

文章编号: 1001-8166(2009)02-0211-08

# 黄土高原沟壑区通量数据空间代表性研究\*

楚良海<sup>1</sup>, 刘文兆<sup>1,2\*</sup>, 朱元骏<sup>2</sup>, 李双江<sup>3</sup>

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100;

2. 中国科学院水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100;  
水利部

3. 河北科技大学环境科学与工程学院, 河北 石家庄 050018)

**摘 要:**利用 FSAM (Flux Source Area Model) 模型, 对中国科学院长武黄土高原农业生态试验站 2004—2005 年冬小麦生育期内的通量数据空间代表性进行了研究。结果发现, 在 90% 贡献率水平下, 整个冬小麦各生育期内通量源区范围动态变化明显, 通量贡献最大点在距离观测点 7.7~36.2 m 范围内变化。在盛行风向上, 通量源区离观测点最近点为 3.3 m, 最远点可达 172.8 m; 在侧风向上, 通量源区在 38.1~128.4 m 范围内变化。不同观测高度的对比研究表明, 观测高度从 1.86 m 增加到 12.17 m, 盛行风向上源区距观测点最远距离从 172.8 m 增加到 1555.2 m; 在侧风向上则从 123.2 m 增加到 665.8 m, 通量源区范围随高度的增加而增大。大气稳定度对通量贡献源区影响很大, 在大气稳定状态下, 通量源区面积最大, 距观测点最远距离达到 135.3 m; 中性条件下次之, 为 101.7 m; 在不稳定条件下面积最小, 为 36.3 m。同一日内, 夜晚源区面积较白天大。在日和季尺度上, 大气稳定度是影响通量源区范围的一个重要因素。

**关键词:** 涡动相关; 通量贡献源区; 冬小麦; 黄土高原

**中图分类号:** P434; P941.74 **文献标志码:** A

## 1 引言

涡动相关法是通量测定中假设最少的一种微气象学方法<sup>[1,2]</sup>。近年来, 随着涡动相关技术的日益成熟以及仪器的不断改进, 该方法已成为生态系统与大气间碳和水热通量观测的标准方法<sup>[3~5]</sup>。

由于涡动相关法是基于点的观测, 因此架设于一定高度的仪器所观测的结果只能反映下垫面某一特定区域内的通量过程。通常, 将对近地面层某一观测点观测的通量数据有贡献的有效下垫面源、汇区域称为通量贡献区 (Footprint)<sup>[6]</sup>。通量贡献区的方向和范围, 受风向、仪器架设高度、下垫面粗糙度、

大气稳定度等特征参数的影响<sup>[7]</sup>。国外对通量源区分析的研究开展较早, 现已建立了 Footprint 理论和多种模型, 包括通量贡献解析模型、拉格朗日随机模型和基于大涡模拟的 Footprint 模型等<sup>[8~11]</sup>。通量解析模型经过了十几年的发展, 已发表并广泛应用的有 Horst-Weil, Komann and Meixner 和 FSAM (Flux Source Area Model) 模型等。Komann 等<sup>[12,13]</sup>在 2001 年提出了基于非中性层结条件下的通量贡献解析模型; 其与拉格朗日模型 (LPDM-B) 比较的结果表明, 对于一定观测高度的仪器来说, 在不稳定和中性条件下, 二者模拟的源区面积范围大致相同; 但 LPDM-B 模拟的通量贡献最大点距观测仪器的距

\* 收稿日期: 2008-09-16; 修回日期: 2008-11-19.

\* 基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目“黄土高原旱作农田生产力及水分生态过程调控”(编号: KZCX2-YW-424); 教育部长江学者和创新团队发展计划项目“黄土高原流域生态系统中水土迁移机制及其调控原理”(编号: RT0749)资助。

作者简介: 楚良海 (1982-), 男, 黑龙江牡丹江人, 在读硕士, 主要从事农田生态系统通量数据处理与模型研究。E-mail: lhchu@126.com

\* 通讯作者: 刘文兆 (1960-), 男, 陕西乾县人, 研究员, 主要从事水文生态与流域管理研究。E-mail: wzliu@ms.iswc.ac.cn

离较 Komann 模型模拟的结果略小。Schmid<sup>[14~19]</sup>于 1994 年提出了主要源区尺度的参数化公式即 FSAM 模型, 由于其物理机制明确, 使用简单, 得到了广泛的应用。在国内, 米娜等于 2006 年应用 FSAM 模型对中国通量观测网络中 8 个站点通量数据的空间代表性进行研究, 发现复杂地貌特征和非均一下垫面条件下的源区范围变化幅度很大。因此, 确定某一观测点通量数据的源区无疑是进行通量观测资料的质量控制和有关研究的基础。

黄土高原地处我国半湿润向干旱和半干旱气候过渡的中间地带, 具有独特的地理、生态和人文景观。科学研究和历史演替表明, 该区域是对全球气候变化反应的敏感地带。此外, 由于历史和现实的因素, 该区域通量观测和研究还处于起步阶段。因此, 在黄土高原地区展开通量等相关研究, 不仅可以监测全球气候变化, 还可以研究气候变化在该区域的生态系统响应过程, 如水碳的循环及反馈等。本文利用 Schmid 的 FSAM 通量源区解析模型, 对中国科学院长武黄土高原农业生态试验站 2004—2005 年冬小麦通量观测数据进行了分析和模拟, 以研究冬小麦各生育期和不同观测高度下、不同大气条件下通量源区的变化情况, 为该地区农田生态系统水、热、碳通量的相关研究提供基础。

## 2 研究区概况

试验在中国科学院长武黄土高原农业生态试验站通量观测场进行。该观测场地处黄土高原中南部陕甘交界的陕西省长武县洪家镇王东村 (35°14'N, 107°41'E), 海拔 1 220 m。属暖温带半湿润大陆性季风气候, 年均降水 584 mm, 年均气温 9.1℃, 无霜期 171 天, 地下水埋深 50~80 m, 属黄土高原典型旱作农业区。地貌类型为黄土高原沟壑区, 土壤类型为黑垆土。观测场主要种植作物为冬小麦, 其生长季为每年 9 月至次年 6 月。涡动相关仪器安装在观测场地中央。

## 3 材料与方法

### 3.1 试验材料

冬小麦田通量观测数据来自于距离地表 1.86 m 和 12.17 m 的两套涡动相关系统。该系统主要由三维超声风速计 (R3-50, Gill Instruments, UK) 和开路 CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O 分析仪 (Li-7500, Li-Cor, USA) 组成, 原始采样频率为 10 Hz, 数据由采集器 (CR5000X, Campbell Scientific, USA) 自动采集并存储。该系统

同时集成了气象和辐射等常规气象观测系统。

### 3.2 研究方法

#### 3.2.1 数据分析方法

利用架设高度为 1.86 m 和 12.17 m 的仪器所接收的通量数据和常规气象数据, 结合 2004 年、2005 年冬小麦加强观测期数据, 应用 FSAM 模型, 对涡动相关仪器获得的通量数据空间代表性进行研究。数据时间跨度包括了冬小麦整个生育期。其中常规气象数据用于一般天气气象分析, 包括通量源区分析所需的风向统计; 涡动相关仪数据用于计算摩擦风速、大气稳定度等参数, 以驱动通量贡献解析模型和分析解释结果。数据计算经过二次坐标轴旋转等校正。对于因下雨, 停电, 仪器维护等产生的无效数据或数据缺失, 一律作删除处理, 未作任何形式的插补。

#### 3.2.2 通量源区模型 (FSAM)

FSAM (Flux-Source-Area Model) 是由美国印第安纳大学 Hans Peter Schmid 等根据 Footprint 理论, 在 Horst 和 Weil 方法基础上开发的。其主要根据 Van Ulden 和 Gryng 等提出的基于 K 理论和假设的风速和扩散指数廓线方法, 通过求解二维平流扩散方程来解析源区足迹。该模型最早在 1993 年开始研发, 目前已有较大改进。

驱动 FSAM 模型的主要参数包括: 观测高度 ( $Z_m$ ), 空气动力学粗糙度 ( $z_0$ ), 摩擦风速  $u_*$ , 奥布霍夫长度 ( $L$ ), 侧向风速 ( $v$ ) 脉动的标准差  $\sigma_v$ 。具体参数应用说明如下:

(1)  $Z_m / z_0$ , 此处的  $Z_m$  为考虑了零平面位移 ( $d$ ) 后的有效观测高度。由于长武地区冬小麦在拔节期至收获期之间株高约为 0.40~0.80 m, 对于架设高度为 1.86 m 仪器所接收的数据, 零平面位移  $d$  的影响不可忽略; 对于 12.17 m 以及更高层次仪器而言, 影响则相对较小。本文根据中性层结条件下风速随高度变化方程 (1), 利用最小二乘法来求算  $d$  和  $z_0$ :

$$u = \frac{u_*}{k} \ln \frac{Z_m}{z_0} \quad (1)$$

其中,  $Z_m = Z - d$ ,  $u$  为风速,  $u_*$  为摩擦风速,  $k$  为卡门常数, 取 0.4,  $Z$  为仪器架设高度。

(2) 稳定度参数 ( $Z_m / L$ ),  $L$  为奥布霍夫长度, 根据不同生育期内的计算结果得到不同状态下的稳定度参数。  $L$  根据公式 (2) 计算:

$$L = \frac{u_*^3}{k \frac{g}{T} \frac{H}{C_p}} = \frac{T u_*^2}{k g T} \quad (2)$$

其中,  $g$  为重力加速度, 实际计算取  $9.8 \text{ m/s}^2$ , 是空气密度,  $C_p$  是空气定压比热。感热通量  $H$ , 摩擦温度  $T$  等参数通过涡动相关数据计算获得。

(3)  $v/u_*$ , 根据涡动相关仪器观测的数据计算  $u_*$  及侧向风速 ( $v$ ) 脉动的标准差, 得到不同生育期, 不同观测高度, 不同大气稳定度下的侧向风脉动强度。

模型的输出参数为: 通量贡献函数取最大值的位置, 通量贡献区等值线上距传感器最近点、最远点、等值线上侧向最大距离的一半, 等值线上最大宽度位置对应的  $x$  值。所有输出参数均被空气动力学粗糙度标准化, 即以各输出参数与  $z_0$  比值的形式反映源区主要位置信息。输入适当的特征参数, 模型可以模拟出对通量值产生  $10\% \sim 90\%$  ( $P = 0.1 \sim 0.9$ ) 的通量贡献区的大小。本文选取  $P = 0.9$  水平下的源面积进行分析。

FSAM 模型对输入参数有特定的要求, 具体如下: 稳定条件下  $2.0 \times 10^1 Z_m / z_0$ ,  $5.0 \times 10^2$ ,  $2.0 \times 10^{-4} Z_m / L$ ,  $1.0 \times 10^{-1}$ ,  $1.0$ ,  $v/u_*$ ,  $6.0$ ; 不稳定条件下  $4.0 \times 10^1 Z_m / z_0$ ,  $1.0 \times 10^3$ ,  $4.0 \times 10^{-4} Z_m / L$ ,  $1.0$ ,  $1.0$ ,  $v/u_*$ ,  $6.0$ 。

### 3.2.3 小麦生育期划分

本观测场下垫面主要作物为冬小麦 (长武 134), 生长季为每年 9 月份到次年 6 月份。在整个生长季内, 麦田生态系统与大气之间的 NEE (净生态系统碳交换量) 随生育期变化而变化, 其通量源面积范围和方向也随生育期以及风向变化。正确评价源面积的变化情况, 对解释 NEE 的时空变异以及水热通量的收支变化都有至关重要的作用。长武冬小麦 2004—2005 年主要生育期划分见表 1 (未标记时间段为非生长季)。

表 1 2004—2005 年长武站冬小麦生育期划分

Table 1 The division of winter wheat growing stages in Changwu station from 2004 to 2005

日期	040924 ~ 050309	050310 ~ 050401	050402 ~ 050502	050503 ~ 050601	050602 ~ 050621
生育期	越冬期	返青期	拔节期	孕穗期	收获期

## 4 结果与分析

### 4.1 盛行风向对目标源区的影响

通量塔所观测的通量数据的贡献区一般分布在通量塔的一侧, 即盛行风向一侧。实验在关注农田通量变化时, 需要首先满足实际风向需要, 以便正确评价农田生态系统通量的时空变异。图 1 给出了该地区以  $15^\circ$  为步长的全年风向频率统计图, 由图可以看出, 在全年尺度上, 整个观测场地盛行东南风。各生育期的统计特征也有相同规律。本实验场, 东南方向地势较为平坦, 下垫面为均一的冬小麦; 盛行风向与冬小麦的种植区域相吻合。

### 4.2 生长季内不同生育期的通量源区变化特征

对于长武黄土高原农田生态系统来说, 随着作物株高以及盖度的变化, 观测场地的空气动力学粗糙度和零平面位移都有所变化, Footprint 解析过程对这些特征参数都十分敏感。正确评价各生育期内仪器所观测的通量数据的源区大小和变异情况, 是解释通量时空变异和源、汇特征的理论前提。表 2 为 2004 年 9 月至 2005 年 6 月本实验观测场 (冬小麦) 空气动力学粗糙度 ( $z_0$ ) 以及模型主要驱动参数在生长季内变化情况。表中各参数均为剔除异常值

后各生育期中以  $30 \text{ min}$  为步长的平均值。

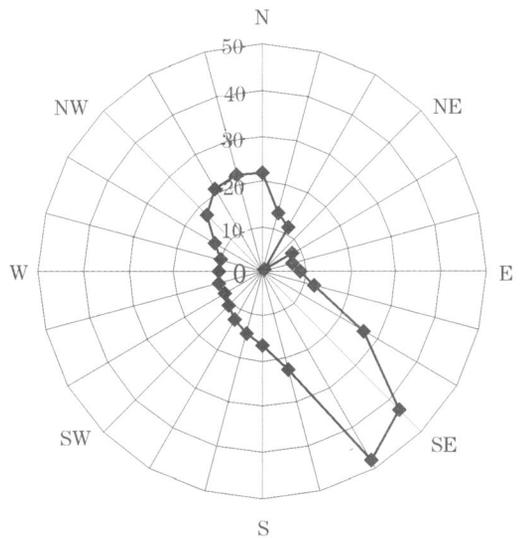


图 1 2004 年 9 月至 2005 年 6 月风向及其分布频率统计图

Fig 1 Wind direction and its distribution frequency from September 2004 to June 2005

应用以上参数驱动 FSAM 模型, 得到冬小麦整个生育期内各阶段的平均源区的方位及尺度信息, 主要包括了通量贡献函数取最大值点  $x_m$ , 源区距塔

最近点 A,最远点 E,横向最大范围长度的一半 D, 单位均为 m。具体结果如图 2 所示。

表 2 冬小麦生育期的模型输入参数(观测高度为 1.86 m)

Table 2 Input-parameters of FSAM during the winter wheat growing stages (Observation height at 1.86 m)

日期	040924 ~ 050309	050310 ~ 050401	050402 ~ 050502	050503 ~ 050601	050602 ~ 050621
生育期	越冬期	返青期	拔节期	孕穗期	收获期
$z_0$	0.011	0.020	0.045	0.081	0.105
$Z_m / z_0$	164	88	36.044	17.875	12.821
$Z_m / L$	-0.111	0.086	0.089	0.056	-0.138
$v / u^*$	4.342	4.36	5.206	3.577	3.296

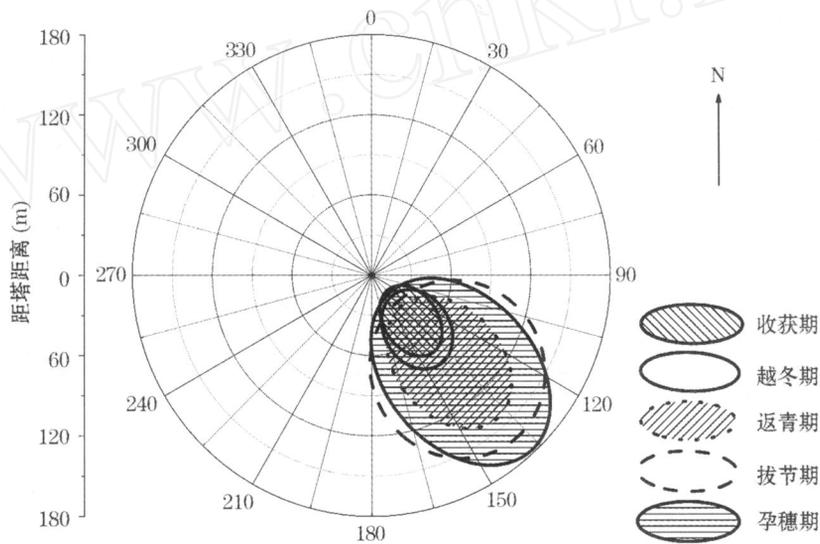


图 2 长武冬小麦各生育期通量源区变化

Fig 2 Changes of flux source area for winter wheat growing stages

注:此结果为在盛行风向上,冬小麦生长季各阶段的平均情况,源面积由小到大依次为收获期、越冬期、返青期、拔节期、孕穗期。观测高度 1.86 m

结果表明,在贡献率 90%水平下,仪器架设高度为 1.86 m 时,各生育期的通量贡献区最大范围 E 分别为距塔 56.4 m, 129.8 m, 150.2 m, 172.8 m, 50.4 m,基本符合上风距离(fetch)与仪器高度的 100:1 经验性法则。综合源区离塔最近距离 A 和最远距离 E 可知,整个生育期内的源面积范围是从距塔 3.3 m 到距塔 172.8 m,横向距离范围是 38.06 ~ 128.4 m。该源区范围未超出有效下垫面面积。通量贡献最大点为距塔 7.7 ~ 36.2 m。比较各个生育期源面积范围,发现收获期和越冬期面积明显小于其他 3 个生育期,这是由于在收获期和越冬期大多数情况下 L 为负,主要为不稳定状态,湍流运动活跃,故源面积较小。由于通量贡献区的大小、位置依据风向、仪器观测高度、下垫面粗糙度和边界层特征的变化而发生瞬时改变,以上研究仅给出了各生育

期内的平均情况,有关大气稳定度等特征参数的影响在下面讨论。

#### 4.3 观测高度对通量源区变化特征的影响

为研究不同观测梯度下农田水、热、碳通量随观测高度的变化,本研究对两个高度(分别为 1.86 m 和 12.17 m)的通量数据进行比较分析。图 3 为两个高度上观测的通量源区变化。

结果表明:在 90% 贡献率水平下,通量贡献区范围随着观测高度的增大而增大,观测高度较大时,通量贡献区距塔最近点和通量贡献函数最大点均远离通量塔位置。观测高度为 1.86 m 时,通量贡献最大点距塔 24.4 m,而观测高度为 12.17 m 时这一距离增加到 425.3 m。观测高度为 12.17 m 时对通量数据产生 90% 贡献的有效源区范围最大长度为 1555.2 m,相同水平下观测高度 1.86 m 时的最大

范围是 172.8 m。在侧风方向上,源面积最大宽度分别为 123.2 m 和 665.8 m。观测高度从 1.86 m 增加到 12.17 m,盛行风向最大源区范围增加了 900%,侧风向范围增加了 532.3%。综合可知,随着观测高度的增大,通量贡献源区逐渐远离观测塔位置,并且源区在盛行风向和侧风向范围内都逐渐变大。

4.4 不同大气稳定度条件下通量源区的变化特征

为了进一步研究大气稳定度对本观测场通量源

区范围的影响,本研究中应用边界层气象学中常用的  $z_m/L$  作为稳定度参数来进行讨论。为 0 时,表示大气稳定度为中性;负值表示不稳定;正值表示稳定。本文使用的 FSAM 模型对  $z_m/L$  有所限制,范围是  $-1 < z_m/L < 0.1$ ,故本研究取该范围内的平均,得到稳定状态下的  $z_m/L$  为 0.029,不稳定状态下的  $z_m/L$  为 -0.174,中性条件下  $z_m/L$  取 0.00076。模拟结果见图 4。

可以看出,在 90% 贡献率水平下,在盛行风向

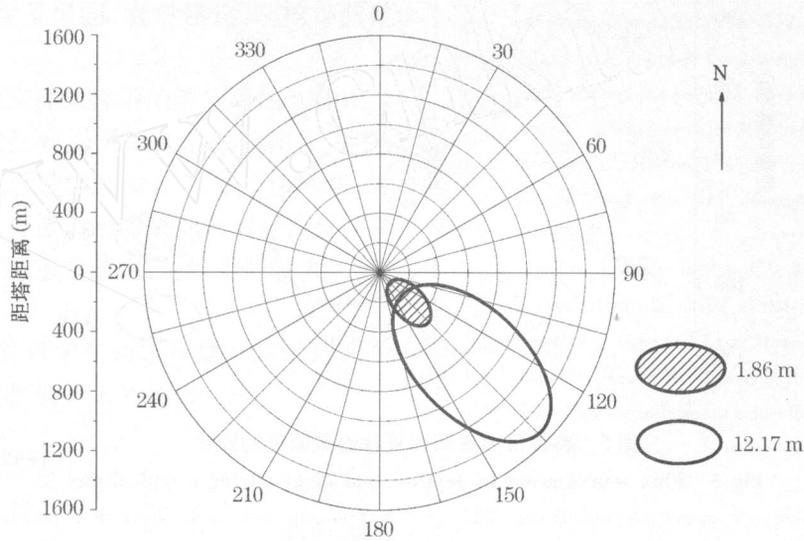


图 3 不同观测高度引起的通量源区变化

Fig. 3 Changes of flux source area in different observation heights

注:此结果为在盛行风向上,长武冬小麦孕穗期内的平均模拟结果

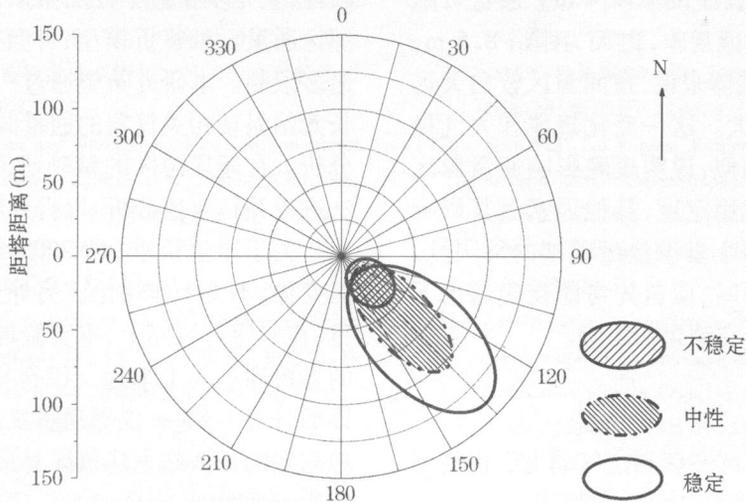


图 4 大气稳定度引起的通量源区变化

Fig. 4 Changes of flux source area for different atmospheric stabilities

注:此结果为在盛行风向上,长武冬小麦在孕穗期内的平均模拟结果;仪器架设高度为 1.86 m

上,通量贡献区在大气不稳定状态下,源区范围为距塔 3.7~36.3 m,中性条件下为 7.3~101.7 m,稳定

条件下为 8.1~135.3 m。表明不稳定条件下源区面积最小,稳定条件下源面积最大。并且随着大气

稳定度的增强,源面积整体远离观测塔位置。在侧行风向上,源面积宽度分别为 29.8 m, 42.6 m, 75.6 m。随着稳定度的增强,源面积在侧行风向上宽度也变大,但此变化幅度较盛行风向的变化小。

#### 4.5 典型日内白天和夜晚通量源区的变化差异

夜间大气处于稳定层结条件下,湍流运动较弱。对于通量贡献源区而言,由于夜间摩擦风速较小,导

致目标源区对仪器的贡献率降低或仪器所接受的数据超出目标源区的范围。本研究通过对典型日内白天和夜晚通量源区变化进行对比,找出夜间湍流活动较弱状态下的通量贡献源区与白天的差异。本研究选取前三天无降水,且观测数据质量较高的典型日进行研究。具体为 5 月 4 日至 5 月 25 日。研究时定义 8 时~18 时为白天。研究结果见图 5。

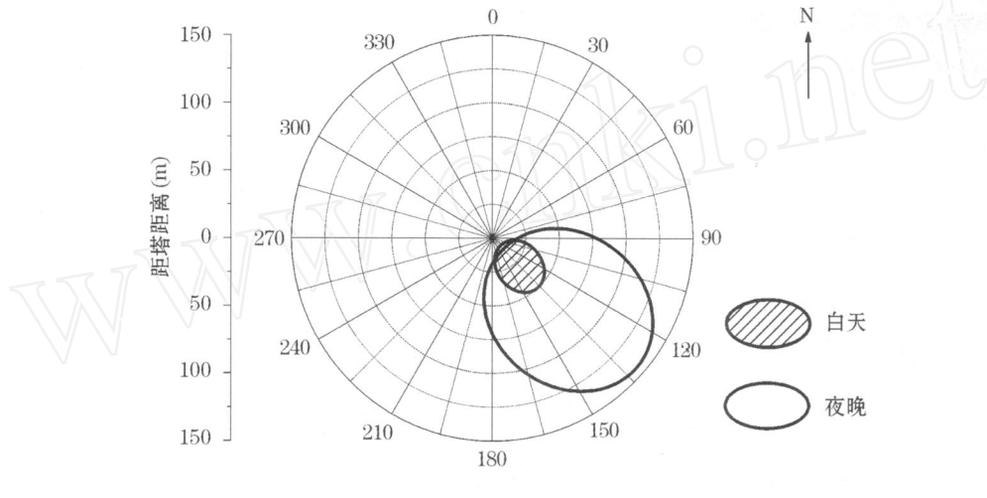


图 5 典型日内白天和夜晚通量源区的变化

Fig 5 Flux source areas in daytime and night during a typical day

可以看出,典型日内白天和夜晚通量源区范围差异很大,白天源区范围为距塔 3.9~38.6 m;夜晚源区范围为距塔 8~131.9 m。侧风向范围宽度从白天的 31.4 m 增加到夜晚的 134.4 m。通量贡献函数最大值变化也有类似规律,白天为距塔 8.5 m,夜晚为距塔 20.7 m。整体来说,夜间源区较白天远离观测点,并且范围变大。这一变化规律和大气稳定度引起的源区变化相似,说明夜晚影响通量源区范围的主要因素是大气稳定度,其他因素对其影响较弱。由于本观测场冬小麦下垫面范围的局限性,故在开展相关通量分析时,应首先考虑夜晚超出下垫面范围的通量值对研究结果的影响。

## 5 讨论

本研究由于最低观测高度和空气动力学粗糙度的限制,使得观测高度为 1.86 m 条件下, $Z_m / z_0$  很难达到模型要求,所以所计算的特征参数有部分超出模型范围。但运行模型后仍然可以得到比较理想的结果。给定模型驱动需要的相关参数,模型可以很好的分析 P 从 10%~90% 的通量贡献区面积。在精确度要求不是十分严格的情况下,可应用该模型得到基本的通量源区的解析结果。

FSAM 模型有一定的优点。它是基于物理过程的机理模型,可以较方便的模拟出对仪器接收信息有贡献的下垫面源区范围。但该模型也有一定的局限性,它是基于近中性层结条件下,平坦下垫面上的源区通量贡献解析模型,并且对输入的特征参数有诸多限制。本研究希望通过一种简单的技术方法对长武站涡动相关仪器的通量源区进行初步的气候学分析。在通量源区的精确研究中,需要综合其他方法进行并行对比分析,以得到精确的通量源区面积。

关于非生长季(即 2005 年 7~9 月)的通量源区变化,本文未作讨论。另外,由于下垫面斑块化严重,在非盛行风向上,本实验场北方和东北方有大片的果树和小块玉米地。综合全年的统计信息来看,该部分对 1.86 m 仪器通量贡献率为 6.4%,实验场地东侧的长武站主建筑区对仪器所测通量的贡献率约为 4.5%。

## 6 结论

从长武冬小麦生育期各阶段的平均情况来看,仪器所接收的通量数据的源区是动态变化的。在通量贡献率达到 90% 水平下,架设高度为 1.86 m 仪器的源区在盛行风向上最大距离为距塔 172.8 m,

侧风向上最大宽度为 128.4 m。通量贡献函数最大点从距塔 7.7 m 变化到距塔 36.2 m。该范围未超出长武冬小麦观测场的范围,所以架设高度为 1.86 m 的涡动相关仪器所观测的通量均来自于冬小麦。

观测高度对通量源区范围影响很大,仪器高度从 1.86 m 增加到 12.17 m,整个通量源区最大范围从距塔 172.8 m 增大到 1555.2 m,就本实验来说,架设高度为 12.17 m 以及更高层次上的涡动相关仪器所接收的通量数据的源区已经远超出了长武冬小麦观测场范围,包含了果园、农户建筑、学校等其他下垫面的影响。

对不同大气稳定度条件下的源区范围变化以及对典型日中白天和夜晚通量源区的变化研究表明,大气稳定度是影响通量源区变化的最敏感因素,大气稳定度的日变化直接引起通量源区的日变化。总体变化特征为大气稳定度越大,通量源区越大。

**致谢:**感谢中国科学院南京地理与湖泊研究所的赵晓松博士在模型模拟上的建议。

#### 参考文献 (References):

- [1] Yu Guirui, Sun Xiaomin, Wen Xuefa, *et al* Principles of Flux Measurement in Terrestrial Ecosystems [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006. [于贵瑞,孙晓敏,温学发,等.陆地生态系统通量观测的原理与方法 [M].北京:高等教育出版社,2006.]
- [2] Wang Jiem in, Wang Weizhen, Ao Yinhuan, *et al* Turbulence flux measurements under complicated conditions[J]. *Advances in Earth Science*, 2007, 22(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,2007,22(8): 791-797.]
- [3] Huang Yao The Carbon and Nitrogen Exchange in Soil-atmosphere system from Experiments to Models[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2003. [黄耀.地气系统碳氮交换——从实验到模型 [M].北京:气象出版社,2003.]
- [4] Yu Guirui, Zhang Leiming, Sun Xiaomin, *et al* Advances in carbon flux observation and research in Asia[J]. *Science in China (Series D)*, 2004, 34 (suppl. ID): 15-29. [于贵瑞,张雷明,孙晓敏,等.亚洲区域陆地生态系统碳通量观测研究进展 [J].中国科学: D 辑, 2004, 34 (增刊): 15-29.]
- [5] Yu Guirui Global Change, Carbon Cycle and Accumulation in Terrestrial Ecosystems[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2003. [于贵瑞.全球变化与陆地生态系统碳循环和碳蓄积 [M].北京:气象出版社,2003.]
- [6] Schmid H P. Source areas for scalars and scalar fluxes [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1994, 67: 293-318.
- [7] Schmid H P. Footprint modeling for vegetation and atmosphere exchange studies: A review and perspective [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 113: 159-183.
- [8] Schmid H P, Lloyd C R. Spatial representativeness and the location bias of flux footprints over inhomogeneous areas[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1999, 93: 195-209.
- [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[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, 127: 175-188.
- [10] Kim J, Guo Q, Baldocchi D D, *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] Sogachev A, Lloyd J. Using a one-and-a-half order closure model of the atmospheric boundary layer for surface flux footprint estimation [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2004, 112: 467-502.
- [12] Komann R, Meixner F X. An analytical footprint model for non-neutral stratification [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2001, 99: 207-224.
- [13] Kljun N, Komann R, Rotach M W, *et al* Comparison of the Lagrangian footprint model LPDM-B with an analytical footprint model[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2003, 106: 349-355.
- [14] 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.
- [15] Liu Shuhua, Ma Yin in. The characteristics of CO<sub>2</sub> concentration and flux turbulence fluxes in the near surface layer over the wheat field[J]. *Acta Meteorology Sinica*, 1997, 4: 181-199.
- [16] Mi Na, Yu Guirui, Wen Xuefa, *et al* A preliminary study for spatial representativeness of flux observation at ChinaFLUX sites [J]. *Science in China (Series D)*, 2006, 36 (suppl. ): 22-33. [米娜,于贵瑞,温学发,等.中国通量观测网络 (ChinaFLUX)通量观测空间代表性初步研究 [J].中国科学: D 辑, 2006, 36 (增刊): 22-33.]
- [17] Shen Yan, Liu Yunfen. Examination of source area in-flux measurements at the Mid-Subtropical forest region [J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2005, 29(2): 202-207. [沈艳,刘允芬.中亚热带森林区通量观测的源面积探讨 [J].植物生态学报, 2005, 29(2): 202-207.]
- [18] Zhao Xiaosong, Guan Dexin, Wu Jiabing, *et al* Distribution of footprint and flux source area of the mixed forest of broad-leaved and Korean pine in Changbai Mountain [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2005, 27(3): 17-23. [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.]
- [19] Shen Yan, Liu Yunfen, Wang Yan. Advances in applying the eddy-covariance technique to calculate heat, moisture and CO<sub>2</sub> flux [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 2005, 4: 559-566. [沈艳,刘允芬,王堰.应用涡动相关法计算水热、CO<sub>2</sub>通量的国内外进展概况 [J].南京气象学院学报, 2005, 4: 559-566.]

## Spatial Representation of Flux Data in Gully Region on the Loess Plateau

CHU Lianghai<sup>1</sup>, LIU Wenzhao<sup>1,2</sup>, ZHU Yuanjun<sup>2</sup>, LI Shuangjiang<sup>3</sup>

(1. College of Resources and Environment, Northwest Agricultural & Forest University, Yangling 712100, China;

2. Institute of Soil and water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources,

Yangling 712100, China; 3. College of Environmental Science and Engineering,

Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China)

**Abstract:** Spatial representation of flux data during winter wheat growing period from 2004 to 2005 was analyzed in Changwu Station, the Chinese Academy of Sciences by FSAM (Flux Source Area Model). The results indicated that flux source area (FSA, footprint) was dramatically changed during each growing stage of winter wheat under the effect level of 90% confidence. The source area of the maximum footprint was located between 7.7 m and 36.2 m from the observation point. In the prevailing wind direction, the upwind range of source area was 3.3 ~ 172.8 m, and vertical upwind range was 38.1 ~ 128.4 m. The comparison of footprint among different measurement heights showed that with the measurement height increased up from 1.86 to 12.17 m, the length of footprint expanded from 172.8 m to 1555.2 m in the prevailing wind direction and from 123.2 m to 665.8 m in the vertical direction. The footprint fluctuated with atmospheric stability. The length of the source area is the largest under the stable atmospheric stratification with the distance of 135.3 m from the observation point, reaching 101.7 m under the condition of moderate atmospheric stratification, and the smallest is under unstable stratification with the distance of 36.3 m. Meanwhile, the source area in night is larger than that in daytime. In daily and seasonal scales, atmospheric stability has an important effect on flux source area.

**Key words:** Eddy covariance; Flux-source area; Winter wheat; The loess plateau

## 《地球科学进展》杂志广告参考价目表

黑白 (文字、照片)		彩色 (文字、照片)	
封二、封三	价格 (元)	封二、封三	价格 (元)
纯文字	1500 ~ 2000	纯文字	3500 ~ 4000
文字加照片	2500 ~ 3000	文字加照片	4500 ~ 5000
封四 (含文字、照片)	2000 ~ 2500	封四 (含文字、照片)	5000 ~ 6000
1/2版面	价格减半	1/2版面	2500 ~ 3000
1/3版面	价格的 1/3	1/3版面	1500 ~ 2000
1/4版面	价格的 1/4	1/4版面	1000 ~ 1500
插页 (正反两版)	3000 ~ 4000	插页 (正反两版)	6000 ~ 8000

注: (1)客户如果长期合作,可以给予 15% ~ 20%的优惠 (需签定合作意向)。

(2)本刊与客户之间可根据广告的难易程度协商确定价格。

(3)其他相关事项可协商确定。

(4)1/2、1/3、1/4版面的纯文字宣传,只做插页广告。

联系电话: 0931 - 4968256 Email: adearth@lzb.ac.cn