

doi:10.3969/j.issn.1000-6362.2018.06.003

张功, 张劲松, 孟平, 等. 双波长交互法测算华北人工林平均水热通量的应用分析[J]. 中国农业气象, 2018, 39(6):380-389

双波长交互法测算华北人工林平均水热通量的应用分析^{*}

张 功^{1,2}, 张劲松^{1,2**}, 孟 平^{1,2}, 郑 宁^{1,2}

(1.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; 2.南京林业大学南方现代林业协同创新中心, 南京 210037)

摘要: 基于红外-微波闪烁仪方法 (Optical-Microwave Scintillometer, OMS), 对华北低丘山地人工林生态系统进行热量通量观测, 并比较 OMS 估算结果与涡动相关系统 (Eddy Covariance, EC) 观测结果的差异, 分析 OMS 方法的估算结果对能量平衡的影响, 探讨影响 OMS 观测结果的影响因子。结果表明, OMS 系统观测的显热通量与 EC 观测结果具有良好的一致性, 但观测的潜热通量比 EC 观测结果高估约 28%。由于对潜热通量的高估, OMS 系统在观测研究中存在过闭合现象, 超出幅度约 5%。分析认为, 波文比、风速对 OMS 观测影响显著。OMS 作为新兴的水热通量观测方法, 可以直接同时测算出区域尺度水平上显热通量和潜热通量, 缩短了采样间隔, 统计不确定性减小, 有助于更精确地测量热量通量, 深入研究能量闭合问题。

关键词: 微波闪烁仪; 大孔径闪烁仪; 波文比; 源区; 能量平衡比率; 蒸散; 人工林

Application of Two-wavelength Bichromatic Correlation Method to Calculate the Average Surface Energy and Water Vapor Fluxes in Plantation North China

ZHANG Gong^{1,2}, ZHANG Jin-song^{1,2}, MENG Ping^{1,2}, ZHENG Ning^{1,2}

(1. Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry/Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation of State Forestry Administration, Beijing 100091, China; 2. Co-Innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037)

Abstract: A field campaign which measuring heat fluxes based on the optical-microwave scintillometer (OMS), was conducted in the plantation ecosystems in the hilly area of North China. The differences between the results of OMS and Eddy Covariance (EC) system were compared in details, the impact of OMS results on the energy balance was estimated, and affecting factors of OMS were also discussed. Results showed that, the sensible heat flux observed by OMS is in favorable consistency with the EC observations, while the latent heat flux estimated by the OMS system is overvalued by 28%. The energy balance observed by the OMS system was over-closed and with an excess of 5%, because of the overestimation of latent heat flux. Bowen ratio and wind speed have great influences on the OMS. As a new method for measuring surface energy and water vapor fluxes, OMS can simultaneously and directly measuring sensible heat flux and latent heat flux at the regional scale, shortening the sampling interval, reducing the statistical uncertainties, contributing to a more accurate measurement of the heat flux and benefit for the further research of the energy balance.

Key words: Microwave scintillometer; Large aperture scintillometer; Bowen ratio; Source area; Energy balance ratio; Evapotranspiration; Plantation

* 收稿日期: 2017-11-13 **通讯作者。E-mail: cafzhangjs@163.com

基金项目: 国家重点研发计划“生态系统水热关键参量监测设备研制”(2016YFC0500101); 国家自然基金“闪烁仪法测算森林生态系统显热通量不确定性的研究”(31500363); 中央级公益性科研院所基本科研业务费“闪烁仪法测算区域水热通量不确定性的研究”(CAFYBB2016QB001)

作者简介: 张功 (1989—), 博士生, 主要从事林业气象、林业生态等研究。E-mail: 12720484zg@sina.cn

蒸散(Evapotranspiration)是全球水量平衡的重要组成部分, 当其被作为潜热通量时, 又与显热通量构成了全球能量平衡的重要组成部分, 因此, 在全球气候变化的背景下, 对蒸散的观测, 特别是区域尺度平均蒸散的观测显得尤为重要^[1-2]。传统的蒸散观测以波文比-能量平衡法(Bowen ratio energy balance)、梯度迭代法(Profile iteration method)、空气动力学方法(Aerodynamic method)、涡动相关方法(Eddy Covariance, EC)以及蒸渗仪法(Lysimeter)等为主, 对于中小尺度蒸散的计算、观测研究成果丰硕, 其中涡动相关方法因其准确快速的优点常被用作蒸散观测的标准^[3-5]。随着全球气候环境的变化以及流域水文研究的需要, 区域尺度的蒸散研究越来越受到重视^[6]。遥感模型法可根据经验或半经验模型对区域尺度进行蒸散的估算, 但模型对蒸散过程中许多关键要素的参数化计算方法尚不成熟, 遥感模型结果还须结合地面观测数据进行验证改进, 模型参数也需要结合地面实测数据进行优化^[7]。若将传统观测结果扩展到区域尺度, 除了需考虑下垫面异质性的影响, 还需考虑大气状态的平稳性、湍流的发展以及局地微气象条件的差异。因此, 对区域平均蒸散的观测仍为相关研究的瓶颈。利用近红外波段与微波波段联合(双波长方法)观测的技术为直接实现区域尺度蒸散的估算带来了希望。该技术不仅弥补了传统方法, 如涡动相关法的空间代表性不足, 同时也为遥感模型的地面验证提供了的尺度匹配的实测数据, 因而在地表能量观测中表现出巨大的潜力。

利用近红外波段与微波波段联合的方法估算区域尺度湍流通量的技术, 虽然早在20世纪70年代就已提出, 但很难找到仅对湿度波动敏感的波动, 且该技术要求高、成本昂贵, 以往研究利用的设备多由实验室研制, 商品化仪器甚少, 且多利用双波长假设方法(Hill双波长方法)进行区域通量估算。双波长方法首次由Hill提出, 通过假设 r_{Tq} 取值等方法概括了该技术的完整计算过程(双波长假设法)。Meijninger等^[8]通过实验验证了双波长方法测算水热通量的可行性, 并得出理想结果。Ward等^[9]在英国Swindon城郊区域利用双波长方法研究水热通量, 测量结果变化趋势明显, 与涡动相关方法结果一致性较高。国内关于双波长方法的研究并不常见, 舒婷^[10]采用双波长假设法在中国北方草原下垫面条件下进行区域蒸散的测量研究, 结果表明双波长方法得到的显热通量与涡动相关方法测量结果相关系数为

0.96, 潜热通量的相关系数达到0.76。上述研究大多基于假设 r_{Tq} 的方法进行双波长测算, Meijninger等^[8]研究发现, r_{Tq} 在研究中通常位于-0.5~0.9, Mei等^[11]在半干旱区研究发现, 双波长方法在实际测量中受到 r_{Tq} 的限制。Lüdi等^[12]认为通过假设 r_{Tq} 的方法并不能真实反映出波文比, 从而提出可以实时测算 r_{Tq} 的双波长交互法。

由于很难选择出仅对湿度波动敏感的波动, 考虑到技术的复杂性以及成本问题, 双波长方法对通量的估算仅在部分实验室进行, 且研究多采用双波长假设法进行区域通量估算。2015年德国RPG公司生产出首套商业化微波闪烁仪(Microwave Scintillometer, MWS), 才使得双波长方法在大范围运用成为可能。基于RPG公司生产的MWS与大孔径闪烁仪(Large Aperture Scintillometer, LAS)相联合, 采用双波长交互测量的方法进行工作, 即红外微波闪烁仪方法(Optical-Microwave Scintillometer, OMS), 在已公开的文献中, 有关利用OMS进行通量的观测实验并不常见。本研究基于OMS方法, 在华北低丘山地人工林生态系统展开关于蒸散的观测研究, 比较OMS估算结果与EC观测结果差异, 并分析OMS方法的估算结果对能量平衡的影响, 深入分析影响OMS观测结果的因子, 旨在探明OMS观测过程中存在的不确定性, 以期为进一步研究区域蒸散、能量闭合问题提供科学依据, 同时也为后续双波长方法的研究奠定基础。

1 材料与方法

1.1 OMS 原理及方法

双波长即红外微波闪烁仪交互测量系统(OMS), 由大孔径闪烁仪(LAS)和微波闪烁仪(MWS)两个分系统组成, 每个分系统均包括接收端和发射端。发射端发射出特定波长的光波, LAS波长为880nm, MWS波长为1.86mm, 在传播过程中受大气湍流的影响而发生光信号强度变化, 接收端根据光强的变化测出空气折射指数结构参数(C_n^2)。其计算式为

$$C_{n,LAS}^2 = 1.12\sigma_{lnI}^2 D^{7/3} L^{-3} \quad (1)$$

$$C_{n,MWS}^2 = 2.015\sigma_{lnI}^2 K^{-7/6} L^{-11/6} \quad (2)$$

$$C_{n,OMS}^2 = A k^{7/6} L^{11/6} \sigma_{lnI}^2 \quad (3)$$

式中, $C_{n,LAS}^2$ 是LAS测算出的空气折射指数结构参数($m^{-2/3}$); σ_{lnI}^2 为接收光强信号的自然对数方差; D为闪烁仪的孔径尺寸(0.15m); L为光路长度

(1.63km); $C_{n,MWS}^2$ 为 MWS 测算出的空气折射指数结构参数 ($m^{-2/3}$); k 为空间波数 ($2\pi/\lambda$, λ 为波长, m); $C_{n,OMS}^2$ 为 LAS 与 OMS 测量的交互空气折射指数结构参数 ($m^{-2/3}$)。A 为待定系数, 与 LAS、MWS 的路径长度以及 LAS 与 MWS 仪器的中心距离有关, 具体计算参考 Lüdi 等^[12]。

C_n^2 可表示为温度结构参数 (C_T^2)、湿度结构参数 (C_q^2) 以及温湿度交互结构参数 (C_{Tq}) 的方程, 即^[12-13]

$$C_n^2 = \frac{A_T^2}{\bar{T}^2} C_T^2 + \frac{2A_T A_q}{\bar{T} q} C_{Tq} + \frac{A_q^2}{q^2} C_q^2 \quad (4)$$

式中, C_T^2 、 C_q^2 和 C_{Tq} 是未知数, \bar{T} 为空气平均温度 (K); \bar{q} 表示空气的平均相对湿度 ($kg \cdot kg^{-1}$), A_T 、 A_q 分别为温度、湿度结构参数系数。按照 Lüdi 等^[12]计算方法, C_T^2 、 C_q^2 和 C_{Tq} 分别为

$$\begin{pmatrix} C_T^2 \\ C_{Tq} \\ C_q^2 \end{pmatrix} = M^{-1} \begin{pmatrix} C_{n,LAS}^2 \\ C_{n,MWS}^2 \\ C_{n,OMS}^2 \end{pmatrix} \quad (5)$$

式中, M^{-1} 为逆矩阵, 表达式可参考文献[12]。

根据莫宁–奥布霍夫相似理论 (MOST), 空气的温度、湿度结构参数与稳定度函数 f 存在如下关系

$$\frac{C_T^2(z-d)^{2/3}}{\bar{T}_*^2} = f_T \left(\frac{z-d}{L_{MO}} \right) \quad (6)$$

$$\frac{C_q^2(z-d)^{2/3}}{q_*^2} = f_q \left(\frac{z-d}{L_{MO}} \right) \quad (7)$$

式中, z 为有效高度 (m), d 为零平面位移 (m), T_* 为温度变量 (K), q_* 为湿度变量 ($kg \cdot kg^{-1}$), f_T 为 MOST 普适函数, L_{MO} 为奥布霍夫长度。其中

$$L_{MO} = -\frac{u_*^2 \bar{T}}{gkT_*} \quad (8)$$

式中, g 为重力加速度 ($9.81 m \cdot s^{-2}$), u_* 为摩擦风速 ($m \cdot s^{-1}$), k 为 von Karman 常数 (0.4)。由于 L_{MO} 受 H 和 u_* 的影响, 上述公式通常无法得出 H 或 LE 的解析解, 对于红外–微波双波长工作方式的光闪烁法需进行如下迭代运算。

$$H = -\bar{\rho} c_p u_* T_* \quad (9)$$

$$LE = \frac{\bar{\rho}}{(1-q)} L_v u_* q_* \quad (10)$$

式中, $\bar{\rho}$ 为空气密度 ($1.2 kg \cdot m^{-3}$), c_p 为空气比

热 ($1005 J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$), \bar{q} 是空气的相对湿度 ($kg \cdot kg^{-1}$), L_v 是蒸发潜热 ($kJ \cdot kg^{-1}$), H 为显热通量 ($W \cdot m^{-2}$), LE 是潜热通量 ($W \cdot m^{-2}$)。

1.2 研究区域概况

研究地点位于河南黄河小浪底森林生态系统国家野外定位观测研究站南山观测区。该定位研究站位于河南省济源市, 地处黄河中游, 太行山南端, 站区中心地理坐标为 ($35^{\circ}01'N$, $112^{\circ}28'E$), 平均海拔 410m, 面积约 $7210 hm^2$ 。区域树种以栓皮栎 (*Quercus variabilis* Blume)、侧柏 [*Platycladus orientalis* (Linn.) Franco cv. *Orientalis*]、刺槐 (*Robinia pseudoacacia* Linn) 人工纯林 3 个树种的针阔混交林为主, 所占面积比例分别约 81.6%、7.4% 和 11.0%, 平均株高分别为 10.1m、8.0m 和 9.4m(2016 年)。属暖温带亚湿润季风气候, 年平均气温 $12.4^{\circ}C$, 全年日照时数为 2367.7h, 年平均降水量 641.7mm。受季风气候的影响, 降水季节性分配不均匀。5–9 月平均降水量为 438.0mm, 占全年的 68.3%。主要生长季节 (5–9 月) 风向东北偏东、西南为主。

1.3 观测系统布置

双波长即红外微波闪烁仪交互测量系统 (OMS) 安装在观测区中的西南–东北走向, 系统发射端与接收端之间直线距离 1.63km。发射端距离地面 32.6m, 接收端距离地面 9.8m, 观测有效高度为 27.3m。具体安装方式如图 1 所示。大孔径闪烁仪 (LAS, 型号 BLS900, 德国产) 与微波闪烁仪 (MWS, 型号 RPG-160, 德国产) 采用横向交叉安置, 两个发射端中心相距 0.4m, 两个接收端中心相距 0.3m, 安装方式可参考文献[12]。MWS 固定采样频率为 1000Hz, 为了最大限度获取 LAS 观测信号, LAS 采用最高发射频率 (125Hz)。气象数据由 MWS 自带气象站 (Vaisala, 型号 WXT-520, 芬兰产) 观测。在近 OMS 光路的中间位置处安装净辐射传感器 (Kipp&Zonen, 型号 CNR-4, 荷兰产)。

涡度观测 (EC) 系统安装在光路中间 (图 1), 靠近 OMS 发射端, 主要包含 CSAT3 三维超声风温计 (美国产) 和 LI-7500 开路式红外 CO_2/H_2O 分析仪 (美国产) 以及 5cm 土壤热通量板。EC 安装在距地面 30m 处, 净辐射安装在距地面 16m 处。EC 采样频率为 10Hz, 其它常规气象参数采样间隔为 10min。气象参数的观测均采用 CR5000 型数据采集器 (Campbell Sci. Inc., USA) 昼夜连续自动采集。

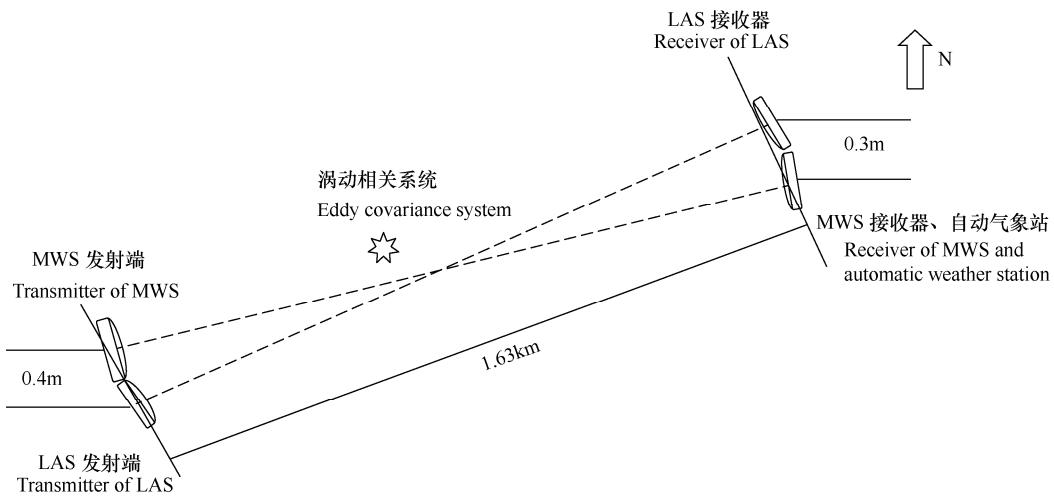


图 1 观测系统仪器布置示意图
Fig. 1 Set-up of laboratory instruments

1.4 数据质量控制

观测时间为 2015 年 9 月 5 日-11 月 9 日。由于 OMS 只输出白天 (6: 00-19: 00) 数据, 由实验期间观测结果可知, 在 7: 00 之前、18: 00 之后 OMS 输出的数据波动较大 (相邻分钟间隔内显热通量正负交叉变化), 为确保数据有效性, 仅筛选出 7: 30-17: 30 的观测数据进行分析。根据自动气象站的观测结果, 剔除降雨时刻数据, 同时对 OMS 信号不稳定或信号强度偏低的数据进行剔除。由于 MWS 波长较大 (1.86mm), 在本次研究观测中不受信号饱和的影响, 因此, 仅对 LAS 进行饱和质量控制。根据 $0.193L^{-8/3}\lambda^{1/3}D^{5/3}$ (L 为光路径长度, 1634m, λ 是 LAS 的波长, 为 880nm, D 是 LAS 的孔径尺寸, 为 0.15m) 剔除 BLS900 的饱和值, 根据 BLS900 的诊断文件进行野点剔除, 并删除同时刻 MWS 的观测数据。观测数据存储时间间隔为 1min, 后期处理时间间隔为 30min, 经上述质量控制后得到 OMS 数据样本量为 3890。

EC 数据处理主要包括降雨时刻数据剔除、野点剔除、延迟时间校正、坐标旋转 (平面拟合法)、大气密度效应的修正 (WPL 修正) 等^[14], EC 直接输出 30min 平均值。EC 与 OMS 观测时间不匹配的数据也被剔除, 如 OMS 系统无夜间数据输出, 因此, EC 在夜间的观测数据也被剔除。

1.5 源区分析

通量源区是指对通量值有主要贡献的下垫面区域, 主要与观测高度、大气稳定度、风速风向等因素有关^[15-16]。根据 Kormann 等^[17]理论先计算出 EC

的源区分布, 再根据 OMS 路径权重函数求得 OMS 系统的源区分布。

EC 单点的累积足迹为

$$f = \frac{1}{\Gamma(\mu)} \frac{\xi^\mu}{x^{1+\mu}} e^{-\xi/x} \quad (11)$$

侧向风分布函数为

$$D_y(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{y^2}{2\sigma^2}} \quad (12)$$

由式 (11)、式 (12) 可得 EC 源区为 $\phi = D_y f$,

其中, Γ 为伽马函数, x 为距离观测点的上风向距离 (m), μ 表示浓度随风速与湍流强度的扩散系数, ξ 表示通量随高度的变化程度, y 表示 x 位置所对应的高高度, σ 表示浓度随风速的变化程度, 主要与风速有关。

OMS 权重函数 $W(x)$ 表示光路路程上每个点对 OMS 观测结果的贡献程度, 其表示形式为

$$W(x) = 4\pi^2 v^2 \int_0^\infty v \phi(v) \sin^2 \left[\frac{v^2 x (L-x)}{2vL} \right] \cdot \left[\frac{2J_1(m_1)2J_1(m_2)}{m_1 m_2} \right] dv \quad (13)$$

其中

$$\phi(v) = 0.033 v^{-\frac{11}{3}} \quad (14)$$

$$m_1 = 0.5vD \frac{x}{L} \quad (15)$$

$$m_2 = 0.5vD(1 - \frac{x}{L}) \quad (16)$$

式中, v 为 OMS 的空间波数, v 为湍流谱空间的波数, L 为光路径长度 (m), D 是 OMS 的直径, J_1

为一阶贝塞尔函数。因此, 可确定 OMS 的足迹模型为

$$f_{OMS}(x',y') = \int_{x_1}^{x_2} W(x) f(x-x',y-y') dx \quad (17)$$

式中, x_1 、 x_2 表示 OMS 发射端和接收端的位置, (x, y) 表示光路程上的点, (x', y') 表示光路径点上风区域的点坐标。在实际应用中常用足迹函数的不同水平等值线所包围的区域表示通量来源范围。等值线通常指达到某一水平的通量值在最小区域上的积分函数。本研究中通量值的等值线取 90%、80%、70%、60%、50%。

2 结果与分析

2.1 OMS 系统水热通量及其影响分析

2.1.1 30min 水热通量

由图 2a 可见, 全观测期内(2015 年 9 月 5 日~11 月 9 日)每日 7:30~17:30, OMS 系统与 EC 系统估算的每 30min 显热通量 (H) 均在 $0\sim350\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 范围, 两者线性回归方程的决定系数 (R^2) 为 0.75, 线性回归系数为 1.05, 说明 OMS 系统所观测的 H 比 EC 系统偏高约 5%。从散点的聚焦程度看, 大部分数值小于 $100\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$, 且在 1:1 线附近; 大于 $100\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 数据点相对较分散。由图 2b 可见, OMS 系统与 EC 系统观测的每 30min 潜热通量 (LE) 在 $0\sim600\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 范围内, 线性回归方程的决定系数 (R^2) 为 0.66, 线性回归系数为 1.28, 表明 OMS 系统估算的 LE 比 EC 系统偏高约 28%。由图还可见, 当 LE 大于 $300\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 时数据点的离散程度较大。

2.1.2 通量源区的分布

通量源区主要受风速、风向以及观测高度等因素的影响, 根据观测高度以及气象站观测的相关气

象参数得出观测期间风向分布如图 3a 所示。由图可见, 西风与西南风为整个观测期间的盛行风向, 根据盛行风向, 结合式 (11)~式 (17), 取平均风速 $2.5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 摩擦速度 $0.4\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 稳定度为 -3.4 时 EC 和 OMS 的观测源区分布如图 3b 所示。从源区分布可以看出, OMS 的通量源区基本完整覆盖了 EC 通量源区。结合图 2a 可知, 当 OMS 与 EC 的通量源区重叠区域较多时, 二者观测得出的显热通量较接近。从图 3b 可以看出, 沿 OMS 光传播方向, EC 通量源区的 90% 位于 OMS 通量源区范围, OMS 采用相对湿度表示空气中水汽含量, 而 EC 采用水汽密度表示空气中水汽含量, 由于 EC 和 OMS 观测通量源区的不同, 受到气压、气温等影响, 二者的观测结果差异较大。

2.1.3 不同波文比下的水热通量

图 4 是不同波文比条件下, OMS 与 EC 观测的每半小时通量比较。图中所示, 波文比对 OMS 估算的热量通量影响显著。由 4a 可知, 当波文比为 0.75 时, OMS 估算的显热通量比 EC 的测量结果高 9% 左右; 而波文比变为 1.03 时, OMS 结果比 EC 测量值高出 2% 左右, R^2 也由 0.72 变成 0.91, 说明 OMS 与 EC 观测的每 30min 显热通量 (H) 具有良好的一致性, 且当波文比较大时, OMS 估算的 H 离散程度较小。图 4b 表明, 与 H 相比, OMS 估算的每 30min 显热通量 (LE) 受波文比的影响较大, OMS 估算的 LE 与 EC 观测结果相比, 均出现不同程度的高估, 当波文比为 0.75 时, OMS 的估算结果比 EC 观测结果偏高约 64%, 当波文比变为 1.03 时, OMS 估算结果出现 34% 的高估现象。说明波文比较大时, OMS 对热量通量的观测, 特别是 H 的观测较为可靠。

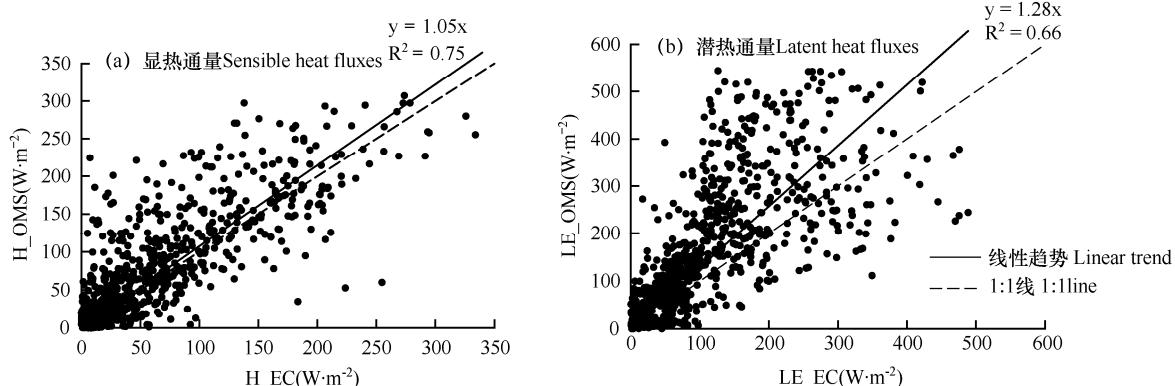


图 2 2015 年 9 月 5 日~11 月 9 日每日 7:30~17:30 OMS 系统与 EC 系统每 30min 观测结果的比较

Fig. 2 Comparison of fluxes from OMS and EC system, datasets from Sep. 5 to Nov. 9, 2015 during 7:30–17:30 with 30 minutes intervals

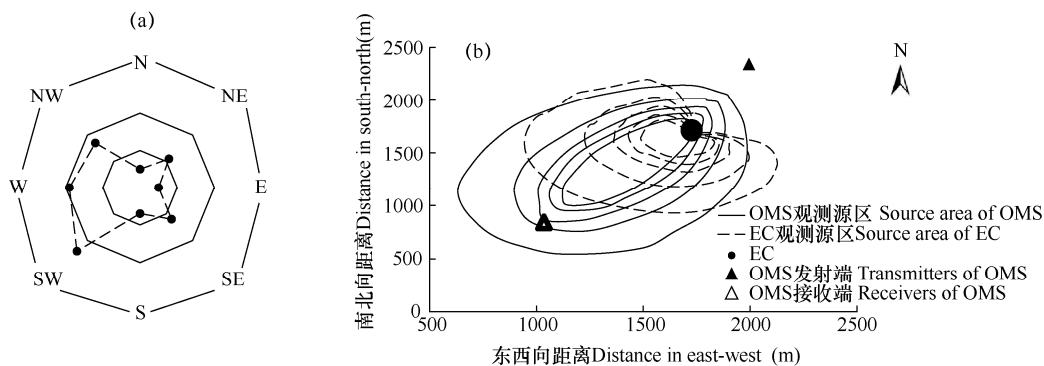


图 3 观测期间风向 (a) 和通量的观测源区分布 (b)

Fig. 3 Wind directions during the observation(a) and the distribution of source area(b)

注: 图 b 中等值线从外向内依次表示的通量贡献值为 90%、80%、70%、60%、50%。

Note: The values of lines are 90%, 80%, 70%, 60%, and 50% contribution to the measured fluxes from the outer to the inner in Fig.b.

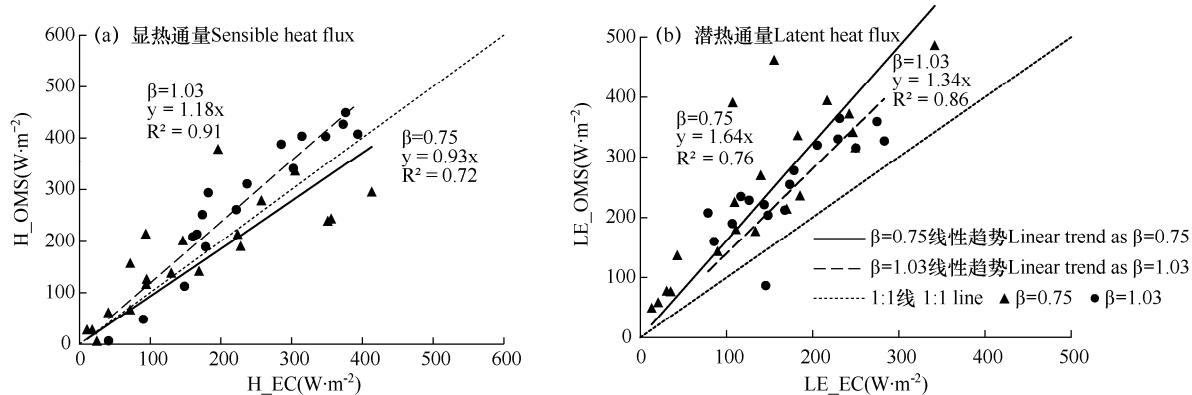


图 4 不同波文比状态下 OMS 系统与 EC 系统每 30min 观测结果的比较

Fig. 4 Comparison of averaged heat fluxes with 30 minutes intervals obtained from OMS and EC system by different β (Bowen ratio)

2.2 OMS 系统能量闭合程度及其影响分析

2.2.1 能量平衡比率

作为生态系统能量来源的净辐射 (R_n) 主要以显热通量 (H) 和潜热通量 (LE) 的方式对边界层底部进行加热, 有部分热量进入土壤, 即土壤热通量 (G), 也有一部分热量以其它形式存储或消亡^[18]。因此, 表示能量闭合程度的能量平衡比率 (Energy balance ratio, EBR) 可以反映出测量方法的可靠程度, 可表达为

$$EBR = \frac{H + LE}{R_n - G} \quad (18)$$

图 5 为每日 7: 30–17: 30 OMS 和 EC 观测的能量平衡比率。由图可见, OMS 估算的能量平衡比率 EBR 为 1.05, 其中 67.5% 的数据点分布在 1:1 线上方, 表现出过闭合状态。EC 观测的能量平衡比率为 0.78, 仅 7.6% 的数据点分散在 1:1 线上方。结合图 2 可知, OMS 系统的过闭合现象可能是因为 LE 出现了高估现象。能量平衡比率表明, 基于相同的 R_n 与 G , OMS

系统观测的能量值出现 5% 左右的高估, 而 EC 系统观测的能量值出现约 22% 的低估现象, 整个观测时段内 R^2 具有一致性。

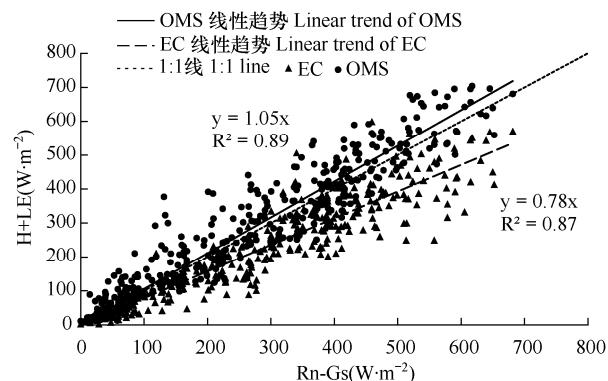


图 5 2015 年 9 月 5 日–11 月 9 日每日 7: 30–17: 30 OMS 系统和 EC 系统每 30min 观测的能量平衡比率

Fig. 5 Energy balance ratio with 30 minutes intervals of OMS and EC system from Sep. 5 to Nov. 9, 2015 during 7:30–17:30

2.2.2 能量闭合误差原因

LE 的高估导致了 OMS 系统出现能量过闭合现象。由于观测区域地形起伏不平, 下垫面性质复杂, OMS 观测的通量源区范围较大(图 3), 在盛行风向条件下的不同风速对湍流的发展状态也不相同, 从而影响了 OMS 系统的观测结果。

对不同风速条件下 OMS 与 EC 的观测结果进行比较可知(图 6), 在风速小于 $3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, OMS 估算的 H 比 EC 观测结果高 $11\% \sim 13\%$, 风速大于 $3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, OMS 估算的 H 比 EC 观测结果高约 21% , 风速大于 $4\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 二者结果偏差可达 37% 。由图还可见, OMS 估算的潜热通量 LE 受风速的影响明显。当风速小于 $3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, OMS 估算的 LE 比 EC 观测

结果偏高 $18\% \sim 21\%$, 但当风速大于 $3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 比 EC 观测结果偏高达 35% , 当风速大于 $4\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, OMS 观测的 LE 均在 $200\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 以上。造成这种差异的原因可能是风速对塔体晃动, 造成信号噪声影响, OMS 在原始数据滤波过程中, 并未完全过滤这些异常信号, 从而造成通量值的高估^[19]。OMS 是在区域尺度对湍流通量进行估算, 得出的通量时间间隔较短(1min), 而 EC 方法得出的结果为 30min 间隔, 统计不确定性较大。在白天观测条件下, 湍流受到温度和风速的影响较大, 在不同风速条件下湍流状态也不相同, OMS 由于观测路径较长, 在获取有效湍流时受到信号噪声的影响, 观测结果也会产生偏差。

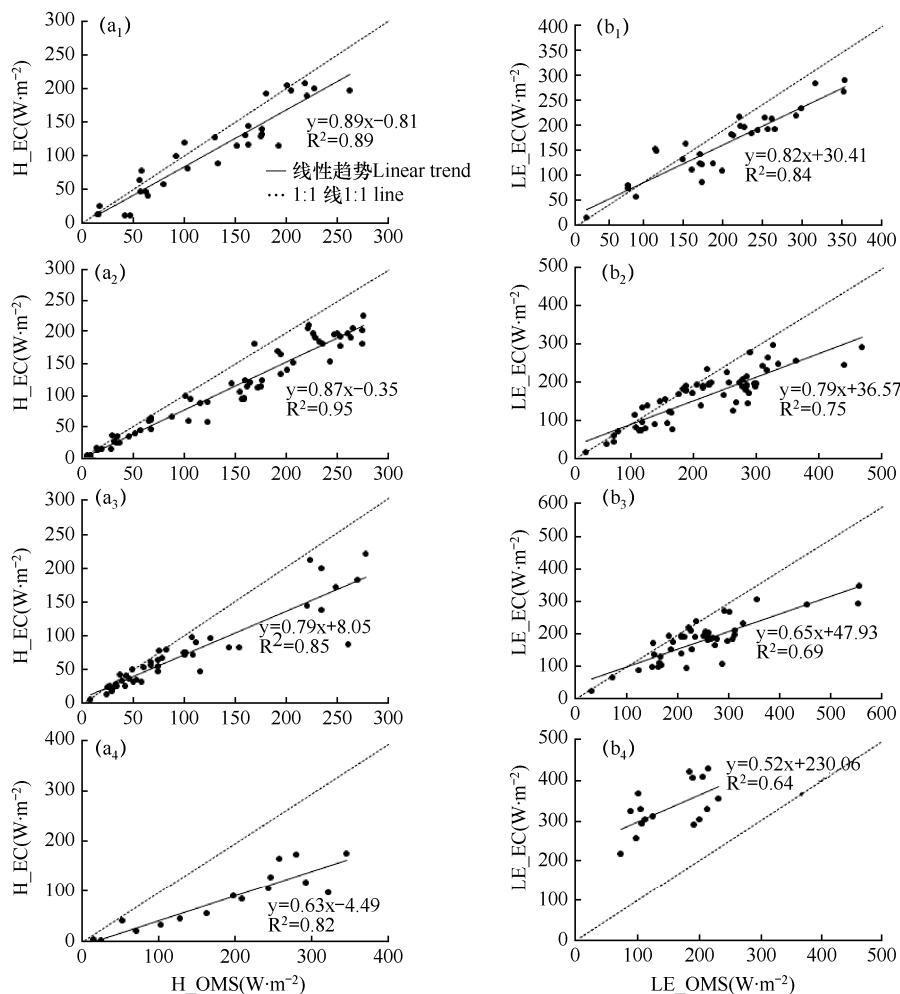


图 6 2015 年 9 月 5 日~11 月 9 日每日 7:30~17:30 不同风速条件下 OMS 与 EC 系统每 30min 观测的显热通量(a)、潜热通量(b)的比较

Fig. 6 Comparison of sensible heat fluxes(a), latent heat fluxes(b) derived from OMS and measured by EC with different wind speed from Sep. 5 to Nov. 9, 2015 during 7:30~17:30 with 30 minutes intervals

注: 下标 1、2、3、4 分别表示风速 < 2 、 $2 \sim 3$ 、 $3 \sim 4$ 和 $> 4\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

Note: Subscript 1, 2, 3 and 4 stand for wind speed in < 2 , $2 \sim 3$, $3 \sim 4$ and $> 4\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$.

3 结论与讨论

3.1 结论

(1) OMS 系统估算的显热通量与 EC 观测结果具有良好的一致性, 但潜热通量比 EC 观测结果高估约 28%。由于存在对潜热通量的高估, 致使 OMS 系统观测在本次研究中出现过闭合现象, 超出幅度约为 5%。

(2) 气象因子, 如波文比、风速对 OMS 估算影响显著。当波文比为 0.75 时, OMS 估算的潜热通量比 EC 观测结果高约 54%。当风速 $> 4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, OMS 估算结果并不理想。

(3) OMS 系统实现了对潜热通量的直接估算, 其系统采样间隔较短, 大大减小了统计不确定性, 有助于更精确地测量热量通量, 深入研究能量闭合问题。

3.2 讨论

在双波长方法估算热通量的研究中, 双波长方法估算的显热通量比 EC 观测结果高 7%左右, 潜热通量估算结果比 EC 观测结果高约 26%^[8], 在 Flevoland 的实验中也发现潜热通量高估约 8%^[20]。OMS 系统估算的显热通量与以往相关文献结果相似, 但潜热通量估算结果相对较高。波文比条件对 OMS 的影响较大。研究表明, 近红外波段主要对温度的波动敏感, 而微波波段对温度和水汽的波动同样敏感^[13,21]。本实验中的微波波长为 1.86mm, 频率为 160GHz, 文献中的波长大约为 11mm, 27GHz^[8] 或 3.2mm, 94GHz^[9,11,22]。Meijninger 等^[8]研究发现, 相同波长、不同频率的 MWS 与近红外联合观测存在 8%的误差, 分别对显热通量与潜热通量高估约 2% 和 4%。针对近红外波段测算显热通量的研究表明, 当波文比较高时, 如在干旱区域, 波文比对热量通量测算的影响很小, 可以忽略, 但当波文比较小时, 如湿地、农田等, 由于湿度波动引起的信号变化会对测量结果产生很大影响, 波文比修正不可忽略^[23-24]。对温湿度波动均敏感的微波波段受湿度影响较大^[12], 受水汽吸收影响, OMS 的观测结果会受到波文比的影响。

OMS 对通量的估算主要根据相似理论通过迭代计算得出。利用近红外与微波联合方式观测空气折射指数结构参数是可靠的^[9,25-26], 由于相似理论的使用具有特定的限制条件, 因此, OMS 得到的最终结果与 EC 观测结果相比偏大^[8,27-28]。关于相似函数已有多种不同的表达形式^[13,24,30-31]。在不稳定状态下,

不同相似函数对通量估算结果影响不大, 但在近中性条件或者稳定条件时不同相似函数对 OMS 通量的估算具有明显影响^[9]。且不同相似函数对通量的估算会产生 20%左右的误差^[30-31]。不同相似函数的选择对通量的结果影响不同, 通过实验拟合得出的相似函数适用性与湍流状态具有明显关联性^[31]。本研究所选择的相似函数是最常用的 Andreas^[26]提出的表达式, 该相似函数成立的前提是假设温湿度波动状况相同, 在本研究的下垫面条件下, 由于风速条件的不同, 湍流状态可能限制了相似函数的适用性, 此外气温的波动与空气湿度的波动也并非相等, EC 与 OMS 的观测尺度不一致、通量源区不完全重叠, 在面积尺度上的累积误差也是造成 OMS 对能量高估的原因。此外, OMS 系统利用迭代方式估算湍流通量时需要确定粗糙度长度。粗糙度长度受到观测源区的影响, 具有动态特征。周艳莲等^[32]对长白山观测站进行粗糙度 z_0 研究时发现, 不同风向时粗糙度差异明显, 并指出采用经验算法 $z_0=0.13h$ (h 为植被冠层高度) 估算得出的结果比实际计算得出的粗糙度偏大。本研究所在区域地形起伏, 植被高度不一, 但在实际计算中采用经验公式对粗糙度长度进行估算, 从而影响了 OMS 系统估算结果。在有效高度计算中, 依据 Hartogensis 等^[33]方法, 而 Evans 等^[22]在研究中指出, Hartogensis 等计算有效高度的方法仅适于近红外波段闪烁仪, 若将之扩展至 OMS 系统观测中, 由于 BLS900 的路径权重函数与 MWS 的路径权重函数并不相同而存在不确定性, Sheepdrove 在实验观测中发现, 由有效高度带来的观测误差在 5%~15%。Ward 等^[24]研究认为不同的有效高度对通量结果产生 6%或 3%的偏差。

采用 EC 方法观测时, 对冠层热储量和其它形式消耗能量的忽略导致了低估^[17]。研究表明, 植被冠层高度超过 8m 时, 冠层热储存量对能量闭合会产生较大的影响, 在茂盛的森林中, 由冠层储量引起的能量闭合误差可达 7%左右^[23]。同时, 由于空间位置的差异, 有效净辐射的观测存在 5%的误差, 土壤热通量的误差在 15%左右^[34]。许多关于森林下垫面的研究中, EC 观测的能量闭合程度最高约为 0.7, 而 OMS 在本研究中能量闭合出现过闭合状态, 如何通过有效的数据质量控制, 合理控制计算过程中的误差, 降低 OMS 对能量的高估现象, 将有助于深入研究能量闭合问题。

参考文献 References

- [1] 李英杰,延军平,王鹏涛.北方农牧交错带参考作物蒸散量时空变化与成因分析[J].中国农业气象,2016,37(2):166-173.
Li Y J,Yan J P,Wang P T.Temporal and spatial change and causes analysis of the reference crop evapotranspiration in farming-pastroral ecotone of Northern China[J].Chinese Journal of Agrometeorology,2016,37(2):166-173.(in Chinese)
- [2] Evans J G,McNeil D,Finch J W,et al.Determination of turbulent heat fluxes using a large aperture scintillometer over undulating mixed agricultural terrain[J].Agricultural Forest Meteorology, 2012,166(2):221-233.
- [3] 郭春明,任景全,张铁林,等.东北地区春玉米生长季农田蒸散量动态变化及其影响因子[J].中国农业气象,2016,37(4): 400-407.
Guo C M,Ren J Q,Zhang T L,et al.Dynamic change of evapotranspiration and influenced factors in the spring maize field in Northeast China[J].Chinese Journal of Agrometeorology, 2016,37(4):400-407.(in Chinese)
- [4] 秦孟晟,郝璐,施婷婷,等.秦淮河流域五种参考作物蒸散量估算方法的比较及改进[J].中国农业气象,2016,37(4):390-399.
Qin M S,Hao L,Shi T T,et al.Comparison and modification of five crop reference evapotranspiration models for Qinhuai River Basin[J].Chinese Journal of Agrometeorology,2016, 37(4):390-399.(in Chinese)
- [5] Maayar M E,Chen J M,Price D T.On the use of field measurements of energy fluxes to evaluate land surface models [J].Ecological Modelling,2008,214(2):293-304.
- [6] 辛晓洲,田国良,柳钦火.地表蒸散定量遥感的研究进展[J].遥感学报,2003,7(3):233-240.
Xin X Z,Tian G L,Liu Q H.A review of researches on remote sensing of land surface evapotranspiration[J].Journal of Remotely Sensing,2003,7(3):233-240.(in Chinese)
- [7] 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,2005,9(9):932-938.
Lu L,Liu S M,Sun M Z,et al.Advances in the study of areal surface fluxes with large aperture scintillometer[J].Advances in Earth Science,2005,9(9):932-938.(in Chinese)
- [8] Meijninger W M L,Beyrich F,Lüdi A,et al.Scintillometer-based turbulent fluxes of sensible and latent heat over a heterogeneous land surface:a contribution to LITFASS-2003[J].Boundary-Layer Meteorology,2006,121(1):89-110.
- [9] Ward H C,Evans J G,Grimmond C S B,et al.Infrared and millimetre-wave scintillometry in the suburban environment (Part 1): structure parameters[J].Atmospheric Measurement Techniques, 2015a,7(11):1385-1405.
- [10] 舒婷.微波闪烁法测量潜热通量的初步研究[D].北京:中国农业大学,2012.
Shu T.Preliminary study of microwave scintillometer in measuring latent heat flux[D].Beijing:Chinese Agricultural University,2012.(in Chinese)
- [11] Mei S Y,Pauwels V R N,Daly E,et al.A comparison of optical and microwave scintillometers with eddy covariance derived surface heat fluxes[J].Agricultural and Forest Meteorology, 2015,213(20):226-239.
- [12] Lüdi A,Beyrich F,Mtzler C.Determination of the turbulent temperature-humidity correlation from scintillometric measurements[J].Boundary-Layer Meteorology,2005,117(3):525-550.
- [13] Andreas E L.Three-wavelength method of measuring path-averaged turbulent heat fluxes[J].Journal of Atmospheric and Oceanic Technology,1990,7(6):801-814.
- [14] Liu S M,Xu Z W,Wang W Z.A comparison of eddy- covariance and large aperture scintillometer measurements with respect to the energy balance closure problem[J].Hydrology and Earth System Sciences,2011,15(4):1291-1306.
- [15] Göckede M T,Markkanen B H,Charlotte T,et al.Update of a footprint-based approach for the characterisation of complex measurement sites[J].Boundary-Layer Meteorology,2006,118: 635-655.
- [16] 胡诚,张弥,肖薇,等.通量及其不确定性对农业区高塔 CO₂浓度模拟的影响[J].中国农业气象,2017,38(8):469-480.
Hu C,Zhang M,Xiao W,et al.Effect of flux and its uncertainty on tall tower CO₂ concentration simulation in the agricultural domain[J].Chinese Journal of Agrometeorology, 2017, 38(8):469-480.(in Chinese)
- [17] Kormann R,Meixner F X.An analytical footprint model for non-neutral stratification[J].Boundary-Layer Meteorology, 2001,99:207-224.
- [18] 田志伟,王维真,王介民.植被大气间能量储存分项对能量闭合率的影响分析[J].冰川冻土,2016,38(3):794-803.
Tian Z W,Wang W Z,Wang J M.Analyzing the effects of energy storage terms in vegetation-atmosphere system on energy balance closure[J].Journal of Glaciology and Geocryology, 2016,38(3):794-803.(in Chinese)
- [19] Danodia A,Sehgal V K,Patel N R,et al.Assessment of large aperture scintillometry for large-area surface energy fluxes

- over an irrigated cropland in north India[J].Journal of Earth System Science,2017,126(5):69.
- [20]Meijninger W M L,Green A E,Hartogensis O K,et al.Determination of area-averaged water vapor fluxes with large aperture and radio wave scintillometers over a heterogeneous surface-Flevoland field experiment[J].Boundary-Layer Meteorology,2002,105:63-83.
- [21]Kohsieck.Measuring C_T^2,C_Q^2 ,and C_{TQ} in the unstable surface layer,and relations to the vertical fluxes of heat and moisture[J].Boundary-Layer Meteorology,1982,24 (1):89-107.
- [22]Evans J G,De Bruin H A R.The effective height of a two-wavelength scintillometer system[J].Boundary-Layer Meteorology,2011,141(1):165-177.
- [23]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.
- [24]Ward H C,Evans J G,Grimmond C S B.Infrared and millimetre-wave scintillometry in the suburban environment (part 2):large-area sensible and latent heat fluxes[J].Atmospheric Measurement Techniques,2015b,8(3):1407-1424.
- [25]Wyngaard J C,Izumi J,Collins Jr S A.Behavior of the refractive-index-structure parameter near the ground[J]. Journal of the Optical Society of America,1971,61(12): 1646-1650.
- [26]Andreas.Two-Wavelength method of measuring path-averaged turbulent surface heat fluxes[J].Journal of Atmospheric and Oceanic Technology,1988,7(6):280-292
- [27]De Bruin H A R,Kohsieck W,Den Hurk B J.A verification of some methods to determine the fluxes of momentum, sensible heat and water vapour using standard deviation and structure parameter of scalar meteorological quantities[J].Boundary-Layer Meteorol.,1993,63:231-257.
- [28]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(2):85-97.
- [29]Li D,Bou-Zeid E,De Bruin H A R.Monin-obukhov similarity functions for the structure parameters of temperature and humidity[J].Boundary-Layer Meteorology,2012,145(1):45-67.
- [30]Hartogensis O K,de Bruin H A R.Monin-Obukhov similarity functions of the structure parameter of temperature and turbulent kinetic energy dissipation rate in the stable boundary layer[J].Boundary-Layer Meteorology,2005,116(2): 253-276.
- [31]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.
Zheng N.Investigation on spatial representativeness of surface and scale effect of sensible heat flux from mixed plation in the hilly zone[D].Hefei:Anhui Agricultural University,2010.
(in Chinese)
- [32]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.(in Chinese)
- [33]Hartogensis O K,De Bruin H A R,van de Wiel B J H.Displaced-beam small aperture scintillometer test(Part II):CASES-99 stable boundary-layer experiment[J].Boundary-Layer Meteorology,2002,105:149-176.
- [34]Mauder M,Liebethal C,Gckede M,et al.Processing and quality control of flux data during LITFASS-2003[J].Boundary-Layer Meteorology,2006,121(1):67-88.