

DOI:10.13759/j.cnki.dlxb.2018.09.015

兴安落叶松林水热通量变化特征及空间代表性¹⁾

王美媛 张秋良 刘璇

(内蒙古农业大学 呼和浩特 100019)

代海燕

(内蒙古生态与农业气象中心)

摘要 以兴安落叶松林为研究对象,利用涡度相关系统观测数据和气候学足迹,分析了兴安落叶松林生长季不同时间尺度水热通量的变化和通量源区的分布特征。结果表明:典型天气状态下兴安落叶松林的水热通量日变化特征呈现单峰曲线。在典型多云状态下,水热通量受云层遮挡,变化波动性较大,整体上与净辐射通量的变化趋势保持一致;在典型晴天状态下,兴安落叶松林在生长旺季水热通量达到峰值后逐渐下降。在水热通量和净辐射通量的月变化上,8月份最大风向上的通量源区面积小于9月份,兴安落叶松林生态系统处于生长旺季的源区面积小于其他时期。

关键词 兴安落叶松林;涡动相关法;水热通量

分类号 S757

Characteristics and Spatial Representation of Water Heat Flux in *Larix gmelinii* Forest//Wang Meiyuan, Zhang Qiuliang, Liu Xuan (Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 100019, P. R. China); Dai Haiyan (Inner Mongolia Ecology and Agricultural Meteorology Centre) //Journal of Northeast Forestry University 2018 46(9):69-74.

By using the eddy correlation system observation data, we studied the distribution characteristics of *Larix gmelinii* in non-growing season rain, water and heat fluxes of different time scale variations and flux source area. The water heat flux diurnal variation characteristics of *L. gmelinii* forest typical weather conditions showed a single peak curve in the condition of water quantity of typical cloudy, and the overall trend and the net radiation flux were consistent. In a typical sunny state, the water heat flux of *L. gmelinii* reached peak during the growing season, and then gradually decreased. The flux source area in August was less than that in September, and the source area of *L. gmelinii* forest ecological system in the growing season was less than that in other periods.

Keywords *Larix gmelinii*; Eddy covariance; Water and heat flux

大气湍流是大气中的一种重要运动形式,它的存在使大气中的动量、热量、水气和污染物的垂直和水平交换作用明显增强,远大于分子运动的交换强度。对大气湍流的研究,为气象及气候、区域水资源管理等有着重要的指导作用。现阶段对大气湍流的变化观测方法主要运用涡度相关法作为目前最主要的通量测量方法^[1]。水热通量是近地层大气和下垫面能量、水分的数量特征。水热通量决定生态系统小气候环境的主要特征,同时影响着区域范围内的气候^[2]。兴安落叶松林生态系统组成的下垫面较为均匀,水热交换过程简单,但对维持生态系统平衡具有重大意义。因此,深入研究不同物种、地区、季节等的水热通量及其影响因子具有科研价值^[3]。涡动相关法采用的假设前提是定常、湍流充分发展、平均垂直速度为零、平均时间段内无水平平流影响^[4]。足迹与通量的观测有关,反映了上风向源区权重函数对观测点的影响^[5-6]。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,使所得结果的准确度降低^[7-10]。

足迹模型的使用为通量空间代表性的研究提供了解决方法,基于足迹分析模型对通量足迹进行判别,是对通量源区的重要分析方式^[11-13]。许多研究者利用不同的足迹工具分析了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水热通量空间分布和变化特征研究较少^[14]。本文旨在不同风向条件下和不同生长尺度下,进行水热通量及足迹、贡献源区分析,计算观测塔周围不同风向的足迹和源区大小,评估分析通量源区的空间代表性和水热通量特征,为兴安落叶松林的通量计算与评估提供参考。

1 研究区概况

研究区位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,该区属寒温带湿润季风气候,年平均气温为-5.0℃,年降水量为400~500mm,地带性土壤为棕色针叶林土。境内最大河流为根河,湿地资源丰富。

2 研究方法

2.1 通量仪器和观测

通量观测塔位于大兴安岭森林生态站,地理坐标为N50°56'34"~E121°25'58",海拔为848m,观测塔高65m。在观测塔60m高度处(冠层3倍高

1) “十三五”国家重点研发计划(2017YFC0504003)。

第一作者简介:王美媛,女,1992年1月生,内蒙古农业大学林学院,硕士研究生。E-mail: adelineyuan@sina.com。

通信作者:张秋良,内蒙古农业大学林学院,教授。E-mail: 18686028468@163.com。

收稿日期:2018年1月10日。

责任编辑:王广建。

度)安装超风速仪(Model CSAT-3, Campbell Scientific)测定温度脉动和三维风速;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 的原始数据均使用数据采集器 CR3000(Model CR3000, Campbell Scientific)储存。观测塔安装的常规气象观测系统包括:7 层空气温度、湿度(HMP45C, Vaisala, Finland)和风速(A100R, Campbell, USA)仪,以上仪器的数据采样频率均为 0.5 Hz,通过数据采集器 CR1000 在线存储并计算。

2.2 计量方法

采用基于 KM 模型原理开发的通量足迹工具,估算兴安落叶松原始林通量足迹和源区分布。三维源区顺风标量浓度的概率分布用函数来描述,其中 x 和 y 是水平空间变量, z 是垂直空间变量,该函数用顺风标量浓度的分布和水平风速垂直分布 $u(z)$ 近似值表示。即:

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

式中: $\bar{u}(x)$ 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:

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

根据 K 理论,用涡流扩散 [$K(z)$] 与涡流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表示侧风集成足迹(即横风集成概率通量分布) $f_y(x, z)$ 为:

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

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。

涡扩散系数的垂直分布可以描述为: $K(z) = kz^n$ 。其中: k 为常数, n 表示表面层稳定性的幂指数, L 为奥布霍夫长度,由此可得:

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

2.3 典型天气选取

选择兴安落叶松林生长季作为研究时段,此阶段兴安落叶松林生态系统处于水热交换强烈,物质积累的重要时期,具有典型的代表性。通过光合有效辐射判断出两类最具代表性典型天气(晴天、多云),充分揭示落叶松林生态系统水热变化趋势。

2.4 数据处理

利用 2015 年 8—9 月生长季的通量数据,经过 Loggernet(CSI, USA)切割后,将 ts 格式转换为 TOA5 格式,再经过 Eddypro(6.2.0)软件进行传感器坐标旋转、频率响应修正、WPL 修正异常值剔除、野点剔除等数据质量控制^[18-19]。对获得的数据去除 10 Hz 原始数据中每半小时缺失率大于 10% 的数据,删除夜间摩擦风速小于 0.15 m/s 的数据^[20]。对缺失小于 2 h 的数据运用线性内插补方法插补,大于 2 h 的缺失数据运用当天内的气象数据进行平均插补^[21-22]。

水热通量特征计算用 Excel 通量时间变化和空间变化的制图分别在 Footprint Tool 中导出和 Origin 中实现。

3 结果与分析

3.1 水热通量的变化特征

3.1.1 水热通量的日变化特征

由图 1 和表 1 可知,两种典型天气状态下的水热通量变化均分布在 06:00—18:00,整体与净辐射通量(R_n)的变化规律趋同。在晴天状态下,水热通量曲线变化平缓呈单峰型的规律,日出后, R_n 由负值变为正直,12:00 达到峰值,随后减小;在多云状态下水热通量曲线整体随 R_n 变化而变化,但在多云状态下, R_n 在云层遮挡下变化复杂,所以水热通量与典型晴天状态下相比曲线变化复杂,整体上在 12:00 后达到峰值。典型晴天状态下,8 月 26 日的感热通量的峰值为 333.39 W·m⁻²,潜热通量的峰值为 432 W·m⁻²;9 月 21 日的感热通量峰值为 357.52 W·m⁻²,潜热通量的峰值为 224.37 W·m⁻²。而在典型的多云状态下,8 月 1 日的感热通量的峰值为 119.24 W·m⁻²,潜热通量的峰值为 323.84 W·m⁻²;9 月 3 日的感热通量峰值为 161.64 W·m⁻²,潜热通量的峰值为 390.05 W·m⁻²。因此,在感热通量和潜热通量日变化的基础上水热通量的变化明显。

4 个典型天气状态下,水热通量日累积值与太阳净辐射的比值,在晴天和多云状态下具有差异。在晴天状态下,感热通量所占 R_n 的比值大于多云状态下,但是潜热通量与感热通量相反。在晴天状态下,太阳的辐射加强使地表升温快,下垫面具有明显的温度梯度,从而促进冠层与大气间的湍流热输送;在多云状态下,太阳的辐射受云层遮挡以及地表的湍流输送减弱,温度梯度小,热输送缓慢。

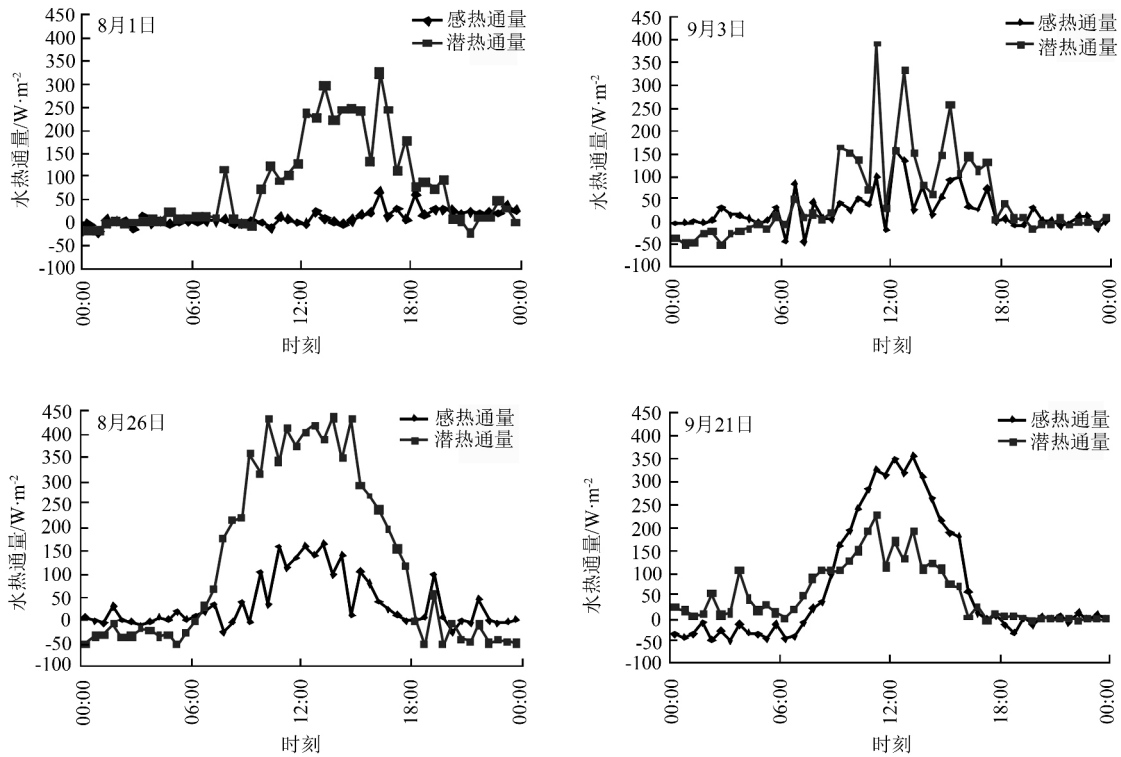


图 1 典型天气状态下水热通量的日变化态

表 1 典型天气状态下水热通量的日累积值与 R_n 的比值

| 天气状态 | 日期 | 感热通量(H)/ $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ | 潜热通量(L_E)/ $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ | 净辐射(R_n)/ $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ | $(H/R_n)/\%$ | $(L_E/R_n)/\%$ |
|------|-------|--|--|---|--------------|----------------|
| 晴天 | 08-26 | 6.76 | 14.47 | 20.23 | 33 | 71 |
| | 09-21 | 9.41 | 7.20 | 12.48 | 76 | 57 |
| 多云 | 08-01 | 2.81 | 11.33 | 16.55 | 17 | 73 |
| | 09-03 | 3.32 | 6.77 | 11.87 | 28 | 59 |

3.1.2 水热通量的月变化特征

由表 2 可知 8 月份各个时期的水热通量和 R_n 均大于 9 月份, 在 8 月下旬光合有效辐射和感热通量达的日累积值达到峰值分别为为 $15.53 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $4.93 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, 由于兴安落叶松林此时生长旺盛, 植物呼吸作用加强促进地气之间的物质交换和湍流热传输所以感热通量较高。由于 9 月下旬光合有效辐射日累积值最低为 $6.17 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, 导致植物呼吸此时研究区潜通量和感热通量低于 8 月下旬日累积值。

表 2 8、9 月份水热通量和 R_n 的日累积值

| 月份 | 净辐射/ $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ | 潜热通量/ $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ | 感热通量/ $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ |
|-------|---|--|--|
| 8 月上旬 | 10.68 | 8.03 | 1.73 |
| 9 月上旬 | 10.27 | 7.63 | 4.50 |
| 8 月中旬 | 13.18 | 8.61 | 2.41 |
| 9 月中旬 | 11.10 | 5.27 | 3.91 |
| 8 月下旬 | 15.53 | 7.42 | 4.93 |
| 9 月下旬 | 6.17 | 3.34 | 3.74 |

由表 3 看出 8 月份整体的水热通量和 R_n 均大于 9 月份 8 月的 R_n 值为 $13.13 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, 9 月

的 R_n 值为 $9.85 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, 潜热通量与太阳净辐射的比值, 8、9 月份均大于 50%, 8 月比值为 61%, 9 月比值为 54%。感热通量与太阳净辐射的比值 8 月份为 20%, 9 月上升到 44%。其上升原因是 9 月份气温下降, 导致兴安落叶松林生长呼吸作用减弱。

表 3 8—9 月份水热通量的日累积值与 R_n 的比值

| 月份 | 净辐射/ $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ | 潜热通量/ $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ | 感热通量/ $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ | $(L_E/R_n)/\%$ | $(H/R_n)/\%$ |
|----|---|--|--|----------------|--------------|
| 8 | 13.13 | 8.02 | 2.69 | 61 | 20 |
| 9 | 9.85 | 5.41 | 4.39 | 54 | 44 |

3.2 水热通量的空间代表性

3.2.1 典型天气状态下的风向及源区特征

由图 2 可知 4 个典型天气状态下风向特征, 8 月 1 日主风向相对集中于西南方向 $180^\circ \sim 247^\circ$, 日平均风速为 $2.33 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; 8 月 26 日主风向相对集中于西南方向 $180^\circ \sim 270^\circ$, 日平均风速为 $0.72 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; 9 月 3 日主风方向相对集中于东北方向 $0^\circ \sim 90^\circ$ 之间, 日平均风速为 $1.02 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; 9 月 21 日主风方向相对集中于东北方向 $0^\circ \sim 90^\circ$, 日平均风速为 $3.18 \text{ m} \cdot$

s^{-1} 。4个典型天气状态下主风向大致为东北方向和

西北方向,通量足迹在主风向有明显的分布特征。

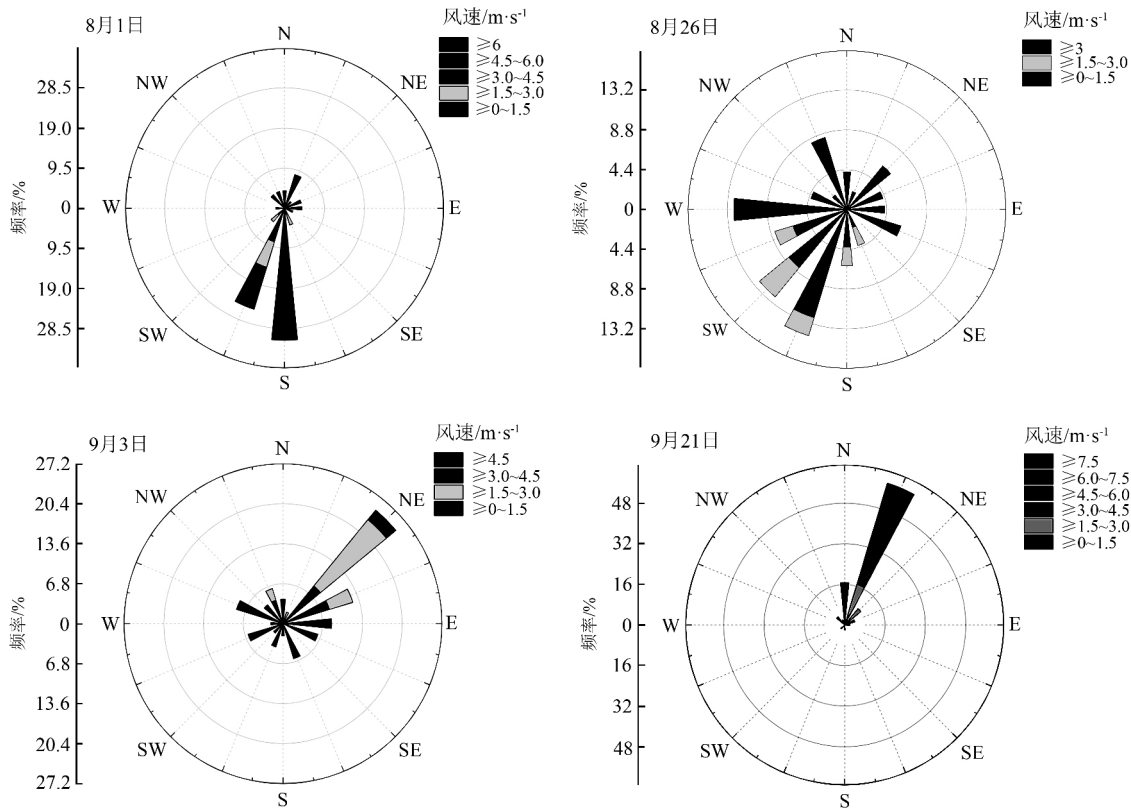


图2 典型天气状态下的风向特征

由图3可知,典型天气状态下水热通量足迹分布特征以80%通量贡献源区为测算对象,通量源区分布形态图中采用不同比例尺进行计算。4个典型天气状态下感热通量源区的面积:多云状态下,8月1日源区面积为 0.1940 km^2 ,9月3日通量源区面积为 0.0706 km^2 ;晴天状态下,8月26日源区面积为 0.0881 km^2 ,9月21日通量源区面积为 0.2355 km^2 。8月份为生长旺季,9月份与8月份相比 R_n 下降,植物呼吸作用减弱,通量源区面积有较大差异。在多云天气状态下,8月1日的源区面积大于9月3日。在大气处于不稳定状态下,平均风速较小,湍流混合不充分,地气间物质交换缓慢,量塔测得的信息来自于通量塔远处,因此,8月份生长较旺时期的源区面积大于9月份。在晴天状态下,8月26日的源区面积小于9月21日,由于在晴天状态下净辐射加强,湍流热通量交换增强,通量源区整体面积大于多云天气状态。

3.2.2 通量源区及风向月变化

由图4、图5可知,8月份风向整体在东北方向,风向频率较小,平均风速为 $1.6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,9月份观测区风速风向由明显变化偏北风居多,平均风速为 $1.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,整体上9月份风速大于8月份,对于最大风向上的通量源区面积有所影响。8月份最大风向的通量贡献源区面积为 0.0653 km^2 ,9月份最大风向

上的通量贡献源区面积为 0.1356 km^2 ,9月份的源区面积大于8月份兴安落叶松林生长旺季的面积。由此可见,兴安落叶松林生长季水热通量和 R_n 达到峰值时,通量源区的面积小于其他时期。

4 结论与讨论

4.1 水热通量的变化特征

典型天气状态下,兴安落叶松林的水热通量日变化特征呈现单峰曲线,水热通量受云层遮挡,变化波动性较大,整体上与净辐射通量的变化趋势保持一致,原因是净辐射通量作为地气交换的主要驱动因子,它的变化可以影响水热通量的变化,本研究与前人在不同生态系统下垫面的研究结果一致^[13,15]。

典型天气状态下 R_n 的分布比例在晴天和多云状态下具有差异。在晴天状态下,感热通量所占 R_n 的比值大于多云状态下,但是潜热通量与感热通量相反,由于在晴天状态下,太阳的辐射加强使地表升温快,下垫面具有明显的温度梯度,从而促进冠层与大气间的湍流热输送;在多云状态下,太阳辐射受到云层遮挡从而使地表的湍流输送减弱,温度梯度小,热输送缓慢。兴安落叶松林在8月份处于生长季,植物光合作用加强,水分蒸散剧烈。9月份水分蒸散和光合作用相对减弱,与8月相比水热交换减弱。

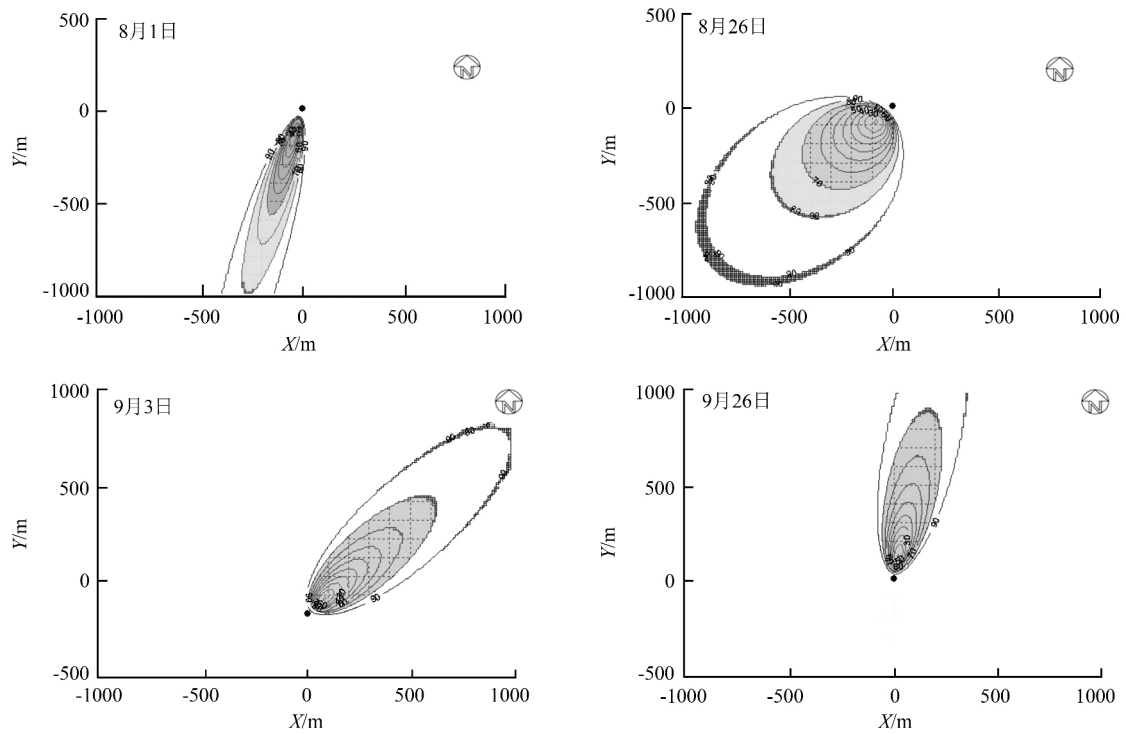


图 3 典型天态下通量源区分布

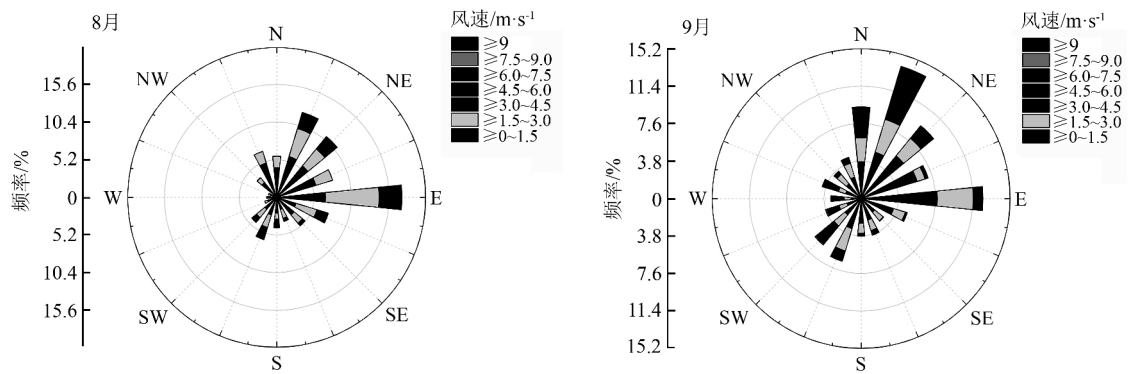


图 4 风向特征

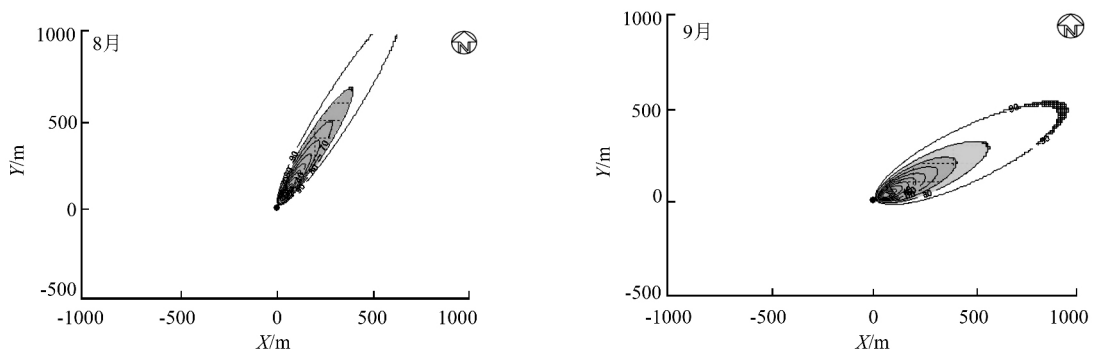


图 5 月通量源区分布

4.2 水热通量的源区变化特征

典型天气状态下感热通量源区的面积,多云状态下 8 月 1 日通量源区面积为 0.1940 km^2 , 9 月 3 日通量源区面积为 0.0706 km^2 ;晴天状态下 8 月 26 日通量源区面积为 0.0881 km^2 , 9 月 21 日通量源区

面积为 0.2355 km^2 ; 8 月份与 9 月份相比,通量源区面积差异较大。在多云天气状态下,8 月 1 日的源区面积大于 9 月 3 日,在大气处于不稳定状态下,平均风速较小,湍流混合不充分,地气间物质交换缓慢,因此 8 月份落叶松生长旺时期的源区面积大于

9月份。在晴天状态下,8月26日的源区面积小于9月21日,由于在晴天状态下净辐射加强,湍流热通量交换增强,通量源区整体面积大于多云天气状态。

在水热通量和净辐射通量的月变化上,8月份最大风向上的通量源区面积小于9月份;兴安落叶松林生态系统处于生长旺季的源区面积小于其他时期,由于净辐射通量作为主要驱动因子,晴天时受到云层干扰较小,整体生态系统光合呼吸加强,湍流交换频繁,物质混合充分,风速小,所以,通量塔测得的通量源区面积小。

参 考 文 献

- [1] SUYKER A E, VERMA S B. Year-round observations of the net ecosystem exchange of carbon dioxide in a native tallgrass prairie [J]. *Global Change Biology*, 2010, 7(3): 279-289.
- [2] 王修信. 半干旱地区草地与裸地水热通量的研究[J]. *广西师范大学学报(自然科学版)*, 2006, 24(2): 24-27.
- [3] 山仑. 植物水分利用效率和半干旱地区农业用水[J]. *植物生理学报*, 1994, 30(1): 61-66.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] BALDOCCHI D D, VOGEL C A, HALL B. Seasonal variation of carbon dioxide exchange rates above and below a boreal jack pine forest [J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 1997, 83(1): 147-170.
- [7] WILCZAK J M, ONCLEY S P, STAGE S A. Sonic anemometer tilt correction algorithms [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2001, 99(1): 127-150.
- [8] MCCAUGHEY J H. Energy balance storage terms in a mature mixed forest at Petawawa, Ontario: A case study [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1985, 31(1): 89-101.
- [9] KORMANN R, MEIXNER F X. An analytical footprint model for non-neutral stratification [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2001, 99(2): 207-224.
- [10] FALGE E, BALDOCCHI D, OLSON R, et al. Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange [J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2001, 107(1): 43-69.
- [11] 李小梅, 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 赵晓松, 关德新, 吴家兵, 等. 长白山阔叶红松林通量观测的足迹及源区分布 [J]. *北京林业大学学报*, 2005, 27(3): 17-23.
- [16] 吴志祥, 谢贵水, 杨川, 等. 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.
- [17] 李阳, 景元书, 秦奔奔. 低丘红壤区农田水热通量变化特征及气候学足迹 [J]. *应用生态学报*, 2017, 28(1): 180-190.
- [18] 卢俐, 刘绍民, 孙敏章, 等. 大孔径闪烁仪研究区域地表通量的进展 [J]. *地球科学进展*, 2005, 20(9): 932-938.
- [19] 王维真, 徐自为, 刘绍民, 等. 黑河流域不同下垫面水热通量特征分析 [J]. *地球科学进展*, 2009, 24(7): 714-723.
- [20] 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.
- [21] 彭谷亮, 刘绍民, 蔡旭晖. 非均匀下垫面湍流通量观测的印痕分析 [J]. *大气科学*, 2008, 32(5): 1064-1070.
- [22] LECLERC M Y, SHEN S, LAMB B. Observations and large-eddy simulation modeling of footprints in the lower convective boundary layer [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1997, 102(D8): 9323-9334.