林业科学研究 2013,26(2):140～144
Forest Research

文章编号:1001-1498(2013)02-0140-05

闪烁仪法测算丘陵山地人工林显热通量的参数敏感性分析

郑 宁,孟 平*,张劲松,尹昌君

(中国林业科学研究院林业研究所,国家林业局林木培育重点实验室,北京 100091)

摘要: 采用2009年5月至9月期间大孔径闪烁仪(LAS)每日连续观测数据,并基于Monin-Obukhov近地层大气相似理论,测算了地处河南省济源市的华北丘陵山地30年生栓皮栎-侧柏-刺槐人工混交林的显热通量(H),分析了H对波文比(β)、零平面位移(d)、LAS光线路径有效高度(Z_{LAS})与风速(v)、空气温度(Ta)等关键参数的敏感性。结果表明:在本研究区域,β值在0.4～4.0范围内浮动变化时,LAS法测算得到的H值影响不大;Z_{LAS}值大小浮动±20%时,H的测算值与参考值相差达35%;d数值大小浮动±50%时,H的测算值与参考值相差仅为1%;T_a值大小浮动±10%时,H的测算值与参考值仅为0.2%左右,v值大小浮动±20%时,H的测算值与参考值相差达到了10%左右。

关键词: 大孔径闪烁仪;人工混交林;显热通量;敏感性分析

中图分类号: S718.5 **文献标识码:** A

Sensitivity Analysis for Sensible Heat Flux from a Mixed Plantation Using LAS Measurements in Hilly Zone of North China

ZHENG Ning, MENG Ping, ZHANG Jin-song, YIN Chang-jun

(Research Institute of Forestry, Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation, State Forestry Administration, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: Based on the LAS data from May to September and MOST in the BLS, the sensible heat flux (H) of a 30-year-old mixed plantation in the hilly zone of the North China in 2009 was calculated. The sensitivity effects of Bowen ratio (β), zero-plane displacement height (d), beam height (Z_{LAS}), wind speed (v) and air temperature (Ta) were analyzed. The results showed that under arid and semi-arid atmosphere conditions in the study area, β was a less sensitive factor in the rang 0.4～4.0; when ZLAS fluctuated by 20%, the difference between estimated value and reference value of H was 35%; when d fluctuated by 50%, the difference was 1%; when Ta fluctuated by 10%, the difference was 0.2%; when v fluctuated by 20%, the difference was 10%.

Key words: large aperture scintillometer; mixed plantation ecosystem; sensible heat flux; sensitivity analysis

近地层水热通量一直是地学、大气科学、水文学、生态学等相关学科共同关注的热点,大尺度地表水热通量的长期观测是了解区域和全球地气作用及气候变化的关键,由于森林是陆地生态系统的主体,了解森林生态系统在地—气相互作用及全球气候变化的研究中具有重要意义。目前,涡度相关法一直被认为是一种相对标准的地面观测方法[1-2],但二者均只能提供单点或斑块尺度的测量结果,数据的

收稿日期:2011-11-26

基金项目:公益性行业(气象)科研专项(GYHY200706046);林业科技创新平台项目(2012-LYPT-DW-004);林业公益性行业科研专项(201104009-04)

作者简介:郑 宁(1981—),男,博士研究生,主要从事农林气象研究.

* 通讯作者:研究员,主要从事农林气象研究. E-mail: menping@caf.ac.cn.

空间代表性通常只有几十米至几百米,无法满足大尺度水热通量观测的应用需求[3],故属单点观测法[4-6]。自 20 世纪 70 年代以来,大孔径闪烁仪(LAS)正发展成为观测区域尺度地表水热通量的一种有效且通用的观测设备。与传统单点观测相比,闪烁仪的优势在于能够测量光线路径区域范围内的水热通量和动量[7],该方法不是简单地将观测路径上显热通量进行单纯时间尺度的平均结合,而是结合了空间和时间的平均湍流统计理论,这意味着 LAS 法的观测结果更加接近地表的实际情况[8],但 LAS 直接观测的只是光强脉动变化值,显热通量的计算需要根据 Monin-Obukhov 相似理论的计算参数和气象观测数据。由于相似理论的适用条件需要地表起伏较小,植被类型相对均匀,而实际下垫面往往地形起伏、植被分布差异较大[9],于是相似理论的适用性需要进一步讨论。因此,在较复杂立地条件下,运算参数的敏感性分析对深入了解显热通量的气象学影响机制、检验 LAS 法测算显热通量的精度等具有重要的科学意义。森林是陆地生态系统的主体,大尺度森林植被水热通量的长期观测在森林生态系统与地—气相互作用及全球气候变化的研究中具有重要意义,但至今为止,对于 LAS 法测算显热通量的敏感性分析研究较少[10-11],且主要在相对平坦均匀的地表条件下进行[12]。本研究以华北南部丘陵山地栓皮栎 - 侧柏 - 刺槐人工混交林生态系统为例,分析显热通量关键运算参数的观测精度及常数化对最终结果准确性的影响,为进一步开展 LAS 在森林生态系统水热通量的观测应用研究提供参考。

1　试验设计

1.1　试验区概况及观测点设置

2009 年主要生长季(5 月至 9 月),在位于河南省济源市的黄河小浪底森林生态系统定位研究站的人工混交林观测区进行观测研究。该区平均海拔 410 m,面积约 7 210 hm^2。观测区域属暖温带亚湿润季风气候,年平均气温 12.4 ℃,年平均降水量 641.7 mm。

在观测区中心偏西南方向 200 m 和东北方向 300 m 各安装 1 套涡动相关系统(分别简称“1 号”、“2 号”涡动相关系统),海拔分别为 412 m 和 408 m,安装高度均为距地面 30 m。在距离 1 号涡动相关系统偏西南方向约 620 m,海拔 420 m 处安装 LAS 的发射端,东北面放置接收端,相距 1 640 m(图 1)。观测区中心周围 1.8 km^2,范围内林木覆盖率为 96.0% 左右,主要树种为栓皮栎(*Quercus variabilis blume* Bl.)、刺槐(*Robinia pseudoacacia* L.)、侧柏(*Platycladus orientalis* (L.) Franco),株数所占比例分别约 81.6%、11.0% 和 7.4%,平均株高分别为 10.1、9.4、8.0 m。

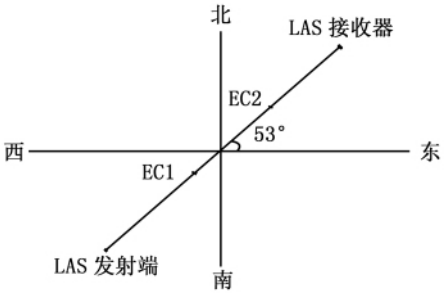

图 1　观测仪器分布示意图

1.2　主要观测内容及设备

1.2.1　大孔径闪烁仪(LAS)　本研究采用的闪烁仪为 BLS 450 型(Scintec. Inc., Germany) LAS,仪器安装高度距地面 30 m。取样频率为 1 Hz,每 1 min 输出 1 组平均值。

1.2.2　涡动相关系统　涡度相关系统主要由 CSAT3 型三维超声风速/温度仪(Campbell Sci. Inc., USA)和快速响应的 LI-7500 型开路红外 CO_2/H_2O 分析仪(Li-Cor. Inc., USA)组成,安装高度距地面 30 m。上述仪器均与 CR5000 型数据采集器(Campbell Sci. Inc., USA)相连,昼夜连续自动采集,原始数据采样频率为 10 Hz,每 30 min 输出 1 组平均值。

1 号涡动相关系统塔上还安装了微气象梯度观测系统,包括 7 层二维超声风速仪(Gill Instruments Ltd. Inc., UK)和 7 层 HMP-45C 型温湿度传感器(Vaisala. Inc., Finland)(安装高度分别为 7、10、11、13、17、24、31 m)。此外,在 17 m 高处,安装了四分量辐射表(Kipp and Zonen. Inc., The Netherlands)、AV-410BP 型气压计(Avalon. Inc., USA)等。上述仪器均与 CR10X 型数据采集器(Campbell Sci. Inc., USA)相连,每 10 min 输出一组平均值,全天 24 h 观测。

1.3　观测数据的处理

1.3.1　LAS 观测数据　LAS 观测数据质量取决于观测区域结露、降水、能见度状况等天气状况和 LAS 观测记录的大气折射指数的结构参数和信号强度等原始数据的质量。因此,首先要对 LAS 的原始观测

数据进行筛选，剔除不利天气条件对数据产生的影响。同时对数据进行饱和修正，根据计算得出本研究中上限为 $1.553e^{-10}$；并利用 LAS 观测同步输出的诊断信号对异常数据进行剔除。

1.3.2 涡动相关系统观测数据 利用观测得到的频率为 10 Hz 的原始数据，再计算得三维风速、温度、湿度、水汽浓度、气压等的半小时平均值和协方差。数据处理过程主要包括：野点剔除、延迟校正、超声虚温订正、坐标旋转、WPL 修正等；同时对观测数据进行了阈值检查、摩擦风速检验、湍流强度检验、频谱分析以及湍流的平稳性与发展充分性评价等。

1.4 计算方法

1.4.1 显热通量及其相关参数的测算方法 Panofsky 等[13] 根据 Monin-Obukhov 近地层大气相似理论，温度结构参数（C_T^2）和显热通量（H）有如下关系：

$$\frac{C_T^2(Z_{LAS}-d)^{2/3}}{T_*^2}=f_T\left(\frac{Z_{LAS}-d}{L}\right) \quad (1)$$

$$T_*=-\frac{H}{\rho_a C_p u_*} \quad (2)$$

$$u_*=\frac{ku}{\ln\left(\frac{Z_u-d}{z_{0m}}\right)-\Psi_m\left(\frac{Z_u-d}{L}\right)+\Psi_m\left(\frac{Z_{0m}}{L}\right)} \quad (3)$$

式中：Z_{LAS} 为光线路径高度，d 为零平面位移，约为平均高度的 0.63，L 为 Monin-Obukhov 长度，T_* 为温度尺度，ρ_a 为空气密度；C_p 为空气比热容；u_* 为摩擦风速，Ψ_m 为动量稳定度修正函数[14]，f_T 为与大气稳定度密切相关的普适函数。

由于 LAS 直接观测的只是光强脉动变化值（I）以及由光强对数变化计算得到的大气折射指数的结构参数（C_n^2）[15]，计算如式（4）。温度及湿度的脉动变化会引起空气密度的波动，进而导致的变化，即：与温度和湿度的结构参数有关[16]，但对于 BLS450 型 LAS 发射的 880 nm 红外波，温度变化是引起其结构参数变化的最重要因素，因此，计算式（1）中的可直接利用公式（5）计算得到[17]，

$$C_n^2=1.12\sigma_{\ln I}^2 D^{7/3}L_1^{-3} \quad (4)$$

$$C_T^2=C_n^2\left(\frac{T^2}{-0.78\times10^{-6}P}\right)\left(1+\frac{0.03}{\beta}\right)^{-2} \quad (5)$$

式中：D 为光学孔径；L_1 为发射仪与接收仪之间的距离；I 为接收到的光强；T 为大气温度；P 为大气压；β 为波文比。

1.4.2 敏感性分析方法 本文以均方根偏差（$RMSD$）和平均绝对百分比误差（$MAPD$）作为衡量指标，对显热通量运算参数进行敏感性分析。具体计算方法如下：

$$RMSD=\left|1/n\sum_{i=1}^{n}(P_i-O_i)^2\right|^{0.5} \quad (6)$$

$$MAPD=100/n\sum_{i=1}^{n}\frac{|P_i-O_i|}{\bar{O}} \quad (7)$$

式中：n 为样本数；P 为不同条件下的计算值；O_i 为参考值；$\bar{O}$ 为所有参考值的平均值。

2 结果与分析

2.1 波文比

波文比（β）为显热通量（H）和潜热通量的比值。β 通常是随时间和各地天气及下垫面的情况变化，由于湿地面的大部分能量用于蒸发，β 较小；而干地面的大部分能量以显热通量的方式进入大气，β 较大。一般认为[18]：$\beta>5$ 为干旱地区；$0.4\leqslant\beta\leqslant5$ 为半湿润半干旱地区，$\beta<0.4$ 为湿润地区。本文在以上范围内分别取 $\beta=10$、$\beta=2.65$、$\beta=0.65$、$\beta=0.3$ 时，计算得到的显热通量（H）作为参考值，讨论 β 取值对 H 计算结果的影响程度。

表1 波文比不同取值时显热通量测算值与参考值的比较

项目	β 取值			
	0.30	0.65	2.65	10.00
$RMSD$/（$W\cdot m^{-2}$）	10.09	4.03	3.97	4.26
$MAPD$/%	9.0	5.5	3.9	3.5

从表1可知：在大气湿润条件（$\beta=0.3$）下，参考值与真实值的差 9%，达到 10 $W\cdot m^{-2}$，为各条件下差异最大的情况；在大气半干旱半湿润（$\beta=2.65$、$\beta=0.65$）情况下，得到的 H 值与参考值差异较小，相差 3.9% 和 5.5%；在大气干旱条件（$\beta=10$）下，H 与参考值差异最小，为 3.5%，均小于大气湿润条件下的计算差异，这与国内外的一些研究结果基本一致[19-20]。可见，在干旱—半干旱—半湿润大气条件下，β 可以赋予 1 个定值，如 0.4～4.0 任意值，简化计算 β 对测算 H 值影响不大。由于本研究观测区域属于暖温带半干旱半湿润地区，2009 年观测区 β 值为 0.44～3.48，说明在本研究观测区，采用 LAS 法测算 H 时，可以在 0.4～4.0 范围内，对 β 赋予 1 个定值。

2.2 零平面位移和 LAS 光线路径的有效高度

LAS 光线路径有效高度（Z_{LAS}）和零平面位移（d）是反映观测区域的大气运动状态与下垫面变化

情况的重要参数。在起伏下垫面条件下,需要精确计算 Z_{LAS},实际测算过程中需要将各测量点距离光线路径的高度乘以权重函数值,推算得到 Z_{LAS}。因此,选取测量点的数量及实际位置对计算 Z_{LAS} 的精确度有影响,考虑到测量点实际观测与计算的误差,通过上下各浮动 20% 的 Z_{LAS},分析 Z_{LAS} 的取值对 H 计算结果的影响。结果表明(表 2):在 0.8 Z_{LAS} 和 1.2 Z_{LAS} 时,得到的 H 测算值与参考值差异均达到 35%,接近 30 W·m^{-2}。因此,在非平坦地表,采用 LAS 法测算显热通量时,要精确计算 LAS 光线路径有效高度。

本观测对象为栓皮栎 - 侧柏 - 刺槐人工混交林,一年当中随着叶片由生长到完全长成到凋落,树木冠层的实际高度也随之发生变化,d 变化幅度大约为 3 m。为此,本研究以冠层叶片生长中期 d = 5.5 m 为中间值,上下各浮动 50%,计算 d 的取值对 H 测算结果的影响程度,结果(表 2)表明:此时得到的 H 值与参考值差异仅为 1%。在本研究观测时期内,可直接采用观测区树冠高度(h)与 d 的经验公式(d = 0.67 h)[14],简化 d 的测算,对 LAS 法测算 H 的准确性影响不大。

表 2　零平面位移(d)和光线路径有效高度(Z_{LAS})不同取值时显热通量测算值与参考值的比较

项目	d 取值		Z_{LAS} 取值	
	50% d	150% d	80% Z_{LAS}	120% Z_{LAS}
$RMSD$/(W·m^{-2})	1.51	1.52	28.81	28.14
$MAPD$/%	0.682	0.681	35.800	35.200

2.3　主要气象参数

气压、气温及风速是 LAS 法测算显热通量的关键参数。由于气压一般变化不大,而气温和风速的脉动变化明显,因此,本文主要考虑气温及风速观测的精确度对计算结果的影响。通过气象观测数据统计分析,2009 年主要生长季 5 月至 9 月期间平均风速为 3.36 m·s^{-1},标准偏差为 1.58 m·s^{-1};平均气温为 23.3 ℃,标准偏差为 5.35 ℃,微气象学风速与温度的观测误差一般为 0.2 m·s^{-1} 和 0.2 ℃,分别是标准偏差的 13% 和 4%,因此,本文以风速和温度的平均值为中间值,分别上下浮动 20% 和 10%,计算 d 的取值对 H 测算结果的影响程度。结果(表 3)表明:气温变化 ±10% 时,计算得到的 H 值与参考值差异仅为 0.2% 左右。可见,气温的观测误差对于 LAS 显热通量的计算影响很小;而风速变化 ±20% 时,H 的计算值与参考值差异达到了 10% 左右。可见,相对于气温的观测来说,风速的精确观测对显热通量的测算精度有较大的影响。

表 3　风速和气温不同取值时显热通量测算值与参考值的比较

项目	v 取值		T_a 取值	
	80% v	120% v	90% Ta	110% T_a
$RMSD$/(W·m^{-2})	13.80	15.70	0.47	0.41
$MAPD$/%	10.50	9.80	0.15	0.18

3　结论

本研究于 2009 年 5 月至 9 月期间,采用闪烁仪法测算了地处河南省济源市的华北丘陵山地 30 年生栓皮栎-侧柏-刺槐人工混交林的显热通量(H),研究 H 对波文比、零平面位移、LAS 光线路径有效高度与风速、空气温度等关键参数的敏感性。由于本研究区域位于温带半干旱半湿润气候区,采用 LAS 法测算 H 时,可以在 0.4 ~ 4.0 范围内,对 β 赋予 1 个定值,对最终结果影响较小;LAS 光线路径经过地形起伏下垫面时,要精确计算光线路径的有效高度,否则,会导致较大误差,零平面位移对 H 的测算结果的准确性影响较小。主要气象要素中,气温的观测误差对于 H 的测算结果影响较小,而风速对 H 的测算结果影响较大,需要精确观测。

本文分别分析了显热通量对不同关键计算参数的敏感性,即在考虑某个参数变化的同时,默认其他相关参数是保持不变的,然而一个参数改变的同时,也会引起其他参数的变化,最终影响到显热通量的计算。因此,应进一步深入分析不同参数对显热通量测算精度的联合影响程度。

参考文献:

[1] 张劲松,孟　平,郑　宁,等. 大孔径闪烁仪测算低丘山地人工混交林显热通量的可行性分析[J]. 地球科学进展,2010,25(11):1283 - 1291

[2] Xuhui L, Massman W J, Law B E. Handbook of micrometeorology: a guide for surface fluxmeasurement and analysis [M]. New York: Kluwer Academic Publishers, 2005

[3] Kleissl J, Gomez J, Hong S H, *et al*. Large aperture scintillometer inter comparison study [J]. Boundary Layer Meteorology, 2008, 128: 133 - 150

[4] Beyrich F, De Bruin H A R, Meijninger W M L, *et al*. Results from one year continuous operation of a large aperture scintillometer over a heterogeneous land surface [J]. Boundary Layer Meteorology, 2002, 105: 85 - 97

[5] Meijninger W M L, Beyrich F, Ldi A, *et al*. Scintillometer Based

turbulent fluxes of sensibleand latent heat over a heterogeneous land surface [J]. Boundary Layer Meteorology, 2006, 121: 89 – 110

[6] Von Randow C, Kruijt B, Holtslag A A M, *et al*. Exploring eddy covariance and large aperture scintillometer measurements in an amazonian rain forest [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2008, 148(4): 680 – 690

[7] Hutt D L, Trepanier F. Surface layer turbulence measured with the Scintec SLS-20 scintillometer [J]. SPIE, Atmospheric Propagation and Remote Sensing IV, 1995, 2471(461): 461 – 470

[8] Hartogensis O K. Exploring Scintillometry in the Stable Atmospheric Surface Layer [D]. Wageningen: Wageningen Universiteity, 2006

[9] Meijninger W M L, Hartogensis O K, Kohsiek W, *et al*. Determination of area-averaged sensible heat fluxes with a large aperture scintillometer over a heterogeneous surface-Flevoland field experiment [J]. Boundary-Layer Meteorology, 2002, 105: 37 – 62

[10] 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(4)：246 – 257

[11] 卢 俐. 地表感热通量的观测、影响因子和尺度关系的研究 [D]. 北京：北京师范大学，2008

[12] Kohsiek W, Meijninger W M L, De Bruin H A R, *et al*. Saturation of the large aperture scintillometer [J]. Boundary-Layer Meteorology, 2006, 121: 111 – 126

[13] Panofsky H A, Dutton J A. Atmospheric Turbulence: Models and Methods for Engineering Applications [M]. New York: Wiley-Interscience Publ, 1984: 397

[14] Foken T. Micrometeorology [M]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2006

[15] 宋正方. 应用大气光学基础 [M]. 北京：气象出版社，1990：67 – 125

[16] Wang T, Ochs G R, Clifford, S F. A saturation-resistant optical scintillometer to measure C_n^2 [J]. Journal of Optical Society of America, 1978, 68(3): 334 – 338

[17] Weseley M L. The combined effect of temperature and humidity fluctuations on refractive index [J]. Journal of Applied Meteorology, 1976, 15: 43 – 49

[18] Roland B S. An introduction to boundary layer meteorology [M]. London: Kluwer Academic Publishers, 1988

[19] Meijninger W M L, Hartogensis O K, Kohsiek W. Determination of area-averaged sensible heat fluxes with a large aperture scintillometer over a heterogeneous surface-Flevoland field experiment [J]. Boundary-Layer Meteorology, 2002a, 105: 37 – 62

[20] 卢 俐，刘绍民，徐自为，等. 不同下垫面大孔径闪烁仪观测数据处理与分析 [J]. 应用生态学报，2009，20(2)：171 – 178