

周琪,李平衡,王权,等.西北干旱区荒漠生态系统通量贡献区模型研究[J].中国沙漠,2014,34(1):98-107. [Zhou Qi, Li Pingheng, Wang Quan, et al. A footprint analysis on a desert ecosystem in West China[J]. Journal of Desert Research, 2014, 34(1):98-107.]. doi:10.7522/j.issn.1000-694X.2013.00289.

# 西北干旱区荒漠生态系统通量贡献区模型研究

周琪<sup>1,2</sup>, 李平衡<sup>1,3</sup>, 王权<sup>1,3</sup>, 郑超磊<sup>3</sup>, 徐璐<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 新疆 乌鲁木齐 830011; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 静冈大学, 日本 静冈 422-8529)

**摘要:** 涡度相关仪通量值所代表的通量贡献区范围,对于通量观测塔的选址、仪器安装高度的确定以及通量观测数据的质量控制等具有重要的指导意义。利用通量贡献区模型对位于古尔班通古特沙漠试验场通量观测资料的空间代表性进行初步分析。结果表明:该荒漠区在大气稳定条件下90%的通量贡献区最远可以达到686.40 m,通量贡献函数最大点的位置在162.50 m;大气稳定时各风向的通量贡献区范围在生长末期均达到最大,生长初期和中期的源区变化因受到各风向风速和植被下垫面的影响而有差异;大气不稳定时不同生长时期各风向通量贡献区没有固定变化规律;通量源区大约有58.71%的信息来自于荒漠区通量观测塔西南至西北方,整个生长季生长末期通量贡献最多,所占比例为40.16%。由FSAM模型测得的通量贡献区范围可以较准确地反映荒漠生态系统下垫面的通量信息。

**关键词:** 涡度相关; 荒漠生态系统; 通量贡献区; FSAM

文章编号: 1000-694X(2014)01-0098-10

doi: 10.7522/j.issn.1000-694X.2013.00289

中图分类号: P404

文献标志码: A

## 1 引言

涡度相关法是一种直接测量植被与大气间通量的观测方法<sup>[1-3]</sup>,其仪器测得的通量值在多大程度上能代表研究区域下垫面植被与大气间物质和能量的交换,即通量的空间代表性,对于通量观测塔位置的选择、仪器的安装高度以及通量观测数据的质量控制<sup>[4-6]</sup>等方面有重要的指导意义。经过各国学者长期深入的研究,解决通量空间代表性问题的通量贡献区(Footprint)理论日益完善<sup>[7]</sup>。

目前已经有许多用于计算Footprint的模型方法<sup>[8]</sup>,主要包括:基于平流扩散方程的解析法<sup>[9]</sup>、拉格朗日随机模拟法(Lagrangian Stochastic Model, LS)和大涡模拟等<sup>[10]</sup>。解析法主要通过运用梯度扩散理论、二维平流扩散方程和相似理论来计算通量贡献区<sup>[11-12]</sup>,虽然计算简便,但是要求湍流在水平方向上是均质的。Kormann等<sup>[9]</sup>运用幂次律廓线求解风速和湍流扩散率,提出了KM通量贡献区模型,该模型虽然可以计算出一个完全解析解<sup>[13]</sup>,但是简化了模型运算<sup>[8]</sup>。Hsieh等<sup>[14]</sup>提出以LS为基

础的解析法。Kljun等<sup>[15]</sup>建立一个三维后向LS模型,该模型较适用于大范围边界层条件,比解析模型更适用于非均匀地表<sup>[16]</sup>。

Schmid<sup>[17]</sup>根据Horst等<sup>[18]</sup>的理论,提出了一种基于K理论和假设的扩散指数廓线法,来求解二维平流扩散方程的解析法,即FSAM(Flux Source Area Model)。该模型物理机制明确,数学形式简单,已得到广泛的应用<sup>[19-21]</sup>,如赵晓松等<sup>[7]</sup>应用FSAM模型分析了长白山阔叶红松林通量源区的分布特征,楚良海等<sup>[22]</sup>应用FSAM模型分析了黄土高原沟壑区通量的空间代表性,吴志祥等<sup>[23]</sup>应用FSAM模型分析了海南岛橡胶林通量贡献区的大小。

占全球陆地面积约为35%的干旱区荒漠生态系统,被认为是对CO<sub>2</sub>浓度升高响应敏感的生态系统之一<sup>[24]</sup>。荒漠生态系统的碳吸收引起了研究者们更多的关注,许多学者将荒漠区作为大气CO<sub>2</sub>“未知碳汇”的分布区以及未来隔离化石燃料CO<sub>2</sub>排放的潜在重要区进行研究<sup>[25]</sup>。目前关于干旱区荒漠生态系统碳水通量的连续监测越来越多<sup>[26]</sup>,但对通

收稿日期:2012-12-15; 改回日期:2013-03-12

基金项目:国家自然科学基金项目(41071238);国家基础研究发展计划项目(2009CB825103);中国科学院项目(1074041001)资助

作者简介:周琪(1988—),女,山西忻州人,硕士研究生,主要从事植物生态学研究。Email: 401zhouqi@163.com

通讯作者:王权 (Email: qw4academic@gmail.com)

量贡献区的相关研究较为匮乏。古尔班通古特沙漠是中国第二大沙漠,位于西北干旱区,属于典型的荒漠生态系统。本文利用FSAM对位于该荒漠研究区在2011年植被生长季内的通量观测数据加以分析,试图确定该荒漠生态系统不同大气条件各风向通量源区的变化特征,不同生长时期各风向在不同大气条件下的源区变化情况以及通量测量的主要源区和主要生长时期,来解释通量测量的空间代表性,为荒漠生态系统碳水通量观测的相关研究提供理论基础支撑。

## 2 研究区概况与方法

### 2.1 研究区概况

研究区位于中国唯一以半移动沙丘形态存在的古尔班通古特沙漠南缘( $44^{\circ}25'54''\text{N}$ ,  $87^{\circ}54'9''\text{E}$ )<sup>[27]</sup>,属于典型的温带荒漠气候,夏季炎热干燥,冬季寒冷<sup>[28]</sup>,年平均气温为 $6.9^{\circ}\text{C}$ ,年平均降雨量小于 $200\text{ mm}$ <sup>[29]</sup>,年参考蒸发量达到 $1\,260\text{ mm}$ <sup>[30]</sup>。依托中国科学院新疆生态与地理研究所干旱区荒漠生态系统遥感综合试验场,在研究区内设有 $1\text{ km}\times 1\text{ km}$ 的样地。地表植被以梭梭(*Haloxyylon persicum*)为主,有少量柽柳(*Tamarix chinensis*),生长季初期有大量短命植物。

### 2.2 观测方法

碳通量的观测方法已比较成熟,目前应用较为广泛的有涡度相关技术、大孔径闪烁仪<sup>[31]</sup>以及静态箱-气相色谱法<sup>[32]</sup>等。本研究应用的通量观测方法为涡度相关法,在样地东南侧建立通量观测塔(高度 $11\text{ m}$ ),塔顶安装开路涡度相关系统,该系统主要包括测定三维风速和空气温度脉动的三维超声风速仪(Campbell, CSAT3, 美国)及一个测量 $\text{CO}_2$ 及 $\text{H}_2\text{O}$ 浓度变化的红外气体分析仪(IRGA, LI-7500, 美国),以及相匹配的数据采集系统(CR1000)。数据原始采样频率为 $10\text{ Hz}$ 。从2011年5月植被生长季开始观测,一直持续到10月底生长季结束,共获得6个月的通量观测数据。数据处理采用了与Mauder<sup>[33]</sup>等类似的方法,分别进行了野点去除、坐标旋转(采用平面拟合法)、超声虚温的湿度订正以及WPL校正等过程,并通过严格的质量控制,最终计算出每 $30\text{ min}$ 的通量值。

### 2.3 Footprint概念及FSAM模型

在涡度相关法中,测量通量的传感器一般都安

装在观测塔上,高出观测表面一定高度 $Z_m$ (较高植被时 $Z_m=Z-d$ ,  $Z$ 为观测高度,  $d$ 为零平面位移),传感器所测的通量值是指迎风方向上某一特定下垫面区域源或汇的强度<sup>[17]</sup>,该下垫面区域被称为通量贡献区或通量源区(Source Area),在此区域内不同位置的表面对通量观测值的贡献是不同的。通量贡献函数又称源权重函数(Source Weight Function),是描述下垫面区域表面源(汇)的空间分布与仪器通量观测值之间关系的函数,它的值可以理解下垫面某一点源对通量观测值贡献程度(称为 $P$ 水平)的大小,不同贡献率等值线所包围的面积称为 $P$ 水平源区<sup>[7]</sup>。

Schmid<sup>[8,17]</sup>通过用通量连续点源的浓度分布来近似求得 $z$ 高度传感器的通量贡献函数,关于该模型的公式,详见文献<sup>[17]</sup>。向FSAM输入3个复合参数,就能得到不同 $P$ 水平的输出值,进而绘出不同 $P$ 水平的二维通量源区。该模型应用简单,目前已经广泛地应用于森林、农田、湿地等生态系统通量贡献区的分析中<sup>[34]</sup>。

### 2.4 模型输入和输出参数

根据该荒漠植被生长情况,将整个生长季(5—10月)分为3个生长时期:生长初期(5、6月)、生长中期(7、8月)和生长末期(9、10月)。整个生长季下垫面植被均为生长缓慢的低矮植物,因此在计算零平面位移 $d$ 和空气动力学粗糙度 $Z_0$ 时,各生长期均采用同一个值。其中空气动力学粗糙度 $Z_0$ 根据Campbell<sup>[35]</sup>提出的经验公式 $Z_0=0.13h$ ( $h$ 为冠层平均高度,本样地植被调查结果 $h$ 取为 $2\text{ m}$ )进行计算,零平面位移 $d$ 由经验值 $d=0.67h$ <sup>[36]</sup>得出。Obukhov长度 $L$ 采用赵晓松等<sup>[7]</sup>文中模型输入参数的公式进行计算,横向风速和摩擦风速 $u^*$ 可由开路涡度相关系统测出,通过计算各风向不同生长时期横向风速脉动的标准差 $\sigma_v$ 和摩擦风速 $u^*$ 的平均值,进而求得比值得到不同条件下的输入值 $\sigma_v/u^*$ (表1)。

该模型只适用于一定的观测高度和大气稳定度范围<sup>[17]</sup>,对模型的输入参数有如下限制:

在大气稳定条件下(即 $Z_m/L>0$ )时, $2.0\times 10^{-4}\leq Z_m/Z_0\leq 5.0\times 10^2$ ,  $2.0\times 10^{-4}\leq Z_m/L\leq 1.0\times 10^{-1}$ ,  $1.0\leq \sigma_v/u^*\leq 6.0$ ;在大气不稳定条件下(即 $Z_m/L<0$ )时, $4.0\times 10^{-4}\leq Z_m/Z_0\leq 1.0\times 10^3$ ,  $4.0\times 10^{-4}\leq -Z_m/L\leq 1.0$ ,  $1.0\leq \sigma_v/u^*\leq 6.0$ 。

由于模型对输入参数的上述限制,在 $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 风

表 1 FSAM 输入和输出参数  
Table 1 Input and output parameters of FSAM

| 参数   | 变量             | 变量代表意义                                          |
|------|----------------|-------------------------------------------------|
| 输入参数 | $Z_m/Z_0$      | $Z_m$ 为观测高度与零平面位移之差, $Z_0$ 为空气动力学粗糙度            |
|      | $Z_m/L$        | 稳定度参数(其中 $L$ 为 Obukhov 长度)                      |
|      | $\sigma_v/u^*$ | 横向脉动强度(其中 $\sigma_v$ 为横向脉动标准差, $u^*$ 为摩擦风速)输出参数 |
| 输出参数 | $a/Z_0$        | $a$ 为通量贡献函数等值线上最近点到观测点的距离                       |
|      | $d/Z_0$        | $d$ 为通量贡献函数等值线上横向宽度最大的一半                        |
|      | $e/Z_0$        | $e$ 为通量贡献函数等值线上最远点到观测点的距离                       |
|      | $X_{\max}/Z_0$ | $X_{\max}$ 为通量贡献函数取得最大值的位置, 与 $P$ 水平无关          |
|      | $X_d/Z_0$      | $X_d$ 为通量贡献函数等值线上最大宽度对应的横坐标值                    |

向大气稳定条件下, 输入参数  $Z_m/L$  超出了模型运行范围, 取该方向上未超出模型运行范围的输入参数值(所占比例为 23.08%)进行平均, 得到该方向上大气稳定条件的输入参数值, 对于该风向大气稳定条件不同生长时期, 超出模型运行范围要求的输入参数值也采用了该方法, 其他各风向不同大气条件及不同生长期的输入参数值均满足模型运行要求。驱动模型即可得到  $P$  水平为 10%~90% 下的输出参数, 本研究讨论该样地在  $P$  水平为 90% 不同

大气条件及不同生长时期各风向通量源区的变化特征。

### 3 结果与分析

#### 3.1 风向风速分布特征

2011 年 5—10 月不同大气条件下的风向分布和风速分布特征如图 1 和表 2, 当大气处于稳定和不稳定条件时, 风频数均在  $270^\circ \sim 360^\circ$  风向所占

表 2 不同大气条件下风速分布表

Table 2 Speed distribution under different atmospheric conditions from May to October of 2011 in the studied site

| 大气层结        | 风向/ $^\circ$ | 最大风速/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ | 最小风速/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ | 平均风速/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ | 风向频数/% |
|-------------|--------------|----------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|--------|
| $Z_m/L > 0$ | 0~90         | 5.54                                   | 0.05                                   | 1.84                                   | 18.69  |
|             | 90~180       | 8.86                                   | 0.07                                   | 2.77                                   | 26.97  |
|             | 180~270      | 10.72                                  | 0.11                                   | 2.78                                   | 21.77  |
|             | 270~360      | 6.06                                   | 0.19                                   | 2.18                                   | 32.57  |
| $Z_m/L < 0$ | 0~90         | 7.84                                   | 0.24                                   | 2.63                                   | 6.38   |
|             | 90~180       | 9.22                                   | 0.50                                   | 3.46                                   | 21.30  |
|             | 180~270      | 11.87                                  | 0.27                                   | 3.81                                   | 16.94  |
|             | 270~360      | 7.83                                   | 0.25                                   | 2.94                                   | 55.38  |

注:  $0^\circ$  方向为正北; “ $Z_m/L > 0$ ” 为大气稳定条件, “ $L < 0$ ” 为大气不稳定条件。

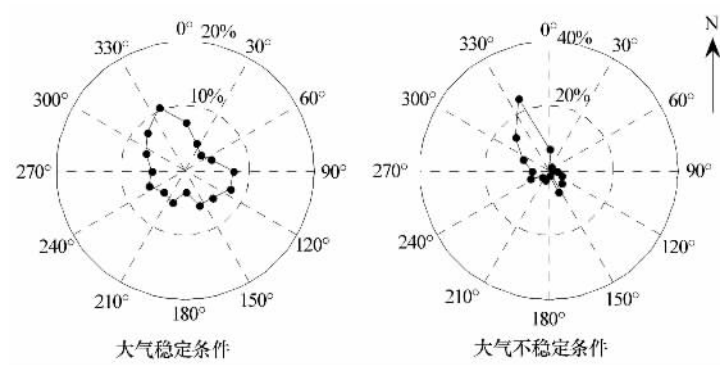


图 1 不同大气条件下风向分布图

Fig. 1 The distribution of wind direction frequency under different atmospheric conditions

比例最多,风速均在  $180^{\circ}\sim 270^{\circ}$  风向上最大。

不同大气条件不同生长时期的风向分布和风速分布特征见图 2 和表 3,在大气稳定时生长初、中、末期的风频数分别在  $180^{\circ}\sim 270^{\circ}$ 、 $90^{\circ}\sim 180^{\circ}$ 、 $270^{\circ}\sim 360^{\circ}$  风向所占比例最大;生长初期平均风速在  $180^{\circ}\sim 270^{\circ}$  风向上最大,生长中期和末期平均风速均在  $90^{\circ}\sim 180^{\circ}$  风向上最大。在大气不稳定时生长初期和末期风频数在  $270^{\circ}\sim 360^{\circ}$  风向上所占比例最大,生长中期在  $90^{\circ}\sim 180^{\circ}$  风向上所占比例最大,平均风速生长初期和中期在  $180^{\circ}\sim 270^{\circ}$  风向上最大,生长

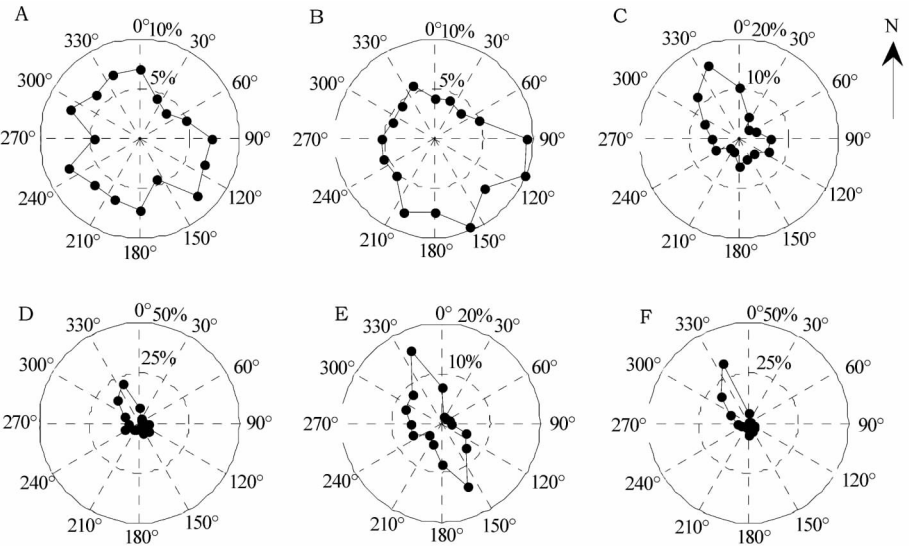


图 2 大气稳定条件下生长初期(A)、生长中期(B)、生长末期(C)的风向分布图及大气不稳定条件下生长初期(D)、生长中期(E)、生长末期(F)的风向分布

Fig. 2 The distribution of wind direction frequency under different atmospheric conditions

表 3 不同大气条件不同生长时期风速分布表

Table 3 Speed distribution of different vegetation growing periods under different atmospheric conditions

| 大气<br>层结  | 风向<br>/ $(^{\circ})$ | 最大风速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ |       |      | 最小风速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ |      |      | 平均风速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ |      |      | 风向频数/ $\%$ |      |       |
|-----------|----------------------|--------------------------------------|-------|------|--------------------------------------|------|------|--------------------------------------|------|------|------------|------|-------|
|           |                      | 初期                                   | 中期    | 末期   | 初期                                   | 中期   | 末期   | 初期                                   | 中期   | 末期   | 初期         | 中期   | 末期    |
| $Z_m/L>0$ | $0\sim 90$           | 5.29                                 | 4.32  | 5.54 | 0.05                                 | 0.11 | 0.20 | 1.89                                 | 1.81 | 1.83 | 2.92       | 2.62 | 4.79  |
|           | $90\sim 180$         | 7.91                                 | 8.86  | 8.27 | 0.22                                 | 0.07 | 0.14 | 2.89                                 | 2.86 | 2.39 | 3.30       | 4.71 | 4.78  |
|           | $180\sim 270$        | 10.22                                | 10.72 | 9.82 | 0.30                                 | 0.26 | 0.11 | 3.14                                 | 2.77 | 2.56 | 3.68       | 2.08 | 3.71  |
|           | $270\sim 360$        | 5.26                                 | 5.88  | 6.06 | 0.35                                 | 0.19 | 0.27 | 1.99                                 | 2.10 | 2.29 | 3.32       | 1.68 | 7.87  |
| $Z_m/L<0$ | $0\sim 90$           | 4.53                                 | 5.56  | 7.84 | 0.81                                 | 0.24 | 1.25 | 2.68                                 | 2.16 | 3.48 | 3.24       | 2.27 | 1.04  |
|           | $90\sim 180$         | 5.23                                 | 8.73  | 9.22 | 0.89                                 | 0.68 | 0.50 | 3.04                                 | 3.78 | 3.36 | 3.30       | 5.16 | 3.13  |
|           | $180\sim 270$        | 10.75                                | 11.87 | 7.47 | 0.30                                 | 1.02 | 0.27 | 4.00                                 | 4.12 | 3.20 | 4.98       | 4.35 | 3.63  |
|           | $270\sim 360$        | 6.76                                 | 7.02  | 7.83 | 0.44                                 | 0.26 | 0.25 | 3.05                                 | 2.80 | 2.93 | 7.44       | 4.76 | 11.24 |

注: $0^{\circ}$ 方向为正北;“ $Z_m/L>0$ ”为大气稳定条件,“ $Z_m/L<0$ ”为大气不稳定条件。

末期在  $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$  风向上最大。

3.2 模型输入参数的确定

根据大气稳定度参数  $Z_m/L$ ,划分为大气稳定 ( $Z_m/L>0$ )和大气不稳定 ( $Z_m/L<0$ )。FSAM 模型不同大气条件各风向的输入参数见表 4,大气不稳定时各风向的  $\sigma_v/u^*$  均大于大气稳定时的值;对于  $180^{\circ}\sim 270^{\circ}$  风向,大气不稳定时  $Z_m/L$  绝对值小于大

气稳定下  $Z_m/L$ ,其余各风向均相反。

不同大气条件不同生长时期各风向的输入参数如表 5,仅有生长末期  $90^{\circ}\sim 180^{\circ}$  风向上大气不稳定的  $Z_m/L$  绝对值小于大气稳定的  $Z_m/L$  值,其它各生长时期各风向均不小于;生长末期  $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$  和生长初期  $270^{\circ}\sim 360^{\circ}$  风向上大气不稳定的  $\sigma_v/u^*$  值均小于大气稳定的值,其它各生长时期各风向则都不小于。

表 4 各风向在不同大气条件下 FSAM 模型的输入参数

Table 4 Input parameters of FSAM in each direction under different atmospheric conditions

| 风向/(°)  | 大气层结      | $Z_m/Z_0$ | $Z_m/L$ | $\sigma_v/u^*$ |
|---------|-----------|-----------|---------|----------------|
| 0~90    | $Z_m/L>0$ | 37.15     | 0.05    | 3.63           |
|         | $Z_m/L<0$ |           | -0.11   | 4.02           |
| 90~180  | $Z_m/L>0$ | 37.15     | 0.04    | 3.19           |
|         | $Z_m/L<0$ |           | -0.06   | 3.94           |
| 180~270 | $Z_m/L>0$ | 37.15     | 0.04    | 3.72           |
|         | $Z_m/L<0$ |           | -0.03   | 4.18           |
| 270~360 | $Z_m/L>0$ | 37.15     | 0.05    | 2.48           |
|         | $Z_m/L<0$ |           | -0.10   | 2.81           |

注:0°方向为正北;“ $Z_m/L>0$ ”为大气稳定条件,“ $Z_m/L<0$ ”为大气不稳定条件。

表 5 各风向在不同大气条件下各生长时期 FSAM 模型的输入参数

Table 5 Input parameters for FSAM in every direction under different atmospheric conditions and different vegetation periods

| 风向<br>/(°) | 大气<br>层结  | 生长季初期     |         |                | 生长季中期     |         |                | 生长季末期     |         |                |
|------------|-----------|-----------|---------|----------------|-----------|---------|----------------|-----------|---------|----------------|
|            |           | $Z_m/Z_0$ | $Z_m/L$ | $\sigma_v/u^*$ | $Z_m/Z_0$ | $Z_m/L$ | $\sigma_v/u^*$ | $Z_m/Z_0$ | $Z_m/L$ | $\sigma_v/u^*$ |
| 0~90       | $Z_m/L>0$ | 37.15     | 0.05    | 2.84           | 37.15     | 0.05    | 4.15           | 37.15     | 0.07    | 5.64           |
|            | $Z_m/L<0$ |           | -0.07   | 3.84           |           | -0.25   | 4.27           |           | -0.56   | 4.13           |
| 90~180     | $Z_m/L>0$ |           | 0.04    | 3.11           |           | 0.02    | 3.33           |           | 0.07    | 3.10           |
|            | $Z_m/L<0$ |           | -0.06   | 4.25           |           | -0.07   | 3.86           |           | -0.05   | 3.78           |
| 180~270    | $Z_m/L>0$ |           | 0.03    | 4.00           |           | 0.02    | 3.49           |           | 0.11    | 3.55           |
|            | $Z_m/L<0$ |           | -0.03   | 4.26           |           | -0.02   | 4.11           |           | -0.16   | 4.16           |
| 270~360    | $Z_m/L>0$ |           | 0.03    | 2.95           |           | 0.05    | 2.59           |           | 0.07    | 2.32           |
|            | $Z_m/L<0$ |           | -0.09   | 2.91           |           | -0.16   | 3.06           |           | -0.09   | 2.64           |

注:0°方向为正北;“ $Z_m/L>0$ ”为大气稳定条件,“ $Z_m/L<0$ ”为大气不稳定条件。

表 6 各风向在不同大气条件下 FSAM 模型的输出参数

Table 6 Output parameters of FSAM in each direction under different atmospheric conditions

| 大气层结      | 风向/(°)  | $a/m$ | $e/m$  | $d/m$  | $X_{\max}/m$ |
|-----------|---------|-------|--------|--------|--------------|
| $Z_m/L>0$ | 0~90    | 67.08 | 686.40 | 223.86 | 162.50       |
|           | 90~180  | 64.22 | 639.60 | 188.50 | 153.92       |
|           | 180~270 | 63.44 | 626.60 | 217.62 | 151.58       |
|           | 270~360 | 66.30 | 670.80 | 151.06 | 159.64       |
| $Z_m/L<0$ | 0~90    | 34.84 | 280.80 | 129.48 | 76.96        |
|           | 90~180  | 36.40 | 293.80 | 94.38  | 80.60        |
|           | 180~270 | 48.88 | 423.80 | 184.34 | 110.50       |
|           | 270~360 | 41.6  | 353.6  | 153.14 | 93.86        |

注:0°方向为正北;“ $Z_m/L>0$ ”为大气稳定条件,“ $Z_m/L<0$ ”为大气不稳定条件。

188.76~368.68 m,且各风向源区范围差异较大。

对同一风向来说,大气稳定时迎风方向上  $a$ 、 $e$ 、

### 3.3 各风向在不同大气条件下的通量贡献区

按不同大气条件输入各风向参数(表 4),运行 FSAM 得到不同  $P$  水平的输出参数(表 6),绘制  $P$  为 90% 时不同大气条件各风向的源区分布图(图 3)。由图可知,大气稳定( $Z_m/L>0$ )时, $a$ 、 $e$ 、 $d$ 、 $X_{\max}$  均在 0°~90°风向达到最大,与其他风向相比各项输出值差别不明显。各风向源区的水平范围为 63.44~686.40 m,横向范围 302.12~447.72 m,且各风向源区范围差异不大。

在大气不稳定( $Z_m/L<0$ )时, $a$ 、 $e$ 、 $d$ 、 $X_{\max}$  均在 180°~270°风向达到最大值,与其余风向相比源区范围差异较大,90°~180°风向源区范围最小。各风向源区的水平范围为 34.84~423.80 m,横向范围

$d$ 、 $X_{\max}$  比大气不稳定时都要大,通量源区范围在迎风方向和垂直于迎风方向比大气不稳定时都大,尤其是迎风方向通量贡献区的拉长式增大非常明显,通量贡献函数最大点位置距离观测点也是在大气稳定时较远。

### 3.4 不同生长时期在不同大气条件下的源区分析

将不同大气条件不同生长时期各风向的输入参数值(表 5)输入 FSAM,驱动模型得到不同  $P$  水平的输出参数(表 7)同时绘出  $P$  为 90% 水平大气稳定和不安定时通量信息源区(图 4)。

当大气稳定时,各风向的通量贡献区均在生长末期达到最大,但 180°~270°风向  $e$  明显大于其它风向,0°~90°风向  $d$  相对较大;生长初期和生长中期各风向的源区差异不明显但不同时期源区变化与风向有关:0°~90°和 270°~360°风向,从生长初期到

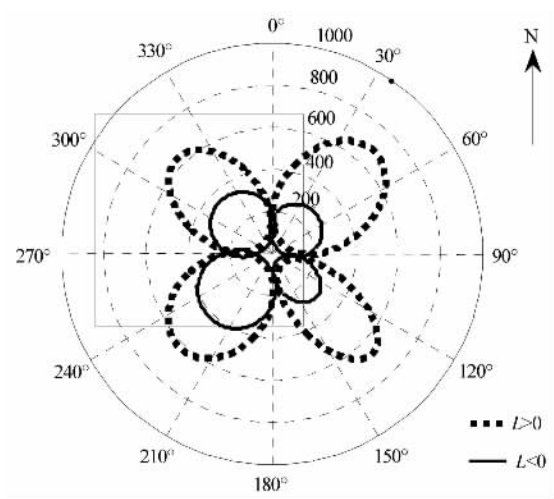


图 3 各风向在不同大气条件下的通量源区分布图  
(图中方框为 1 km×1 km 的样地,“ $L>0$ ”为大气稳定条件下,  
“ $L<0$ ”为大气不稳定条件下)

Fig. 3 The footprint source area distribution in every direction under different atmospheric conditions (the square represents the 1 km×1 km plot, “ $L>0$ ”is under stable atmospheric conditions, “ $L<0$ ”is under unstable atmospheric conditions)

到生长末期通量源区逐渐增大;但  $90^{\circ}\sim 180^{\circ}$  和  $180^{\circ}\sim 270^{\circ}$  风向,均为生长中期通量源区范围最小,生长初期次之,生长末期最大。

当大气不稳定时,各生长时期在  $180^{\circ}\sim 270^{\circ}$  和  $270^{\circ}\sim 360^{\circ}$  风向通量源区较大,不同生长时期各风向通量贡献区没有固定变化规律; $180^{\circ}\sim 270^{\circ}$  风向,通量贡献区在生长中期最大,生长初期次之,生长末期最小;在其他 3 个风向,通量贡献源区生长初期和生长末期基本重合,生长中期在  $90^{\circ}\sim 180^{\circ}$  和  $270^{\circ}\sim 360^{\circ}$  较小,在  $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$  最大。

3.5 Footprint 的源区时间分布

结合各风向风频数所占比例(表 2 和图 5),通过计算各风向不同大气条件在时间尺度上所占比例得知,各风向在大气稳定和不稳定时通量贡献区分别占 10.37% 和 6.54%, 12.79% 和 11.59%, 9.43% 和 12.97%, 12.87% 和 23.44%。其中  $270^{\circ}\sim 360^{\circ}$  风向风频数所占比例最大,对通量观测值贡献最多。综合分析表明,大约有 58.71% 的通量信息来自于观测塔西南至西北方。各生长时期(依次

表 7 各风向在不同大气条件下各生长时期 FSAM 模型的输出参数

Table 7 Output parameters for FSAM in every direction under different atmospheric conditions and different vegetation periods

| 大气<br>层结  | 风向<br>/( $^{\circ}$ ) | $a/m$ |      |      | $e/m$ |       |        | $d/m$ |       |       | $X_{max}/m$ |       |       |
|-----------|-----------------------|-------|------|------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------------|-------|-------|
|           |                       | 初期    | 中期   | 末期   | 初期    | 中期    | 末期     | 初期    | 中期    | 末期    | 初期          | 中期    | 末期    |
| $Z_m/L>0$ | $0\sim 90$            | 62.6  | 59.5 | 87.6 | 613.6 | 561.6 | 1008.8 | 230.6 | 190.6 | 275.6 | 149.0       | 139.6 | 224.1 |
|           | $90\sim 180$          | 61.6  | 66.3 | 71.5 | 595.4 | 673.4 | 761.8  | 166.9 | 158.1 | 152.1 | 145.9       | 159.9 | 175.8 |
|           | $180\sim 270$         | 67.1  | 67.1 | 72.5 | 686.4 | 686.4 | 777.4  | 175.2 | 256.1 | 374.4 | 162.5       | 162.5 | 178.9 |
|           | $270\sim 360$         | 65.8  | 61.1 | 73.1 | 663   | 587.6 | 785.2  | 219.9 | 187.2 | 207.2 | 158.1       | 143.0 | 180.4 |
|           |                       |       |      |      |       |       |        |       |       |       |             |       |       |
| $Z_m/L<0$ | $0\sim 90$            | 13.5  | 24.3 | 15.2 | 99.8  | 187.5 | 113.6  | 55.6  | 100.1 | 113.6 | 24.8        | 42.9  | 27.3  |
|           | $90\sim 180$          | 37.7  | 29.6 | 37.4 | 306.8 | 234.5 | 306.8  | 100.9 | 85.3  | 91.3  | 83.7        | 62.4  | 83.2  |
|           | $180\sim 270$         | 48.6  | 52   | 29.9 | 418.6 | 462.8 | 235.8  | 187.5 | 191.1 | 166.7 | 109.7       | 118.0 | 62.9  |
|           | $270\sim 360$         | 42.1  | 40.0 | 43.9 | 356.2 | 330.2 | 374.4  | 166.4 | 142.0 | 154.2 | 94.6        | 89.2  | 98.8  |
|           |                       |       |      |      |       |       |        |       |       |       |             |       |       |

注:“ $Z_m/L>0$ ”为大气稳定条件下,“ $Z_m/L<0$ ”为大气不稳定条件下。

为生长初期、生长中期、生长末期)的通量贡献在大气稳定和不稳定条件下分别占 32.18%、27.66%、40.16%。可见在整个生长季中,生长末期的通量贡献最多。

4 讨论

应用 FSAM 分析通量观测的空间代表性,已广泛地应用于森林、农田、湿地等生态系统,但对荒漠生态系统通量贡献分析则相对较少。荒漠生态系统作为最脆弱的生态系统之一,其抵御外界环境干扰的功能要弱于其他生态系统<sup>[37]</sup>。本研究通过处理位于古尔班通古特沙漠样地 2011 年生长季的通量观

测数据,对通量贡献区进行初步分析,旨在为荒漠生态系统通量观测数据分析提供了一定的理论依据。

4.1 不同生态系统应用 FSAM 分析通量贡献区的比较

通量贡献区范围主要受到仪器的观测高度、空气动力学粗糙度(与地形、植被覆盖和风速有关)以及大气稳定度等特征参数的影响<sup>[36,38]</sup>。通量贡献区范围随观测高度的增加而变大,随空气动力学粗糙度的增加而减小。荒漠生态系统与观测高度相近且  $P$  水平相同时的农田生态系统<sup>[22]</sup>相比,荒漠生态系统的通量贡献区范围偏小,而与观测高度稍大且

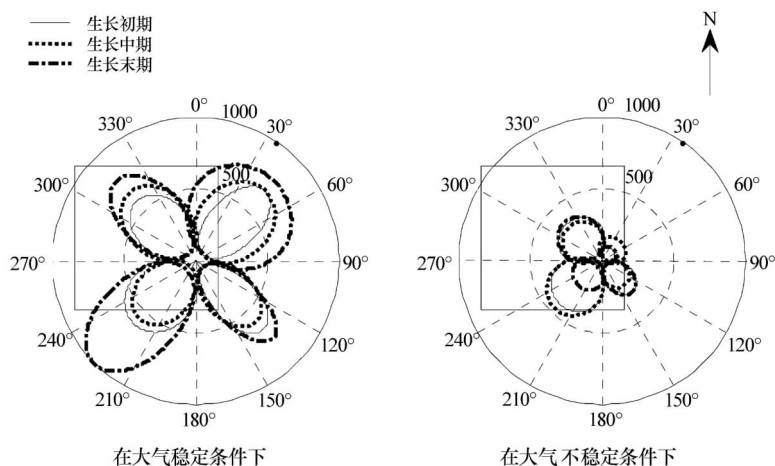


图 4 在不同大气条件下生长季不同生长时期的源区分布图(图中方框为  $1\text{ km} \times 1\text{ km}$  的样地)

Fig. 4 The footprint source area distribution with different vegetation period under different atmospheric conditions(the square represents the  $1\text{ km} \times 1\text{ km}$  plot)

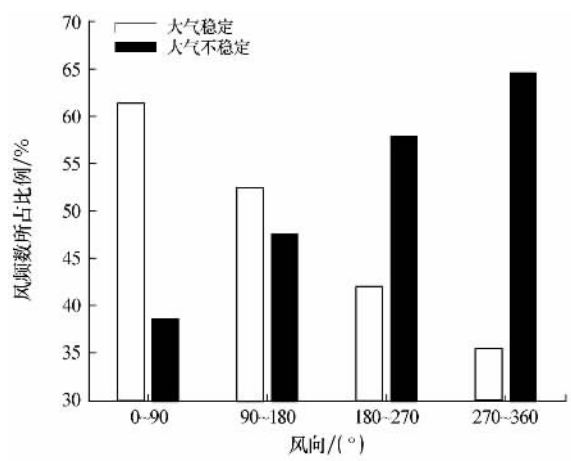


图 5 各风向不同大气稳定度分布

Fig. 5 Distribution of different atmospheric conditions with different direction

$P$  水平为 50% 的农田生态系统<sup>[39]</sup>相比, 通量贡献区的范围则偏大; 与  $P$  水平相近或相同的森林生态系统<sup>[23,40]</sup>相比, 荒漠生态系统的观测高度较低, 通量贡献区偏小; 与  $P$  水平相同的湿地生态系统<sup>[34]</sup>相比, 荒漠生态系统观测高度稍高, 通量贡献区偏大。

该荒漠区在大气稳定条件下 ( $P$  水平为 90%) 的通量贡献区最远可以达到 686.40 m, 通量贡献函数最大点位置在 162.50 m, 同经典风浪区 (fetch) 长度和测量高度 100 : 1 的经验性法则所估算的通量贡献区结果 (966 m) 相比, 由 FSAM 模型计算出的通量贡献区小于经典法则所推算出的结果, 但此观测点的风浪区可以满足通量贡献区的要求, 即可以认为我们的结果可以较准确地反映荒漠生态系统的通量信息。

表 8 不同生态系统在大气稳定条件下的通量源区大小

Table 8 The source area under stable atmospheric condition for different ecosystems

| 生态系统   | 下垫面代表植被  | 观测高度/m | $P$ 水平 | 通量贡献区范围      |                     | 参考文献 |
|--------|----------|--------|--------|--------------|---------------------|------|
|        |          |        |        | $e/\text{m}$ | $X_{\max}/\text{m}$ |      |
| 农田生态系统 | 小麦       | 20.00  | 50%    | 283.00       | 135.00              | [39] |
| 农田生态系统 | 冬小麦      | 12.17  | 90%    | 1 555.20     | 425.30              | [22] |
| 森林生态系统 | 少量草本植物   | 25.00  | 90%    | 3613.40      | 316.68              | [40] |
| 森林生态系统 | 橡胶林地     | 25.00  | 80%    | 1 858.00     | 413.00              | [23] |
| 湿地生态系统 | 芦苇、互花米草等 | 4.80   | 90%    | 380.20       | 62.40               | [34] |
| 荒漠生态系统 | 梭梭       | 11.00  | 90%    | 670.80       | 151.06              | 本研究  |

#### 4.2 不同大气条件不同生长时期各风向源区的比较

与大气不稳定条件相比, 荒漠生态系统在大气

稳定时迎风方向的通量贡献区和通量贡献区最大点位置都远离观测点, 并且通量贡献区有拉长的趋势, 覆盖区域也在变大, 这与其他生态系统<sup>[7,22,34]</sup>通量贡献区不同大气条件的比较结果一致 (表 8)。

在大气稳定时各风向通量贡献区范围均在生长末期达到最大,由表3可知这一结果主要是由于大气稳定时各风向均在生长末期的风频数所占比例最大。在 $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 和 $270^{\circ}\sim 360^{\circ}$ 风向,从生长初期到生长中期通量源区范围逐渐增大,且这两个风向在生长初期和生长中期风频数所占比例分别为2.92%和2.62%,3.32%和1.68%,平均风速分别为 $1.89\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $1.81\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , $1.99\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $2.10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。其中 $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 风向生长初期风频数所占比例、风速与生长中期相比都较大, $270^{\circ}\sim 360^{\circ}$ 风向生长初期的风频数所占比例相比生长中期较大,但平均风速略小。因此这两个风向生长初期比生长中期源区范围小,这一结果可能主要与不同生长时期下垫面植被类型有关,在生长初期梭梭和低矮植被生长良好且存在低矮短命植物,在生长中期这些低矮植物基本消失。在 $90^{\circ}\sim 180^{\circ}$ 和 $180^{\circ}\sim 270^{\circ}$ 方向,均为生长初期的通量源区范围比生长中期大,在这两个风向上生长初期和生长中期风频数所占比例分别为3.30%和4.71%,3.68%和2.08%,平均风速分别为 $2.89\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $2.86\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , $3.14\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $2.77\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。可知在 $90^{\circ}\sim 180^{\circ}$ 风向生长初期相比生长中期,风频数所占比例较小,平均风速略大,因此该风向生长初期源区范围大于生长中期可能主要是由于该风向的风速。在 $180^{\circ}\sim 270^{\circ}$ 风向上生长初期的风频数所占比例、平均风速、通量源区范围与生长中期相比较,三者变化一致,说明在该风向主要是受到风向风速的影响。对于各风向生长末期,在 $180^{\circ}\sim 270^{\circ}$ 风向上生长末期 $e$ 明显大于其它风向,这主要是受到该风向风速的影响,因为该风向在生长末期平均风速达到 $2.56\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,比其余3个风向平均风速都要大。在 $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 方向上 $d$ 明显大于其他风向,主要是由于该风向生长末期的输入参数 $\sigma_v/u^*$ 为5.64,明显要大于其它各风向,因为输出参数侧向最大距离 $d$ 要依赖于 $\sigma_v/u^*$ <sup>[36]</sup>。因此在大气稳定时各风向生长初期和中期的源区变化因受到各风向风速和植被下垫面的影响而有差异。

在大气不稳定时 $90^{\circ}\sim 180^{\circ}$ 和 $270^{\circ}\sim 360^{\circ}$ 风向,通量贡献源区在生长初期和生长末期相基本重合,在生长中期均最小,这一方面是受到风向风速的影响;另一方面是受到不同生长时期植被类型的影响,生长初期梭梭和低矮植被都长势良好,生长中期低矮植被死亡、只剩梭梭,生长末期梭梭也变枯黄。在

$180^{\circ}\sim 270^{\circ}$ 和 $270^{\circ}\sim 360^{\circ}$ 风向各生长时期的通量源区范围相比其它两个风向较大,这可能主要受到风的影响,由表2可知在 $270^{\circ}\sim 360^{\circ}$ 风向风频数所占比例最大,在 $180^{\circ}\sim 270^{\circ}$ 风向平均风速最大,而对于 $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 风向风频数所占比例最小、风速也最小。因此在大气不稳定时不同生长时期各风向的通量贡献区没有固定变化规律。

#### 4.3 输入参数值的确定对结果的影响

FSAM模型输入参数为3个复合无量纲参数,参数值取自经验值,这会对输出参数值有一定的影响,尤其是 $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 风向,该风向在大气稳定条件下输入值 $Z_m/L$ 超出模型运行范围,在研究中取该风向大气稳定条件符合模型运行条件的所有 $Z_m/L$ 值进行平均,且参与计算的风频数占该风向大气稳定条件总风频的23.08%。FSAM模型虽然只能用来模拟昼夜层结稳定、湍流不活跃时的通量贡献区<sup>[41]</sup>,对输入参数有一定的局限性,但是依然能够得到有价值的通量信息<sup>[33]</sup>,更为精确的研究,需要综合其他方法进行分析,以得到更为精确的通量源区分布特征。

## 5 结论

古尔班通古特荒漠区在大气稳定条件90%的通量贡献区最远可以达到686.40 m,通量贡献函数最大点的位置在162.50 m;大气稳定时各风向的通量贡献区范围在生长末期均达到最大,生长初期和中期的源区变化受到各风向风速和植被下垫面的影响而有差异;大气不稳定时不同生长时期各风向通量贡献区没有固定变化规律;通量源区大约有58.71%的信息来自于荒漠区通量观测塔西南至西北方,整个生长季生长末期通量贡献最多,所占比例为40.16%。由FSAM模型测得的通量贡献区范围可以较准确地反映荒漠生态系统下垫面的通量信息。

#### 参考文献:

- [1] Baldocchi D D, Valenitini V, Running, et al. Strategies for measuring and modeling carbon dioxide and water vapor fluxes over terrestrial ecosystems[J]. Global Change Biology, 1996(2):159-168.
- [2] 黄妙芬. 地表通量研究进展[J]. 干旱区地理, 2003, 26(2):159-165.

- [3] 耿少波,鲁绍伟,饶良懿,等. 基于涡度相关技术测算地表碳通量研究进展[J]. 世界林业研究, 2010, 23(3): 24—27.
- [4] Schmid H P. Experimental design for flux measurements—matching scales of observations and fluxes[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1997, 87(2/3): 179—200.
- [5] Chen B Z, Biack 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(2): 137—167.
- [6] Gockede 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.
- [7] 赵晓松,关德新,吴家兵,等. 长白山落叶红松林通量观测的 footprint 及源区分布[J]. 北京林业大学学报, 2007, 27(3): 17—23.
- [8] Schmid H P. Footprint modeling for vegetation atmosphere exchange studies: a review and perspective[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2001, 113: 159—283.
- [9] Kormann R, Meixner F X. An analytical footprint model for non-neutral stratification[J]. Boundary-layer Meteorology, 2001, 99: 207—224.
- [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] Schuepp P H, Leclerc M Y, Macpherson J I, et al. Footprint prediction of scalar fluxes from analytical solutions of the diffusion equation[J]. Boundary-layer Meteorology, 1990, 50: 353—373.
- [12] Horst T W, Weil J C. How far is far enough—the fetch requirements for micrometeorological measurement of surface fluxes[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1994, 11(4): 1018—1025.
- [13] 张慧. 中亚热带人工林碳水通量贡献区的评价研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2012.
- [14] Hsieh C I, Katul G, Chi T. An approximate analytical model for footprint estimation of scalar fluxes in thermally stratified atmospheric flows[J]. Advances in Water Resources, 2000, 23(7): 765—772.
- [15] Kljun N, Kastner K P, Fedorovich E, et al. Evaluation of Lagrangian footprint model using data from wind tunnel convective boundary layer[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2004(127): 189—201.
- [16] Vesala T, Kljun N, Rannik U, et al. Flux and concentration footprint modeling: state of the art[J]. Environmental Pollution, 2008, 152(3): 653—666.
- [17] Schmid H P. Source areas for scalars and scalar fluxes[J]. Boundary-layer Meteorology, 1994, 67: 293—318.
- [18] 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.
- [19] Aubinet M, Chermanne B, Vandenhaute M, et al. Long term carbon dioxide exchange above mixed forest in the Belgian Ardennes[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2001, 108(4): 293—315.
- [20] Soegaard H, Jensen N O, Boegh E, et al. Carbon dioxide exchange over agricultural landscape using eddy correlation and footprint modeling[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2003, 114(324): 153—173.
- [21] Rogiers N, Eugster W, Furger M, et al. Effect of land management on ecosystem carbon fluxes at a subalpine grassland site in the Swiss Alps[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2005, 80(2/4): 187—203.
- [22] 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.
- [23] 吴志祥, 陈帮乾, 杨川, 等. 海南岛橡胶林通量足迹与源区分布研究[J]. 热带生物学报, 2012, 3(1): 42—50.
- [24] Jasoni R L, Smith S D, Arnone J A. Net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange in Mojave Desert shrublands during the eighth year of exposure to elevated CO<sub>2</sub>[J]. Global Change Biology, 2005, 11: 749—756.
- [25] William H, Schlesinger J B, Giles M. On carbon sequestration in desert ecosystems[J]. Global Change Biology, 2009, 15: 488—1490.
- [26] Huxman T E, Snyder K A, Tissue D, et al. Precipitation pulses and carbon fluxes in semiarid and arid ecosystems[J]. Oecologia, 2004, 141: 254—268.
- [27] 刘会良, 宋明方, 段士民, 等. 古尔班通古特沙漠南缘 32 种藜科植物种子萌发策略初探[J]. 中国沙漠, 2012, 32(2): 413—420.
- [28] 刘冉, 李彦, 王勤学, 等. 盐生荒漠生态系统二氧化碳通量的年内、年际变异特征[J]. 中国沙漠, 2011, 31(1): 108—114.
- [29] 王雪芹, 蒋进, 张元明, 等. 古尔班通古特沙漠南部防护林体系建成 10 a 来的生境变化与植物自然定居[J]. 中国沙漠, 2012, 32(2): 372—379.
- [30] 刘冉, 王勤学, 唐立松, 等. 盐生荒漠地表水热与二氧化碳通量的季节变化及驱动因素[J]. 生态学报, 2009, 29(1): 67—75.
- [31] 双喜, 刘绍民, 徐自为, 等. 黑河流域观测通量的空间代表性研究[J]. 地球科学进展, 2009, 24(7): 724—732.
- [32] 顾帅, 周凌晞, 刘立新, 等. 静态箱-气相色谱法 CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 通量观测的质控方法研究[J]. 气象, 2010, 36(8): 87—91.
- [33] Mauder M, Foken T. Documentation and Instruction Manual of the Eddy Covariance Software Package TK2[Z]. Bayreuth Germany: Bayreuth University, 2004-12.
- [34] 顾永剑, 高宇, 郭海强, 等. 崇明东滩湿地生态系统碳通量贡献区分析[J]. 复旦学报(自然科学版), 2008, 47(3): 374—379.
- [35] Campbell G S. An Introduction to Environmental Biophysics

- [M]. New York, US: Springer, 1977: 155.
- [36] 金莹, 张志强, 方显瑞, 等. 杨树人工林生态系统通量贡献区分析[J]. 生态学报, 2012, 32(12): 3966—3974.
- [37] 任鸿昌, 孙景梅, 祝令辉, 等. 西部地区荒漠生态系统服务功能价值评估[J]. 林业资源管理, 2007, 6: 67—69.
- [38] 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.
- [39] 马迪, 吕世华, 陈世强, 等. 夏季金塔绿洲近地层通量足迹及源区分布特征分析[J]. 高原气象, 2009, 28(1): 28—35.
- [40] 魏远, 高升华, 张旭东, 等. 基于 FSAM 模型的岳阳地区美洲黑杨人工林通量观测源区分布[J]. 林业科学, 2012, 48(2): 16—21.
- [41] Foken T, Leclerc M Y. Methods and limitations in validation of footprint models[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2004, 127(3/4): 223—234.

## A Footprint Analysis on a Desert Ecosystem in West China

Zhou Qi<sup>1,2</sup>, Li Pingheng<sup>1,3</sup>, Wang Quan<sup>1,3</sup>, Zheng Chaolei<sup>3</sup>, Xu Lu<sup>1,2</sup>

(1. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumchi 830011, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Shizuoka University, Japan 422-8529)

**Abstract:** Footprint analysis is essential for eddy covariance tower site selection, quality-control and data-interpretation. But only a few of such studies are available in the western China arid region till now. This study aims to fill the empty up by utilizing the FSAM Model (Flux Source Area Model) to analyze the spatial representation of flux measurements in this region. Flux data in the Gurbantunggut Desert Remote Sensing Experimental Station was used in this study. Results revealed that under stable atmospheric conditions, the far end of the source area reached 680.40 m with the maximum contribution source located at 162.50 m (at a 0.9 significant level). Variations of source area in different phenological stages were preliminary due to different wind directions when under similar conditions of atmospheric stability from the beginning to the mid-term of season, even the largest source areas were all found at the end of season ignorant of wind directions. Furthermore, under different conditions of atmospheric stability the source area are inconsistent in different wind directions. About 58.71% of flux came from the southwest to northwest of the tower with a contribution estimated to be as high as 40.16% at the end of growth period under the stable and unstable conditions. Our study suggests that our carbon dioxide flux data adequately revealed the characteristics of surface flux with desert ecosystem.

**Key words:** eddy covariance; desert ecosystem; footprint; FSAM (Flux Source Area Model)