同的涡动相关仪数据处理软件均有

各自的优势与不足。本研究采用英国爱丁堡大学发展的 EdiRe 软件对涡动相关仪观测数据进行后处理,包括观测数据的筛选、处理、质量评价与数据的插补等<sup>[15]</sup>。大孔径闪烁仪采集的原始数据为空气折射指数系数的结构参数,需要经过一系列的处理及筛选过程,本文在原有说明书推荐计算流程的基础上,增加了数据筛选条件、稳定度的判断以及普适函数的选择等步骤,形成了大孔径闪烁仪观测数据

的处理流程<sup>[16]</sup>。

### 3 解析足迹模型的建立

足迹的明确定义最早由 Pasquill 等<sup>[17]</sup>在 1983 年提出:

$$F(x, y, z) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^x F_0(x', y', z' = 0) \cdot f(x - x', y - y', z) dx' dy' \quad (1)$$

式中,  $F(x, y, z)$  是仪器在高度为  $z$  时的通量观测值,  $F_0$  是上风向的地面源项,  $f$  是足迹函数, 仪器观测通量值和地面层源或汇的空间分布是由足迹函数联系起来。

#### 3.1 涡动相关仪的足迹模型

本文中涡动相关仪 (EC) 的解析足迹函数采用由 Kormann 等<sup>[18]</sup>提出的函数, 其解析解是显式函数, 在应用上方便一些。足迹函数的导出主要应用了近地层风速廓线、湍流扩散系数廓线和近地层的相似性。首先假设近地面层的平均风速  $\bar{u}(z)$  和湍流扩散系数  $K(z)$  都可以用幂指数形式来近似, 即:

$$\bar{u}(z) = \alpha_u z^m \quad (2)$$

$$K(z) = \kappa' z^n \quad (3)$$

式中:  $\alpha_u$  和  $\kappa'$  为常数。根据近地层的相似性关系, 有:

$$m = \frac{z}{u} \cdot \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} = \frac{u_*}{k} \cdot \frac{\phi_m}{u} \quad (4)$$

$$n = \frac{z}{K(z)} \cdot \frac{\partial K(z)}{\partial z} = \begin{cases} \frac{1}{1 + 5z/L} & \text{for } L > 0 \\ \frac{1 - 24z/L}{1 - 16z/L} & \text{for } L < 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$K(z) = \frac{ku_* z}{\phi_c} \quad (6)$$

式中  $z$  为仪器观测高度,  $L$  为莫宁奥布霍夫长度,  $m$  和  $n$  分别是扩散烟云的形状参数,  $u_*$  为摩擦速度,  $\phi_c$  和  $\phi_m$  为热量传输和动量传输的普适函数,  $k$  为 von Karman 常数。由 (1) ~ (5) 式计算  $\alpha_u$  和  $\kappa'$ , 并导出通量侧向积分函数  $f^y$  为:

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

其中  $\Gamma$  为伽玛函数,  $x$  为上风向距离,  $\mu = (1 + m)/r$ ,  $\xi(z) = \frac{\alpha_u z^r}{r^2 \kappa'}$ ,  $r = 2 + m - n$ 。

假设呈高斯分布, 侧风向分布函数  $D_y$  可表示为:

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

有效烟云速度为:

$$\bar{u} = \frac{\Gamma(u)}{\Gamma(1/r)} \left( \frac{r^2 \kappa'}{\alpha_u} \right)^{m/r} \alpha_u x^{m/r} \quad (9)$$

其中:  $\sigma = \sigma_y \frac{x}{u}$ ,  $\sigma_y$  为侧风向风速的标准差, 这

样联立 (6) ~ (8) 式就可以通过  $f_{EC} = D_y f^y$  直接求解足迹函数。

从物理学意义上讲, 通量贡献区 (源区) 是指一个特定的范围, 即此范围内的通量通过湍流作用应有充足的时间到达仪器感测高度, 也就是说通量在被平流耗散之前可以对观测的通量值产生贡献。由此不难理解, 它一般在观测仪器所在位置的上风向区域, 源区的大小和位置与风向、风速、仪器架设高度、下垫面粗糙度和大气边界层特性 (如大气稳定度) 有关<sup>[3, 19, 20]</sup>。

#### 3.2 大孔径闪烁仪的足迹模型

1978 年, 王庭义<sup>[21]</sup>提出了利用光闪烁法测量感热通量和潜热通量的设想, LAS 一般由发射仪和接收仪两部分组成, 二者相隔一定距离, 发射仪发出一定波长和直径的波束, 在大气中传播, 而大气中的温度、湿度和气压的波动引起空气密度的波动, 进而引起空气折射系数的波动, 这个波动再进一步引起光强度的变化, 即闪烁, 接收端就是测量闪烁的“量”的仪器。LAS 沿光程路径方向的权重函数是用来表示在 LAS 光程路径上每点对闪烁测量结果的贡献程度。

本文采用 Meijninger 等<sup>[22]</sup>提到的沿光程路径方向的权重函数, 为:

$$W(x) = 4\pi^2 v_{LAS}^2 \int_0^\infty K \phi(K) \sin^2 \left[ \frac{K^2 x (L_0 - x)}{2v_{LAS} L_0} \right] \cdot \left[ \frac{2J_1(m_1) 2J_1(m_2)}{m_1 m_2} \right]^2 dK \quad (10)$$

$$\phi(K) = 0.033 K^{-\frac{11}{3}} \quad m_1 = 0.5KD \frac{x}{L_0}$$

$$m_2 = 0.5KD \left( 1 - \frac{x}{L_0} \right)$$

其中:  $L_0$  是 LAS 的光径长度,  $v_{LAS}$  是 LAS 发射光的波数,  $K$  是湍流谱空间的波数,  $D$  是仪器光学镜面的直径,  $J_1(m)$  是第一类一阶贝塞耳函数。图 1 是权重函数归一化计算结果示意图, 可见呈钟形曲线, 说明光程路径中点处对闪烁观测的贡献最大。

Meijninger 等<sup>[22]</sup>在 2002 年首次将足迹模型分析应用于 LAS, 本文参考其提出的方法, 根据大孔径闪烁仪 (LAS) 的观测原理和特点, 结合了基于单点

观测的解析足迹函数和 LAS 沿光程路径方向的权重函数,建立了 LAS 解析足迹模型,为:

$$f_{\text{LAS}} = \int_{x_2}^{x_1} W(x)f(x-x', y-y', z_m) dx \quad (11)$$

式中: $x_1$ 和 $x_2$ 分别表示 LAS 发射端和接收端的位置, $x$ 和 $y$ 表示光程路径上的点, $x'$ 和 $y'$ 表示光程路径上的点的上风方向各点的坐标。

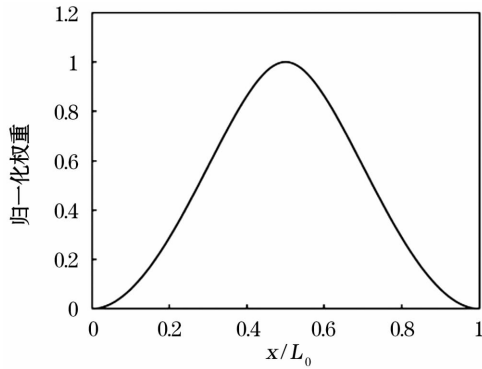


图1 LAS的权重函数

Fig. 1 Weight function of LAS

## 4 结果分析

### 4.1 观测站点通量源区的时空变化特征

本文选取黑河流域大野口关滩森林站、盈科灌区绿洲站1月、6月观测数据以及阿柔冻融观测站3月、6月观测数据来分析涡动相关仪和大孔径闪烁仪通量源区的季节变化特征。

大野口关滩森林站位于大野口关滩相对平坦的林地中,主要树种为青海云杉,树高近20 m,涡动相关仪也架设在这一高度左右,主要用于观测林地的水热通量变化。图2中,左侧分别为2008年1月和6月大野口关滩森林站的通量源区,图3左幅为关滩站的航拍影像,范围为0.5 km×0.5 km,从图中可知,大野口关滩森林站通量贡献源区呈东北—西南方向,主要分布在涡动相关仪的东北方向,距离观测塔500 m范围内。距离观测塔200 m范围内,源区从外到内,通量贡献率明显增大(颜色加深),可推断,这里对通量观测的影响会比较大。根据左上角的风向玫瑰图,易见大野口关滩森林站1月、6月的盛行风向为东北风,有少量南风 and 西风,并且发现东北风大部分出现在白天,南风和西风大部分出现在夜间,这也正是通量观测塔的主要贡献源区在东北方向,西南方向有部分贡献源区的原因,且西南方向贡献权重明显较低。比较了观测站1~10月的数据,发现:1月、6月是比较具有代表性的,离观测塔

较近的东北方向是通量观测的主要贡献源区。结合图3可知,大野口关滩森林站涡动相关仪的源区以林地下垫面为主。

盈科灌区绿洲站下垫面为农田,主要作物为小麦和玉米,涡动相关仪架设高度为2.8 m,主要用于开展农田蒸散发的观测。图2中,右侧分别为盈科灌区绿洲站2008年1月和6月通量源区,图3右幅为盈科灌区绿洲站的航拍影像,范围为0.5 km×0.5 km。观测站地势平坦,1月为非生长季,6月为生长季,小麦和玉米高约几十厘米。观测站1月份风向以北、东北方向为主,6月风向以东南、西北为主。从图2中可知,距离涡动相关仪周边250 m环形范围为主要贡献源区,而距离观测塔100 m范围,通量贡献率明显较大(颜色加深),1月东北方向贡献率稍大,而6月则是西北方向的贡献率稍大。结合图3可知,盈科灌区绿洲站涡动相关仪1月、6月的通量源区以小麦、玉米下垫面为主。

阿柔冻融观测站位于青海省祁连县中东部地区的阿柔乡草大板村瓦王滩牧场,下垫面为高山草原,海拔3 000 m,主要用于监测黑河上游八宝河河谷的地气交换,土壤水热动态及冻融过程,涡动相关仪架设在3 m左右。图4中从左至右为阿柔站2008年3月和6月通量源区(包括涡动相关仪和大孔径闪烁仪)。因观测站位于河谷地带,地势较平坦,受南北山脉的阻挡,这里南风和北风常年都会比较少,以东南、西北风为主,从图4中可知,距离涡动相关仪周边250 m环形范围为其观测通量主要贡献源区,而大孔径闪烁仪的源区呈西南—东北方向,垂直LAS光程路径距离250 m的范围为其主要贡献源区,其中6月因东南风的增多、西北风的减少,通量源区较3月更多地分布在东南方向。阿柔冻融观测站涡动相关仪和大孔径闪烁仪的通量源区下垫面主要为草地。

### 4.2 涡动相关仪和大孔径闪烁仪观测通量的差异分析

因涡动相关仪和大孔径闪烁仪源区范围的不同,其观测到的通量也随之有所不同,特别在水热特性非均匀的观测场,两者通量的差异性更加明显。本文选取黑河流域阿柔冻融观测站和临泽草地区典型天的观测数据来分析涡动相关仪和大孔径闪烁仪观测通量的差异性。

图5中左图是2008年6月22日阿柔冻融观测站EC和LAS观测的显热通量日变化,图中加入了风向的观测,以利于使用足迹分析,右图是阿柔冻融

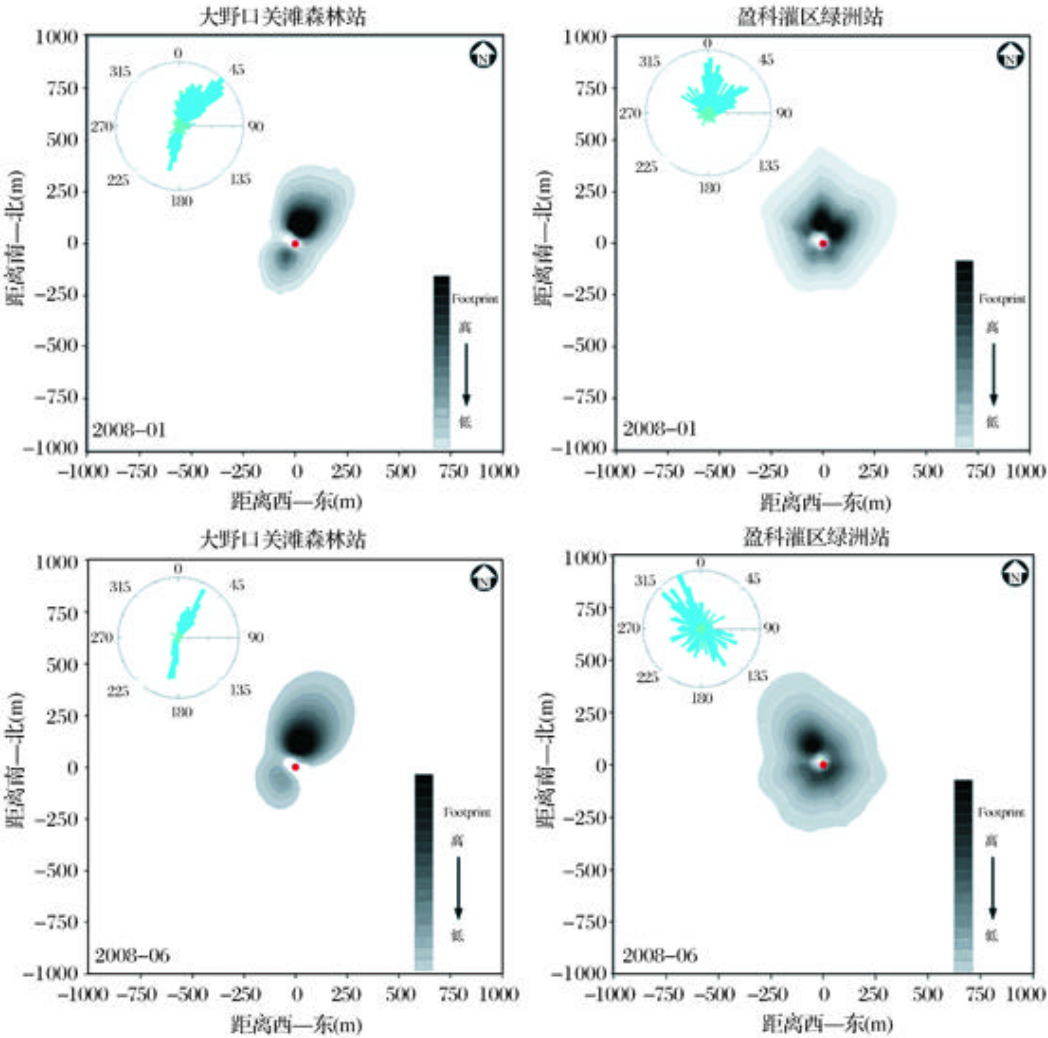


图2 2008 年1 月、6 月大野口关滩森林站、盈科灌区绿洲站的通量源区(80%源区 ,网格分辨率为 30 m 红点代表涡动相关仪位置)

Fig.2 Source area for EC at Dayekou Guantan forest and Yingke irrigated oasis station in January and June ,2008 (80% source area ,the grid resolution is 30 m ,red circle stand for the location of EC )

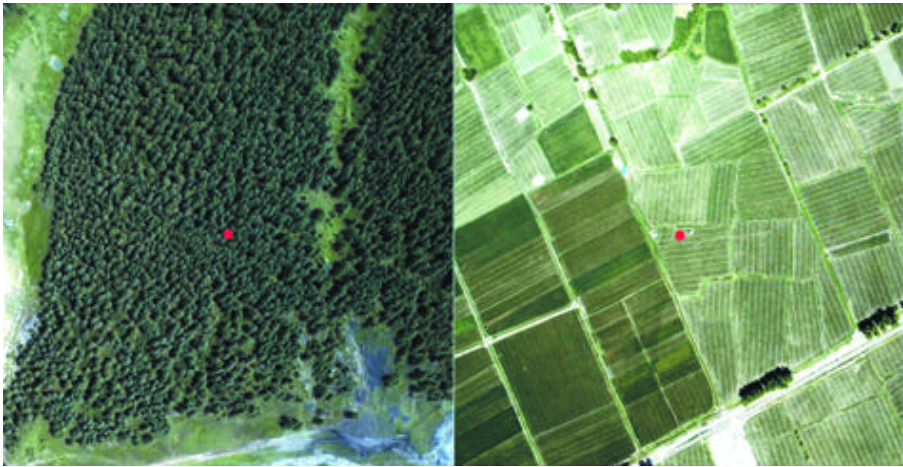


图3 大野口关滩森林站、盈科灌区绿洲站的航拍影像(分辨率为 0.2 m 红点代表涡动相关仪位置)

Fig.3 Airborne image at Dayekou Guantan forest and Yingke irrigated oasis station (resolution :0.2 m , red circle stand for the location of EC )



观测站的 ASTER 假彩色遥感影像(2008 年 6 月 4 日)。从图 5 中可以发现:显热通量数值整体来说比较低,由于此时阿柔的雨量充沛,正是牧草长势比较旺盛的时候,北面八宝河的流量也比较大,因此水热通量交换以潜热为主。10:30-20:00 期间,  $H_{EC}$  (由涡动相关仪观测的显热通量)和  $H_{LAS}$  (由大孔径闪烁仪计算的显热通量)的差距增大,而风向也是在 10:30 左右发生了较大改变,即从东南风转向西北风。图 6 是足迹模型计算的 6:30-10:30、10:30-15:00 两个时间段的通量源区。10:30 以前,观测站 LAS 和 EC 的通量贡献源区(60%,蓝线以内的部分)重叠较多,因此,由 EC 观测和 LAS 计算的显热

差距较小。10:30 以后,观测站 LAS 和 EC 的 60% 通量贡献源区几乎没有重叠,即对各自通量观测具有较大影响的区域没有重叠,这里下垫面虽然是比较均一的牧草,但是观测场地的土壤水分分布不均,势必会造成下垫面水热特性的不均一,因此,EC 观测和 LAS 观测的显热通量差距较大。

临泽草地站位于临泽县境内的盐渍化草甸草地,海拔 1 390 m,浅层地下水位较高,季节变化起伏较大,当地土壤、地下水位和气候特点,决定了其植被以盐生植物为主,大体可分为盐土区植物与盐化草甸区植物。

2008 年 5 月在临泽草地站安装了 LAS 和 EC ,

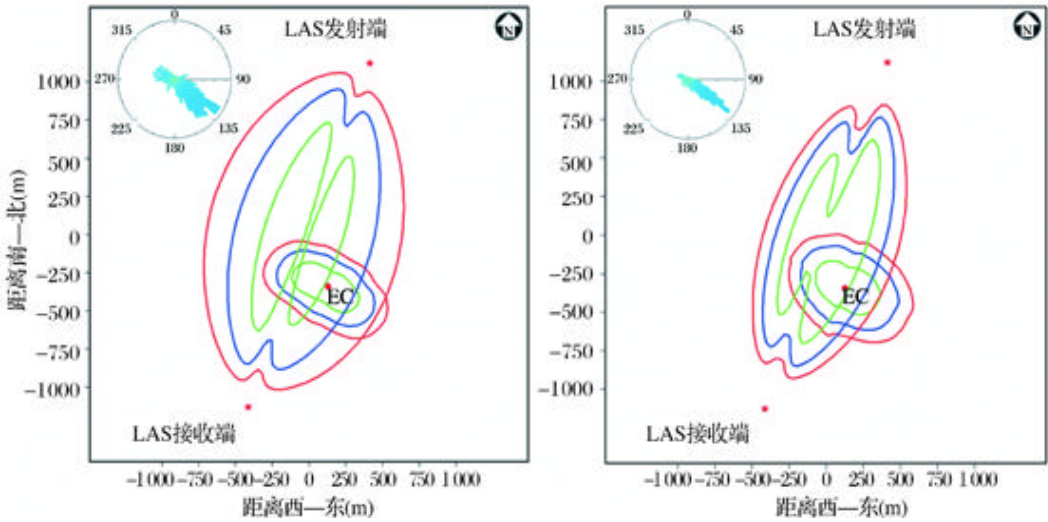


图 4 2008 年 3 月、6 月阿柔冻融观测站的通量源区(红线,蓝线,绿线分别代表 80%、60%、40%源区,网格分辨率为 30 m;红点从上到下,分别代表 LAS 发射端、EC、LAS 接收端位置)

Fig.4 Source areas for the EC and LAS at A rou freeze/thaw observation station (red line, blue line and green line represent 80%, 60% and 40%-level source area, respectively, the grid resolution is 30 m. Red circle from up to down indicate the location of the transmitter of LAS, EC and the receiver of LAS, respectively)

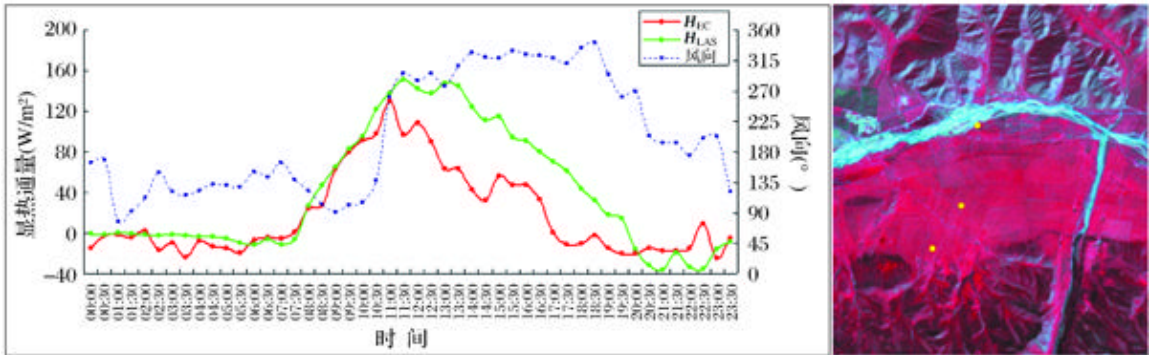


图 5 2008 年 6 月 22 日阿柔冻融观测站 EC 和 LAS 观测的显热通量和 ASTER 影像(分辨率为 15 m,黄点从上到下,分别代表 LAS 发射端、EC、LAS 接收端位置)

Fig.5 Sensible heat flux measured by EC and LAS at A rou freeze/thaw observation station on June 22, 2008 & ASTER image (resolution 15 m, yellow circle from up to down indicate the location of the transmitter of LAS, EC and the receiver of LAS, respectively)

分别进行观测,涡动相关仪架设在 2.5 m 左右。图 7 是 5 月 20 日 8 :40-19 :00 这段时间里 EC 和 LAS 观测的显热通量。图中加入了风向的观测,以利于使用足迹分析,图 7 右幅是临泽草地站的 SPOT 假彩色遥感影像。从右图中大致可以看出 LAS 发射端周围下垫面以盐碱地(颜色较浅)为主,LAS 接收端周围以芦苇地为主(颜色较深),EC 的位置更接近芦苇地。

从图 7 中左图可以发现,14 :00 以后, $H_{EC}$  和  $H_{LAS}$  的差距增大,而风向也是在这个时刻发生了较大改变,图 8 是足迹模型计算的 10 :00-14 :00、14 :00-18 :00 两个时间段的通量源区。14 :00 之前,

临泽草地站 LAS 和 EC 的 80% 源区的重叠网格为 110 个左右,其中含水区占 LAS 的 80% 源区的 250 个网格左右,占 EC 的 80% 源区的 39 个网格左右,即含水丰富区是 EC 和 LAS 的主要源区,因此 EC 观测和 LAS 观测的显热通量差距较小,而 14 :00 之后,临泽草地站 LAS 和 EC 的 80% 源区的重叠网格为 310 个左右,其中含水区占 LAS 的 80% 源区的 160 个网格左右,占 EC 的 80% 源区的 9 个网格左右,即 EC 的源区更多的是含水较少区(含水少的芦苇地和盐碱地),而含水丰富区仍是 LAS 源区的主要组分,虽然,在 14 :00 以后,LAS 和 EC 重叠网格数增多,但由于下垫面的水热特性的非均匀性加大,

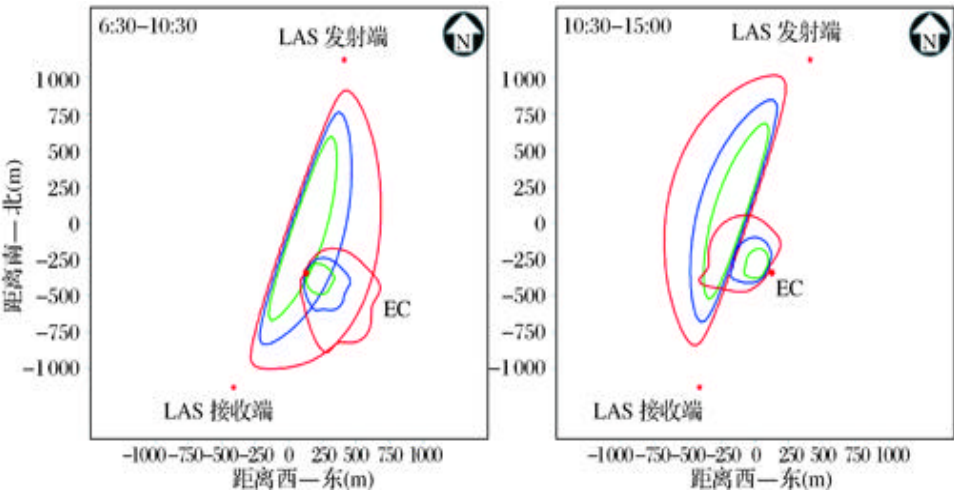


图 6 阿柔冻融观测站 6 :30-10 :30、10 :30-15 :00 的 EC 和 LAS 的通量源区 (红线 蓝线 绿线分别代表 80%、60%、40% 源区,网格分辨率为 30 m)

Fig.6 Source areas for the EC and LAS at Arou freeze/thaw observation station (6 :30-10 :30 and 10 :30-15 :00)(red line ,blue line and green line represent 80% ,60 % and 40%-level source area ,respectively. The grid resolution is 30 m)

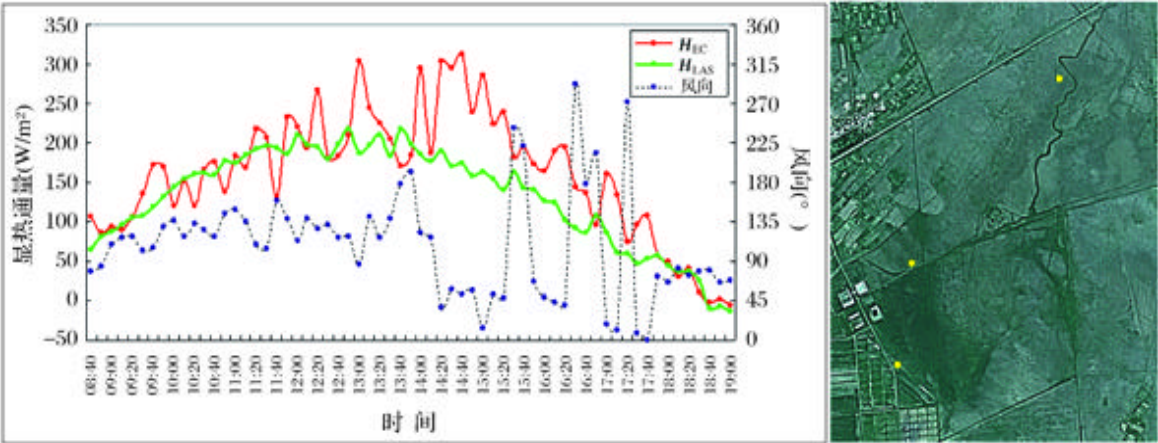


图 7 2008 年 5 月 20 日临泽草地站 EC 和 LAS 观测的显热通量和 SPOT 影像(分辨率为 2.5 m 黄点从上到下,分别代表 LAS 发射端、EC、LAS 接收端位置)

Fig.7 Sensible heat flux measured by EC and LAS at Linze grassland station on May 20 ,2008 & SPOT image (resolution :2.5 m ,yellow circle from up to down indicate the location of the transmitter of LAS ,EC and the receiver of LAS ,respectively)

致使由 LAS 观测的显热通量与 EC 显热通量观测差异明显。

图 9 是多角度热红外传感器(W iDAS)获取的临泽草地站热红外图像,从图中可知,在 LAS 接收端附近,因有蓄水沟渠,这里的芦苇地含水较多呈现低温,在发射端附近,因盐碱地的存在而呈现高温,并且高温跟低温组分的温差最高可达 20 左右。在 EC 观测塔周围,高温组分和低温区域相间分布,而源区中高、低温所占的比例会随着风向的改变而变化。总之,图 9 可进一步说明临泽草地站 14 :00

之后造成 LAS 和 EC 观测通量差异的原因主要是地表水热特性的非均匀性。

5 结论与讨论

解析足迹模型无论是从原理的理解难易上还是从计算耗时上,都有较大的优势,并且,Korm ann 等<sup>[18]</sup>给出了一个真正意义上的解析解,本文利用其基于单点观测的解析足迹函数,建立了 EC 足迹模型。结合 LAS 沿光程路径的权重函数,建立了 LAS 的足迹模型。黑河流域遥感—地面观测同步试验是

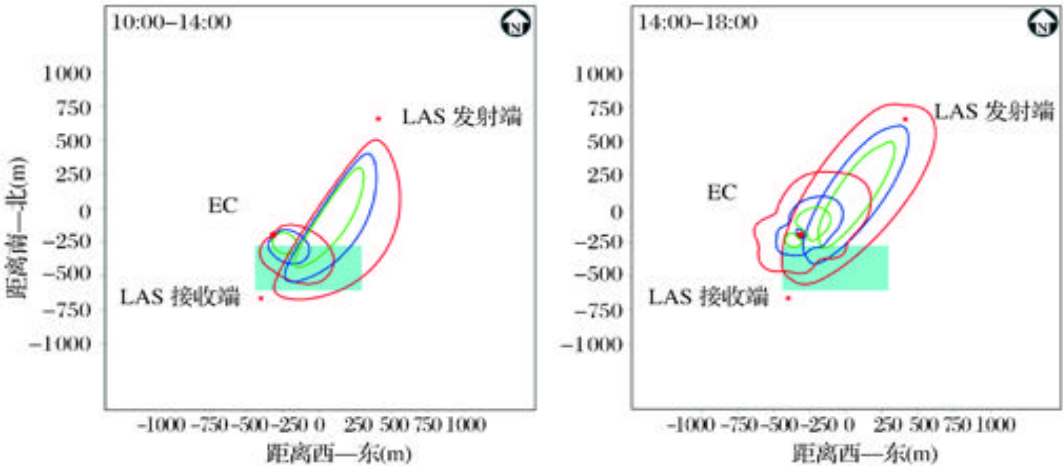


图 8 临泽草地站 10 :00-14 :00、14 :00-18 :00 的 EC 和 LAS 的通量源区(红线、蓝线、绿线分别代表 80%、60%、40%源区,矩形蓝色区域表示含水丰富的区域,网格分辨率为 30 m)

Fig.8 Source areas for the EC and LAS at Linze grassland station (10 :00-14 :00 and 14 :00-18 :00) (red line ,blue line and green line represent 80 % ,60 % and 40 %-level source area , respectively. The blue region in the rectangle indicated the abundant water area. The grid resolution is 30 m )

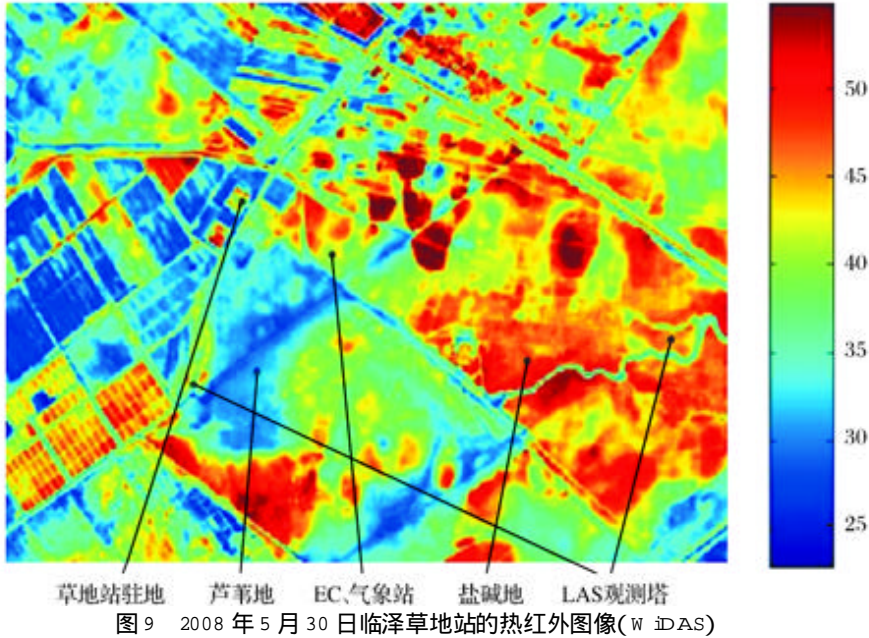


图 9 2008 年 5 月 30 日临泽草地站的热红外图像(W iDAS)

Fig.9 Thermal infrared image (W iDAS) on 30 May ,2008 at Linze grassland station



一次流域尺度上展开的大型航空、卫星遥感与地面同步观测科学试验,本文利用足迹模型分析了黑河流域大野口关滩森林站、盈科灌区绿洲站以及阿柔冻融观测站涡动相关仪与大孔径闪烁仪观测通量源区的空间代表性特征及季节变化特征,并且探讨了阿柔冻融观测站和临泽草地站涡动相关仪、大孔径闪烁仪观测通量的差异性及原因。结果表明:

(1) 大野口关滩森林站源区沿东北、西南方向分布,东北方向距观测塔 200 m 范围为 EC 通量观测主要贡献源区,源区下垫面以林地为主;盈科灌区绿洲站、阿柔冻融观测站 EC 通量观测的主要贡献源区为距离观测塔周边 250 m 环形范围,垂直 LAS 光程路径距离 250 m 的范围为阿柔冻融观测站 LAS 通量观测主要贡献源区,盈科灌区绿洲站源区下垫面以小麦、玉米为主,阿柔冻融观测站源区下垫面以草地为主。

(2) 在阿柔冻融观测站选择的典型天,10:30 左右是 EC 和 LAS 观测通量观测差异出现的时刻,也是风向从东南转向西北方向的时刻;在临泽草地站选择的典型天,14:00 左右是通量观测差异出现的时刻。在各观测站点由 EC 观测的显热通量和 LAS 观测而得的显热通量,并没有一定的高低规律,需要分析下垫面的水热特性,结合足迹模型,来进行差异解释。

通过计算分析以上站点的通量源区,进一步证明足迹模型的准确性和实用性,但是,现如今仍有一些工作需进一步完善,如在复杂地表上,应通过拉格朗日随机粒子扩散方法<sup>[23~25]</sup>、大涡模拟、边界层湍流闭合方法来求解足迹函数。

## 参考文献 (References):

- [1] Wang Jiemin, Wang Weizhen, Ao Yinhuan, *et al.* Turbulence flux measurements under complicated conditions[J]. *Advances in Earth Science*, 2007, 8(8): 791-797. [王介民, 王维真, 奥银焕, 等. 复杂条件下湍流通量的观测与分析[J]. 地球科学进展, 2007, 8(8): 791-797.]
- [2] Lu Li, Liu Shaomin, Sun Minzhang, *et al.* Advances in the study of areal surface fluxes with large aperture scintillometer[J]. *Advances in Earth Science*, 2005, 20(9): 932-938. [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.]
- [3] Gong Lijuan, Liu Shaomin, Shuang Xi, *et al.* Investigation of spatial representativeness for surface flux measurements with eddy covariance system and large aperture scintillometer[J]. *Plateau Meteorology*, 2009, 28(2): 246-257. [宫丽娟, 刘绍民, 双喜, 等. 涡动相关仪和大孔径闪烁仪观测通量的空间代表性研究[J]. 高原气象, 2009, 28(2): 246-257.]
- [4] Schmid H P. Experimental design for flux measurements: Matching the scales of observations and fluxes[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1997, 87: 179-200.
- [5] Gash J H C. A note on estimating the effect of a limited fetch on micrometeorological evaporation measurements[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1986, 35: 409-414.
- [6] Schmid H P, Oke T R. A model to estimate the source area contributing to turbulent exchange in the surfacelayer over patchy terrain[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorology Society*, 1990, 116: 965-988.
- [7] Schmid H P. Source area for scalar and scalar flux[J]. *Boundary Layer Meteorology*, 1994, 67: 293-318.
- [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] Göckede M, Rebmann C, Foken T. 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.
- [10] Rebmann C, Göckede M, Foken T, *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.
- [11] Chu Lianghai, Liu Wenzhao, Zhu Yuanjun, *et al.* Spatial representation of flux data in gully region on the Loess plateau[J]. *Advances in Earth Science*, 2009, 24(2): 211-218. [楚良海, 刘文兆, 朱元骏, 等. 黄土高原沟壑区通量数据空间代表性研究[J]. 地球科学进展, 2009, 24(2): 211-218.]
- [12] Peng Guliang, Liu Shaomin, Cai Xuhui, *et al.* Footprint analysis of turbulent flux measurement over heterogeneous surface[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2008, 32(5): 1 064-1 070. [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[J]. 大气科学, 2008, 32(5): 1 064-1 070.]
- [13] 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): 1 169-1 178.
- [14] Li Xin, Ma Mingguo, Wang Jian, *et al.* Simultaneous remote sensing and ground-based experiment in the Heihe river basin: Scientific objectives and experiment design[J]. *Advances in Earth Science*, 2008, 23(9): 897-914. [李新, 马明国, 王建, 等. 黑河流域遥感—地面观测同步试验: 科学目标与试验方案[J]. 地球科学进展, 2008, 23(9): 897-914.]
- [15] Xu Ziwei, Liu Shaomin, Gong Lijuan, *et al.* Processing and quality assessment of eddy covariance system data[J]. *Advances in Earth Science*, 2008, 23(4): 357-370. [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研究[J]. 地球科学进展, 2008, 23(4): 357-370.]
- [16] Lu Li, Liu Shaomin, Xu Ziwei, *et al.* Results from measurements of large aperture scintillometer over different surfaces[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2009, 20(2): 171-178. [卢

- 俐,刘绍民,徐自为,等. 不同下垫面大孔径闪烁仪观测数据处理与分析[J]. 应用气象学报, 2009, 20(2):171-178. ]
- [17] Pasquill F, Smith F B. Atmospheric Diffusion[M]. England: West Sussex Press, 1983:142.
- [18] Kormann R, Meixner F X. An analytic footprint model for neutral stratification[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2001, 99: 207-224.
- [19] Schmid H P. Footprint modeling for vegetation atmosphere exchange studies: A review and perspective [J]. *Agriculture and Forest Meteorology*, 2002, 113: 159-183.
- [20] Schmid H P. Spatial representativeness and the location bias of flux footprints over inhomogeneous areas [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1999, 93: 195-209.
- [21] Wang T, Ochs G R, Clifford S F. A saturation-resistant optical scintillometer to measure  $C_n^2$  [J]. *Journal of Optical Society of America*, 1978, 68(3):334-338.
- [22] Meijninger W M L, Hartogensis O K, Kohsiek W. Determination of area-averaged sensible heat fluxes with a large aperture scintillometer over a heterogeneous surface-Flevoland field experiment [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2002, 105: 37-62.
- [23] Kljun N, Rotach M W, Schmid H P. A three-dimensional backward lagrangian footprint model for a wide range of boundary-layer stratifications [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2002, 103: 205-226.
- [24] Kljun N, Calanca P, Rotach M, et al. A simple parameterization for flux footprint predictions [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2004, 112: 503-523.
- [25] Thomson D J. Criteria for the selection of stochastic models of particle trajectories in turbulent flow [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1987, 180: 529-556.

## Investigation of Spatial Representativeness for Surface Flux Measurements in the Heihe River Basin

SHUANG Xi<sup>1</sup>, LIU Shaomin<sup>1</sup>, XU Ziwei<sup>1</sup>, WANG Weizhen<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, School of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** It is very important to determine the land surface fluxes, including sensible heat fluxes and latent heat fluxes, for the issues involving many aspects of climate, agriculture, and water resources management. Nowadays, the Eddy Covariance system (EC) and the Large Aperture Scintillometer (LAS) are the main instruments measuring surface fluxes. The former is point observation and can observe hundreds of meters and the latter can observe area average fluxes in the scale of hundreds of meters to ten kilometers. In order to analyze the source area, we develop Eulerian analytical footprint models for the EC and LAS. Detailed descriptions of the theory basis and methods of the two models are given, and their differences are discussed. Simultaneous remote sensing and ground-based experiment was being carried out in the Heihe River Basin, its observing major components of water cycle were in three experiment areas, *i. e.*, cold region, forest, and arid region hydrology experiment areas. This paper shows some outcomes of the flux footprint models application in A'Rou freeze/thaw observation station, Yingke irrigated oasis station, Dayekou Guantan forest station and Linze grassland station. The representative one day or one month is selected. The analysis of the source area and spatial representativeness of the EC and LAS is given. The difference of observing flux is discussed. In the end, it reveals that reasonable source area of LAS and EC can be derived from their flux footprint models and the footprint model is an effective and practical tool.

**Key words:** Heihe River Basin; Large aperture scintillometer; Eddy covariance system; Analytical footprint models; Spatial representativeness.