

珠海城郊草地通量源区分析*

周梅¹, 郑伟¹, 高全洲^{1,2}

- (1. 中山大学地理科学与规划学院//广东省城市化与地理环境空间模拟重点实验室, 广东 广州 510275;
2. 广东省地质过程与矿产资源探查重点实验室, 广东 广州 510275)

摘要: 运用 FSAM (Flux Source Area Model) 模型对中山大学珠海校区综合气象观测场内涡度观测塔不同稳定度、不同时间尺度的通量源区进行分析。结果表明: ① 研究区盛行东南风, 东南方向的通量数据占 48.36%。② 在 90% 贡献水平下, 不同大气稳定度的通量源区变化范围各不相同。大气处于稳定状态下的通量源区范围较不稳定状态下大, 其通量源区距观测塔最远距离可达 155 m。③ 不同季节通量源区的大小也存在明显变化。当大气稳定时通量源区的大小关系为: 冬 > 秋 > 春 > 夏; 而在大气不稳定的条件下, 春、秋季节通量源区大小没有明显区别。④ 白天通量源区范围较夜间小, 在 12:00 时观测塔所能观测到的最远距离最小, 为 31 m。此外, 不同下垫面、不同观测高度、不同通量贡献水平 (P) 等都会影响通量源区的大小。由 FSAM 模型基本可以较准确反映珠海城郊草地的通量源区大小。

关键词: 珠海; 涡度相关技术; FSAM 模型; 城郊草地; 湍流通量

中图分类号: P404 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2018) 03-0024-10

Flux footprint analysis of suburban lawn in Zhuhai City

ZHOU Mei¹, ZHENG Wei¹, GAO Quanzhou^{1,2}

- (1. Guangdong Provincial Key Laboratory for Urbanization and Geo-Simulation, School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;
2. Guangdong Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resource Exploration, Guangzhou 510275, China)

Abstract: By using the Flux Source Area Model (FSAM), the flux source area of suburban lawn in Zhuhai City was analyzed under different stability and different time scales. The results are shown as follows: ① The southeast wind is prevailing with a percentage of 48.36%. ② Under the 90% contribution level, the area of flux source varies with atmospheric stability, there are much larger areas of flux source, up to 155 m, in stable atmosphere. ③ The area of flux source obviously changes with the seasons. The area of flux source changes from large to small in the order of winter, autumn, spring and summer under the stable atmosphere, while it does not change in spring and autumn under the unstable atmosphere. ④ The area of flux source is smaller in day time than in the night. The minimum visual distance of 31m was obtained at 12:00. In addition, the area of flux source could be influenced by underlying surface, observation height and contribution level (P). Therefore, FSAM was considered as model that can reflect the

* 收稿日期: 2017-03-15

基金项目: 广东省自然科学基金重点项目 (2014A030311003); 国家自然科学基金 (41340019); 国家自然科学基金 (41071054)

作者简介: 周梅 (1992 年生), 女; 研究方向: 全球变化与碳循环研究; E-mail: meidaidai@126.com

通信作者: 高全洲 (1965 年生), 男; 研究方向: 全球变化与碳循环研究; E-mail: eesgqz@mail.sysu.edu.cn

flux source area of the suburban lawn in Zhuhai City.

Key words: Zhuhai; eddy covariance technique; FSAM; suburban lawn; turbulent flux

草地约占陆地总面积的 1/3，是陆地生态系统中分布最广的植被类型之一^[1]，也是最易受人类影响的区域之一，研究草地的水热、碳通量对区域气候变化响应、水文过程及生态平衡等具有重要意义。1951 年，Swinbank^[2]首次提出运用涡度相关技术测定草地的显热和潜热通量。涡度协方差技术是一种基于微气象学理论对大气边界层湍流通量进行直接、长期、连续和非破坏性的测定方法^[3-4]，近年来由于观测技术的发展，涡度相关技术已广泛应用于稀树大草原^[5]、北美大草原^[6]、欧亚大陆典型草原^[7]、青藏高原高寒草甸草原^[8]以及我国华南地区热带草地^[9]等草地生态系统的植被-大气间的研究。与此同时，中国陆地生态系统通量观测研究网络 (<http://www.chinaflux.org/>) 也建立了 15 个草地生态系统观测站，为不同草地生态系统通量的长期和连续观测做了充分准备，也为研究草地生态系统间的地气交换对气候变化的响应提供可能，但这些草地观测站点大多位于西北地区的天然草地，较少涉及华南城郊人工草地，同时也造成城郊人工草地研究的不充分。城郊人工草地改变了原有下垫面的性质，影响区域的地气交换特征，对缓解城市热岛效应、减少沙尘暴、防止水土流失意义重大，也对调节局域小气候、维系生态平衡起着重要作用^[10]。因此研究城郊草地地气交换是十分必要的。

涡度相关理论是基于地势平坦、植被分布均匀的假设^[11-12]，只有观测塔周边环境满足此条件，仪器观测的数据才可反映真实的地气交换状况。但在实际条件下，由于受到观测塔高度、大气稳定状况、风速风向、下垫面复杂程度等因素的影响^[13]，仪器只能观测到特定下垫面或某部分下垫面的物理过程^[14]，这个范围即是通量源区。通量源区的范围可以定量评估通量数据的空间代表性^[15]，其大小的确定关系到通量数据的可靠程度，准确计算通量源区的范围为后续数据的处理和地气交换综合分析提供参考^[16-17]。1994 年，Schmid^[18]提出的 FSAM 模型 (Flux Source Area Model) 由于其物理机制明确、数学模型简单、计算耗时少^[19]，是我国现在应用较为普遍的解析模型之一。

20 世纪 80 年代以来珠江三角洲地区经济迅速发展，城市化水平远高于全国平均水平，土地利用性质和区域气候受到严重影响。珠海位于广东省珠

江口的西南部，是珠江三角洲中心城市之一，属于典型的亚热带季风气候区，气候温暖湿润，雨热同期，雨季受台风灾害影响严重。由于珠海地域及气候的复杂性，本文运用 FSAM 模型，对珠海城郊人工草地不同稳定度、不同时间尺度下的通量源区进行分析，为通量观测站点的选择、通量数据的质量控制与评价、碳源/汇估算等提供数据支撑。

1 观测站点与方法

1.1 区域简介

珠海涡度观测塔于 2014 年 5 月建成并开始记录数据，观测塔位于中山大学珠海校区综合气象观测场内 (22.35°N, 113.57°E)，整个观测区域地势较平坦、植被分布较为均一，下垫面为长势茂盛的草地，研究区北面分布少量建筑用地以及道路，西南侧为森林边界，整个研究区内草地面积约有 1.3 hm²，观测塔总高度为 4.8 m，其中涡度观测系统安装在离地面 3 m 处，观测仪器是由 CSTA3A 三维超声风速仪和 EC150 红外气体分析仪及 EC150 外部温度探头组成的开路观测系统 (Open Eddy Covariance System, OPEC)，采样频率为 10 Hz，记录 30 min 平均值，数据记录以北京时间为准。本文选取了 2016 年 1 月 13 日至 2017 年 1 月 13 日通量观测数据进行通量源区分析。

1.2 FSAM 模型简介

在 FSAM 模型中，通量贡献函数 (Footprint 函数) 是下垫面源/汇空间分布与探头真实高度 z_m 的关系函数。假设观测塔的坐标为原点 (0,0,0)，则探头的坐标为 (0,0, z_m)，迎风方向为 x 轴负方向，通量观测站点的通量 η 可表示为：

$$\eta = \iint Q(x,y) \cdot f(x,y,z_m) dx dy \quad (1)$$

$Q(x,y)$ 为表面源强/汇分布函数； $f(x,y,z_m)$ 为下垫面某一点 (x,y) 对 $(0,0,z_m)$ 处通量观测值的贡献大小。一般情况下，Footprint 函数首先随着距观测塔的距离增大而增大，然后在某一点达到最大，这个点则为最大源强，最后随着距离增大而逐渐减小至 0。

根据 K 理论，垂直方向的通量 F 可表达为：

$$F(x,y,z) = -K_c(z) \cdot \frac{\partial C}{\partial z} = D_y(x,y) \overline{F^y(x,z)} \quad (2)$$

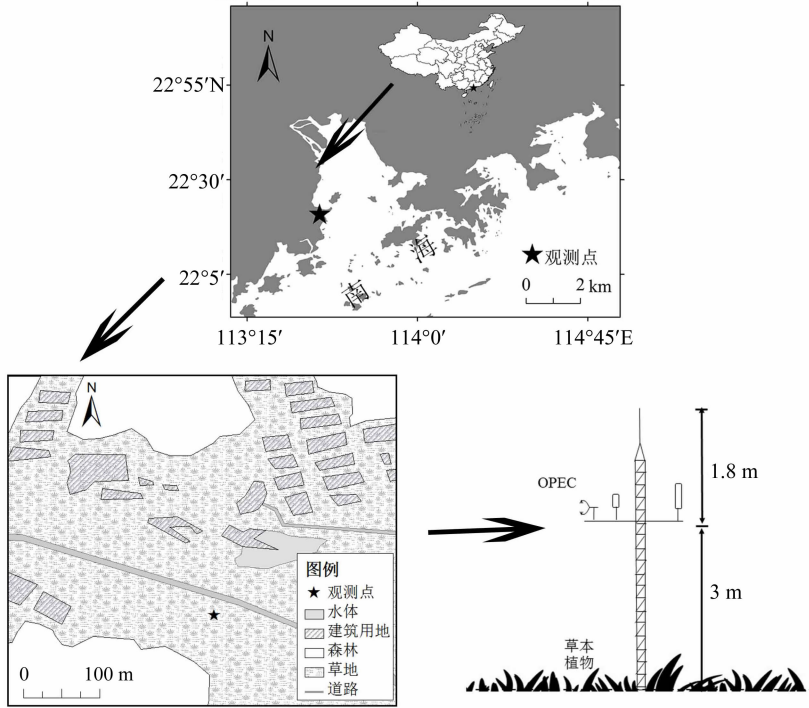


图 1 珠海城郊草地通量观测站点

Fig. 1 Suburban lawn flux observation site in Zhuhai City

$K_c(z)$ 为湍流扩散速率, C 为浓度分布函数, $\overline{F^y}$ 为 y 方向积分通量, $D_y(x, y)$ 为 y 方向浓度分布函数。利用二维平流扩散方程, 将 y 方向的积分通量 $\overline{F^y}$ 、 y 方向的积分浓度 $\overline{C^y}$ 和平均风速廓线 $\overline{u}(z)$ 联立, 得到如下方程:

$$\overline{u}(z) \cdot \frac{\partial \overline{C^y}}{\partial x} = - \frac{\partial \overline{F^y}}{\partial z} \quad (3)$$

把 (3) 式积分后, 粗糙度为 z_o , 观测高度为 z_m 的垂直通量可表达为:

$$\overline{F^y}(x, z_m) = \overline{F^y}(x, z_o) - \int_{z_o}^{z_m} \overline{u}(z) \frac{\partial \overline{C^y}(x, z)}{\partial x} dz \quad (4)$$

应用边界层条件, 当 $x > 0$ 时, Footprint 函数 $f(x, y, z_m - z_o)$ 为:

$$\overline{F^y}(x > 0, z_m) = - \int_{z_o}^{z_m} \overline{u}(z) \frac{\partial \overline{C^y}(x, z)}{\partial x} dz \quad (5)$$

联立 (1)、(2)、(4)、(5) 式可知:

$$f(x, y, z_m - z_o) = \frac{\overline{F^y}(x, y, z)}{F_u} = \frac{1}{F_u} [\overline{F^y}(x, z_o) + \overline{F^y}(x > 0, z_m)] D_y(x, y) \quad (6)$$

在上式中, F_u 为某一表面源/汇强度。

P 水平源区 (Ω_p) 指由 $f(x, y, z_m - z_o) = F_p$

的等值线所包含的区域, 表示能达到 P 水平最小区域的 Footprint 函数的积分。 P 表示通量贡献水平, 用于衡量某一区域对总体通量观测值的贡献强度, 可用 Ω_p 贡献源区的 Footprint 函数积分 φ_p 与所有 Footprint 函数积分 φ_{tot} 的比值来表示。

$$P = \frac{\varphi_p}{\varphi_{tot}} = \frac{\int_{\Omega_p} \int F(x, y, z) dx dy}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_0^{+\infty} F(x, y, z_m) dx dy} \quad (7)$$

因此, 将 (4)、(6) 代入 (7) 中可得:

$$P = \frac{1}{F_u} \int_{\Omega_p} \int \left[- \int_{z_o}^{z_m} \overline{u}(z) \cdot \frac{\partial \overline{C^y}(x, z)}{\partial x} dz \cdot D_y(x, y) \right] dx dy \quad (8)$$

利用 FSAM 模型可得出, 在不同稳定度、不同时间尺度 10% ~ 90% (间距为 10%) 的通量贡献水平下通量源区的大小。

1.3 关键参数的输入

FSAM 模型是关于 z_m/z_o 、 z_m/L 、 σ_v/u_* 这 3 个复合参数的函数, 其中 L 为 Monin-Obukhov 长度, σ_v 为横向风速脉动强度, u_* 为摩擦风速。

Schmid^[18] 认为模型的参数输入是有一定范围的 (表 1), 符合此范围得出的通量源区才具有可靠性。

表1 FSAM 模型输入参数的范围
Table 1 The range of input parameters in FSAM model

项目	z_m/z_o	z_m/L	σ_v/u_*
稳定条件 $z_m/L > 0$	$2.0 \times 10^{-2} \sim 5.0 \times 10^{-2}$	$2.0 \times 10^{-4} \sim 1.0 \times 10^{-1}$	1.0 ~ 6.0
不稳定条件 $z_m/L < 0$	$4.0 \times 10^{-2} \sim 1.0 \times 10^{-3}$	$-1.0 \sim -4.0 \times 10^{-4}$	1.0 ~ 6.0

1) z_m/z_o

$z_m = z - d$, z_m 为有效观测高度 (m), z 为探头的观测高度 (m), 本文为 3 m, d 为零平面位移 (m), 取经验值 $d = 2/3h$ [20], h 为灌丛平均高度 (m)。 z_o 为空气动力学粗糙度, 依据 Campell [21] 提出的经验公式:

$$z_o = 0.13h \quad (9)$$

2) z_m/L

$$\theta = T(P_0/P)^{0.286} \quad (10)$$

$$\theta_v = \theta(1 + 0.61r) \quad (11)$$

$$L = \frac{-\theta_v u_*^2}{kg(w'\theta'_v)} \quad (12)$$

在上式中, θ 为位温 (K), θ_v 为虚位温 (K), T 为大气温度 (K), P_0 为标准大气压 (100 kPa), P 为气压 (kPa), r 为未饱和和空气混合比 (kg/kg), u_* 为摩擦风速 (m/s), $w'\theta'_v$ 为垂直风速 w 与超声虚温 T_s 的协方差, 即垂直温度热通量 ((m · K)/s), k 为卡门常数 0.4, g 为重力加速度 9.8 (kg · m) / s², 将 (10)、(11) 式带入 (12) 式可得在 30 min 内的 L 值。依据不同方向、不同稳定性和不同时间尺度对 L 进行分类, 求得不同条件下的 L 的平均值, 即可求出 z_m/L 。

3) σ_v/u_*

σ_v/u_* 为水平风速脉动 v 的标准差 (m/s) 与摩擦风速 (m/s) 的比值 (σ_v 、 u_* 可由超声风速仪得出)。

1.4 模型参数的输出

FSAM 模型可输出 10% ~ 90% 通量贡献水平的源区范围, 其大小可用 a 、 e 、 d 、 X_d 、 X_m 等 5 个参数表示。 a 表示等值线上距离源区最近点的距离; e 表示等值线上距离源区最远点的距离; d 表示等值线上最大宽度的 1/2; X_d 表示等值线上横向宽度最大点的横坐标; X_m 表示 Footprint 函数取最大值的横坐标 (图 2)。

1.5 FSAM 模型适用性分析

在地理空间数据云网站 (<http://www.gscloud.cn/>) 下载 30 m 分辨率的数字高程数据, 计算以观测塔为中心两百米范围内的投影密度。当区域投影密度较高时则表示地面较平坦, 而

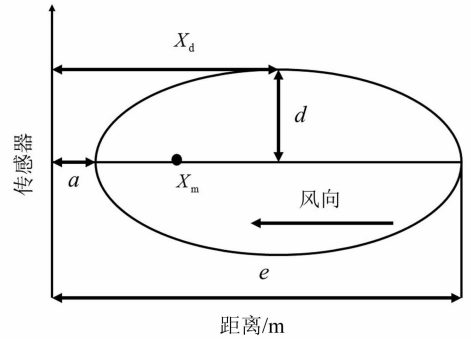


图2 通量源区输出参数示意图

Fig. 2 Schematic diagram of output parameters of flux source

投影密度较低时则反之。投影密度 (λ_f) 计算公式为 [22]

$$\lambda_f = A_{2d}/A_{3d} \quad (13)$$

其中 A_{2d} 表示区域内的投影面积, A_{3d} 表示区域内表面积, 利用 Arcgis 10.0 中的 3D 分析工具计算出 A_{2d} 和 A_{3d} 值, 发现区域内 λ_f 大于 0.9, 可视区域内地表较为平坦, 适用于 FSAM 模型。

1.6 实验预处理

1) 将原始通量数据运用 LoggerNet3.3 软件转换成 TOA5 的格式, 再运用 eddypro6.2.0 软件对数据进行野点去除、倾斜修正、超声虚温修正、频率损失修正、数据插补等处理。

2) 剔除降雨时段的通量数据, 因为降雨会影响仪器响应, 导致仪器的测量值不准确或不合理。

3) 剔除夜间 (18:30 - 6:00) 摩擦风速 (u_*) < 0.15 m/s 的数据 [23]。摩擦风速可以反映夜间湍流发展强弱, 由于夜间大气较稳定使湍流发展不充分, 导致涡度相关仪器测量的通量数据不能反映下垫面真实的地气交换。

4) 剔除大气稳定度 $L > 5000$ 或 $L < -2000$ 的通量数据。剔除强稳定以及强不稳定条件下的通量数据以适应模型输入范围。

2 结果

2.1 观测点主风向分析

2016 年 1 月 13 日至 2017 年 1 月 13 日的风向、

风速和频率分布特征如图 3 所示。研究区全年平均风速为 0.74 m/s, 180° ~ 270° 方向平均风速最小, 为 0.53 m/s。观测塔附近最大风速变化范围 (0.93 ~ 3.763 m/s) 较大, 最大风速在 90° ~ 112.5° 方向 (即 90° ~ 180° 方向)。在 0° ~ 90°、90° ~ 180°、180° ~ 270°、270° ~ 360° 方向的数据占全部数据的百分比分别为 13.97%、48.36%、16.06%、21.60%, 因此本研究的主风向为 90° ~ 180° (东南方向)。

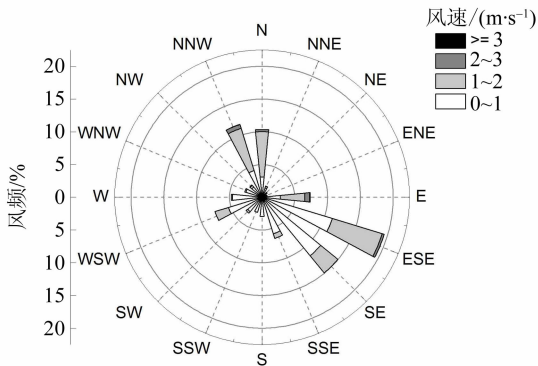


图 3 珠海城郊草地风向、风速和风频分布图
Fig. 3 Distribution of wind direction, speed and frequency in suburban lawn of Zhuhai City

2.2 各风向在不同稳定度的通量源区分析

大气的稳定度影响大气湍流状态, 也间接影响通量值, 因此需要划分其稳定度计算通量源区的大小。Monion - Obukhov 相似理论是依据大气稳定度参数 z_m/L 来划分大气层结是否稳定, 当 $z_m/L > 0$ 时为稳定状态, 当 $z_m/L < 0$ 时为不稳定状态。从图 4 中可看出在 90° ~ 180° 方向的通量数据不仅是所有方向上通量数据最多的, 而且其处于稳定条件下通量数据也是最多的 (占所有通量数据 30.88%)。

不同方向和不同稳定度下的通量源区范围各不相同, 因此需分别进行分析。不同方向和不同稳定度的输入参数 z_m/z_o 、 z_m/L 、 σ_v/u_* 范围 (表 2) 皆

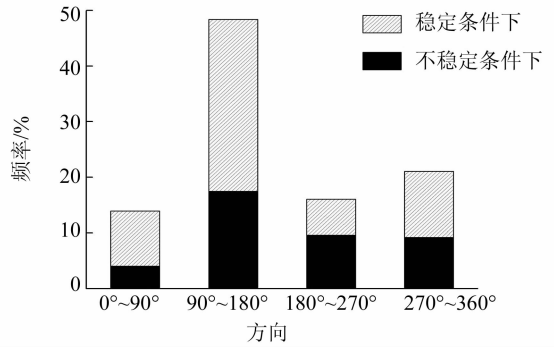


图 4 各个方向大气稳定度频率

Fig. 4 The frequency of atmospheric stability in different direction

与 Schmid^[18] 的输入范围相符, 因此可运用 FSAM 模型计算的通量源区范围。

运用 FSAM 模型, 将不同风向上的参数输入模型中, 可以得出不同 P 水平下的输出参数, 从而绘制相应的等值线图 (图 5), 本文取 $P = 90\%$ 。在稳定条件下, 研究区通量源区在迎风方向变化范围为 14 ~ 155 m, 在垂直于迎风方向的变化范围为 28 ~ 43 m。 a 、 e 、 X_d 、 X_m 值在 180° ~ 270° 方向最大, 分别为 17、155、89 和 39 m; d 值在 270° ~ 360° 方向取最大, 在 180° ~ 270° 方向最小, 分别为 43 m、28 m。当大气不稳定时, a 、 e 、 X_d 、 X_m 值在 0° ~ 90° 方向最大, 分别为 15、127、72 和 33 m, 这与其他方向 a 、 e 、 X_d 、 X_m 值相差不大。 d 值在 270° ~ 360° 方向取最大, 为 42 m。通量源区迎风方向变化和垂直于迎风方向范围分别为 14 ~ 127 和 29 ~ 42 m。

总的来说, 稳定条件下的通量源区范围均大于不稳定条件下的贡献区范围, 但是在各个方向上稳定条件和不稳定条件下的 a 、 e 、 X_d 、 X_m 的值相差不大, 这可能是因为草地生态系统下垫面较为平坦、植被分布较为均匀^[24]。

在大气稳定状态下, 通量源区的范围与盛行风方向无显著差异^[25], 而本研究 48.36% 通量数据均

表 2 各风向在不同稳定度条件下模型输入参数

Table 2 Input parameters of different direction in different atmospheric stability

参数	0° ~ 90°		90° ~ 180°		180° ~ 270°		270° ~ 360°	
	稳定	不稳定	稳定	不稳定	稳定	不稳定	稳定	不稳定
σ_v/u_*	2.883	3.114	2.783	3.439	1.921	2.388	3.050	3.516
z_m/L	0.006	-0.015	0.007	-0.020	0.020	-0.022	0.010	-0.022
z_m/z_o	41.077		41.077		41.077		41.077	

来源于盛行风方向 ($90^{\circ} \sim 180^{\circ}$)，因此研究盛行风方向不同稳定度的通量源区范围尤为重要。在 FSAM 模型中输入盛行风向的参数，依据输出参数绘制不同 P 水平 ($P = 10\% \sim 90\%$ ，间距为 10%) 的等值线分布图 (图 5)。

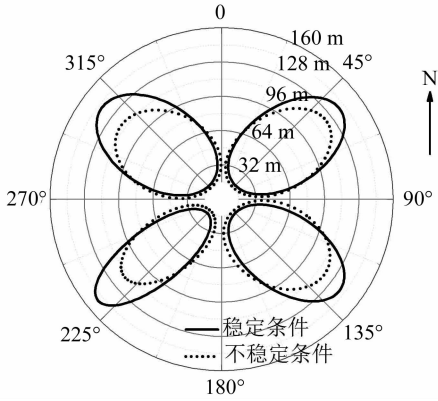


图 5 各风向在不同大气稳定度下通量源区的范围 ($P = 90\%$)

Fig. 5 The area of flux source in different direction in different atmospheric stability

58、67 和 83 m。 P 值从 10% 增加 90% 时， e 、 d 、 X_d 的增幅分别为 201% 、 520% 、 113% 。在不稳定条件下，当 $P = 10\% \sim 90\%$ 时，通量源区的最大值分别出现在 34、35、37、39、42、44、50、57 和 70 m 处。 P 值从 10% 增加 90% 时， e 、 d 、 X_d 的增幅分别为 198% 、 507% 、 108% 。在稳定条件和 unstable 条件下，随着 P 值增大，通量源区范围逐渐增大，并且稳定条件下通量源区增加幅度更大。这可能是因为在大气稳定条件下，湍流发展不充分，气体在垂直方向运输较为缓慢，探头可以观测到远处的通量，因而通量源区范围较大；但是在大气不稳定的状况下，湍流充分发展，气体在垂直方向上的运动十分剧烈，探头观测到的通量值来源于近处，因此通量源区范围较小。总之，随着稳定度的增加通量源区的范围也逐渐增大。

2.3 通量源区季节变化

为了研究珠海城郊草地通量源区范围在各个季节变化的特点，将数据分为春、夏、秋、冬四个季节。春季为 3-5 月，夏季为 6-8 月，秋季为 9-11 月，冬季为 12-2 月。依据表 3 的数据输入 FSAM 模型得到的输出数据如图 7 所示。

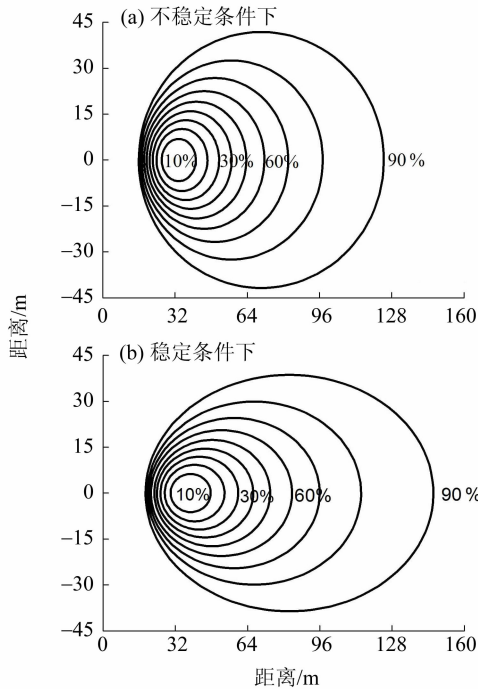


图 6 当 P 取不同值时的盛行风向通量源区范围
Fig. 6 The flux source area of prevailing wind direction for different P values

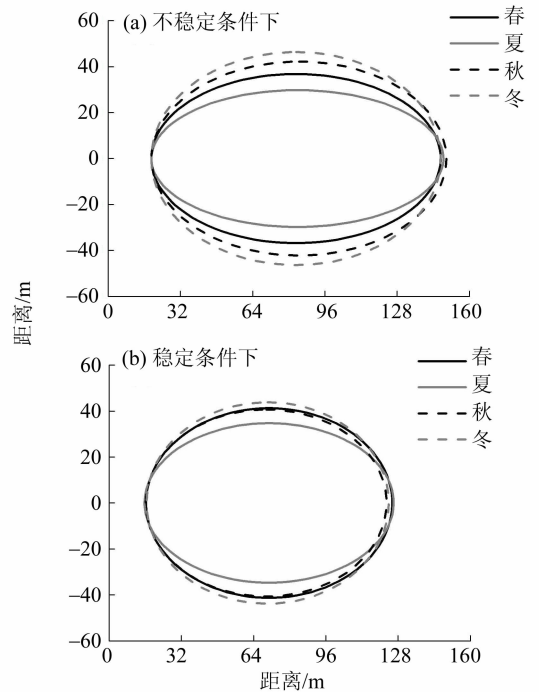


图 7 不同季节通量源区不同稳定状态的变化范围 ($P = 90\%$)
Fig. 7 The area of flux source in different seasons in different atmospheric stability ($P = 90\%$)

在稳定条件下，当 $P = 10\% \sim 90\%$ 时，通量源区最大值分别出现在 39、41、43、45、48、52、

表 3 不同季节通量模型输入参数
Table 3 Input parameters in different seasons

参数	春		夏		秋		冬	
	稳定	不稳定	稳定	不稳定	不稳定	稳定	稳定	不稳定
σ_v/u_*	2.640	3.378	2.129	2.831	2.994	3.378	3.324	3.619
z_m/L	0.008	-0.019	0.009	-0.018	0.011	-0.022	0.008	-0.021
z_m/z_0	41.077		41.077		41.077		41.077	

秋季迎风方向 90% 的通量数据来源于 14 ~ 147 m, 在 4 个季节中范围最大。其次是夏、冬季, 分别来源于 15 ~ 145 m 和 14 ~ 145 m。春季迎风方向 90% 的信息来源于 14 ~ 144 m, 在四个季节中最小。虽然各个季节在迎风方向通量源区范围各有差异, 但是总的来说, 各个季节迎风方向通量源区的大小差异较小。冬季垂直于迎风方向 90% 的通量数据来源于 -46 ~ 46 m, 在四个季节中最大; 而夏季垂直于迎风方向 90% 的通量数据来源在四个季节中最小, 为 -35 ~ 35 m。

当大气稳定时, 通量源区的大小关系为: 冬 > 秋 > 春 > 夏; 当大气不稳定时, 冬季的通量源区略微大于春、秋两季, 夏季通量源区远小于其他 3 个季节。总的来说, 在大气稳定条件和不稳定条件下, 研究区冬季的通量源区范围最大, 而夏季的通量源区范围最小。这可能是因为研究区属于亚热带季风气候, 冬季受到单一冷气团控制, 大气较稳定, 因此其通量源区范围大, 而夏季由于西南暖湿气流活跃, 盛行西南风和东南风, 大气层结由于受到季风的影响较为不稳定, 通量源区范围较其他 3 个季节小。

2.4 通量源区的日变化

将研究区处理后的通量数据分为白天 (06:00 ~ 18:30) 与夜间, 其输入参数及输出参数如表 4 所示。从表中可看出夜间大气层结属于以稳定状态为主, 而白天大气层结则以不稳定状态为主。此外夜间通量源区远远大于白天。白天, 90% 通量数据来源于迎风方向 3 ~ 25 m; 夜间, 90% 通量数据来源于迎风方向 17 ~ 151 m 之间。白天垂直于迎

风方向的通量数据来源 (-14 ~ 14 m) 远小于夜间 (-86 ~ 86 m)。不仅如此, 白天与夜间对观测点通量贡献最大的点也相差甚远, 分别为 7 m、39 m。昼夜大气稳定度不同是引起白天与夜间通量源区相差较大的原因。将全年各个时段 (以 1 h 为步长) 的涡度观测数据进行处理输入 FSAM 模型中, 得到 90% 水平下的 e 平均日变化图 (图 8)。从图中可看出 7:00 - 9:00 观测塔可观测到的最远距离急剧下降, 在 19:00 至次日 7:00 的通量数据来源较远, 稳定在 175 m 左右, 而 9:00 - 16:00 的通量数据最远来自距观测塔 45 m 左右的位置, 在 12:00 时探头能观测到通量源区的最远距离最小, 为 32 m。16:00 - 19:00 是由白天向夜间转变的时间, 大气逐渐由不稳定状态转换为稳定状态, 因此通量源区越来越大。

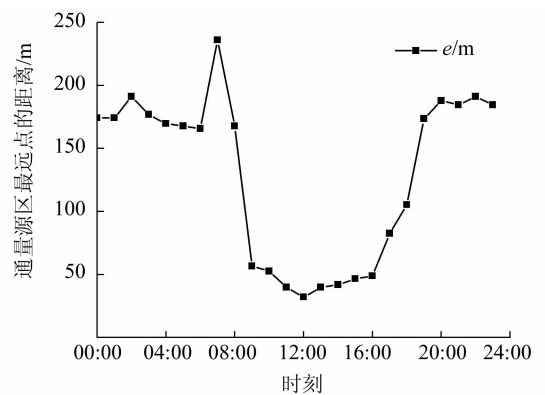


图 8 e 的平均日变化 ($P=90\%$)

Fig. 8 Average daily change of e ($P=90\%$)

表 4 白天与夜间模型输入及输出参数

Table 4 Input and output parameters at daytime and nighttime

时间	输入参数			输出参数 $P=90\%$				
	z_m/z_0	z_m/L	σ_v/u_*	a/m	e/m	d/m	X_d/m	X_m/m
白天	41.077	-0.785	3.145	3	25	11	14	7
夜间	41.077	0.015	2.248	17	151	32	86	39

3 讨 论

尽管表 5 的通量源区均是由 FSAM 模型求得的,但是在不同的生态系统中,其通量源区大小各不相同,即使在相同的生态系统也由于其下垫面、 P 水平等不同而导致其通量源区范围也不尽相同。在农田生态系统中,当坐标、气候、下垫面植被等地理属性相似时, $P = 90\%$ 农田生态系统通量源区最远的位置 (173 m) 大于 $P = 80\%$ 的农田生态系统 (135 m)。在相同的 P 水平下,不同的下垫面其通量源区大小也有略微差异,下垫面为玉米的农田生态系统的通量源区最远的位置 (155 m) 小于小麦 (135 m),但是其通量源区范围最大时的位置大于小麦。在相同观测高度下,森林生态系统在不同 P 水平下,通量源区也各不相同, P 水平越高,通量源区范围越大。荒漠生态系统、城市生态系统、湿地生态系统的通量源区小于森林生态系

统。高寒草甸生态系统的观测高度与本研究的生态系统相近,下垫面均较为均一、平坦,因此其通量源区范围相差较小,但是由于其下垫面草地种类、气候条件、风速等条件不同其 X_m 表现出不一致性。观察与本研究同属亚热带季风气候的城市生态系统相比较,发现城市生态系统的通量源区较本研究大,这可能与城市生态系统观测探头较高有关。

总之,即使在同一研究区,运用同一批数据由于其数据处理软件^[26]、空气动力学粗糙度^[27]、大气稳定度^[28]的选取不同,其通量源区的大小也会略微有差异。现有的研究表明通量源区的范围主要受到观测探头的高度、空气动力学粗糙度以及大气稳定度的影响。通量源区随着大气稳定度和观测高度的增大而增大,而随着空气动力学粗糙度的增大而减小^[29]。因此在不同气候条件、下垫面、不同观测高度下其通量源区范围不尽相同。

表 5 不同生态系统在大气稳定状态下的通量源区范围

Table 5 The area of flux source under the stable atmosphere condition in different ecosystem

生态系统	坐标	气候	代表植被	观测高度/m	$P/\%$	e/m	X_m/m	文献
农田	35.23°N, 107.08°E	暖温带半湿润大陆性	小麦	1.86	90	173	24	[30]
	40.12°N, 98.98°E	暖温带半湿润大陆性	小麦	3.33	80	135	48	[31]
	35.43°N, 105.24°E	暖温带半干旱季风	玉米	3	90	155	46	[32]
森林	112.86°N, 29.52°E	亚热带湿润季风	美洲黑杨	25	90	3 613	317	[33]
	19.54°N, 109.48°E	热带海岛季风	橡胶树	25	80	1 858	413	[34]
荒漠	44.43°N, 87.90°E	温带荒漠	梭梭	11	90	671	151	[35]
湿地	31.52°N, 121.96°E	亚热带季风	芦苇-互花米草	4.8	90	380	62	[36]
城市	31.40°N, 21.50°E	亚热带季风	香樟树	18	90	1 047	295	[37]
高寒草甸	38.04°N, 100.4°E	高原大陆性	高寒草甸	3.15	80	150	49	[24]
草地	22.35°N, 113.57°E	亚热带季风	城郊草地	3	90	155	14	本文

4 结 论

本文基于 2016 年 1 月 13 日至 2017 年 1 月 13 日的珠海中山大学综合气象观测场内的涡度观测数据对不同稳定度、不同时间尺度的通量源区进行分析,得到以下结论:

1) 在稳定条件下,研究区 90% 通量源区在迎风方向最远距离为 155 m,在垂直于迎风方向最大距离为 43 m,通量贡献最大的点最远可达 39 m。在不稳定条件下,研究区 90% 通量源区在迎风方向最远距离为 127 m,在垂直于迎风方向最大距离为 42 m,通量贡献最大的点最远可达 33 m。总的来说,稳定条件下通量源区大于不稳定条件下的通量源区,但是在各个方向上稳定条件和不稳定条件

下的 a 、 e 、 d 、 X_d 、 X_m 的值相差不大,这可能是因为草地生态系统下垫面较为平坦、植被分布较为均一。

2) 在大气稳定条件下和不稳定条件下,研究区冬季的通量源区最大的,而夏季的通量源区最小。此外由于夜间大气较白天稳定,因此夜间通量源区范围远远大于白天。

3) 在不同生态系统中通量观测仪器所观测到的通量源区范围不尽相同,这是因为不同生态系统其下垫面性质、湍流运动状况、气候条件均不相同,这会影响通量源区的大小。即使在相同生态系统中,在不同的观测高度、不同 P 水平下通量源区的范围略有差异。因此需要根据观测塔周边的环境对通量源区进行分析,以明确观测仪器的观测范

围, 为实际的通量数据的处理和后续的通量分析提供一定理论依据。

参考文献:

- [1] ADAMS J M, FAURE H, FAUREDENARD L, et al. Increases in terrestrial carbon storage from the Last Glacial Maximum to the present [J]. *Nature*, 1990, 348 (6303): 711 - 714.
- [2] SWINBANK W C. The measurement of vertical transfer of heat and water vapor by eddies in the lower atmosphere [J]. *J Meteor*, 1951, 8(3): 135 - 145.
- [3] BALDOCCHI D D, WILSON K B. Modeling CO₂ and water vapor exchange of a temperate broadleaved forest across hourly to decadal time scales [J]. *Ecological Modelling*, 2001, 142(142): 155 - 184.
- [4] 于贵瑞, 张雷明, 孙晓敏. 中国陆地生态系统通量观测研究网络 (ChinaFLUX) 的主要进展及发展展望 [J]. *地理科学进展*, 2014, 33(7): 903 - 917.
YU G R, ZHANG L M, SUN X M. Progresses and prospects of Chinese terrestrial ecosystem flux observation and research network (ChinaFLUX) [J]. *Progress in Geography*, 2014, 33(7): 903 - 917.
- [5] BALDOCCHI D D, XU L, KIANG N. How plant functional-type, weather, seasonal drought, and soil physical properties alter water and energy fluxes of an oak-grass savanna and an annual grassland [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, 123(1): 13 - 39.
- [6] BURBA G G, VERMA S B. Seasonal and interannual variability in evapotranspiration of native tallgrass prairie and cultivated wheat ecosystems [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 135(1/2/3/4): 190 - 201.
- [7] YANG J, ZHOU G, WANG Y, et al. Estimation of sensible and latent heat fluxes of typical steppe in Inner Mongolia based on variational method [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(17): 2046 - 2051.
- [8] 赵亮, 徐世晓, 李英年, 等. 青藏高原两种草甸类型地表通量的季节变化特征 [J]. *草地学报*, 2005, 14(3): 248 - 253.
ZHAO L, XU S X, LI Y N, et al. Seasonal variation of surface fluxes of two species meadows on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Acta Agreotir Sinica*, 2005, 14(3): 248 - 253.
- [9] BI X, GAO Z, DENG X, et al. Seasonal and diurnal variations in moisture, heat, and CO₂ fluxes over grassland in the tropical monsoon region of southern China [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2007, 112(D10): 185 - 194.
- [10] 王修信, 刘馨, 陈声海, 等. 半干旱地区草地水热通量与环境因素及相关性研究 [J]. *应用基础与工程科学学报*, 2008, 16(5): 770 - 777.
WANG X X, LIU X, CHEN S H, et al. Correlation analysis of water and heat fluxes with environmental varia-
- ble over lawn in semi-arid area [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2008, 16(5): 770 - 777.
- [11] DENNIS B. Breathing of the terrestrial biosphere: lessons learned from a global network of carbon dioxide flux measurement systems [J]. *Australian Journal of Botany*, 2008, 56(1): 1 - 26.
- [12] FINNIGAN J J, CLEMENT R, MALHI Y, et al. A re-evaluation of long-term flux measurement techniques part I: averaging and coordinate rotation [J]. *Boundary Layer Meteorology*, 2003, 107(1): 1 - 48.
- [13] AUBINET M, VESALA T, PAPAIE D. Eddy covariance: a practical guide to measurement and data analysis [M]. New York: Springer Publishing Company, 2012: 21 - 58.
- [14] 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 [J]. *高原气象*, 2009, 28(2): 246 - 257.
GONG L J, LIU S M, SHUANG X, 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.
- [15] CHEN B, COOPS N C, FU D, et al. Characterizing spatial representativeness of flux tower eddy-covariance measurements across the Canadian Carbon Program Network using remote sensing and footprint analysis [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 124(9): 742 - 755.
- [16] FOKEN T, LECLERC M Y. Methods and limitations in validation of footprint models [J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2004, 127(3/4): 223 - 234.
- [17] 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(1): 355 - 373.
- [18] SCHMID H P. Source areas for scalars and scalar fluxes [J]. *Boundary Layer Meteorology*, 1994, 67(3): 293 - 318.
- [19] ZHANG H, WEN X F. Flux footprint climatology estimated by three analytical models over a subtropical coniferous plantation in southeast China [J]. *Journal of Meteorological Research*, 2015, 29(4): 654 - 666.
- [20] GRIMMOND C S B, KING T S, CROPLEY F D, et al. Local-scale fluxes of carbon dioxide in urban environments: methodological challenges and results from Chicago [J]. *Environmental Pollution*, 2002, 116 (S1): S243 - S254.
- [21] CAMPBELL G S, NORMAN J M. An introduction to environmental biophysics [M]. 2nd ed. New York: Springer Publishing Company, 1997: 68 - 75.
- [22] 刘伟, 韦志刚, 郑志远, 等. 珠海凤凰山林地地下垫面观测通量的贡献区分析 [J]. *热带地理*, 2016, 36(5):

- 840 - 849.
- LIU W, WEI Z G, ZHENG Z Y, et al. Analysis on the source area of forest site in phoenix mountain of Zhuhai [J]. Tropical Geography, 2016, 36(5): 840 - 849.
- [23] 朱治林, 孙晓敏, 温学发, 等. 中国通量网 (ChinaFLUX) 夜间 CO₂ 涡度相关通量数据处理方法研究 [J]. 中国科学 (地球科学), 2006, 36(S1): 34 - 44.
- ZHU Z L, SUN X M, WEN X F, et al. Research on the processing method of the night eddy flux data in ChinaFLUX in Chinese [J]. Science China (Earth Sciences), 2006, 36(S1): 34 - 44.
- [24] 张琨, 韩拓, 朱高峰, 等. 西北内陆河流域典型生态系统通量数据空间代表性研究 [J]. 干旱区地理, 2015, 38(4): 743 - 752.
- ZHANG K, HAN T, ZHU G F, et al. Investigation of spatial representativeness for flux data of continental river basin in arid region of northwestern China [J]. Arid Land Geography, 2015, 38(4): 743 - 752.
- [25] 刘郁珏, 胡非, 程雪玲, 等. 北京城市通量足迹及源区分布特征分析 [J]. 大气科学, 2013, 38(6): 1044 - 1054.
- LIU Y Y, HU F, CHENG X L, et al. Distribution of the source area and footprint of Beijing [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2013, 38(6): 1044 - 1054.
- [26] 庄金鑫, 王维真, 王介民. 涡动相关通量计算及三种主要软件的比较分析 [J]. 高原气象, 2013, 32(1): 78 - 87.
- ZHUANG J X, WANG W Z, WANG J M. Flux calculation of eddy-covariance method and comparison of three main softwares [J]. Plateau Meteorology, 2013, 32(1): 78 - 87.
- [27] 周艳莲, 孙晓敏, 朱治林, 等. 几种典型地表粗糙度计算方法的比较研究 [J]. 地理研究, 2007, 26(5): 887 - 896.
- ZHOU Y L, SUN X M, ZHU Z L, et al. Comparative research on four typical surface roughness length calculation methods [J]. Geographical Research, 2007, 26(5): 887 - 896.
- [28] 毕雪岩, 刘烽, 吴兑. 几种大气稳定度分类标准计算方法的比较分析 [J]. 热带气象学报, 2005, 21(4): 402 - 409.
- BI X Y, LIU F, WU D. Comparison of some limit for stability classification [J]. Journal of Tropical Meteorology, 2005, 21(4): 402 - 409.
- [29] LECLERC M Y, THURTELL G W. Footprint prediction of scalar fluxes using a Markovian analysis [J]. Boundary Layer Meteorology, 1990, 52(3): 247 - 258.
- [30] 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.
- CHU H L, LIU Z W, ZHU Y J, et al. Spatial representation of flux data in gully region on the Loess Plateau [J]. Advances in Earth Science, 2009, 24(2): 211 - 218.
- [31] 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.
- MA D, LV S H, CHEN S Q, et al. Distribution of source area and footprint of Jinta Oasis in summer [J]. Plateau Meteorology, 2009, 28(1): 28 - 35.
- [32] 董军, 党慧慧, 孔凡亮, 等. 半干旱区农田生态系统通量贡献区分析 [J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(12): 1571 - 1579.
- DONG J, DANG H H, KONG F L, et al. Analysis of agro-ecosystem footprint of flux in semi-arid areas [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2009, 28(1): 28 - 35.
- [33] 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.
- WEI Y, GAO S H, ZHANG X D, et al. Source area in flux measurement by FSAM model over the *populus deltoides* Plantation in Yueyang [J]. Scientia Silvae Sini- cae, 2012, 48(2): 16 - 21.
- [34] 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, 12(1): 42 - 50.
- WU Z X, CHEN B Q, YANG C, et al. Distribution of footprint and fluxes source area of rubber plantation in Hainan Island [J]. Journal of South China University of Tropical Agriculture, 2012, 12(1): 42 - 50.
- [35] 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 Q, LI P H, WANG Q, et al. A footprint analysis on a desert ecosystem in west China [J]. Journal of Desert Research, 2014, 34(1): 98 - 107.
- [36] 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.
- GU Y J, GAO Y, GUO H Q, et al. Footprint analysis for carbon flux in the wetland ecosystem of Chongming Dongtan [J]. Journal of Fudan University (Natural Science), 2008, 47(3): 374 - 379.
- [37] 袁庄鹏, 赵敏. 基于 FSAM 模型的城市碳通量观测贡献区研究 [J]. 上海师范大学学报 (自然科学版), 2012, 41(5): 533 - 539.
- YUAN Z P, ZHAO M. Research of flux footprint of city based on the FSAM model [J]. Journal of Shanghai Normal University (Natural Sciences), 2008, 47(3): 374 - 379.