

兴安落叶松林通量观测足迹与源区分布

王美媛,张秋良*

(内蒙古农业大学 林学院,内蒙古 呼和浩特 100019)

摘要:基于 Korman 和 Meixner 理论提出的适用于涡动相关系统通量足迹方法,利用内蒙古自治区大兴安岭森林生态系统国家野外科学观测研究站兴安落叶松林生态系统的不同风向、大气稳定状态、生长季和非生长季通量观测数据,分析兴安落叶松林通量足迹以及贡献源区的分布,为今后大兴安岭地区兴安落叶松生态系统通量变化及影响因素对比研究提供依据。结果表明,以 80% 通量源区为测算对象,不同风向下大气处于稳定状态时,观测的通量源区主风向东北风-北风风向下面积最大,最大主风向源区面积要比不稳定时主风向源区面积大近 36%。生长季源区在任何状态时均 < 非生长季,在大气稳定状态时生长季源区面积 < 非生长季近 15%,大气不稳定状态时生长季源区面积 < 非生长季 9%。在大气处于稳定状态时不同风向下,源区横风峰值 < 不稳定状态时的峰值,源区达到峰值距离约为稳定时的 2 倍。当大气处于稳定状态时,生长季的横风积峰值和源区峰值距离均 > 非生长季。兴安落叶松林生长季时呼吸、光合作用加强,使得地与气之间的湍流物质交换频繁;主风方向通量源区面积 < 非生长季,在大气稳定状态时,湍流混合充分,通量塔的信息来自主风方向,使得通量源区面积和空间范围扩大。

关键词:兴安落叶松;大气边界层;通量足迹;源区

中图分类号:S791.222 文献标志码:A 文章编号:1001-7461(2018)05-0009-07

Flux Footprint of *Larix gmelinii* Forest and the Distribution of Source Area

WANG Mei-yuan, ZHANG Qiu-liang*

(Forestry Institute, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 100019, China)

Abstract: Based on the flux footprint method suitable for eddy correlation system proposed by Korman and Meixner theory, by using the observed data collected in growing season and non-growing season in different wind directions in Daxinganling Forest Ecological Station, the flux footprint of *Larix gmelinii* forest and the distribution of contribution source areas were investigated to provide a basis for the comparative study on the changes of ecosystem fluxes and influencing factors of *L. gmelinii* in the Greater Xing'an Mountains. The results showed that when 80% of the source area of flux was used as the calculation object, and when the atmosphere was steady under different wind directions, the area was the largest under the northeasterly-northeasterly wind direction of the main flux direction of the observed flux source area was the largest, and the area of the source area of the largest main wind direction was 36% larger than the source area of the main wind direction when unstable. Under all conditions, the source area in growth season was less than that in non-growing season, and the source area in the growing season under atmospheric stability was less than 15% in non-growing season, and the source area in growing season under the unstable atmosphere was 9% smaller than in non-growing season. When the atmosphere was in a steady state, the peak value of cross winds in the source area under steady wind conditions was less than that under unstable conditions and the

收稿日期:2017-12-12 修回日期:2018-01-09

基金项目:“十三五”国家重点研发计划“火烧及采伐迹地森林生态系统恢复和功能提升关键技术”(2017YFC0504003)

作者简介:王美媛,女,硕士,研究方向:森林可持续经营理论与技术。E-mail:adelineyuan@sina.com

*通信作者:张秋良,男,教授,研究方向:森林可持续经营理论与技术。E-mail:18686028468@163.com

peak distance in the source area was about 2 times more than that of a stable one. When the atmosphere was in stable condition, the cross wind peak area and the source area peak distance in growing season were greater than those in the non-growing season. *L. gmelinii* forest respiration and photosynthesis during growth season strengthened, making the exchange of turbulent substances between ground and gas frequent, the main wind direction flux source area was smaller than in non-growing season. Under atmospheric stability conditions, turbulents were fully mixed, flux tower received information from the main wind direction, making the flux source area and the expansion of space area.

Key words: *Larix gmelinii*; atmospheric boundary layer; flux footprint; source area

大气湍流中主要研究地与气间相互作用的过程,对气象及气候、区域水资源管理和分析等有着重要的指导作用,现阶段研究者对大气湍流的变化观测方法主要运用涡动相关法(Eddy Covariance)作为最主要的通量测量方法,在 Fluxnet 等众多研究中得到了广泛的应用^[1]。随着研究的深入,湍度相关技术的进步使得通量研究长期定位观测成为可能^[3-5]。涡动相关法采用的假设前提是定常、湍流充分发展、平均垂直速度为 0、平均时间段内无水平平流影响^[6]。在不同的大气层结稳定度、下垫面粗糙度、边界层厚度下的研究表明,生态系统通量数据的空间代表性沿上风向可达到几十米到几千米^[7-8]。足迹与通量的观测有关,反映上风向源区权重函数对观测点的影响。但是在实际测量中,特别是在复杂地形上,这种假设条件常常难以满足,从而导致数据质量下降,所得结果的准确度降低^[9-10]。目前,通量足迹分析多用涡动相关法进行观测,兴安落叶松林通量观测塔架设高度较高,用此方法适合分析较大通量观测区域足迹和贡献源区。

基于足迹分析模型(Footprint Tool)对通量足迹进行判别是对通量源区的重要分析方式。许多研究者利用不同的足迹工具对不同气候状态进行观测并分析不同生态系统的通量足迹和源区,但结合源区数据对兴安落叶松林通量空间分布进行研究的较少^[11-12]。本研究旨在对不同风向条件下和不同生长尺度下进行通量足迹和贡献源区分析,计算观测塔周围不同风向上的足迹和源区大小及生长季和非生长季变化规律,评估通量源区的空间代表性,为兴安落叶松林的通量计算与评估提供参考依据。

1 研究区概况

研究区位于内蒙古大兴安岭根河林业局潮查林场境内的兴安落叶松原始林内。地理坐标为 50°49′—50°51′N, 121°30′—121°31′E, 海拔 800~1 000 m, 地貌为低山山地, 土壤为棕色针叶林土, 有大面积连续多年冻土分布。属寒温带湿润季风性气候, 具有冬季严寒而漫长、夏季短促湿热、无霜期短的特点,

年平均气温 -0.5℃, 主要植被类型为寒温带针叶林, 地带性植被为兴安落叶松。

2 研究方法

2.1 通量观测

通量依托于内蒙古大兴安岭森林生态系统国家野外科学观测研究站, 地理坐标为 50°49′N, 121°30′—121°31′E, 海拔 848 m, 观测塔高度为 65 m, 在观测塔 60 m 处安装超风速仪(Model CSAT-3, Campbell Scientific)测定三维风速和温度脉动, 采用红外线 CO₂/H₂O 气体分析仪(Model Li-7500, Licor Inc)测定 CO₂ 与 H₂O 密度脉动。所有采样频率为 10 Hz 的原始数据均利用数据采集器 CR3000(Model CR3000, Campbell Scientific)记录和储存。观测塔配备的常规气象观测系统(RMET)包括: 7 层空气温/湿度(HMP45C, Vaisala, Finland)和风速仪(A100R, Campbell, USA), 上述数据采样频率均为 0.5 Hz, 通过数据采集器 CR1000 在线计算并存储。

2.2 数据处理

选用 2016 年 3—8 月的通量数据经过 Logger-net(CSI, USA)切割后, 将 ts 格式转换为 TOA5 格式, 再经过 Eddypro 软件进行传感器坐标旋转、频率响应修正、WPL 修正、野点剔除, 数据质量控制得到 0.5 h 的数据^[12], 此时需对获得的数据集进行筛选: 去除 10 Hz 原始数据中每 0.5 h 缺失率 > 10% 的数据; 删除夜间摩擦风速 < 0.15 m·s⁻¹ 的数据^[13-14], 得到相应数据。

2.3 通量贡献区模型及参数

2.3.1 Kormann and Meixner 的足迹推导分析
根据 Horst 和 Weil, 三维源区的顺风标量浓度的概率分布可以用函数来描述^[13]。该函数用 2 个独立的顺风标量浓度分布和水平风速垂直分布 [$u(z)$] 近似:

$$c(x, y, z) = \frac{c(x, y)c(x, z)}{\int_0^{\infty} u(z)c(x, z)dz} = \frac{c(x, y)c(x, z)}{u(x)} \quad (1)$$

式中, x 和 y 是 x 轴方向平均水平方向的水平空间变量; z 是垂直空间变量; $\bar{u}(x)$ 为羽流有效速度, 在概率论中, y 整个域的积分是 x 和 z [$c_y(x, z)$] 中顺风标量浓度的边缘 (横风积分) 概率分布, 将整合应用于双方得出:

$$c_y(x, z) = \frac{c(x, z)}{u(x)} \quad (2)$$

根据 K 理论, 对涡流扩散 [$K(z)$] 涡扩散系数垂直分布的乘积和垂直标量浓度梯度的标量通量。因此, 侧风集成足迹 [$f_y(x, z)$], 即横风集成概率通量分布为:

$$f_y(x, z) = -K(z) \frac{dc_y(x, z)}{dz} \quad (3)$$

在实际应用中分析 $f_y(x, z)$, $K(z)$ 和 $c_y(x, z)$ 必须用实测变量进行解析表示。

$$K(z) = kz^n \quad (4)$$

涡流扩散系数的垂直分布可以描述为:

$$n = \frac{z}{K(z)} \frac{dK(z)}{dz} = \begin{cases} \frac{1}{1+5z/L} & z/L > 0.1 \\ \frac{1-24z/L}{1-16z/L} & z/L \leq -0.1 \end{cases} \quad (5)$$

式中, k 是 Karman 常数 0.41, n 取决于表面层稳定性的幂指数; L 为莫宁-奥布霍夫长度 (Monin-Obukhov)。

以上方程表示在测量变量的涡流扩散系数的垂直分布。

2.3.2 Footprint Tool 的输入参数 足迹模型需要输入观测高度、冠层高度、树冠面积密度、边界层厚度、显热通量等参数^[16-20]。冠层高度、树冠面积密度由通量观测塔下样地每木检尺得到, 其中边界层厚度由 Obukhov-L 决定, 不同长度下的边界层厚度有所变化从而影响通量源区分布^[21-24], 其他输入参数由 EddyPro(6.2.0) 输出数据中得到^[25-29]。

3 结果与分析

3.1 涡动相关系统通量源区的分布

由于足迹模型主要利用大气层处于各种稳定度状态下近地层风速廓线、湍流扩散系数、廓线以及近地层的相似性, 所以在不同大气稳定度状态下, 通量源区的分布会有所不同, 源区主风向与次主风向的方向有明显的方向相反, 本研究采用数据中 Obukhov 稳定度参数区分大气稳定度, 从而不同大气稳定度 $(z-d)/L$ 下和通量源区的足迹分布和通量贡献率会有一定差异^[30-33]。本研究分别计算了在不稳定和稳定 2 种大气稳定度状态时不同风向 80% 源区范围。其中, 稳定度以 $(z-d)/L$ 为判别标准, 以

$(z-d)/L > 0.1$, $(z-d)/L < -0.1$ 将数据划分为稳定、不稳定 2 类。利用足迹模型分析不同风向上通量源区分布, 分析接近主风向和次主风向时的不同大气稳定度状态时通量源区的分布。图 1 与坐标中心的圆形图标代表装载涡动相关系统的通量塔在通量足迹源区的位置 (以图中阴影区域 80% 通量源区面积为测算对象, 以下各图标准均相同)。

3.2 源区风向特征分析

图 1 中以 22.5° 风向角度为步长, 可以看出以通量观测塔为中心的通量源区等风向和频率。在研究期间观测塔周边的主风向为东北方向。盛行东北风和北风, 其次为次主风向西南风, 其他风向频率较少, 为非主风向。主风向东北风及北风的频率为 32%、17.7%, 平均风速为 0~8、0~6 $m \cdot s^{-1}$; 次主风向西南风的频率为 19.7%, 平均风速为 0~9 $m \cdot s^{-1}$; 非主风向的频率分别为 3.74%、2.2%、2.7%、3.26%, 平均风速为 0~7 $m \cdot s^{-1}$ 。源区主风向与次主风向的方向有明显的方向相反, 从而影响通量源区的足迹分布和通量贡献率。

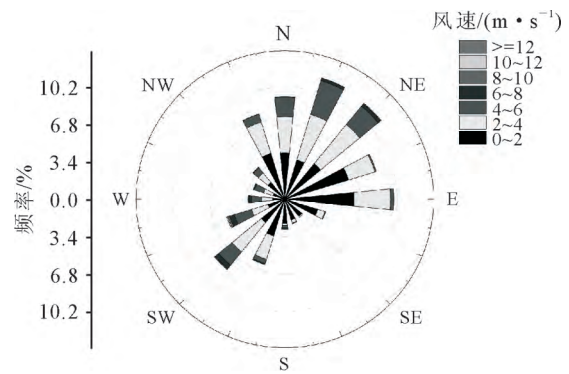


图 1 通量源区风向分布

Fig. 1 Distribution of wind direction in source area

3.3 不同风向下的通量源区分布

主风风向-东北风和北风风向下, 大气处于稳定状态时, 观测的通量源区大部分来自主风风向 (图 2 和图 3)。大气处于稳定条件时, 通量源区沿主风向狭长分布, 由图 2 测算出通量源区面积 (以 80% 通量源区) 约为 0.225 2 km^2 。大气处于不稳定条件时, 通量源区向主风向两侧扩展, 由图 3 测算出通量源区面积 (以 80% 通量源区) 约为 0.142 9 km^2 (图 3)。源区形状与大气稳定条件时趋于相似, 但明显在大气不稳定状态时的源区面积要小于稳定状态时的面积。大气处于不稳定条件时, 通量源区向西南风方向两侧扩展。

次主风向-西南风风向下, 大气处于稳定状态时, 观测的通量源区大部分来自西南风风向 (图 4 和图 5)。通量源区沿主风向狭长分布, 由图 4 测算出通

量源区面积(以 80% 通量源区)约为 0.216 3 km²。由图 5 测算出通量源区面积(以 80% 通量源区)约为 0.159 2 km²。源区形状与大气稳定条件时趋于相似,但明显在大气不稳定状态时的源区面积 < 稳定状态时的面积,源区轮廓与主风向基本相似,只是区域变为迎风方向且随风向偏移。

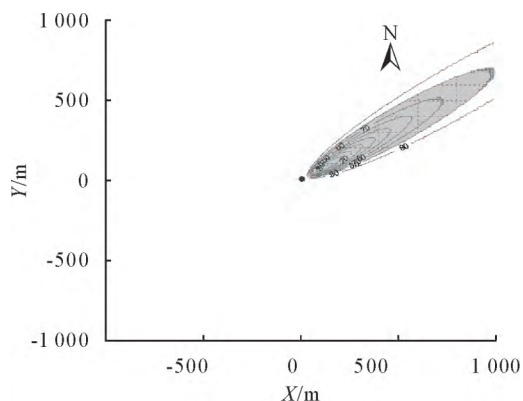


图 2 大气稳定状态时主风向通量源区
Fig. 2 Source area of main wind in stable

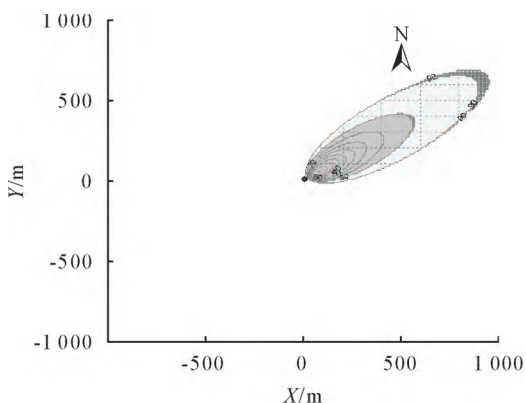


图 3 大气不稳定状态时主风向通量源区
Fig. 3 Source area of main wind in unstable

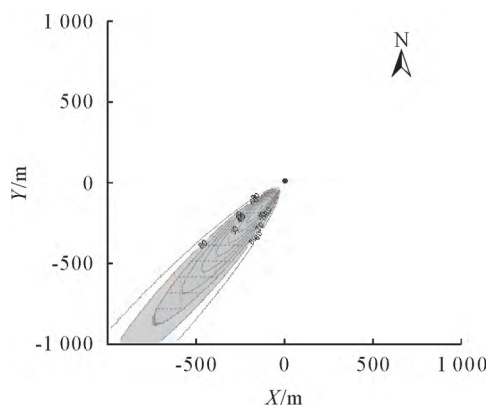


图 4 大气稳定状态时次主风向通量源区
Fig. 4 Source area of lesser wind in stable

3.4 生长季和非生长季通量源区分布

兴安落叶松林在生长季(6—8月),非生长季(3—5月)通量源区大小有明显的变化,并且随风向改

变。非生长季到生长季,源区主风向向东北方向集中和偏移(图 6、图 7),生长季主风向上的通量源区面积在大气稳定状态下 < 非生长季(图 8、图 9),由图 8 测算出非生长季通量源区面积(以 80% 通量源区)约为 0.191 2 km²。由图 9 测算出生长季通量源区面积(以 80% 通量源区)约为 0.161 08 km²。

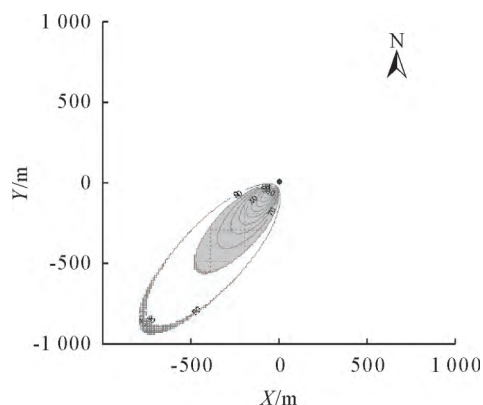


图 5 大气不稳定状态时次主风向通量源区
Fig. 5 Source area of lesser wind in unstable

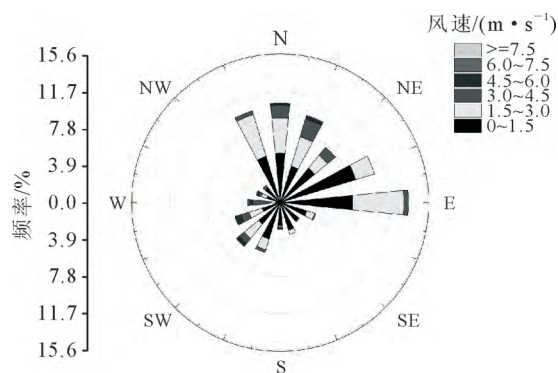


图 6 大气稳定状态时非生长季通量源区风向
Fig. 6 Source area of non growing season in stable map of wind rose

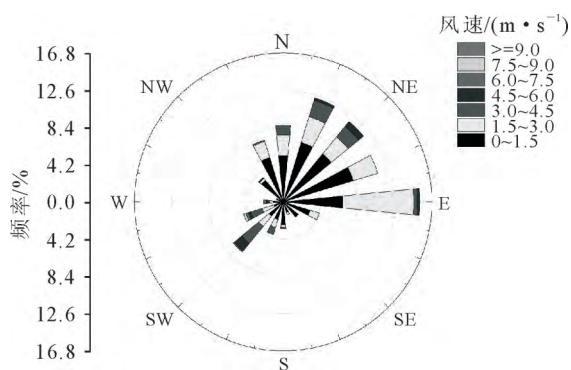


图 7 大气稳定状态时生长季通量源区风向
Fig. 7 Source area of growing season in stable map of wind rose

主风向向下生长季和非生长季的通量源区(图 10、图 11),在大气不稳定状态时受主风向影响,由图 10 算出非生长季通量源区面积(以 80% 通量源

区)约为 0.113 0km²。由图 11 测算出生长季通量源区面积(以 80%通量源区)约为0.101 7 km²。

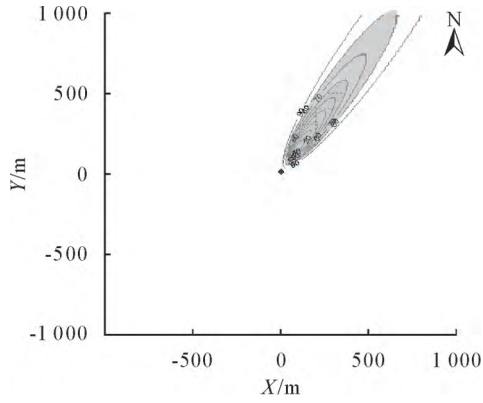


图 8 大气稳定状态时非生长季通量源区

Fig. 8 Source area of non growing season in stable

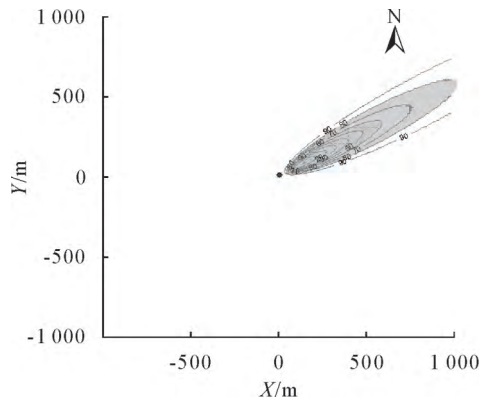


图 9 大气稳定状态时生长季通量源区

Fig. 9 Source area of growing season in stable

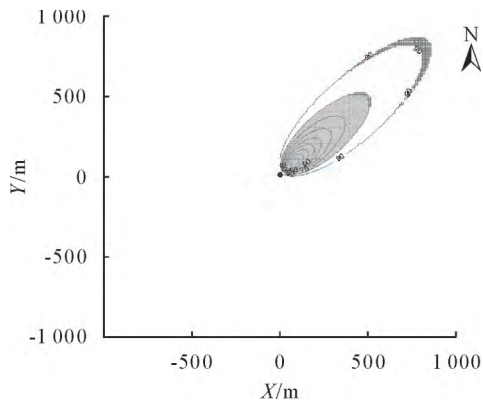


图 10 大气不稳定状态时主风向非生长季通量观测源区

Fig. 10 Source area of non growing season under main wind in unstable

3.5 集成足迹的横风积分的足迹分布

结合表 1,主风向稳定时横风积分峰值0.008<不稳定时的峰值 0.017 5,源区峰值距离 210 m>不稳定时的 90 m 距离;次主风向稳定时横风积分峰值 0.007 略小于不稳定时的峰值 0.016,源区峰值距离 266 m 大于不稳定时的 98 m 距离;生长季稳

定时主风向的横风积分峰值 0.008 小于不稳定时的峰值 0.015,源区峰值距离 215 m 大于不稳定时的 106 m 距离;非生长季稳定时主风向的横风积分峰值 0.008 明显小于不稳定时的峰值 0.013,源区峰值距离 210 m 大于不稳定时的 122 m 距离。

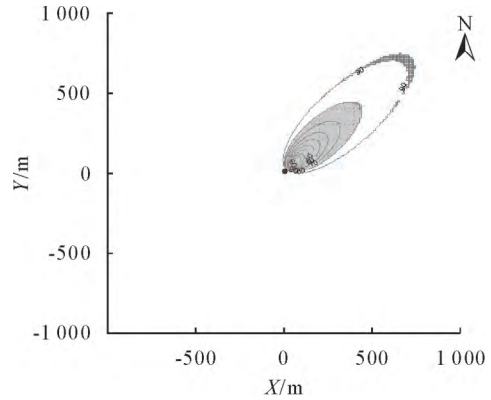


图 11 大气不稳定状态时主风向生长季通量观测源区

Fig. 11 Source area of growing season under main wind in unstable

表 1 不同风向和稳定度下的源区横风积分峰值及源区距离

Table 1 Under different direction and stability range of area peak and cross wind integrated

参数	主风向	次主风向	生长季	非生长季
P	0.008	0.007	0.008	0.008
$d(Zm/L>0.1)$	210 m	266 m	214 m	215 m
P	0.017 5	0.016	0.015	0.013
$d(Zm/L<-0.1)$	90 m	98 m	106 m	122 m

注: P 为能够达到 P 水平贡献率最小区域上的足迹函数积分; Zm 为下垫面粗糙度; Zm/L 为大气稳定度参数,根据稳定度参数划分大气层结状态。

4 结论与讨论

4.1 结论

以 80%通量源区为测算对象,不同风向下大气处于稳定状态时,观测的通量源区主风向东北风-北风风向下面积最大,最大的主风向的源区面积要比不稳定时主风向的源区面积大近 36%,风向和风速影响通量源区面积大小。生长季的源区在任何状态时均<非生长季,在大气稳定状态时生长季的源区面积<非生长季近 15%,大气不稳定状态时生长季的源区面积<非生长季 9%。在大气处于稳定状态时不同风向下,大气处于稳定状态时源区横风峰值<不稳定状态时的峰值,源区达到峰值距离约为稳定时的 2 倍。当大气处于稳定状态时,生长季的横风积分峰值和源区峰值距离均>非生长季。

4.2 讨论

根据风的主要频率和方向分为主风向和次主风向及其他风向(其他风向所占比重不足 10%不加以讨论),并计算主风向和次主风向的通量源区大小以

及影响因素,比较生长季和非生长季通量足迹变化。同时,根据李晓梅^[15]等对兴安落叶松林生长季和非生长季的划分,将3—5月划分为观测区非生长季,6—8月为生长季。采用基于KM模型原理开发的通量足迹工具估算了兴安落叶松原始林通量足迹和源区分布。了解不同时间尺度兴安落叶松林的实际地面贡献源区分布,引入通量足迹模型反映通量值测得实际地面贡献区分布。

研究发现,影响足迹分布的主要因素为大气稳定度、风向、风速、地表粗糙度等。在大气稳定状态时,湍流垂直扩散弱,以水平运动为主,源区范围延伸至上风向较远的地方,测得通量源区面积和空间范围扩大,大气处于稳定状态时源区面积达到最大 0.2252 km^2 。郑宁^[2]等运用大孔径闪烁仪(LAS)法的印痕模型研究了华北地区山丘栓皮栎,其通量源区面积的变化与大气处于稳定状态时变化趋势相一致。

通量足迹位置方向与最大主风方向一致,在不同时间尺度上,风向影响通量足迹和源区的变化,观测主风向的方向影响最大通量贡献区的位置,测得主风向非生长季源区面积为 0.1130 km^2 ,生长季的面积 0.10174 km^2 ,生长季和非生长季源区面积存在差异。由于兴安落叶松林在生长季时呼吸、光合作用增强,使得地与气之间的湍流交换频繁,物质垂直扩散加快,通量塔信息均来自通量塔近距离,通量源区小,生长季面积<非生长季。赵晓松^[21]等将Footprint模型应用于阔叶红松林中,结果表明在生长季的通量源区在任何条件小均<非生长季。

相较下,兴安落叶松林大气稳定度变化与通量源区变化趋同。兴安落叶松林生长季时呼吸和光合作用加强,使得地与气之间的物质交换频繁,生长季时在主风向上大气处于不稳定状态下生长季源区面积最小,结果与前人研究一致。

但需要说明的是通量足迹模型虽然可以较好地分析兴安落叶松林生态下垫面通量足迹和源区的分布。但通过足迹模型的计算兴安落叶松林通量足迹源区分布受到测量高度、风向、大气稳定度、温度、气候等多种因素的影响,导致不同状态时源区分布不同,如果需要更加精确地计算非均匀森林下垫面的通量源区分布及足迹特征,需进一步深入计算和修正下垫面的地形起伏因素及林木冠层对粗糙度、边界层厚度和风速等的影响以便更明确了解涡动相关通量观测。

致谢:感谢中国林业科学研究院林业研究所郑宁在足迹模型应用和通量数据处理方面的指导、解答!

参考文献:

- [1] VALENTINI R, MATTEUCCI G, DOLMAN A J, *et al.* Respiration as the main determinant of carbon balance in European forests[J]. *Nature*, 2000, 404(6780): 861-865.
- [2] 郑宁, 张劲松, 孟平, 等. 基于闪烁仪观测低丘山地人工混交林通量印痕与源区分布[J]. *地球科学进展*, 2010, 25(11): 1175-1186.
ZHENG N, ZHANG J S, MENG P, *et al.* Distribution of flux source area and footprint for the scintillation method over a mixed plantation in the hilly zone of the north China[J]. *Advances in Earth Science*, 2010, 25(11): 1175-1186. (in Chinese)
- [3] 郝彦宾, 王艳芬, 孙晓敏, 等. 内蒙古羊草草原碳交换季节变异及其生态学解析[J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2006, 36(Supp. 1): 174-82.
HAO Y B, WANG Y F, SUN X M, *et al.* Chinensis grassland in Inner Mongolia seasonal variation of carbon exchange and its ecological analysis [J]. *Science in China: Series D: Earth Science*, 2006, 36(Supp. 1): 174-182. (in Chinese)
- [4] 汪雪, 周国模, 周健, 等. 基于贝叶斯改进的人工神经网络毛竹林碳通量估算[J]. *西北林学院学报*, 2017, 32(1): 203-209.
WANG X, ZHOU G M, ZHOU J, *et al.* Estimation of phyllostachys heterocycla cv. pubescens carbon flux based on artificial neural networks improved by bayesian [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2017, 32(1): 203-209. (in Chinese).
- [5] SUYKER A E, VERMA S B. Year round observations of the net ecosystem exchange of carbon dioxide in a native tall grass prairie [J]. *Global Change Biology*, 2011, 7: 279-289.
- [6] KAIMAL J C, FINNIGAN J J. Atmospheric boundary layer flows: their structure and measurement [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1995, 121(525): 1177-1177.
- [7] SOEGAARD H, JENSEN N O, BOEGH E, *et al.* Carbon dioxide exchange over agricultural landscape using eddy correlation and footprint modelling [J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2003, 114(3/4): 153-173.
- [8] RANNIK Ü, AUBINET M, KURBANMURADOV O, *et al.* Footprint analysis for measurements over a heterogeneous forest [J]. *Boundary Layer Meteorology*, 2000, 97(1): 137-166.
- [9] HUMPHREYS E R, BLACK T A, ETHIER G J, *et al.* Annual and seasonal variability of sensible and latent heat fluxes above a coastal Douglas-fir forest, British Columbia, Canada [J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2003, 115(1/2): 109-125.
- [10] DENNIS D, BALDOCCHI C, CHRISTOPH A, *et al.* Seasonal variation of carbon dioxide exchange rates above and below a boreal jack pine forest [J]. *Agric. For. Meteorol.*, 1997, 83: 147-170.
- [11] JAMES M W, STEVEN P O, STEVEN A S. Sonic anemometer tilt correction algorithms [J]. *Boundary Layer Meteorology*, 2001, 99: 127-150.
- [12] WEBB E K. On the correction of flux measurements for effects of heat and water vapor transfer [J]. *Boundary Layer Meteorology*, 1982, 23: 251-254.

- [13] KORMANN R, MEIXNER F X. An analytic footprint model for non-neutral stratification[J]. *Boundary Layer Meteorology*, 2001, 99: 207-224.
- [14] FALGE E, BALDOCCHI D, OLSON R O, *et al.* Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 107(1): 43-69.
- [15] 李晓梅, 张秋良. 兴安落叶松林生长季碳通量特征及其影响因素[J]. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2015, 43(6): 121-128.
LI X M, ZHANG Q L. Study on carbon dioxide of the Larix gmelinii forest ecosystem and impact factors over growing season. [J] *Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition*, 2015, 43(6): 121-128.
- [16] VESALA T, KLJUN N, RANNIK U, *et al.* Flux and concentration footprint modelling: state of the art[J]. *Environmental Pollution*, 2008, 152(3): 653-666.
- [17] 张晓娟, 吴志祥, 杨川, 等. 海南岛橡胶林能量平衡研究[J]. *西北林学院学报*, 2016, 31(2): 77-85.
ZHANG X J, WU Z Y, YANG C, *et al.* Energy balance research of the rubber plantation in Hainan island[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2016, 31(2): 77-85. (in Chinese).
- [18] 吴志祥, 谢贵水, 杨川, 等, 周兆德. 海南儋州地区橡胶林碳通量特征研究[J]. *西北林学院学报*, 2015, 30(1): 51-59, 107.
WU Z X, XIE G S, YANG C, *et al.* Characteristics of carbon fluxes in a rubber plantation ecosystem in Danzhou area, Hainan Province[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2015, 30(1): 51-59. (in Chinese)
- [19] 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(02): 16-21.
WEI Y, GAO S H, ZHANG X D, *et al.* Source area in-FLUX measurements by FSAM model over the *Populus deltoides* plantation in Yueyang[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2012, 48(2): 16-21.
- [20] LECLERC M Y, THURTELL G W. Footprint prediction of scalar fluxes using a markovian analysis[J]. *Boundary Layer Meteorology*, 1990(3): 247-258.
- [21] 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(3): 17-23.
ZHAO X S, GUAN D X, WU J B, *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(3): 17-23.
- [22] 王雪, 蔡旭晖, 康凌, 等. 复杂地形湍流观测特征及通量代表性分析[J]. *北京大学学报: 自然科学版*, 2010, 46(6): 965-971.
WANG X, CAI X H, KANG L, *et al.* Assessment of turbulence state and analysis of flux footprint over complex terrain [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2010, 46(6): 965-971.
- [23] NIEUWSTADT F T M. The steady-state height and resistance laws of the nocturnal boundary layer: theory compared with cabauw observations[J]. *Boundary Layer Meteorology*, 1981, 20(1): 3-17.
- [24] 孙丙寅, 刘淑明, 孙长忠. 油松与侧柏人工幼林热量平衡的研究[J]. *西北林学院学报*, 2000, 15(4): 6-9.
SUN B Y, LIU S M, SUN C Z. Studies on energy balance in the *Pinus tabulaeforms* and *Platycladus orientalis* plantation [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2000, 15(4): 6-9. (in Chinese)
- [25] 冷清波, 周早弘. 东江源区森林系统碳汇计量[J]. *西北林学院学报*, 2013, 28(5): 254-258.
LENG Q B, ZHOU Z H. Forest carbon sink measurement in Dongjiang riverhead[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2013, 28(5): 254-258. (in Chinese)
- [26] 邢海虹. 汉江水源区土地利用碳源/汇效应的空间差异分析——以陕南为例[J]. *西北林学院学报*, 2013, 28(4): 199-203.
XING H H. Spatial-temporal differences of carbon source/sink in Hanjiang river basin upstream land use—a case study of southern Shaanxi[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2013, 28(4): 199-203. (in Chinese)
- [27] 蔡旭晖. 湍流微气象观测的印痕分析方法及其应用拓展[J]. *大气科学*, 2008, 32(1): 123-132.
CAI X H. Footprint analysis in micrometeorology and its extended applications[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2008, 32(1): 123-132. (in Chinese)
- [28] HAN S J, WEN X F, YU G R, *et al.* Net water vapour exchange over a mixed needle and broad-leaved forest in Changbai mountain during autumn[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2003, 13(4): 463-468.
- [29] 韩福贵, 孙涛, 郭树江, 等. 干旱荒漠区不同演替阶段白刺灌丛沙堆土壤呼吸特征及其影响因素分析[J]. *西北林学院学报*, 2017, 32(5): 1-7.
HAN F G, SUN T, GUO S J, *et al.* Characteristics of soil respiration of *Nitraria tan gutorum* at different succession stages in desert areas & the influencing factors[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2017, 32(5): 1-7. (in Chinese)
- [30] 赵彬清, 胡同欣, 李飞, 等. 计划火烧对阿里河兴安落叶松林土壤呼吸影响[J]. *森林工程*, 2018(4): 1-6.
ZHAO B Q, HU T X, LI F, *et al.* Effects of planned fire on soil respiration of Larix gmelinii forest in Alihe River[J]. *Forest Engineering*, 2018(4): 1-6. (in Chinese)
- [31] 窦兆一, 刘建军. 神经网络在通量观测资料插补中的应用[J]. *西北林学院学报*, 2009, 24(3): 58-62.
DOU Z Y, LIU J J. Application of artificial neural networks to interpolation and extrapolation of flux data[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2009, 24(3): 58-62. (in Chinese)
- [32] BIAN L, XU X, LU L, *et al.* Analyses of turbulence parameters in the near-surface layer at qamdo of the southeastern tibetan plateau[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2003, 20(3): 369-378.
- [33] STANHILL G. A simple instrument for the field measurement of turbulent diffusion flux[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2010, 8(4): 509-513.