

DOI: 10.5846/stxb201907041409

纪小芳, 龚元, 郑翔, 鲁建兵, 冯明, 庄家尧, 叶立新, 刘胜龙, 方万力, 王丹, 何雪凯, 姜姜. 凤阳山针阔混交林通量观测源区分布及特征. 生态学报, 2020, 40(20): 7377-7388.

Ji X F, Gong Y, Zheng X, Lu J B, Feng M, Zhuang J Y, Ye L X, Liu S L, Fang W L, Wang D, He X K, Jiang J. Distribution and characteristics of flux footprint of coniferous and broad-leaved mixed forest ecosystem in Fengyang Mountain of Zhejiang, China. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(20): 7377-7388.

凤阳山针阔混交林通量观测源区分布及特征

纪小芳¹, 龚元², 郑翔¹, 鲁建兵¹, 冯明¹, 庄家尧¹, 叶立新³, 刘胜龙³, 方万力³, 王丹³, 何雪凯³, 姜姜^{1,*}

1 南方现代林业协同创新中心, 南京林业大学林学院, 南京 210037

2 南京林业大学生物与环境学院, 南京 210037

3 凤阳山-百山祖国家级自然保护区凤阳山管理处, 龙泉 323700

摘要:基于涡度相关技术的通量观测要求下垫面均匀一致, 然而在实际观测中, 地形往往非常复杂。尤其是丘陵山区森林植被覆盖的区域, 不同植被类型的空间分布对该区域的碳通量观测影响很大。本研究利用 Kljun 模型和 ART Footprint Tool, 对浙江凤阳山针阔混交林森林生态系统 2017 年全年的观测数据进行分析, 探究该区域涡度相关系统在不同季节、不同大气稳定度条件下的通量源区变化情况。结果表明: 受地形的影响, 研究区内全年盛行东北风 (0—90°) 和西南风 (180—270°); 因此, 通量的源区分布也主要在东北和西南方向; 当通量贡献率达到 90% 时, 源区长度最大不超过 7000m, 当通量贡献率在 80% 时, 源区长度不超过 3000m; 在大气稳定条件下, 其源区分布范围总是比大气不稳定条件下的源区范围广。在该源区分布范围内, 主要以针阔混交林为主, 也分布有少量杉木、柳杉和毛竹等纯林, 源区贡献从大到小依次为针阔混交林、阔叶林、杉木林、毛竹林、柳杉林、黄山松林。

关键词: 凤阳山; 针阔混交林; Kljun 模型; 涡度相关; 通量足迹

Distribution and characteristics of flux footprint of coniferous and broad-leaved mixed forest ecosystem in Fengyang Mountain of Zhejiang, China

Ji Xiaofang¹, GONG Yuan², ZHENG Xiang¹, LU Jianbing¹, FENG Ming¹, ZHUANG Jiayao¹, YE Lixin³, LIU Shenglong³, FANG Wanli³, WANG Dan³, HE Xuekai³, JIANG Jiang^{1,*}

1 Co-Innovation Center of Sustainable Forestry in Southern China, College of Forestry, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China

2 College of Biology and the Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China

3 Fengyang Mountain Administration of Zhejiang Fengyang Mountain-Baishanzu Nation Nature Reserve, Longquan 323700, China

Abstract: The flux observation based on eddy covariance requires uniform underlying surface. However, in the actual observation, the terrain is often very complex. Especially in the area covered by forest vegetation, the spatial distribution of different vegetation types has a great influence on carbon flux observation. In this study, Kljun model and Art Footprint Tool were used to analyze the observation data of coniferous and broad-leaved mixed forest ecosystem in Fengyang Mountain, Zhejiang province in 2017. We aim to explore the flux source area changes of the vorticity related system in the region under different seasons and atmospheric stability conditions. The results showed that the northeast wind (0—90°) and the southwest wind (180—270°) prevailed in the study area through 2017 due to the influence of terrain; therefore, the source area distribution of flux was mainly in the northeast and southwest directions. When the flux contribution rate reached 90%,

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFC0505502); 国家自然科学基金 (41701225); 江苏省自然科学基金 (BK20170920)

收稿日期: 2019-07-04; **修订日期:** 2020-05-09

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ecologyjiang@gmail.com

the length of the flux footprint was less than 7000 m. When the flux contribution rate was 80%, the source area length was less than 3000 m. The source areas were larger, when atmosphere stability conditions were more stable. In the distribution range of the source area, there are mainly coniferous and broad-leaved mixed forest, but also a small number of monoculture forests such as *Cunninghamia lanceolata*, *Cryptomeria fortunei* and *Phyllostachys pubescens*. The contribution of the source area from the largest to the smallest is coniferous and broad-leaved mixed forest, broad-leaved forest, *Cunninghamia lanceolata*, *Phyllostachys pubescens*, *Cryptomeria fortunei*, Pine forest.

Key Words: Fengyang Mountain; forest ecosystem; Kljun model; eddy covariance; footprint

在全球气候变化的背景下,2002—2011 年间 CO_2 浓度的增加速率达到了 $(2.0 \pm 0.1) \text{ ppm/a}$, 其对温室效应的贡献大约 78%^[1]。森林生态系统作为主要的碳汇之一,在陆地生态系统中扮演着重要的角色。过去几十年大量的研究围绕森林生态系统的碳循环展开,试图了解和掌握其碳排放动态,为分析和解决温室效应等全球环境问题寻找途径。

涡度协方差 (Eddy covariance, EC) 方法常用来测量生态系统尺度上地表与大气的 CO_2 气体交换。涡度协方差也称涡度相关法是一种多用于测量植被下垫面与大气间热量、物质和动量交换的工具,目前为国际上主流的基于微气象理论的通量观测技术,20 世纪 90 年代以来,随着涡度相关法的发展和应用为直接观测不同生态系统 CO_2 排放和吸收提供了技术方法^[2]。早期的涡度相关技术多应用于农田、湿地、草地和森林等几个关键陆地生态系统与大气之间的 CO_2 交换研究^[3],但受观测高度,大气边界层高度,大气稳定度等环境因素的影响,通量塔传感器所测得的通量值仅代表下垫面的一定区域^[4],因此在应用涡度协方差法时,需要确定其空间代表性和通量源区^[5]。目前通量源区的模型主要有解析模型、大涡模拟模型、拉格朗日模型和闭合模型等几类。解析模型的假设基础较多,理论上仅适用于下垫面平缓的区域,主要采用梯度扩散理论、二维平流扩散方程以及相似理论得出通量贡献区,较著名的有 Kormann and Meixner (KM) 模型、FSAM 模型和 Horst-Weil 模型^[6-9];大涡模型最初用于大气和环境科学的研究,但其物理机理、计算比较复杂繁琐,耗时,消耗大量的存储空间,不适宜于长期通量观测数据下的计算^[10-11];拉格朗日模型是基于拉格朗日粒子扩散的数值模拟,理论上严格考虑了扩散的均匀分布约束,可以正确的反映出非均匀湍流中的扩散,较为著名的有 Hsieh 模型以及 Kljun 模型^[12-13]。2015 年由 Kljun^[14] 等提出的三维通量足迹模型更加适用于长期连续且多时间序列的通量塔观测源区计算,运算速度更快。目前应用 FSAM 模型^[5,9,15-23] 和 KM 模型^[24-27] 的研究较多,但是对 Kljun 模型^[28-29] 实际进行运用的研究较少。对通量源区的主要研究结果发现生长季的源区分布在任何状态下均小于非生长季^[5,24-25,30-31];但是也有研究表明在大气不稳定状态下时,非生长季的源区面积大于生长季^[32];在稳定大气条件下的通量源区长度要显著大于不稳定条件下^[33];不同时间其通量源区的大小有所不同^[16],随着研究的深入与实际需要针对下垫面不均一的森林生态系统碳通量的监测方法也逐渐成为研究的热点^[34]。Schmid H P 等^[35] 对位于尼日尔萨赫勒地区的虎灌木(粗砂和灌木交错分布)进行研究发现从单一位置进行测量不能代表生态系统的空间湍流通量。Sogachev A 等^[36] 利用 SCADIS 模型对山脊不同位置的通量值进行研究,相比较于同等高度,背山脊处的通量所受到的干扰最大,而通量塔的最佳建设位置在山脊顶部。而目前使用的最多的为 ART (Agroscope Reckenholz Tanikon) Footprint Tool 模型(基于 KM 模型)来实现对空间异质性不同土地类型对所测通量所占比例的确定^[12,27]。

本研究利用 Kljun 通量足迹模型(后简称 Kljun 模型)和 ART Footprint Tool (KM 模型),对浙江凤阳山通量塔 2017 年全年的观测数据进行分析,探讨该森林生态系统在不同时间跨度、不同大气条件下的通量源区变化情况以及不同土地类型的对通量观测值的贡献,对研究区通量观测值的空间代表性作出解释,为其他森林生态系统 CO_2 通量研究和类似下垫面的通量源区评估提供服务和参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于中国东南部的浙江丽水龙泉市凤阳山自然保护区内,该区建于 1975 年,现有管理面积 15171hm^2 [37-38]。位于东经 $119^\circ06' - 119^\circ15'$ 、北纬 $27^\circ46' - 27^\circ58'$ 。保护区森林覆盖率达到 90.8%,属于中亚热带温暖湿润气候区,同时受海洋性气候和季风影响较大,研究区内雨量充沛,多年平均降水量达到 2400mm,降水集中于 4—6 月,占全年的 80%,湿度大,雾多;年均气温 12.8°C ,极端高低温分别为 30.2°C 、 -12.5°C ,月均气温最高 28°C 左右,最低 $6^\circ\text{C} - 13^\circ\text{C}$,年蒸发量达到 1170 mm 以上,无霜期 275 d,有效积温约 6500°C [39-40]。四季分明,一般 3 月底 4 月初入春;7 月初入夏;8 月中旬入秋;11 月中旬入冬,光照资源丰富 [41]。土壤类型主要为黄壤土,分布在海拔 800 m 以上的高山坡地。地形以山地为主,地势较高,沟壑交错,保护区的黄茅尖,海拔高达 1928 m,为江浙第一高峰。保护区内的通量塔于 2016 年 10 月搭建完成,位于研究区中心,其所在下垫面为阴坡 24° ,森林遍山野岭,风浪区无限大,树冠高度大部分分布均匀,符合 Kljun 模型的使用条件 [42],周围林地以木荷、杉木和木楠混交为主,平均冠层高度约 15 m,平均林龄约 40 a。植物资源丰富,形成多优势种结构特征。人工杉木林和人工柳杉林分布在海拔 1400—1500 m 左右,木荷在海拔 300 m, 900 m 和 1500 m 处均有分布,黄山松在海拔 600 m 和 1300 m 处均有分布,多脉青冈和黄山木兰在海拔 1500 m 左右有分布 [43]。

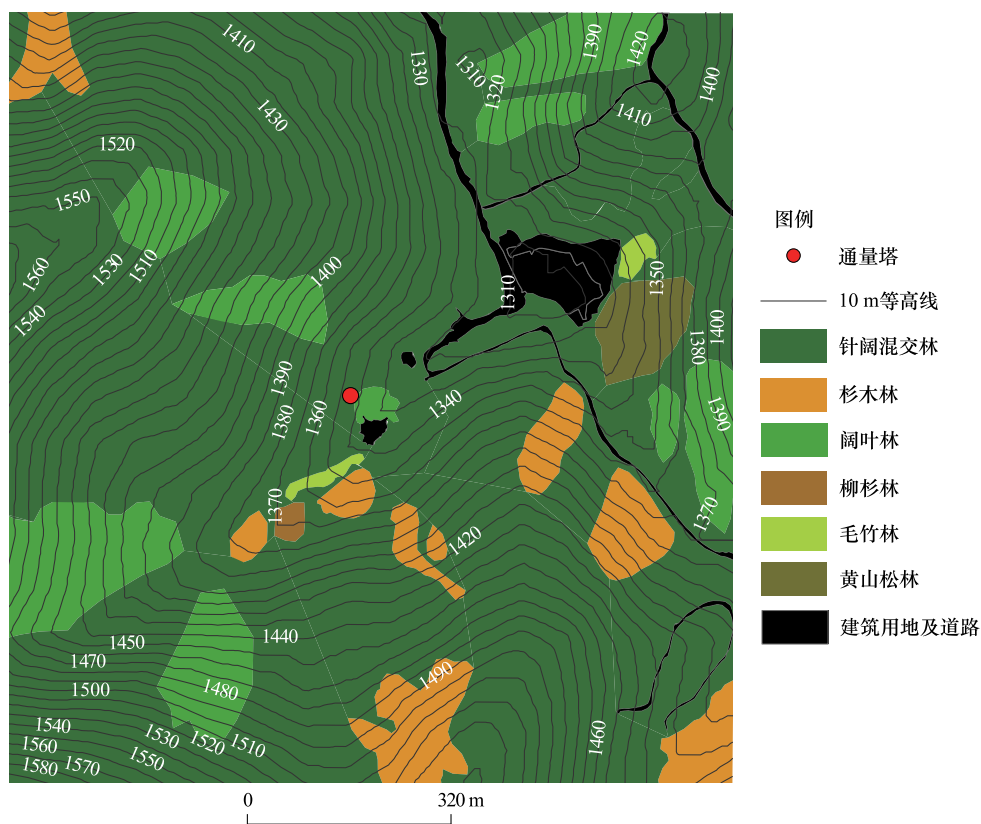


图 1 凤阳山研究区土地利用类型地形图

Fig.1 Topographic map and land use types in Fengyangshan research area

1.2 观测方法和数据处理

研究区中心建有高 40m 的观测铁塔,塔上装有通量和梯度系统。通量观测系统的传感器有数据采集器 (CSI CR300, Campbell Scientific Inc., USA), 三维超声及 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 分析仪 (IRGASON, Campbell Scientific Inc.,

USA), 四分量辐射表(CNR4, Campbell Scientific Inc., USA), 空气温湿度(HMP155A, Campbell Scientific Inc., USA), 土壤热通量板(HFP01, Campbell Scientific Inc., USA)。配套的气象观测系统为 6 层梯度观测(空间高度 2、8、16、24、32、40m, 土壤深度 10、20、30、40、60、90cm), 梯度系统测量大气中不同高度的温度、湿度、风速、风向以及不同深度土壤含水量和土壤温度, 适用于不同的下垫面和大气条件, 是边界层气象、农林气象、大气环境监测最普遍运用和最基本的观测手段。主要传感器有土壤温度传感器(TCAV)、土壤水分传感器(Campbell CS616, Campbell Scientific Inc., USA)、风向传感器(MetOne 020C, Campbell Scientific Inc., USA)、数据采集器(CSI CR300, Campbell Scientific Inc., USA)、6 层风速传感器(MetOne 010C, Campbell Scientific Inc., USA)、HOBO 雨量传感器(Onset RG3-M, Campbell Scientific Inc., USA)和空气温湿度传感器(HMP155A, Campbell Scientific Inc., USA)。整套观测系统于 2016 年 10 月修建完成。研究人员每隔三个月去现场进行数据下载和维护仪器等工作。本研究选取凤阳山通量塔 2017 全年的连续通量观测数据。采集到的数据经过在线程序(EasyFlux™-PC, Campbell Scientific Instruments, USA, <https://www.campbellsci.com/>)处理, EasyFlux 程序中所用代码均与 EddyPro (Li-COR, NE, USA, <https://www.licor.com/>)软件所用源代码一致。主要处理过程包括: 野点去除、坐标旋转、WPL 校正、建立数据质量等级指标(1—9)等最后得到 30 min 时间间隔的通量和微气象数据序列^[44-45]。之后对数据进行筛选, 主要是去除降雨及降雨前后 1h 数据; 剔除红外分析仪信号强度低于 0.8 的数据; 去除质量控制等级标记为“9”的数据^[46]。基于本文剔除数据的原则, 2017 年的通量数据有效率为 51%, 来进行通量贡献区分析, 一般通量数据有效率超过 50%则具有代表性^[26,28]。

依据凤阳山当地的实际气候状况, 季节划分以 3、4、5 月为春季, 6、7、8 为夏季, 9、10、11 为秋季, 1、2、12 月为冬季^[47]。

1.3 通量足迹模型

一般通量观测塔上红外分析仪所测得的通量值为某一时刻迎风方向上对观测值产生影响的下垫面空间代表区域的碳源或碳汇强度, 对观测点通量值有贡献的下垫面区域即为通量贡献区^[48-49]。以观测点通量塔为原点(0,0)建立坐标, x 轴的正值方向代表上风距离:

$$F_c(0,0,z_m) = \int_R Q_c(x,y)f(x,y)d_xd_y \quad (1)$$

式中 Z_m 为有效观测点高度, f 为碳源或碳汇的转换函数即 footprint 函数, 代表了表面上某点(x,y)对 Z_m 处观测值的贡献率密度, Q_c 代表的是表面碳源或碳汇的点源强度, F_c 为在 Z_m 处所测得的通量值, R 代表对通量值有贡献的下垫面区域^[7]。

$$Z_m = Z_{\text{receptor}} - Z_d \quad (2)$$

式中 Z_{receptor} 为通量塔相对于地面的观测高度, Z_d 为零平面位移高度, 采用森林冠层高度的 2/3^[50-51]。

而侧风积分足迹函数 f_{iy} 则主要受到上风距离(x), 有效动力学高度(Z_m), 大气边界层高度(h), 摩擦风速(u_*)和垂直风速脉动的标准差(σ_w)等几个参数决定。以上参数除了 h 需要单独计算, 主要与 L (Obukhov, 奥布霍夫长度)有关, 详细计算方法 Kljun 文章中给出^[14], 其他的都可以通过 EasyFlux™ 在线程序处理获取^[46]。由量纲分析(Π 定理), 将以上变量有可能构成的无量纲参数组如下所示:

$$\Pi_1 = f_{iy} Z_m \quad (3)$$

$$\Pi_2 = \frac{x}{Z_m} \quad (4)$$

$$\Pi_3 = \frac{(h - Z_m)}{h} = 1 - \frac{Z_m}{h} \quad (5)$$

$$\Pi_4 = \frac{\sigma_w}{\mu_*} \quad (6)$$

侧风积分足迹的无量纲函数 F^* 可以由为上风距离 X^* 表示, 即 $F^* = \varphi(X^*)$, 由 $X^* = \Pi_2 \Pi_3^{-1} \Pi_4$, $F^* =$

$\Pi_1 \Pi_3^{-1} \Pi_4$ 可得到:

$$F^* = a \left(\frac{X^* + d}{c} \right) \exp \left[b \left(1 - \frac{X^* + d}{c} \right) \right] \quad (7)$$

式中的 a, b, c, d 为通过后向拉格朗日随机粒子扩散模型 (LPDM-B) 不断的实验计算出的各拟合参数, 均与粗糙度 (z_0) 有关。用 Z_m/L 来判别大气稳定度, 其中 L 为 Obukhov 长度 (可由 EasyFlux 在线程序计算获取), 当 $Z_m/L > 0$ 时, 大气为稳定状态, 而当 $Z_m/L < 0$ 时, 大气为不稳定状态^[21]。一般在分析中常用贡献率密度的 P 水平等值线所包围的区域 (一般取 $P = 0.8$ 或 0.9) 来表示 EC 系统的观测范围^[21], 这里参考 Kim 等^[42] 基于 Kljun 模型的森林生态系统通量源区的研究方法, 本研究选取 $P = 0.8$ ^[42], Kljun 等^[42] 还提供了该模型的在线数据处理网站 (<http://www.footprint.kljun.net/index.php>), 该研究下载了该模型的开源 Matlab (MathWorks, USA, <https://www.mathworks.com/>) 函数代码应用于浙江凤阳山针阔混交林森林生态系统的通量足迹研究。

2 结果与分析

2.1 主风向分析

从图 2 和表 1 可以清晰的看到凤阳山森林全年和四季的风速和风向分布频率, 除秋季的主风向为东北风之外, 其余季节与全年的主风向均为西南风。结合图 1 中的地形可以看出, 风向受到地形的很大影响, 由于通量塔位于山坡上, 所以其西北方向的风受到山坡高度的影响, 很难传输到通量塔所在位置, 而西南方向海拔从通量塔位置开始逐渐增高, 因此不会完全阻挡风, 给风的传输提供了可能, 东北和西南方向也是如此。同时从表 1 中的白天和黑夜不同风频数据可以看出, 全年昼夜风向相反, 白天和黑夜的主风向分别为东北风和西南风, 可能受到山谷风的影响^[52]。

表 1 不同时间不同风向的风频

Table 1 Wind frequency of different wind direction at different times

时间 Time	风频/% (Wind frequency)				主风向 Prevailing wind direction
	东北风 (0—90°) Northeast wind	东南风 (90—180°) Southeast wind	西南风 (180—270°) Southwest wind	西北风 (270—360°) Northwest wind	
春 Spring	31.2	5.91	52.94	9.94	西南风
夏 Summer	25.63	3.8	49.25	21.31	西南风
秋 Autumn	49.73	6.54	33.6	10.13	东北风
冬 Winter	34.32	9.28	48.43	7.96	西南风
全年 Yearly	34.16	6.34	46.96	12.54	西南风
全年白天 All day	52.77	8.39	27.99	10.84	东北风
全年黑夜 All night	26.44	5.64	53.23	14.69	西南风

2.2 研究区总体通量源区特征

利用 Kljun 模型计算出 30 min 时间间隔的 90% 的通量贡献率的通量足迹, 并绘制出其所对应的上风距离分布图和累计频率概率图。从图中可以明显的看出, 通量贡献区最远点的分布比较集中, 距离通量塔观测点最远的距离为 7000m, 主要的通量测量值来自于东北和西南方向, 结合全年的风向风速图 2 可以发现, 风向和风速是影响通量贡献区的主要因素。

对全年的贡献率在 10—80% 的源区分布进行分析发现, 在不稳定条件下的源区面积明显小于稳定条件。当大气处于不稳定条件时, 其通量贡献率在 80% 的源区面积为 0.89 km^2 , 源区长度在 323.62—839.62 m 间, 0—90° 方向上源区长度达到最大, 此时大气做垂直剧烈运动, 物质不稳定输送速度很快, 涡流更易形成和传播, EC 系统所测得的通量值来自上风向更短距离, 导致其源区面积较小; 而当大气处于稳定条件时, 其通量贡

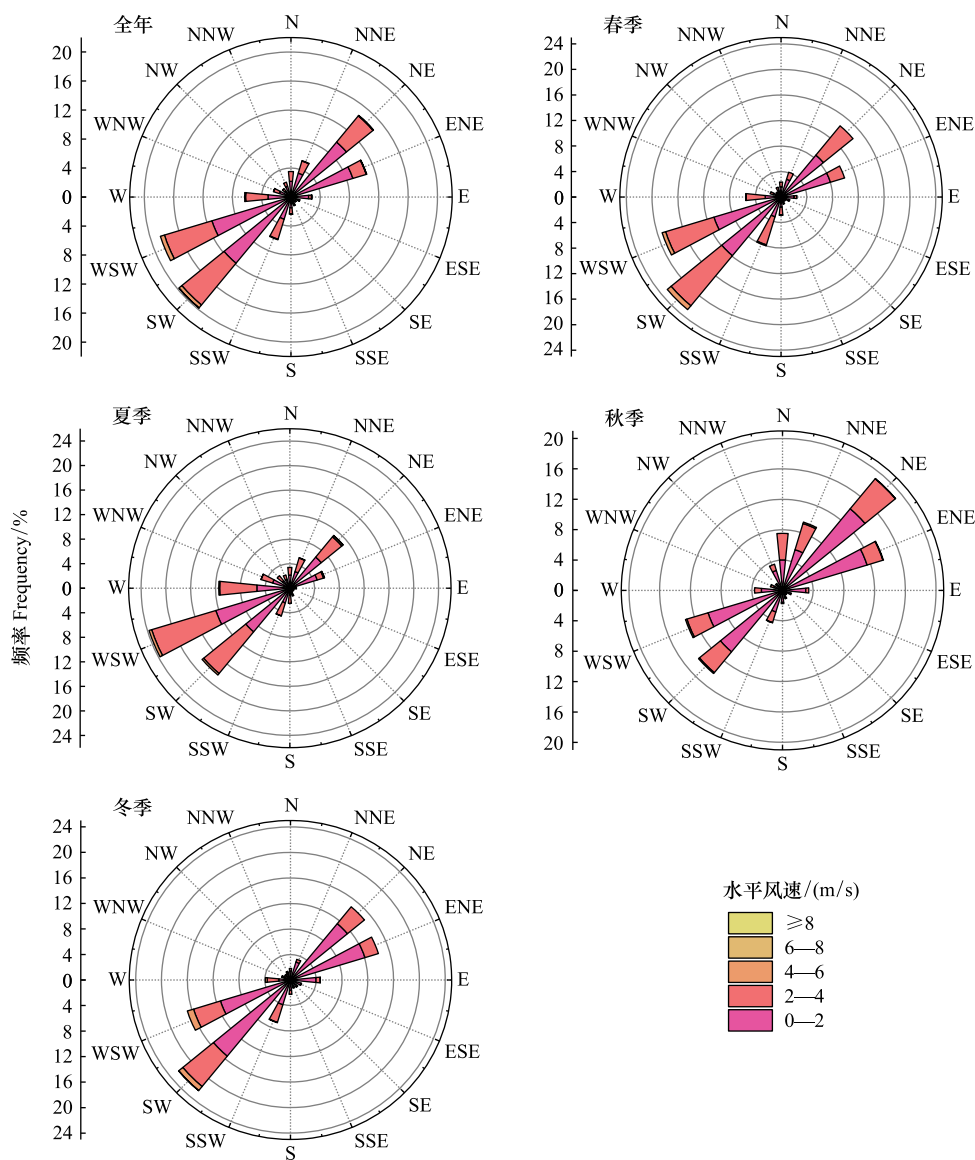


图2 研究区风向风速玫瑰图

Fig.2 The wind rose map in the study area

献率在 80% 的源区面积为 4.88 km^2 , 源区长度在 $672.69\text{—}2390.49 \text{ m}$ 之间, 在 $180\text{—}270^\circ$ 方向上源区长度达到最大, 空气的湍流运动较弱, 物质上下垂直扩散速度比较缓慢, EC 系统可以测得来自较远距离的涡流, 因此所代表的源区面积较大^[16,24,53]。

2.3 不同季节的通量源区足迹气候态特征

图 6 表示在 40 m 观测高度 Kljun 模型评价浙江凤阳山针阔混交林分别在春、夏、秋、冬季节在大气条件稳定和不安定条件通量贡献率为 80% 时的源区分布图。可以看出, 通量贡献区存在季节差异, 不同季节通量贡献区的面积和主要分布方向都有差异, 稳定条件下的源区面积要明显大于不安定大气条件下, 与全年的源区分布规律相似, 且源区的方向和形状均与风向风速图相一致。春季在不安定和稳定条件的源区面积分别为 0.64 km^2 和 4.89 km^2 , 源区长度分别在 $277.08\text{—}707.41 \text{ m}$ 和 $622.73\text{—}1887.58 \text{ m}$ 之间, 分别在 $0\text{—}90^\circ$ 和 $180\text{—}270^\circ$ 方向源区长度达到最大。夏季在不安定和稳定条件下的源区面积分别为 1.07 km^2 和 2.58 km^2 , 源区长度分别在 $442.04\text{—}1822.53 \text{ m}$ 和 $329.40\text{—}1880.01 \text{ m}$ 之间, 源区长度最大值均出现在 $180\text{—}270^\circ$ 方向。秋季在不

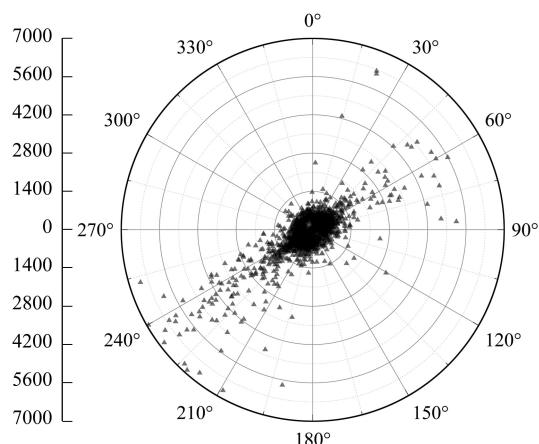


图3 通量足迹最远点分布图

Fig.3 The distribution of the flux footprint furthest point

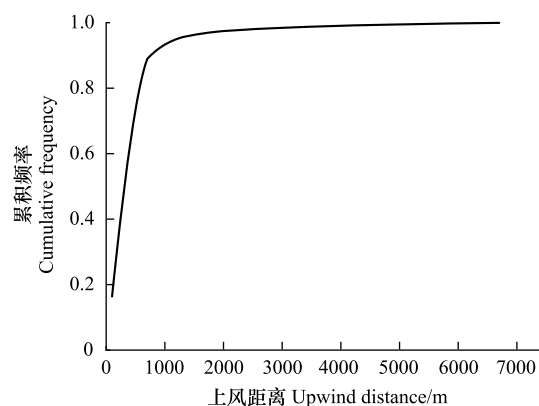


图4 通量足迹最远点累计频率图

Fig.4 The probability chart of the flux footprint furthest point

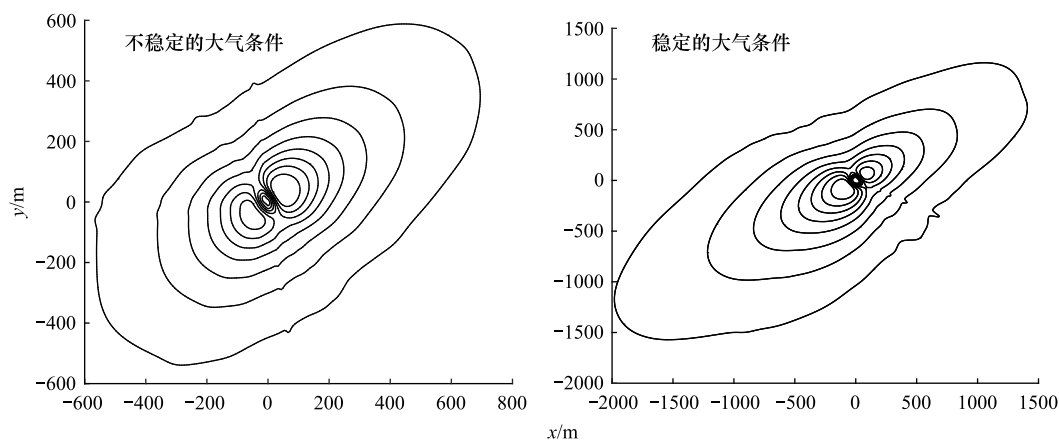


图5 全年源区分布

Fig.5 Flux footprint through 2017

(0,0)点为观测点,东南西北方向分别为 x 正轴、y 负轴、x 负轴和 y 正轴

稳定和稳定条件下的源区面积分别为 1.42 km^2 和 5.37 km^2 , 源区长度分别在 $359.69\text{—}1212.98 \text{ m}$ 和 $441.73\text{—}2717.48 \text{ m}$ 之间, 源区长度最大值出现在 $0\text{—}90^\circ$ 和 $180\text{—}270^\circ$ 风向。冬季不稳定和稳定条件下的源区面积分别为 0.70 km^2 和 5.54 km^2 , 源区长度分别在 $122.43\text{—}756.86 \text{ m}$ 和 $650.90\text{—}2468.66 \text{ m}$ 之间, 源区长度最大值风向为 $0\text{—}90^\circ$ 和 $180\text{—}270^\circ$ 风向。明显可以看出, 源区长度的最大值出现方向主要在东北 ($0\text{—}90^\circ$) 和西南 ($180\text{—}270^\circ$) 方向, 这完全符合全年源区的分布规律。在大气条件不稳定的条件下, 源区长度分布不超过 2000 m , 源区范围从大到小排列为: 秋季、夏季、冬季和春季, 可以看出生长季的贡献区在大气不稳定条件下较大; 当大气条件稳定时, 源区长度分布不超过 3000 m , 源区范围从大到小排列为: 冬季、秋季、春季和夏季, 此时生长季的源区分布最小。

从图 7 中可以看出通量贡献率峰值均位于传感器附近, 不超过 150 m , 且随着大气条件从不稳定到稳定, 其在上风向的倾斜更少。在不稳定条件下, 其湍流强度较高导致化合物向上传输和较短的传输距离与传输时间。在稳定条件下侧风向距离是明显高于不稳定条件下, 该结论与 Kim^[42] 等研究结果一致, 与前文通量贡献区在不稳定条件下的源区分布范围小于大气稳定条件的结果一致。 $Z_m/L < 0$, 表示大气不稳定状态, 当 $Z_m/L >$

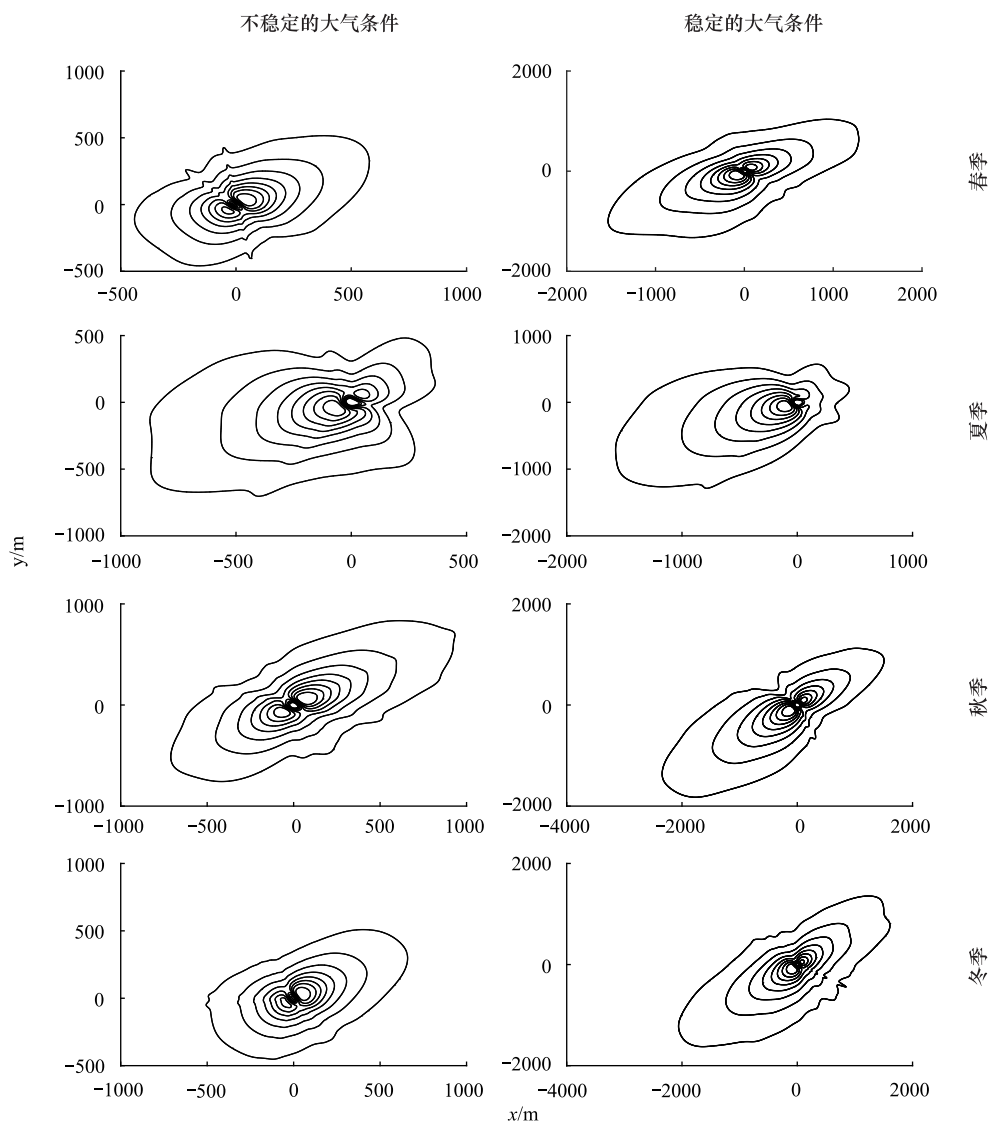


图 6 不同季节的源区分布

Fig.6 Flux footprint during different seasons

0, 表示大气稳定状态^[22]。从表 2 可以看出在春、夏、秋、冬季, 当大气条件不稳定时, Z_0 、 h 、 σ_{mv} 和 u_* 值均大于稳定条件下的, 在稳定条件下, 夏季的 z_0 、 h 、 σ_{mv} 和 u_* 最高, 冬季的 L 值最高; 在不稳定条件下, 夏季的 z_0 、 σ_{mv} 、 u_* 和 L 的绝对值最高, 冬季的 h 最高。

2.4 不同土地利用类型的通量贡献率

下垫面的土地利用类型对通量值有重要影响, 所以能将两者进行结合, 可以对源区不同植被对通量观测值的贡献有更加直观的认识。本研究选取 1120×1180 m 的研究区范围利用 ART Footprint Tool^[6, 54-56] 进行定量化分析, 将该范围分割成 3304 个 20×20 m 的方格, 确定其格内的土地利用类型并求出其对通量值的贡献率, 最后叠加得到不同植被类型在全年对通量贡献的百分占比 (图 8) 所选范围全年总贡献率达 90%。从图中可以看出源区贡献从大到小依次为针阔混交林、阔叶林、建筑用地及道路、杉木林、毛竹林、柳杉林、黄山松林。结合图 1 可以看出通常土地类型的面积越大, 其占比就较大。毛竹林的面积是柳杉林的两倍, 但是其贡献百分比却是柳杉林的 3.7 倍, 可以看出毛竹林在该研究区的碳预算功能有重要作用。该区域内的建筑用地主要为生态定位站的实验楼及标准气象场, 其本身的 CO_2 通量理论上可以忽略不计。

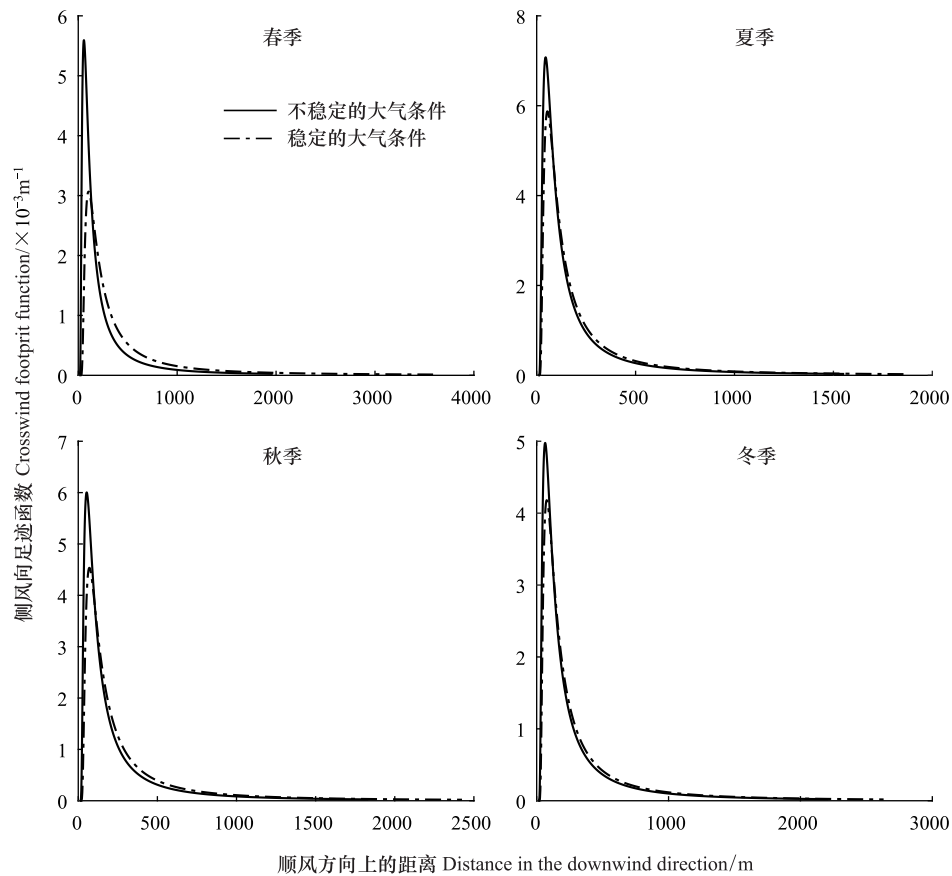


图 7 侧风积分函数图

Fig.7 Crosswind integral function diagram

表 2 侧风积分函数输入参数

Table 2 Crosswind integral function input parameter

季节 Season	大气条件 Atmospheric conditions	z_0/m	h/m	L/m	$\text{Sigma}/(\text{m/s})$	$u_* /(\text{m/s})$
春 Spring	稳定	4.93	350.62	1199.64	0.98	0.43
	不稳定	5.19	1361.27	-1467.54	1.03	0.52
夏 Summer	稳定	6.92	399.59	1203.77	1.14	0.50
	不稳定	7.06	1353.33	-4455.54	1.18	0.56
秋 Autumn	稳定	4.87	329.40	681.17	0.83	0.37
	不稳定	5.08	1389.99	-1578.08	0.86	0.42
冬 Winter	稳定	3.31	312.52	3885.27	0.80	0.34
	不稳定	3.51	1391.48	-1539.83	0.88	0.43

3 讨论

通量贡献区主要受到风向和风速的影响,但是自然条件中的风向风速几乎时刻在发生变化,为了更好的对贡献区进行分析,本文分析了不同大气层结条件和不同季节下的贡献区分布。如结果(图 6)中所示,通量源区的位置在不同季节有相应的变化,主要受到风向风速的影响,因为夏季的风向风速变化幅度较大,所以其对应的源区分布范围无论是在大气稳定还是不稳定的条件下,都分布较广,冬季时的大气较为稳定从图 6 中的冬 b 可以看出,该季节在西南方向的源区分布范围明显较其他季节大,而在大气稳定的条件下夏季的源区

范围较小,主要是夏季植物茂盛生长,导致湍流形成比较迅速,从而导致源区的范围较小,该结论与朱明佳^[53]等的研究结果一致,在大气不稳定的条件下源区范围从大到小排列为:夏季、秋季、春季和冬季,可以看出生长季的贡献区在大气不稳定条件下较大,该结论与龚笑飞^[16]等研究结论一致;无论从全年还是季节的尺度上来看,在大气不稳定的情况下,其源区分布范围均小于大气稳定条件,主要是由于当大气条件不稳定时,空气上下交换较快,垂直运动强烈,扩散也较快,最终使通量值所代表的源区范围较小,然而在大气稳定条件下,空气垂直产生湍流的速度减缓,扩散减弱,源区范围可以追溯到上风方向更远处,该结论与前人^[5,16,24-25,31-32,57-58]研究结论均一致。本研究区的源区距离最远可达到7000m(图3),这可能也与下垫面、冠层高度和仪器的观测高度有关,本研究中观测高度为40m,冠层高度大约15m,超过了冠层高度的2.5倍。与魏远^[5]等人得出源区最远点距离为3500m结果不同,主要其仪器高度为25m,冠层高度为16m,由于仪器测量高度不同而导致源区最远点的距离有差异;而顾永剑^[17]等对湿地生态系统进行源区分析得出其源区长度不超过300m,主要由于湿地的植被均为较低矮的草类植被,仪器观测高度仅为4.8m,因此造成其源区长度小于本研究。而下垫面对摩擦速率产生影响,从而对通量贡献区产生影响,在未来的研究中,特别是在地形及其复杂的情况下,探索研究出能够考虑到下垫面,地形变化等方面的源区模型并加以运用。本研究发现建筑用地及道路的源区分布贡献率也会达到5.48%,仅次于常绿阔叶林。虽然这部分对CO₂通量理论上可以忽略不计,但人为活动产生的CO₂排放会低估对该区域的森林碳汇功能。

4 结论

本文利用2017年全年浙江凤阳山针阔混交林生态系统通量塔观测资料,在保证数据质量的前提下,对其所测通量值所代表的源区分布进行分析,从而对研究区通量观测值的空间代表性作出解释,为其他森林生态系统CO₂通量研究和类似下垫面的通量源区评估提供服务 and 参考,研究发现:

研究区内全年盛行东北风和西南风,风向在东北方向的占总风频的34.16%,风向在西南方向的占总风频的46.96%;而风向是影响源区分布的主要因素,研究区的源区分布主要也在东北和西南方向,从源区的季节分布也可以看出,各季节的源区分布方向和形状基本与该季节的风向一致;当通量贡献率达到90%和80%时,通量观测值分别来自距通量塔7000m和3000m范围,且各季节的侧风向积分函数峰值均位于传感器附近,不超过150m。在大气层结不稳定条件下,湍流强度较高;稳定时,源区范围大于大气不稳定条件,主要由于大气不稳定条件直接影响了大气运动的强度,湍流形成速度与传播距离;季节尺度上,当大气条件不稳定时,源区范围从大到小排列为:秋季、夏季、冬季和春季;当大气条件稳定时源区范围从大到小排列为:冬季、秋季、春季和夏季源区贡献从大到小依次为针阔混交林、阔叶林、建筑用地及道路、杉木林、毛竹林、柳杉林、黄山松林。

参考文献 (References):

- [1] Pachauri R K. Climate change 2014[R]. Geneva, Switzerland: IPCC, 2014.
- [2] Aubinet M, Vesala T, Papale, D. Eddy Covariance: A Practical Guide to Measurement and Data Analysis. Dordrecht: Springer, 2012.

土地利用类型

黄山松林	毛竹林
建筑用地及道路	杉木林
阔叶林	针阔混交林
柳杉林	

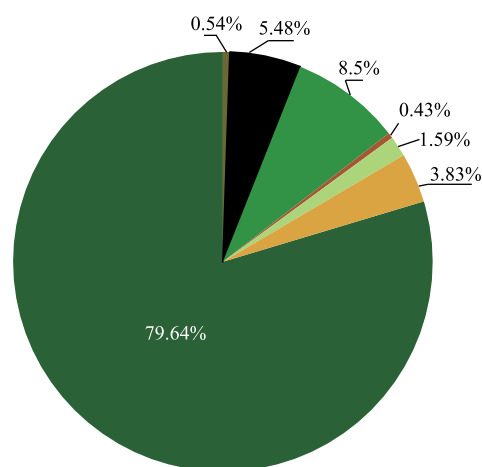


图8 不同土地利用类型的源区贡献率占比

Fig.8 Proportion of source area contribution by land use type

- [3] 于贵瑞, 张雷明, 孙晓敏, 李正泉, 伏玉玲. 亚洲区域陆地生态系统碳通量观测研究进展. 中国科学(D 辑: 地球科学), 2004, 34(S2): 15-29.
- [4] Foken T, Wichura B. Tools for quality assessment of surface-based flux measurements. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1996, 78(1/2): 83-105.
- [5] 魏远, 高升华, 张旭东, 耿绍波, 赵晓松, 江泽平, 王云龙. 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. 林业科学, 2012, 48(2): 16-21.
- [6] Kormann R, Meixner F X. An analytical footprint model for non-neutral stratification. *Boundary-Layer Meteorology*, 2001, 99(2): 207-224.
- [7] Schmid H P. Footprint modeling for vegetation atmosphere exchange studies: a review and perspective. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 113(1/4): 159-183.
- [8] Schmid H P. Source areas for scalars and scalar fluxes. *Boundary-Layer Meteorology*, 1994, 67(3): 293-318.
- [9] 冯俊婷, 胡振华, 张宝忠, 周青云, 彭致功. 涡度相关技术实测农田的通量贡献区范围分析. 灌溉排水学报, 2017, 36(6): 49-56.
- [10] Kljun N, Kastner-klein P, Fedorovich E, Rotach M W. Evaluation of Lagrangian footprint model using data from wind tunnel convective boundary layer. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, 127(3/4): 189-201.
- [11] 郑宁. 低丘山地人工林显热通量空间代表性和尺度效应的研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2010.
- [12] 龚元. 基于足迹模型的碳通量空间分异性研究[D]. 上海: 上海师范大学, 2017.
- [13] Hsieh C, Katul G, Chi T. An approximate analytical model for footprint estimation of scalar fluxes in thermally stratified atmospheric flows. *Advances in Water Resources*, 2000, 23(7): 765-772.
- [14] Kljun N, Calanca P, Rotach M W, Schmid H P. A simple two-dimensional parameterisation for Flux Footprint Prediction (FFP). *Geoscientific Model Development*, 2015, 8(11): 3695-3713.
- [15] 董军, 党慧慧, 孔凡亮, 岳宁, 王刚, 郭映, 魏国孝. 半干旱区农田生态系统通量贡献区分析. 中国生态农业学报, 2015, 23(12): 1571-1579.
- [16] 龚笑飞, 陈丽萍, 莫路锋. 基于 FSAM 模型的毛竹林碳通量贡献区研究. 西南林业大学学报, 2015, 35(6): 37-44.
- [17] 顾永剑, 高宇, 郭海强, 赵斌. 崇明东滩湿地生态系统碳通量贡献区分析. 复旦学报: 自然科学版, 2008, 47(3): 374-379, 386-386.
- [18] 楚良海, 刘文兆, 朱元骏, 李双江. 黄土高原沟壑区通量数据空间代表性研究. 地球科学进展, 2009, 24(2): 211-218.
- [19] 周梅, 郑伟, 高全洲. 珠海城郊草地通量源区分析. 中山大学学报: 自然科学版, 2018, 57(3): 24-33.
- [20] 周琪, 李平衡, 王权, 郑超磊, 徐璐. 西北干旱区荒漠生态系统通量贡献区模型研究. 中国沙漠, 2014, 34(1): 98-107.
- [21] 赵晓松, 关德新, 吴家兵, 金昌杰, 韩士杰. 长白山阔叶红松林通量观测的 footprint 及源区分布. 北京林业大学学报, 2005, 27(3): 17-23.
- [22] 吴东星, 李国栋, 张茜. 华北平原冬小麦农田生态系统通量贡献区. 应用生态学报, 2017, 28(11): 3663-3674.
- [23] 王江涛, 周剑虹, 欧强, 仲启铨, 王开运. 崇明东滩滨海围垦湿地 CO₂ 通量贡献区分析. 生态与农村环境学报, 2014, 30(5): 588-594.
- [24] 王美媛, 张秋良. 兴安落叶松林通量观测足迹与源区分布. 西北林学院学报, 2018, 33(5): 9-15.
- [25] 王美媛, 张秋良, 刘璇, 代海燕. 兴安落叶松林水热通量变化特征及空间代表性. 东北林业大学学报, 2018, 46(9): 69-74.
- [26] 龚元, 赵敏, 郭智娟, 姚鑫, 何毅, 张立平. 复杂下垫面碳通量足迹分析——以上海市奉贤大学城为例. 上海师范大学学报: 自然科学版, 2017, 46(2): 284-291.
- [27] 郭智娟, 龚元, 张凯迪, 张立平, 何毅, 徐良, 赵敏. 复杂下垫面下不透水层的 CO₂ 通量足迹分析——以上海市奉贤大学城为例. 环境科学学报, 2018, 38(2): 772-779.
- [28] 龚元, 郭智娟, 张凯迪, 徐良, 魏艳艳, 赵敏. 植被对亚热带城市生态系统 CO₂ 通量的影响. 生态学报, 2019, 39(2): 530-541.
- [29] 张凯迪, 龚元, 郭智娟, 魏艳艳, 徐良, 姚国芳, 赵敏. 2011 和 2016 年亚热带城市生态系统通量源区及 CO₂ 通量特征——以上海市奉贤大学城为例. 上海师范大学学报: 自然科学版, 2018, 47(4): 458-465.
- [30] 金莹. 杨树人工林湍流通量的印痕分析与空间代表性研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2012.
- [31] 金莹, 张志强, 方显瑞, 康满春, 查同刚, 王小平, 陈俊崎. 杨树人工林生态系统通量贡献区分析. 生态学报, 2012, 32(12): 3966-3974.
- [32] 吴志祥, 陈帮乾, 杨川, 陶忠良, 谢贵水, 周兆德. 海南岛橡胶林通量足迹与源区分布研究. 热带生物学报, 2012, 3(1): 42-50.
- [33] 陈丽萍, 李平衡, 莫路锋, 周国模, 李金荣. 基于通量源区模型的雷竹林生态系统碳通量信息提取. 浙江农林大学学报, 2016, 33(1): 1-10.
- [34] 徐小军, 周国模, 莫路锋, 杜华强, 施拥军, 胡军国, 陈丽萍. 一种面向下垫面不均一的森林碳通量监测方法. 中国科学: 信息科学, 2013, 43(10): 1342-1352.
- [35] Schmid H P, Lloyd C R. Spatial representativeness and the location bias of flux footprints over inhomogeneous areas. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1999, 93(3): 195-209.
- [36] Sogachev A, Rannik Ü, Vesala T. Flux footprints over complex terrain covered by heterogeneous forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004,

- 127(3/4): 143-158.
- [37] 孟苗婧, 郭晓平, 张金池, 赵友朋, 吴家森, 叶立新, 瞿承伟, 刘胜龙. 海拔变化对凤阳山针阔混交林地土壤微生物群落的影响. 生态学报, 2018, 38(19): 7057-7065.
- [38] 赵友朋, 孟苗婧, 张金池, 马洁怡, 刘胜龙. 不同林地类型土壤团聚体稳定性与铁铝氧化物的关系. 水土保持通报, 2018, 38(4): 75-81, 86-86.
- [39] 徐筱芃. 浙江凤阳山常绿阔叶林树种多样性及其影响因素研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2017.
- [40] 王群, 张金池, 田月亮, 叶立新, 刘胜龙. 浙江凤阳山天然混交林林分空间结构分析. 浙江农林大学学报, 2012, 29(6): 875-882.
- [41] 张洋. 浙江凤阳山不同林分土壤有机碳矿化研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2015.
- [42] Kim J, Hwang T, Schaaf C L, Natascha K, William M J. Seasonal variation of source contributions to eddy-covariance CO₂ measurements in a mixed hardwood-conifer forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 253-254(1): 71-83.
- [43] 田月亮. 凤阳山主要林分类型结构特征及其改土效应[D]. 南京: 南京林业大学, 2012.
- [44] Webb E K, Pearman G I, Leuning R. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1980, 106(447): 85-100.
- [45] Wilczak J M, Oncley S P, Stage S A. Sonic anemometer tilt correction algorithms. *Boundary-Layer Meteorology*, 2001, 99(1): 127-150.
- [46] 纪小芳, 鲁建兵, 杨军, 姜姜, 王丹, 何雪凯, 方万力. 凤阳山针阔混交林碳通量变化特征及其影响因子. 东北林业大学学报, 2019, 47(3): 49-55.
- [47] 杨诗芳, 毛裕定. 浙江省近 50 年气温变化及四季划分. 浙江气象, 2008, 29(4): 1-6.
- [48] Schmid H P. Experimental design for flux measurements; matching scales of observations and fluxes. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1997, 87(2/3): 179-200.
- [49] 张慧. 中亚热带人工林碳通量贡献区的评价研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2012.
- [50] Raupach M, Antonia R, Rajagopalan S. Rough-wall turbulent boundary layers. *Applied Mechanics Reviews*, 1991, 44: 1-.
- [51] Jarvis P G, James G B, Landsberg J J. Coniferous forest. In: *Vegetation and the Atmosphere*. London: Academic Press, 1976: 171-240.
- [52] 贾春晖, 窦晶晶, 苗世光, 王迎春. 延庆-张家口地区复杂地形冬季山谷风特征分析. 气象学报, 2019, 77(3): 475-488.
- [53] 朱明佳, 赵谦益, 刘绍民, 徐自为, 徐同仁. 农田下垫面观测通量的变化特征及其气候学足迹分析. 地球科学进展, 2013, 28(12): 1313-1325.
- [54] Kljun N, Kormann R, Rotach M W, Meixner F X. Comparison of the Lagrangian footprint model LPDM-B with an analytical footprint model. *Boundary-Layer Meteorology*, 2003, 106(2): 349-355.
- [55] Garratt J R. *The Atmospheric Boundary Layer*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1992: 1-232.
- [56] Neftel A, Spirig C, Ammann, C. Application and test of a simple tool for operational footprint evaluations. *Environmental Pollution*, 2008, 152(3): 644-652.
- [57] Wu Z X, Xie G S, Chen B Q, Yang C, Zhou Z D, Tao Z L. Fluxes footprint and source area of rubber plantation. *Agricultural Science & Technology*, 2011, 12(12): 1937-1942.
- [58] 陈世苹, 白永飞, 韩兴国. 稳定性碳同位素技术在生态学研究中的应用. 植物生态学报, 2002, 26(5): 549-560.