

文章编号: 1001-8166(2010)11-1148-18

大孔径闪烁仪观测数据的处理方法研究

白 洁¹, 刘绍民^{*}, 卢晓萍¹, 卢 俐^{1,2}

(1. 北京师范大学遥感科学国家重点实验室, 地理学与遥感科学学院, 北京 100875

2. 北京市气象局气象信息中心, 北京 100089)

摘 要: 大孔径闪烁仪可以获取公里级尺度的显热/潜热通量, 其观测数据在农林业、水文、气象等领域的研究中具有越来越重要的作用。以海河流域 2008 年密云站和馆陶站大孔径闪烁仪的观测数据为例, 讨论了数据筛选与处理方法, 以及大气不稳定状态下不同处理方法对显热通量造成的影响。结果表明: 空气折射指数结构参数应结合电压信号的方差进行计算、采用逐日的日平均波文比系数进行湿度订正、结合空间权重函数计算有效高度、选取 Andreas(1988)稳定度函数计算显热通量等是可信的。通过对不同插补方法的比较可知, 采用非线性回归方法和以零值替代的方法对不稳定状态和稳定状态下 30 min 缺失的显热通量进行插补, 采用动态线性回归方法对日显热通量的缺失进行插补是可行的。为了解决由于冬天净辐射和显热通量较小, 造成能量平衡方程余项法计算的蒸散量产生较大误差的问题, 可采用根据大孔径闪烁仪与涡动相关仪观测的日蒸散量建立的关系式进行估算。基于上述方法的研究, 形成了一套较为完整的大孔径闪烁仪观测数据的处理流程, 保证了在不同下垫面、不同的天气状况条件下都能获取质量可靠、数据连续的大孔径闪烁仪观测的显热/潜热通量。

关 键 词: 大孔径闪烁仪; 数据筛选与质量控制; 不稳定状态; 插补

中图分类号: P404

文献标志码: A

1 引 言

大孔径闪烁仪 (Large Aperture Scintillometer LAS), 是一种基于“闪烁”概念的通量测量仪器, 可实现光程路径上大尺度水热通量的连续观测。目前, 大孔径闪烁仪在国内外众多通量观测试验中都得到了广泛的应用, 包括 SALSA (Semi-Arid Land-Surface Atmosphere) 试验^[1]、Yagu 2000^[2]、CASES-99^[3]、LITFASS-98^[4]等, 基于 LITFASS-2003 试验也以专辑的形式发表了一系列的相关成果^[5]。

大孔径闪烁仪是由发射仪发射一定波长 (近红

外波段) 和直径的波束, 经过大气中的传播, 由接收仪接收到光程路径上受到温度、湿度和气压波动影响的光, 以折射指数结构参数 (C_n^2) 表示大气的湍流强度, 进而结合气象数据根据相似理论迭代计算显热通量 (H_{LAS}) 的仪器, 由此可见, LAS 观测显热通量的数据质量一方面取决于周围的天气状况 (如结露、降水、能见度状况等) 和 LAS 观测记录的原始数据 (空气折射指数的结构参数和信号强度), 另一方面取决于由 LAS 观测的 C_n^2 值计算显热通量等步骤造成的差异。因此, 首先要对 LAS 测量直接受到不利天气条件影响的原始观测数据进行筛选。Beyrich

收稿日期: 2010-03-16 修回日期: 2010-09-15

* 基金项目: 公益性行业 (气象) 科研专项“大尺度水热通量观测系统的研制与应用研究” (编号: GYHY200706046); 国家自然科学基金项目“地表水热通量的时空尺度扩展研究” (编号: 40971194) 和“基于遥感和数据同化方法的海河流域水文通量预测研究—SP2 不同尺度蒸散量和土壤水分的观测研究” (编号: 30911130504) 资助。

作者简介: 白洁 (1984-), 女, 内蒙古包头人, 博士研究生, 主要从事地表通量观测数据的处理与分析研究。

E-mail: baijie@mail.bnu.edu.cn

* 通讯作者: 刘绍民 (1967-), 男, 浙江绍兴人, 教授, 主要从事陆面过程观测与遥感应用研究, E-mail: smliu@bnu.edu.cn

等^[6]在研究中,剔除了降水期间的数据,并认为 LAS 的数据质量在冬天主要受到能见度的影响,在夏天主要受到降水的影响,Meijninger 等^[7]、Kleissl 等^[8]、Savage^[9]以及 Solognac 等^[10]在研究中都剔除了降雨天或水汽影响较大的数据。除此之外,原始的观测数据还受到电压信号的饱和效应以及信号强度较小的影响。其中,电压信号的饱和效应是指当闪烁强度达到一定上限后,接收到光强自然对数的方差与空气折射指数结构参数之间的关系不再成立,闪烁仪安装越接近地表或者路径长度越长,观测到的闪烁量越多,越容易产生饱和。Ochs 等^[11]于 1993 年和 1985 年分别给出 C_n^2 饱和上限为 0.193 和 0.180 $L^{-8/3} \lambda^{1/3} D^{5/3}$, 其中前者在应用中更为广泛^[7,13-15]。对于大孔径闪烁仪观测数据信号强度的判断,Beirich 等^[6,13]利用荷兰瓦赫宁根大学研制 LAS 的观测数据,将解调信号强度的上限值设置为 -25 mV, 接收到光强的对数的方差 Var_{logI} 应满足 $[0.25(\sigma_x/x)^2 < Var_{logI} < 4(\sigma_x/x)^2]$, 其中 σ_x^2 为接收信号振幅波动的对数的方差。Meijninger 等^[7]、Kleissl 等^[8]在研究中也剔除了信号强度较小的数据,其中, Kleissl^[8]剔除了 LAS (Kipp & Zonen) 原始观测值中信号强度大于 -50 mV 的数据。而德国 Scintec 公司生产的 BLS_450 LAS 在输出折射指数结构参数时,同时包括了以错误代码判断数据有效性的诊断文件,包括出现信号强度较弱或无效数据等情况^[17]。同时,在已知大气稳定度的条件下,可以结合涡动相关仪和自动气象站的观测数据,将不同稳定度状况下 LAS 获取的温度结构参数 (C_T^2) 与根据莫宁—奥布霍夫相似理论计算的理论值进行比较。De Bruin^[18]、Hoedjes 等^[2,19]分别对 Kipp & Zonen LAS 获取的不稳定状态下 C_T^2 的观测值与 De Bruin (1993) 函数理论值进行了比较。

LAS 观测的原始数据需要结合不同的下垫面特征参数(如零平面位移、动力学粗糙度),仪器参数以及气象数据等,由空气折射指数的结构参数 (C_n^2) 计算温度结构参数 (C_T^2),由 C_T^2 迭代计算显热通量,最后利用能量平衡方程的余项法计算出潜热通量。包括了湿度订正、大气稳定度的判断及稳定度函数的选取以及 LAS 有效高度的计算等关键步骤。不同参数的测量精度及计算方法的差异都会对通量结果产生不同程度的影响。Hartogensis 等^[20]、Max 等^[21]、卢俐等^[22]均对 LAS 原始数据计算显热通量所涉及中间参数的敏感性进行了分析,包括有效高度、光径长度、波文比系数以及稳定度普适函数的不

同表达形式等。其中,荷兰 Kipp & Zonen 和德国 Scintec 说明书中分别给出了计算有效高度的不同方法^[18,23], Hartogensis 等^[20]对不同地表影响条件下(包括倾斜的平坦地表、地表拓扑和地球曲率) LAS 有效高度的计算方法进行了比较。由于湿润情况下大气中的水分含量对 H_{LAS} 的影响较为显著,且利用单台大孔径闪烁仪进行观测,很难直接获取温度、湿度之间的关系。因此,目前除了可以设置 2 台或多台不同波段范围的闪烁仪获取上述信息外,还可以利用能够表示温度和湿度之间相互关系的其他信息(如涡动相关仪数据)来对湿度的影响进行订正。Green^[24]认为波文比系数 (Bowen Ratio β) 在 0.1 ~ 0.3 之间变化时, H_{LAS} 比 H_{EC} 可低估 2 倍; β 在 0.1 左右时,温度结构参数会低估 60%。Hemakumara 等^[25]指出 β 在 0.2 ~ 0.5 之间变化时,会对 H_{LAS} 造成约 7% 的误差。Meijninger 等^[26]、Moene^[27]分别给出了忽略湿度订正对 C_T^2 造成的误差。Meijninger 等^[7]、Solognac 等^[10]在 H_{LAS} 的计算中引入了净辐射 (R_n) 和土壤热通量 (G), 利用能量平衡方程循环迭代,同时确定 β 和 H_{LAS} 。Beirich^[13]认为大孔径闪烁仪估算显热通量的误差除上述原因外,不同稳定度普适函数的表达形式也可引起 10% ~ 20% 的误差。Savage^[9]、Asanuma 等^[28]、Odhiambo 等^[29]、Su 等^[30]以及卢俐^[31]等分别针对稳定和不定状态下不同形式的稳定度普适函数对显热通量造成的差异进行了比较,造成显热通量的估算误差可达 15% ~ 20%。

由于受到天气状况(大风、降水)、仪器维护、标定、仪器信号强度较弱、达到饱和或不符合理论函数等的影响,造成了原始观测数据的缺失或剔除,而将其应用在不同的研究领域时,需要日、月等不同时间尺度上的完整数据。因此,建立针对大孔径闪烁仪的数据插补方法,获取完整、可靠的数据集是十分必要的。在目前的研究中, Hemakumara 等^[25]在计算日显热通量时,将夜间的显热通量定为 0。Meijninger 等^[26]认为如果忽略夜间的显热通量,日显热通量将造成 10% 左右的低估。Moene 等^[32]在研究中,对于不稳定情况下的缺失数据采用了自由对流方法计算。该方法不需要摩擦速度和迭代运算,直接可以由 C_T^2 计算得到显热通量。但是 De Bruin 等^[33]、卢俐^[31]等的研究表明,该方法会造成显热通量的低估。由于需要插补的数据多出现在阴天、弱湍流情况下,因此自由对流方法不再适用。目前,针对涡动相关仪观测通量数据的缺失,已经建立了多

种不同的方法^[34],如非线性回归方法(Nonlinear Regression Method, NLR)^[35],动态线性回归方法(Dynamic Linear Regression, DLR)^[36~38],人工神经网络方法(Artificial Neural Network, ANN)^[39,40]以及用于遥感影像插补的 HANTS方法(Harmonic Analysis of Time Series, HANTS)^[41]等。

本文在已有研究的基础上,进一步讨论了大孔径闪烁仪观测数据的筛选与质量控制、显热/潜热通量的计算以及通量数据的插补,尤其针对原始观测数据的筛选,显热通量计算过程中稳定度普适函数的选取、湿度订正及有效高度的计算,以及不同时间尺度缺失通量数据插补、冬季蒸散量的推算等进行了研究,以期获得不同下垫面上质量可靠、时间连续的显热/潜热通量数据。

2 观测仪器和方法

2.1 观测站概况

本研究所用的观测数据主要为 2008 年北京密云站和河北馆陶站大孔径闪烁仪、自动气象站以及涡动相关仪的观测资料。

密云观测站(40°37'51"N, 117°19'24"E)位于北京市密云县新城子镇一个宽度约 500~1 000 m,长度约 2 420 m,西南—东北走向的山谷中。盛行风向为西南风(白天)与北风(夜间),下垫面主要为果树(李子树、苹果树)、玉米、裸地以及居民地等。一套 LAS(Kipp & Zonen, 荷兰)装置在南北 2 座小山顶,光径长度为 2 420 m,有效高度 35.86 m。其中西南面为接收仪,采样频率为 1 Hz,平均输出时间为 10 min。在 LAS 光径路线中间、距离接收仪 900 m 处,一套涡动相关仪(CSAT3, Campbell 美国; L7500, Campbell 美国)架设在高为 26.66 m 的铁塔上,其沿大孔径闪烁仪光程路径,且距离光程路径中点处约 450 m。在该塔上还包括自动气象站的 2 层风、温、湿(10.66 m, 30.76 m)、降水量、气压与向上(下)长(短)波辐射等观测项目,同时还有地表辐射温度、土壤热通量、7 层土壤温度以及 6 层土壤水分的观测。

馆陶观测站(36°30'54"N, 115°07'39"E)位于河北省馆陶县河寨村,盛行风向为南风 and 北风,下垫面以玉米、小麦、棉花为主。LAS(Kipp & Zonen, 荷兰)发射仪与接收仪分别放在相距 2 760 m 的南北两侧,南面为 LAS 的接收端,有效高度 15.6 m,采样频率为 1 Hz,平均输出时间为 10 min。涡动相关仪(CSAT3, Campbell 美国; L7500, Campbell 美国)

和自动气象站位于大孔径闪烁仪光程路径的中点处,其中涡动相关仪的架高是 15.6 m,自动气象站的观测项目包括风、温、湿、降水量、气压与净辐射、向下(上)长(短)波辐射,同时还有地表辐射温度、土壤热通量(0.02 m)、8 层土壤温度以及 7 层土壤水分等。

2.2 LAS 的测量原理

空气折射指数(n)的时间变化可以表征大气中湍流气团运动的特性,并与温度和湿度的波动紧密相关,因此可以用空气折射指数的结构参数来描述空气的湍流运动。大孔径闪烁仪可由下式计算空气折射指数的结构参数(C_n^2)^[42]:

$$C_n^2 = 1.12 \sigma_{\text{w}}^2 D^{7/3} L^{-3} \quad (1)$$

其中, σ_{w}^2 为受到传播路径上温度、湿度和气压波动影响后,接收仪接收到光强(I)自然对数的方差, D 和 L 分别表示孔径直径和发射仪与接收仪之间的光径长度。由此计算的 C_n^2 的典型值约为 $10^{-13} \sim 10^{-18} \text{ m}^{-2/3}$ 。空气的折射指数取决于它的组成及气压、温度等状态变量,水蒸汽是其中最容易变化的组分,空气的组分则可以通过干空气和水蒸汽变化的浓度(水汽压 e 或者比湿 q)来表示^[43]。Wesely^[44]及其他研究均表明,光学闪烁仪的气压波动通常可以近似忽略。因此,空气折射指数的结构参数可表示为温度和湿度结构参数的函数,

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

其中, A_T 和 A_q 取决于发射光束的波长、绝对温度和湿度^[45]。相对于湿度的变化而言,位于近红外波段的大孔径闪烁仪对温度的变化更加敏感。Wesely^[44]等假设温度和湿度的相关系数为 1,引入了能够表示湿度状况的波文比系数(β)进行订正,即

$$C_n^2 \approx \left(\frac{0.78 \times 10^{-6} P}{T^2} \right)^2 C_T^2 \left(1 + \frac{0.03}{\beta} \right)^2 \quad (3)$$

其中, P 为气压, T 为空气温度。

根据莫宁—奥布霍夫相似理论,由空气的温度结构参数结合气象数据以及大气稳定度普适函数,经过迭代计算得到显热通量,

$$\frac{C_T^2 (Z_{\text{LAS}} - d)^{2/3}}{T_*^2} = \tilde{\sigma}_T \left(\frac{Z_{\text{LAS}} - d}{L_{\text{MO}}} \right) \quad (4)$$

$$T_* = - \frac{H}{\rho_a C_p u_*} \quad (5)$$

$$u_* = \frac{ku}{\ln[(Z_u - d)/z_{0m}] - \Psi_m[(Z_u - d)/L_{\text{MO}}] + \Psi_m(z_{0m}/L_{\text{MO}})} \quad (6)$$

其中, Z_{LAS} 为闪烁仪观测高度, Z_u 为风速的观测高度, 在本文中与 Z_{LAS} 一致, T^* 为温度尺度, L_{MO} 为莫宁—奥布霍夫长度, ρ_a 为空气密度, C_p 为空气定压比热, H 为显热通量, u^* 为摩擦速度, Ψ_m 为动量稳定修正函数, d 为零平面位移, z_{0m} 为动力学粗糙度, k 为卡曼常数, f_r 为仅与大气稳定度有关的普适函数, 不同学者给出了不稳定和稳定情况下的不同表达式^[46~50]。

2 3 涡动相关仪观测数据的处理

本文所用的涡动相关仪数据, 是从原始测量的 10 Hz 数据出发, 采用英国爱丁堡大学发展的 EdRe 软件 (<http://www.geos.ed.ac.uk/abs/research/micromet/EdRe>) 对观测数据进行后处理, 主要包括野点值的剔除、延迟时间的校正、超声虚温转化为空气温度、坐标旋转(平面拟合法)、空气密度效应的修正(即 WPL 修正)等。同时对观测数据进行了严格的质量控制, 包括了阈值检查、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^[51]。

3 结果分析

3 1 观测数据的筛选

本文以 2008 年密云和馆陶站 Kipp & Zonen LAS 的观测数据为例进行分析。

首先, 剔除了原始观测数据中出现降水时刻和达到饱和上限的数据, 密云站和馆陶站的饱和上限分别为 $7.58E-14$ 和 $5.34E-14\text{ m}^{-2/3}$ 。

其次, 由于本文所用数据为荷兰 Kipp & Zonen LAS 得到的观测数据, 输出的数据相对于德国 Scintec 公司提供的 BLS_450 LAS 的结果有很大不同, 这样就造成了数据筛选的差异。德国 BLS_450 LAS 输出数据中同步输出的诊断信号文件, 除错误代码 (Error Code) 外, 还包含了解调信号 (X) 的平均值 (X_{avg})、最大值 (X_{max})、最小值 (X_{min}) 值等。在数据处理分析中发现在根据 Error Code 进行判断时, X_{min} 对观测数据结果影响也较大, 即每分钟记录的 X_{avg} 处于正常范围, 而 X_{min} 较小 (如 < 50) 时, 同样会造成该时刻 C_n^2 数据出现异常。因此在数据处理中, 需要对 1 min 的 Error Code 不为 0 和 $X_{min} < 50$ 的异常数据进行剔除。而对于 Kipp & Zonen LAS 的观测数据, 针对不稳定状态下观测数据的筛选与质量控制, 本文增加了湍流强度较弱数据的剔除后, 通过与不稳定状态下较常用的 De Bruin (1993) 函数和 Andreas

(1988) 函数的理论值比较, 对不同站点设定了不同的信号强度阈值。

以密云站 2008 年 4 月 LAS 观测数据为例, 选取降水、饱和剔除后的不稳定状态 ($H_{EC} > 10\text{ W/m}^2$, 以保证涡动相关仪和大孔径闪烁仪数据的稳定性) 下的数据, 通过比较不同信号强度范围内 LAS 观测值与 De Bruin (1993) 函数及 Andreas (1988) 函数的理论值之间的离散程度, 确定信号强度较弱的阈值。

由图 1 可见, 在不同的信号强度下, LAS 观测的 $C_T^2(Z_{LAS} - d)^{2/3}/T^{*2}$ 与 De Bruin (1993) 函数或 Andreas (1988) 函数理论值之间的差异各不相同, 信号强度越大 (Demod 数值越小), 观测值与理论值之间的一致性就越好; 同时考虑到不同信号强度下的数据比例, 设定 -30 mV 作为密云站 LAS 观测数据信号强度的判断阈值。

同理对馆陶站 2008 年的观测数据进行类似分析, 设定 -10 mV 为 LAS 观测数据信号强度判断的阈值。图 2 分别给出了 2008 年密云站和馆陶站经过降水时刻数据、饱和数据, 以及信号强度较弱数据剔除后, LAS 观测的 $C_T^2(Z_{LAS} - d)^{2/3}/T^{*2}$ 与 De Bruin (1993) 函数及 Andreas (1988) 函数理论值之间的关系。从图 2 中可知, 经过数据筛选后, LAS 的观测值集中分布在理论曲线周围, 密云站、馆陶站不稳定状态下的有效数据分别为 84.09% 和 77.26% (表 1)。

表 1 密云、馆陶站大孔径闪烁仪观测数据状况

Table 1 LAS data conditions in Miyun and Guantao site

站点	不稳定下	降水	饱和	信号强度	有效
	总样本	剔除	剔除	较弱剔除	
密云站	4 468	0 20%	1 12%	15. 35%	84. 09%
馆陶站	5 136	0 21%	1 97%	20. 77%	77. 26%

3 2 显热通量的计算

经过数据筛选得到的 C_n^2 值即可参与显热/潜热通量的计算。首先, 由 C_n^2 经过湿度订正得到温度结构参数 C_T^2 , 再结合气象数据 (风速、温度、大气压等), 以及大孔径闪烁仪观测的有效高度、风速观测高度、下垫面状况 (零平面位移及动力学粗糙度) 等, 根据莫宁—奥布霍夫相似理论, 通过大气稳定度的判断, 并选取合适的稳定度函数, 分别在稳定和不稳定状态下, 经过迭代计算得到显热通量。

3 2 1 C_n^2 的计算

不同型号的大孔径闪烁仪原始观测值各不相

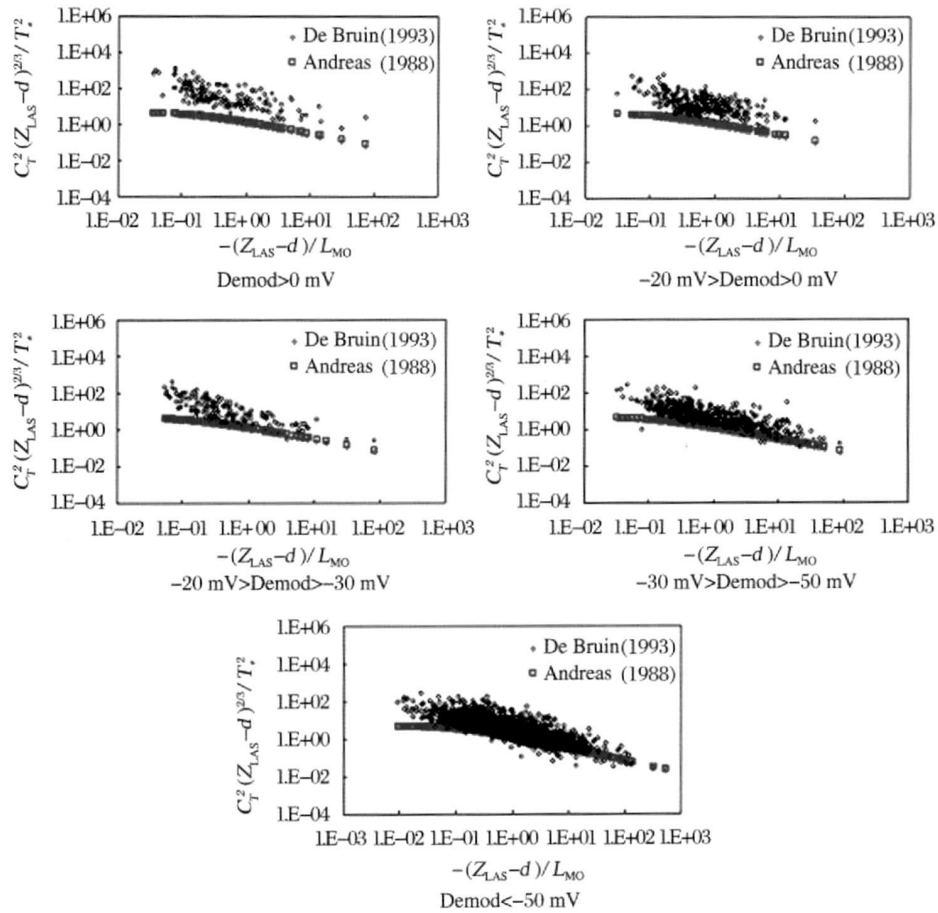


图 1 不稳定状态不同信号强度下观测的 $C_T^2(Z_{LAS}-d)^{2/3}/T^2$ 与 $-(Z_{LAS}-d)/L_{MO}$ 的关系与理论值的比较
Fig.1 Comparison of $C_T^2(Z_{LAS}-d)^{2/3}/T^2$ and $-(Z_{LAS}-d)/L_{MO}$ between observation and theory data in different signal intensity under unstable conditions

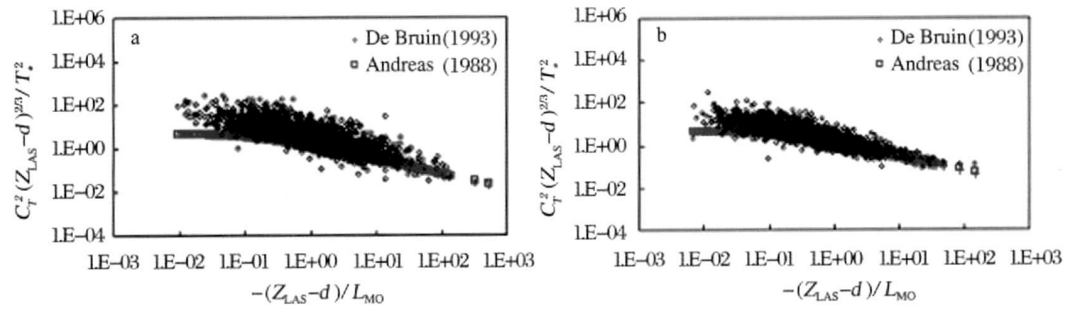


图 2 不稳定情况下观测的 $C_T^2(Z_{LAS}-d)^{2/3}/T^2$ 与 $-(Z_{LAS}-d)/L_{MO}$ 的关系与理论值的比较
Fig.2 Comparison of $C_T^2(Z_{LAS}-d)^{2/3}/T^2$ and $-(Z_{LAS}-d)/L_{MO}$ between observation and theory data under unstable conditions
a: 密云站, Demod < -30 mV, b: 馆陶站, Demod < -10 mV
a: Miyun, Demod < -30 mV, b: Guantao, Demod < -10 mV

同,其中德国 Scintec 公司的 BLS_450 大孔径闪烁仪原始输出的信号为 C_n^2 ,而荷兰 Kipp&Zonen 的 LAS 及研制大尺度水热通量观测系统,则需要根据原始采集的 $U_{C_n^2}$ (空气折射指数结构参数的电压值) 经过

计算得到 C_n^2 。本文针对 Kipp&Zonen LAS 的观测数据,对由 $U_{C_n^2}$ 计算 C_n^2 的不同方法进行了比较。

大孔径闪烁仪接收端接收到经过大气散射、折射后的光束后,以空气折射指数结构参数的电压信

号 ($U_{C_n^2}$) 输出, 进而利用每 10 m in 输出的 $U_{C_n^2}$, 根据下式计算得到 C_n^2 , 再求取 30 m in 的平均值^[23]。

$$C_n^2 = 10^{(U_{C_n^2} - 12)}$$

(7)

由于 C_n^2 与 $U_{C_n^2}$ 之间的非线性关系, 每 10 m in 输出的 $U_{C_n^2}$ 值经过简单的平均并不能真实反映 C_n^2 的大小^[23], 因此给出下述订正形式:

$$C_n^2 = 10^{(U_{C_n^2} - 12 + 1.15 \sigma_{U_{C_n^2}}^2)}$$

(8)

其中, $\sigma_{U_{C_n^2}}$ 为 $U_{C_n^2}$ 的方差。

选取馆陶站 2008 年 1 月、7 月的数据, 对订正前 (公式 7)、后 (公式 8) 显热通量的差异进行了比较 (图 3)。

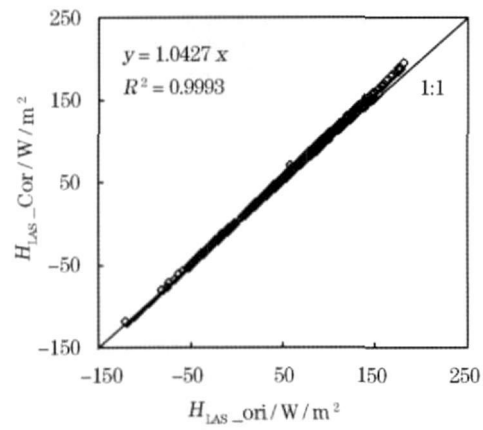


图 3 C_n^2 计算方法订正前后对 H_{LAS} 的影响
(馆陶站 2008 年 1 月、7 月)
Fig 3 Effect on H_{LAS} before and after C_n^2 correction
(Guantao site, January and July 2008)

由图 3 可见, 由经过订正的 C_n^2 得到的显热通量值较原有方法的结果偏大, 而且显热通量值越大, 两种方法之间的偏差越为明显。其中原有方法对显热通量约低估 4%, 因此本文采用了结合 $U_{C_n^2}$ 方差的方法计算 C_n^2 。

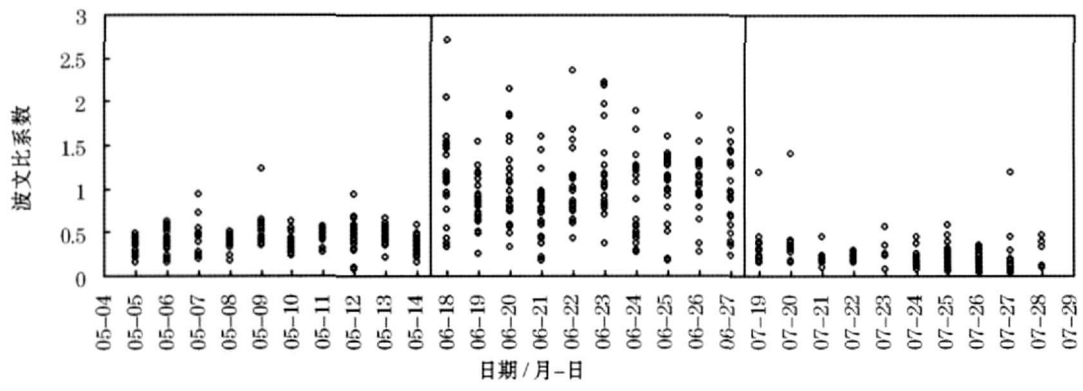


图 4 馆陶站 2008 年 5~7 月所用数据波文比系数的分布 ($H_{EC} > 10 \text{ W/m}^2$, 30 m in)
Fig 4 Distribution of Bowen ratio of used data of Guantao site from May to July 2008 ($H_{EC} > 10 \text{ W/m}^2$, 30 m in)
© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

3 2 2 湿度订正
Moene^[27] 在公式 (2) 的基础上, 提出了 3 种不同近似程度的湿度订正方法, 即: ①利用涡动相关数据获取的温度、湿度的相关系数作为订正因子 (方法 1, 公式 (9)); ②假设温度、湿度与风速相关系数的绝对值相等, 以温度和湿度的相关系数以及波文比系数作为订正因子 (方法 2, 公式 (10)); ③在第二步假设的基础上, 假设温度和湿度的相关系数约等于 1, 利用波文比系数作为订正因子 (方法 3, 公式 (11)), 3 种不同订正方法中 C_n^2 与 C_T^2 的关系式具体为:

$$C_n^2 \approx \frac{A_T^2}{T^2} C_T^2 \left(1 + 2 \frac{A_q T}{q A_T} R_{Tq} \frac{\sigma_q}{\sigma_T} + \frac{A_q^2}{q^2} \frac{T^2}{A_T^2} \left(\frac{\sigma_q}{\sigma_T} \right)^2 \right)$$

(9)

$$C_n^2 \approx \frac{A_T^2}{T^2} C_T^2 \left(1 + 2 \frac{A_q T}{q A_T} R_{Tq} \frac{C_p}{L_v} |\beta|^{-1} + \frac{A_q^2}{q^2} \frac{T^2}{A_T^2} \left(\frac{C_p}{L_v} \right)^2 |\beta|^{-2} \right)$$

(10)

$$C_n^2 \approx \frac{A_T^2}{T^2} C_T^2 \left(1 + \frac{A_q}{q} \frac{T}{A_T} \frac{C_p}{L_v} \beta^{-1} \right)^2$$

(11)

其中, C_p 、 L_v 分别为干空气的定压比热 ($\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$) 和水蒸汽的汽化潜热 (J/kg), R_{Tq} 为温度和比湿的相关系数。

分别选取馆陶站 2008 年 5 月 5~14 日、6 月 18~27 日、7 月 19~28 日不同生长季节白天不稳定状态下 ($H_{EC} > 10 \text{ W/m}^2$) 波文比系数变化较为平缓的连续 10 天的数据, 如图 4 所示。其中, 5 月冬小麦进入抽穗期, 棉花刚出苗; 6 月, 冬小麦灌浆成熟, 叶片枯黄, 部分开始收割, 并同时种植玉米, 蒸散量明显减小; 7 月, 玉米生长旺盛, 棉花进入吐絮期, 作物生长旺盛。选取其中波文比系数在 0~3 之间变化

的数据, 结合不进行波文比订正 (即假设公式 (3) 中波文比系数为无穷大) 的方法, 分别计算了不同湿度条件下, 不同的订正方法对 C_T^2 估算造成的平均相对误差, 比较了不同湿度订正方法与未进行湿度订正得到的显热通量的差异。

由图 5 可见, 不同订正方法对 C_T^2 引起的误差在 50% ~ 60% 之间变化, 而且不进行湿度订正得到的 C_T^2 与其他 3 种订正方法之间的差异随着波文比系数的增加而减小。当波文比系数小于 0.5 时, 差异最为显著。因此, 在湿润状况下 (波文比系数小于 0.5), 湿度订正对 C_T^2 的影响较大。

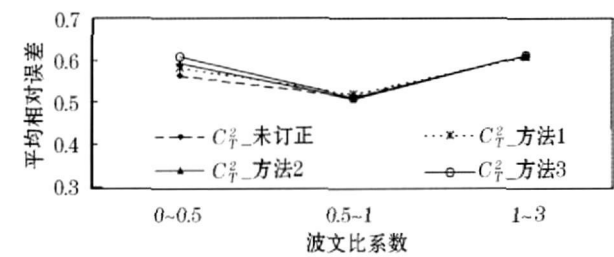


图 5 不同波文比系数下各种湿度订正方法对 C_T^2 造成的平均相对误差

Fig 5 Averaged relative errors of various humidity correction method on C_T^2

表 2 是以未进行湿度订正计算得到的显热通量作为参考值, 检验 3 种不同湿度订正方法对显热通量造成的影响。可见, 在较湿润条件下 (波文比系数小于 0.5), 如果完全忽略大气中水汽的影响, 对 C_T^2 和显热通量都会造成低估, 且以方法 3 订正的误差最小; 在干旱半湿润条件 (波文比系数大于 0.5), 3 种订正方法之间的差异减小, 以方法 2 和方法 3 较为接近; 在干旱条件 (波文比系数大于 1) 下, 大气中水汽对显热通量的影响并不显著, 3 种方法得到的 H_{LAS} 值之间的差异很小。因此, 在湿润条件下 (波文比系数小于 0.5), 需要对大气中的水汽进行订正。在干旱条件下 (波文比系数大于 1), 水汽对 H_{LAS} 的影响并不显著, 综合考虑到 3 种订正方法对估算显热通量造成的差异以及可操作性, 认为采取涡动相关仪的波文比数据进行订正即可。

3.2.3 大气稳定度判断与普适函数的选取

由于大孔径闪烁仪只能观测到大气湍流的强度, 并不能判断通量的符号, 因此, 在迭代计算显热通量前, 需要对显热输送方向进行判断。参考卢俐等^[22]的研究, 分别在有温度梯度观测的密云站采用理查逊数 R_i ($R_i < 0$), 无温度梯度观测的馆陶站采用净辐射 ($R_n > 10 \text{ W/m}^2$) 作为大气稳定度的判据。

表 2 不同湿度订正方法对显热通量估算的影响 (W/m^2)

Table 2 Effect on H_{LAS} of various humidity correction methods

波文比	H_{LAS} 方法 1			H_{LAS} 方法 2			H_{LAS} 方法 3		
	<i>RMSD</i>	<i>MBE</i>	<i>MAPD</i>	<i>RMSD</i>	<i>MBE</i>	<i>MAPD</i>	<i>RMSD</i>	<i>MBE</i>	<i>MAPD</i>
0~0.5	20.76	2.48	10.02	15.21	3.24	11.17	16.64	2.87	13.60
0.5~1	2.27	1.46	1.54	3.89	1.69	2.12	5.06	2.17	2.81
1~3	2.37	0.83	1.29	2.99	0.62	1.71	5.57	0.75	1.12

$$RMSD = \left| \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2 \right|^{0.5}, \quad MBE = \frac{1}{n} (P_i - O_i), \quad MAPD = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|P_i - O_i|}{O_i}$$

不同学者给出了计算显热通量 H_{LAS} 过程中不同的稳定度普适函数表达式 (表 3)。

选取馆陶站 2008 年 1 月、7 月数据, 以 Kipp & Zonen 说明书推荐的 Andreas (1988) 函数计算得到的 $H_{LAS_Andreas}$ 值为标准, 分别计算了与上述其他不同稳定度普适函数得到显热通量的差异 ($\Delta H = H_{LAS} - H_{LAS_Andreas}$), 结果如图 6 所示。

从图 6 可知: 在不稳定状况下, 不同普适函数的表现各有差异。除 De Bruin (1993) 函数、Thiemann & Grassl (1992) 函数外, Andreas (1988) 函数计算的 H_{LAS} 与其他 4 种函数均较为接近, 且差值都在 10 W/m^2 以内。在稳定状态下, 除 De Bruin 函

数与 Andreas (1988) 函数计算的 H_{LAS} 的差异较大外, 其他普适函数的计算值与 Andreas (1988) 函数的差值都集中分布在零附近 $\pm 5 \text{ W/m}^2$ 的范围内。因此, 本文采用了 Andreas (1988) 函数计算显热通量。

3.2.4 有效高度的计算

在不同型号的仪器以及不同的地形条件下, LAS 有效高度有不同的计算方法。其中主要考虑到了以下 3 种地势: ①平坦地表; ②倾斜下垫面; ③起伏下垫面。总结不同型号仪器有效高度的计算方法及相关研究, 大致可以分为以下 3 种:

(1) 在德国 Scintec LAS 说明书中, 给出倾斜路径上有效高度的计算公式:

表 3 不同形式的稳定度普适函数表达式

Table 3 Comparisons between the various MOST empirical functions under unstable and stable conditions

	不稳定状态 ($L < 0$)	稳定状态 ($L > 0$)
Andreas (1988)	$\bar{\theta}_T \left(\frac{Z_{\text{LAS}} - d}{L_{\text{MO}}} \right) = 4.9 \left(1 - 6.1 \frac{Z_{\text{LAS}} - d}{L_{\text{MO}}} \right)^{-2/3}$	$\bar{\theta}_T \left(\frac{Z_{\text{LAS}} - d}{L_{\text{MO}}} \right) = 4.9 \left[1 + 2.2 \left(\frac{Z_{\text{LAS}} - d}{L_{\text{MO}}} \right)^{2/3} \right]$
Wyllaard <i>et al</i> (1971)	$\bar{\theta}_T \left(\frac{Z_{\text{LAS}} - d}{L_{\text{MO}}} \right) = 4.9 \left(1 - 7 \frac{Z_{\text{LAS}} - d}{L_{\text{MO}}} \right)^{-2/3}$	$\bar{\theta}_T \left(\frac{Z_{\text{LAS}} - d}{L_{\text{MO}}} \right) = 4.9 \left[1 + 2.75 \left(\frac{Z_{\text{LAS}} - d}{L_{\text{MO}}} \right) \right]$
Wyllaard <i>et al</i> (1973)	$\bar{\theta}_T \left(\frac{Z_{\text{LAS}} - d}{L_{\text{MO}}} \right) = 4.9 \left(1 - 7 \frac{Z_{\text{LAS}} - d}{L_{\text{MO}}} \right)^{-2/3}$	$\bar{\theta}_T \left(\frac{Z_{\text{LAS}} - d}{L_{\text{MO}}} \right) = 4.9 \left(1 + 2.4 \left(\frac{Z_{\text{LAS}} - d}{L_{\text{MO}}} \right)^{2/3} \right)$
Thieman and Grassl (1992)	$\bar{\theta}_T \left(\frac{Z_{\text{LAS}} - d}{L_{\text{MO}}} \right) = 6.23 \left[1 - 7 \left(\frac{Z_{\text{LAS}} - d}{L_{\text{MO}}} \right) + 75 \left(\frac{Z_{\text{LAS}} - d}{L_{\text{MO}}} \right)^2 \right]^{-1/3}$	$\bar{\theta}_T \left(\frac{Z_{\text{LAS}} - d}{L_{\text{MO}}} \right) = 6.23 \left[1 + 7 \left(\frac{Z_{\text{LAS}} - d}{L_{\text{MO}}} \right) + 20 \left(\frac{Z_{\text{LAS}} - d}{L_{\text{MO}}} \right)^2 \right]^{1/3}$
De Bruin <i>et al</i> (1993)	$\bar{\theta}_T \left(\frac{Z_{\text{LAS}} - d}{L_{\text{MO}}} \right) = 4.9 \left(1 - 9 \frac{Z_{\text{LAS}} - d}{L_{\text{MO}}} \right)^{-2/3}$	$\bar{\theta}_T \left(\frac{Z_{\text{LAS}} - d}{L_{\text{MO}}} \right) = 5$
Kaimal and Finnigan (1994)	$\bar{\theta}_T \left(\frac{Z_{\text{LAS}} - d}{L_{\text{MO}}} \right) = 5 \left[1 + 6.4 \left \frac{Z_{\text{LAS}} - d}{L_{\text{MO}}} \right \right]^{-2/3}$	$\bar{\theta}_T \left(\frac{Z_{\text{LAS}} - d}{L_{\text{MO}}} \right) = 4 \left[1 + 3 \frac{Z_{\text{LAS}} - d}{L_{\text{MO}}} \right]$
Edson and Fairall (1998)	$\bar{\theta}_T \left(\frac{Z_{\text{LAS}} - d}{L_{\text{MO}}} \right) = 5.92 \left(1 - 8 \frac{Z_{\text{LAS}} - d}{L_{\text{MO}}} \right)^{-2/3}$	$\bar{\theta}_T \left(\frac{Z_{\text{LAS}} - d}{L_{\text{MO}}} \right) = 5.9 \left(1 + 2.4 \left(\frac{Z_{\text{LAS}} - d}{L_{\text{MO}}} \right)^{2/3} \right)$

$$Z_{\text{LAS}_1} = \left| 3 \frac{Z_T^{-\frac{1}{3}} - Z_R^{-\frac{1}{3}}}{Z_T - Z_R} \right|^{-\frac{3}{4}} \quad (12)$$

其中, Z_T 和 Z_R 分别为发射端和接收端高度。

(2) 在荷兰 Kipp&Zonen LAS 说明书中, 考虑了光程路径上测点海拔高度的差异, 给出了结合空间权重函数计算有效高度的公式:

$$Z_{\text{LAS}_2} = \int_0^1 Z(u) G(u) \, \mathrm{d}u \quad (13)$$

$$Z_{\text{LAS}_3} = \frac{-1 + \sqrt{1 - \frac{4c_2}{L_{\text{MO}}} \left(\int_0^1 Z(u) \left[1 - c_2 \frac{Z(u)}{L_{\text{MO}}} \right]^{-2/3} G(u) \, \mathrm{d}u \right)^{-3/2}}}{- \frac{2c_2}{L_{\text{MO}}}} \quad (14)$$

其中, c_1 , c_2 为稳定度普适函数中的系数, 本文根据 Andreas (1988) 稳定度函数, 得到 $c_1 = 4.9$, $c_2 = 6.1$ 。

针对公式 (13)、公式 (14) 的计算方法, 以密云站倾斜下垫面、馆陶站平坦下垫面为例, 选取 2008 年 1 月、7 月数据进行计算。图 7 给出了密云站和馆陶站各 GPS 测点的高度以及空间权重的分布函数。其中, 要根据 GPS 测点距离发射 (或接收端) 的距离以及光径路线的长度, 首先将 GPS 测点距离发射 (或接收端) 的距离进行归一化处理, 并根据前后相邻两点将 GPS 测点的高度插值到相对权重所在的归一化距离处, 再结合该点的相对权重值进行加权平均即可。

比较了方法 3 (公式 (14)) 与方法 2 (公式 (13)) 计算的密云站、馆陶站 1 月、7 月不稳定状态下有效高度的日变化结果 (图 8)。可以看出, 在平坦和起伏的下垫面上, 通过与空间权重函数相结合

其中, $Z(u)$ 、 $G(u)$ 分别为 IAS 观测路径上的测点高度和空间权重函数。

(3) 大孔径闪烁仪获取的光程路径上的显热通量值是垂直和水平尺度上的空间平均值。Hartogensis 等^[20]考虑了光程路径上测点下垫面水热状况的差异, 结合稳定度普适函数及空间权重函数给出了有效高度的计算公式:

的方法计算得到的有效高度比结合大气稳定度方法得到的有效高度偏低。特别是在起伏地势上, 2 种方法计算有效高度的差异略大一些。

图 9 给出以密云站和馆陶站 2008 年 1 月和 7 月数据为例, 2 种不同计算方法得到的不稳定状况下显热通量的差异。总的来看, 结合莫宁—奥布霍夫长度迭代计算 (公式 (14)) 得到的有效高度比公式 (13) 的结果略偏大, 但是对显热通量的影响非常小。其中密云站和馆陶站 1 月、7 月平均的 $RMSE$ 和 $MAPD$ 分别为 0.26 W/m^2 和 0.38% 以及 1.39 W/m^2 和 0.8% 。

因此, 有效高度随着稳定度的变化对显热通量影响并不显著。本文采用公式 (13) 计算 IAS 观测的有效高度。

3.3 显热通量数据的插补

以 2008 年密云站 LAS 的观测数据为例, 对数据缺失状况进行了统计 (表 4), 分为短时间数据缺

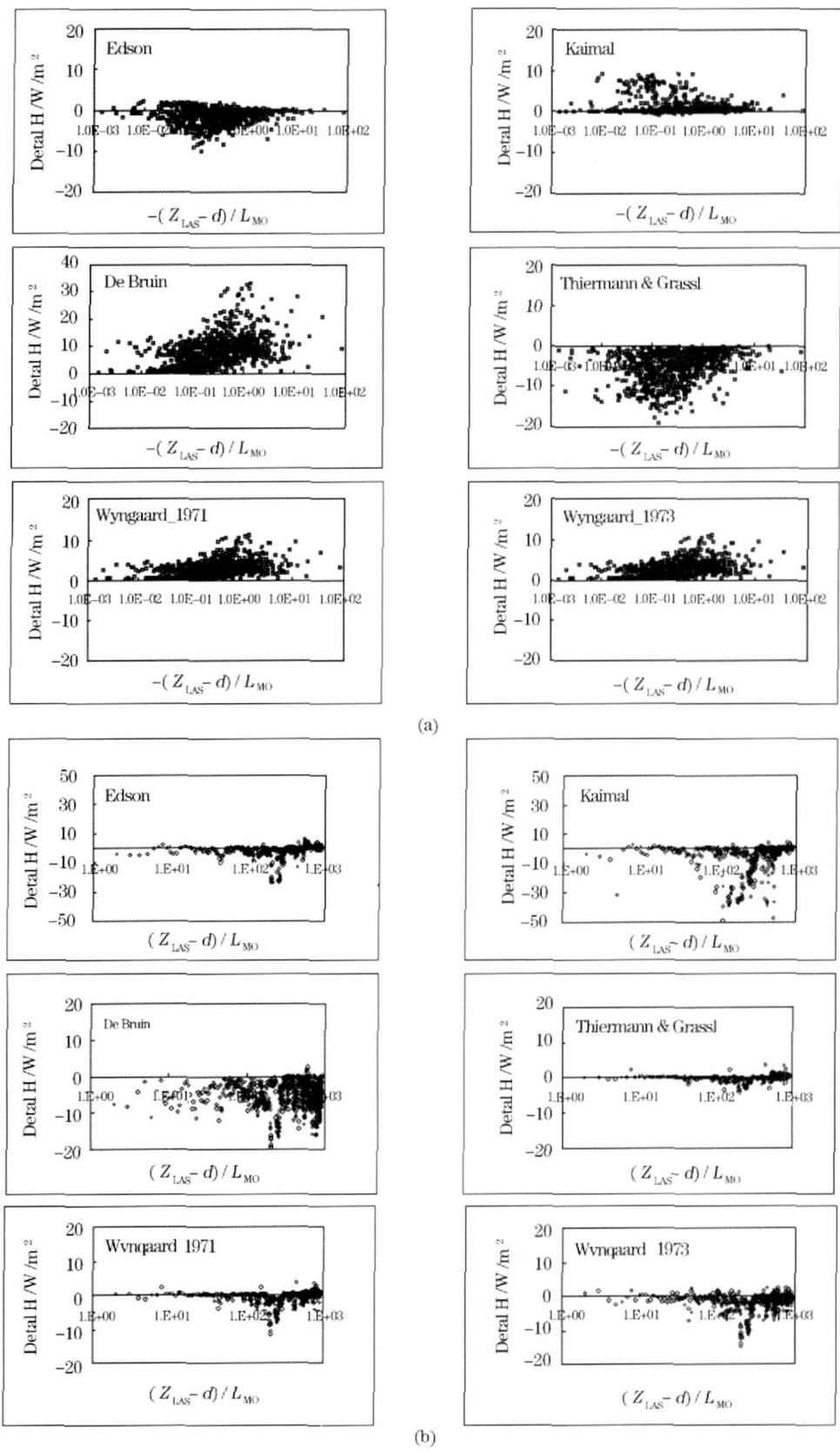


图 6 不稳定状态 (a) 及稳定状态 (b) 下不同稳定度普适函数计算的 H_{LAS} 与 $H_{LAS-Andreas}$ 的差值
Fig.6 Comparison of H_{LAS} calculated between Andreas and other empirical functions

under unstable (a) and stable (b) conditions

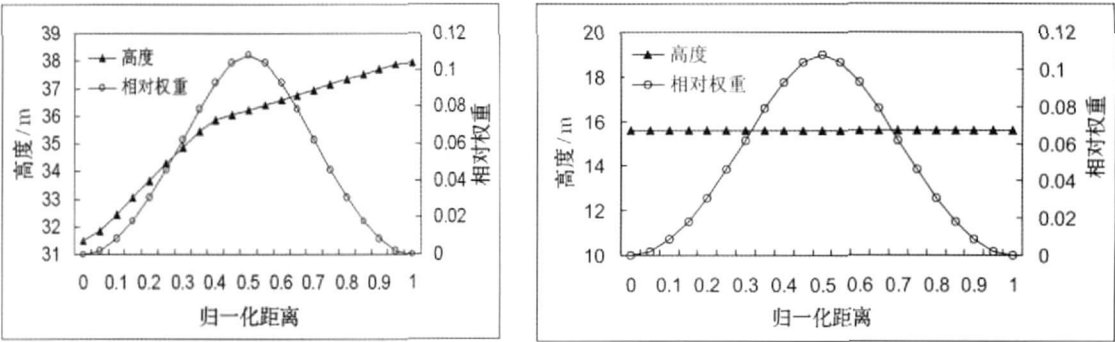


图 7 密云站(左)、馆陶站(右)光程路径上各测点的高度及空间权重分布函数

Fig. 7 Height of observation site and the path-weighting function of LAS in Miyun(left) and Guantao(right) site

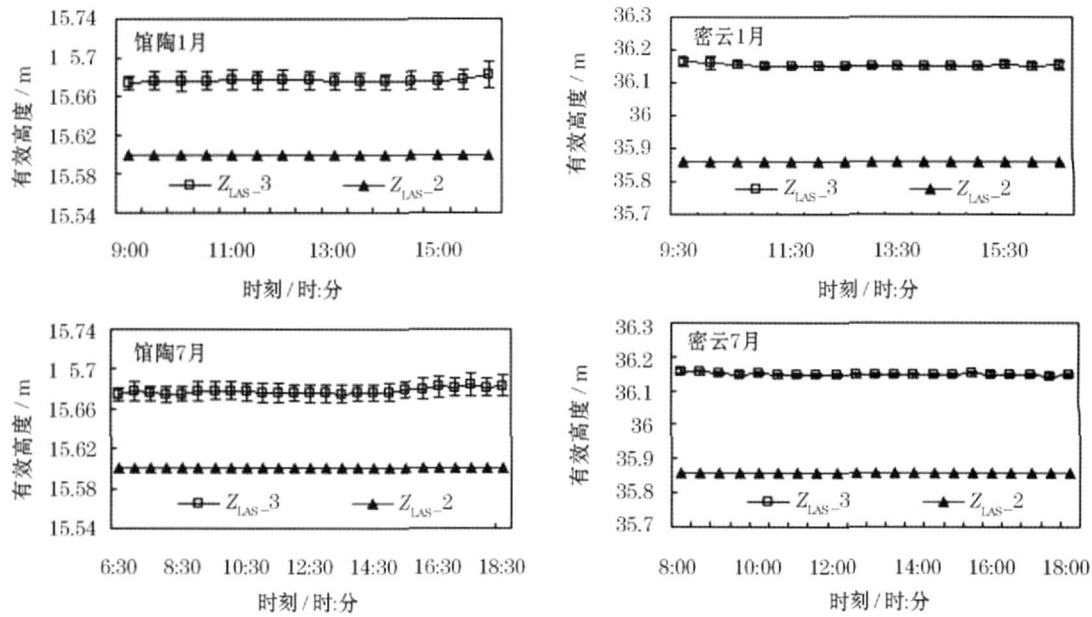


图 8 馆陶站、密云站 2008 年 1 月、7 月不同计算方法得到有效高度平均值的比较

Fig. 8 Comparison of averaged effective heights of different method of Guantao and Miyun site in January and July, 2008

失 (30 min 显热通量的缺失)和长时间数据缺失(日显热通量的缺失)。其中日显热通量缺失定义为不稳定状态下 30 min 显热通量缺失率大于 50% 的观测日。

表 4 2008 年密云站不稳定状态下 30 min 和日显热通量缺失状况

Table 4 30 min and daily LAS data missing conditions under unstable conditions of Miyun site in 2008

30 min 缺失时次	1	2	3	4	5	6	7	8	9	> 10
次数	17	18	13	12	9	5	1	3	2	3
日缺失天数	1	2	3	4	5					
次数	16	11	1	2	1					

本文分 30 min 显热通量的缺失和日显热通量的缺失 2 种情况, 比较了自由对流方法、非线性回归方法 (Nonlinear Regression Methods, NLR)、动态线性

回归方法 (Dynamic Linear Regression, DLR) 与 HANTS 方法 (Harmonic Analysis of Times Series) 的插补效果。其中, 对于稳定条件下 30 min 显热通量的缺失, 参考 Hemakumara 等^[25] 以及 Meijninger 等^[26] 的研究, 认为夜间的显热通量较小可以忽略, 采用零值插补稳定状态下缺失的显热通量。

针对不稳定状态下 30 min 显热通量缺失情况, 对以下插补方法进行了比较:

(1) 自由对流方法。即: $H_{free} = \rho_a C_p b_{LAS} (Z_{LAS} - d) (\frac{g}{T})^{1/2} (C_T^2)^{3/4}$, 其中, b_{LAS} 是经验系数, 不同的

LAS 生产商给出的经验值各有差异, 其中荷兰 Kipp & Zonen 生产的 LAS、自制大尺度水热通量观测系统和德国 Scintec 公司 LAS 给出的经验值分别为

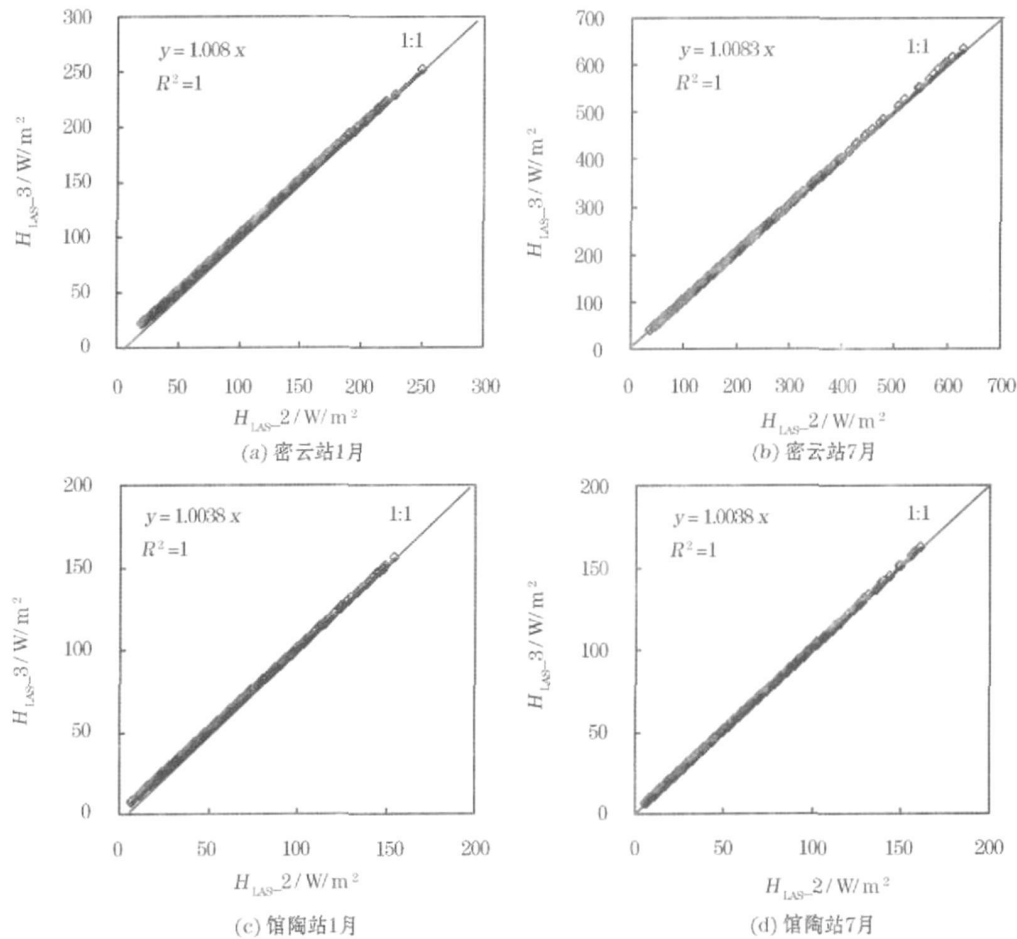


图 9 密云站、馆陶站 2008 年 1 月、7 月两种不同有效高度计算方法对显热通量的影响

Fig 9 Comparison of the effect of different effective heights on H_{LAS} in Guantao and Miyun site of January and July 2008

H_{LAS-2} : Z_{LAS-2} 计算的显热通量, H_{LAS-3} : Z_{LAS-3} 计算的显热通量

H_{LAS-2} : sensible heat flux calculated based on Z_{LAS-2} H_{LAS-3} : sensible heat flux calculated based on Z_{LAS-3}

0.48 和 0.47。但是该方法只考虑了热力湍流引起的显热通量部分, 没有将摩擦速度的影响计算在内。因此, 除非 LAS 的安装高度足够高可以用该方法计算白天不稳定条件下的显热通量, 否则该方法的计算结果相对于迭代方法, 会造成显热通量的低估。

(2) 非线性回归方法 (NLR)。此方法建立显热通量与其主要影响因子的回归方程^[34]。本文选取缺失数据当日不稳定状态下的观测数据建立显热通量与净辐射的二次幂函数方程。若拟合函数的相关系数 (R^2) 大于 0.5, 则可以利用建立的方程对缺失数据进行填补。

针对不稳定状态下 30 min 数据缺失情况, 选取了密云站 2008 年 1 月、7 月中任一典型晴天和多云天的完整数据, 人工删除数据, 形成不同状况的数据缺失, 即单个时次和连续多个时次 (2~3 个) 数据的

缺失, 分别利用自由对流方法和 NLR 方法进行插补, 并与原始的观测数据进行了比较 (图 10)。从图 10 可以看出, 自由对流方法对显热通量普遍存在低估的效应, 而高估和低估情况在 NLR 方法中都有出现。总体来看, NLR 方法插补得到的显热通量与原始的观测值更为接近。其中晴天下自由对流方法和 NLR 方法的 $RMSE$ 分别为 17.83 和 10.22 W/m^2 , 多云天 2 种方法的 $RMSE$ 分别为 13.81 和 7.05 W/m^2 。本文采用了 NLR 法来插补不稳定状态下 30 min 数据的缺失。

针对日显热通量缺失情况, 对以下插补方法进行了比较:

(1) 非线性回归方法 (NLR)。选取缺失数据前后 10 天的观测数据, 建立显热通量与净辐射的二次幂函数方程。如果相关系数 (R^2) 大于 0.5, 则可利用已建立的方程对缺失数据进行填补, 否则应适当

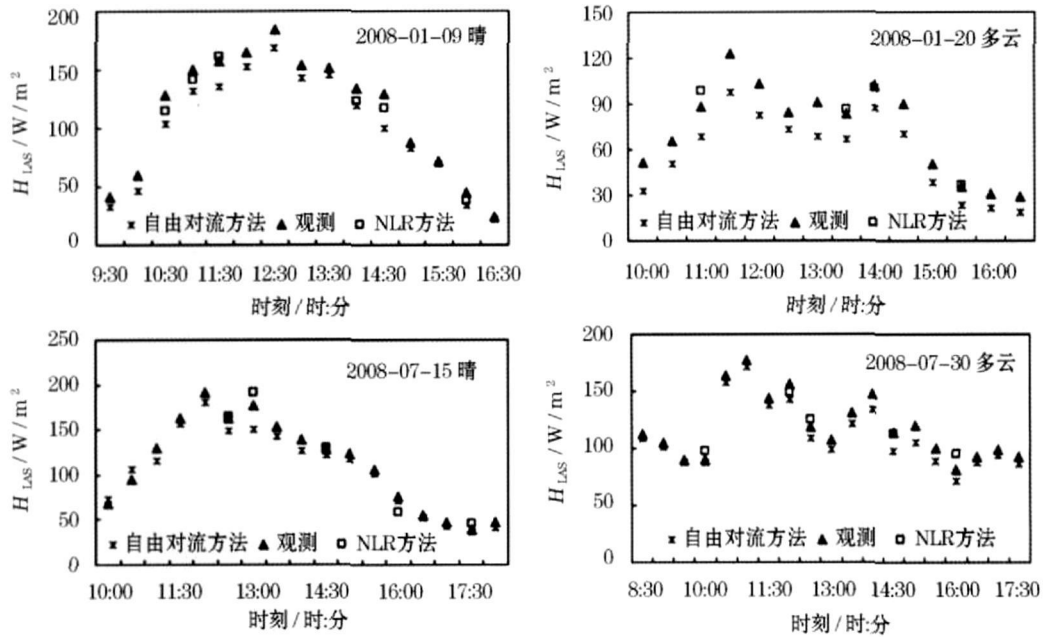


图 10 密云站 2008 年 30 m in 显热通量缺失情况下不同插补方法的比较

Fig 10 Comparison of H_{LAS} filled by different gap filling methods of Miyun site in 2008

扩大窗口。

(2) 动态线性回归方法 (DLR)。用于显热通量插补的动态线性回归方程, 是将显热通量表示为净辐射 R_n 和土壤热通量 G 的回归关系^[37, 38], 即 $H(t) = \alpha(t)(R_n(t) - G(t)) + \zeta(t)$, 其中 $\alpha(t)$ 为模型参数, ζ 为模型误差, t 为时间; 随时间变化的参数 $\alpha(t)$ 可以表示为: $\alpha(t) = \alpha(t-1) + \eta_\alpha(t)$, η_α 为均值为零的随机误差。通过同化未缺失时刻的显热通量优化模型, 并利用显热通量缺失时刻 $a(t)$ 的估算值计算该时刻显热通量的最优估算值。

以密云站 2008 年 8 月 30 日至 11 月 8 日为例, 人为设定 1 天 (9 月 12 日和 9 月 28 日) 和连续 2 天 (10 月 26~27 日)、3 天 (11 月 5~7 日) 缺失情况, 采用了 NLR 和 DLR 方法进行了插补 (图 11)。

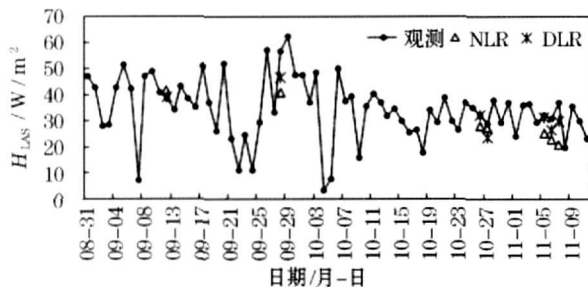


图 11 日显热通量缺失情况下不同插补方法的比较

Fig 11 Comparison of daily H_{LAS} filled by different gap filling methods of Miyun site in 2008

由图 11 可见, 在大多数情况下, DLR 方法比 NLR 方法得到的日显热通量值与观测值更为接近, 其中 NLR 方法和 DLR 方法的 RMSD 分别为 9.69 和 5.29 W/m^2 。因此本文采用 DLR 法来进行日显热通量缺失的插值。

3.4 潜热通量的计算及插补

由 30 m in 平均的观测数据计算得到显热通量后, 结合能量平衡方程的余项法可计算得到潜热通量^[24], 即

$$LE_{LAS} = R_n - G - H_{LAS} \quad (15)$$

其中, LE_{LAS} 、 R_n 分别为潜热通量和净辐射, G 为订正至地表 (0 cm) 的土壤热通量, 本文采用了 Yang 等^[51]方法对土壤热通量进行订正, 且净辐射和土壤热通量的测量在密云站和馆陶站均位于大孔径闪烁仪显热通量测量源区权重值最大的中点附近或中点处。

然而, 由于冬季净辐射较小, 且能量主要用于显热通量的消耗, 潜热通量很小。因此在利用能量平衡方程的余项法计算潜热通量时, 会由于 R_n 和 H_{LAS} 较为接近且量级较小而造成较大的误差, 经常出现潜热通量为零或负值的情况。通过对密云站 2008 年数据进行分析, 认为日净辐射小于 50 W/m^2 时, 利用能量平衡方程的余项法推算潜热通量会造成较大的误差。下面分别利用 LAS 观测的日蒸散量与 EC 观测的日蒸散量建立关系式, DLR 方法与 HA-

NTS等3种方法,对密云站2008年日净辐射小于 50 W/m^2 的1月、2月、3月以及11月、12月的蒸散量进行计算。其中利用LAS观测的日蒸散量与EC观测的日蒸散量建立关系式的方法是指根据每日不稳定状态下涡动相关仪观测和大孔径闪烁仪根据地表能量平衡方程计算的每30 min的蒸散量ET建立线性关系式,对缺失时刻的蒸散量进行插补的方法;而用于插补潜热通量的DLR方法是将彭曼公式与数据同化方法相结合^[36],利用潜热通量、净辐射、土壤热通量和饱和水汽压差建立回归方程,作为该同化算法的模型算子,利用集合卡曼滤波作为最优化算法,通过对未缺失时刻潜热通量的同化,对模型参数进行优化,得到各个时刻潜热通量最优估算值,即 $LE(t) = \alpha(t)[R_n(t) - G(t)] + \beta(t)D(t) + \zeta(t)$,其中 $\alpha(t)$ 、 $\beta(t)$ 为模型参数, ζ 为模型误差, t 为时间,通过给定 $\alpha(t)$ 、 $\beta(t)$ 一个初值,基于集合卡曼滤波算法利用未缺失时刻的潜热通量优化 $\alpha(t)$ 、 $\beta(t)$,并计算出缺失时刻的模型参数,从而由上式估算出该时刻的潜热通量。HANTS方法(Harmonic Analysis of Time Series)是在傅立叶变换基础上改进的一种时间序列分析方法^[41]。该方法允许数据在时间序列上不等间距,并由使用者选择周期性函数的频率去模拟观测值的时间序列数据。HANTS方法一般对长时间有周期变化的数据进行插补,由于蒸散量(潜热通量)具有年变化特征,本文将该方法用在冬天月蒸散量的计算中。各种插补方法的效果如图12所示。

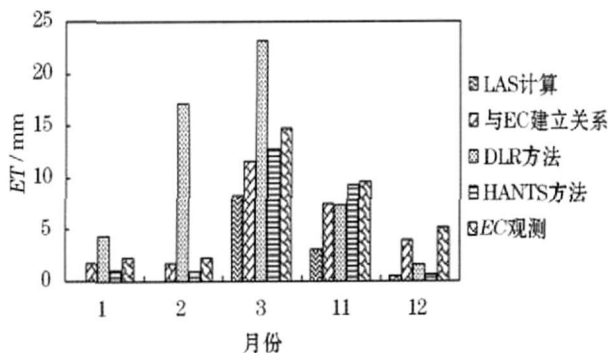


图 12 不同方法计算得到冬季蒸散量的比较

Fig 12 Comparison of ET filled by different gap filling methods of Miyun site in 2008

由图12可见,通过能量平衡方程的余项法直接计算LAS冬季蒸散量较小或接近于0。由于冬季净辐射和蒸散量都较小,DLR方法的误差较大,HANTS方法则与EC观测蒸散量的变化趋势差异较

大,而通过与EC观测的蒸散量建立关系式得到的LAS观测的蒸散量比EC的观测值略偏低,但变化趋势一致。其中3种方法的RMSD分别为7.95、2.35与1.83 mm。因此,本文利用与EC观测的日蒸散量建立关系式的方法来推算LAS冬季蒸散量。

通过上述分析,本文建立了一套完整的LAS观测数据的处理流程(图13)。

本文所建立的大孔径闪烁仪观测数据的处理流程,相对于荷兰和德国BLS_450系列大孔径闪烁仪的处理软件,增加了原始数据的筛选、大气稳定度的判断以及湿度订正等步骤,同时还包括了不同时间尺度显热、潜热通量数据的插补,保证了获取数据的质量和连续性,可以应用于荷兰Kipp&Zonen、德国Scintec BLS_450 LAS以及自制大尺度水热通量观测系统的数据处理,其中荷兰Kipp&Zonen LAS与研制大尺度水热通量观测系统的数据处理流程类似。

以密云站2008年4月12日和4月30日为例(4月30日剔除了5:00~12:00信号强度较弱的的数据),对比了本文建立的数据处理流程与荷兰Kipp&Zonen LAS处理软件的计算结果(图14)。其中,荷兰Kipp&Zonen LAS处理软件无大气稳定度的判断及缺失数据的插补等步骤。从图14可以看出,2种处理流程得到的显热通量的结果与净辐射变化趋势一致,且在稳定和不稳定状态下都较为接近。但是本文所建立的处理流程通过对大气稳定度的判断以及数据的插补,得到了全天连续的显热通量。采用同样的大气稳定度判断标准,2种处理流程在4月12日和30日稳定和不稳定状态下的RMSD分别为4.13、2.52、10.32及2.38 W/m^2 。

4 结论与讨论

本文以2008年密云站和馆陶站的观测数据为例,较全面地分析了大孔径闪烁仪观测数据的处理流程,并针对其中关键处理步骤进行了讨论,包括原始观测数据的筛选、 C_n^2 的计算、大气稳定度普适函数的选取、湿度订正、有效高度的计算方法,以及冬天蒸散量的计算与不同时间尺度缺失数据的插补等,最后形成了一套较为完整的大孔径闪烁仪观测数据的处理流程。

(1) LAS的原始观测数据需要对降水时刻、达到饱和、信号强度较弱的的数据,以及稳定状态下的弱湍流数据进行剔除。其中密云站和馆陶站的信号强度阈值分别为-30和-10 mV。

(2) 以不稳定状态下的数据为例,讨论了空气

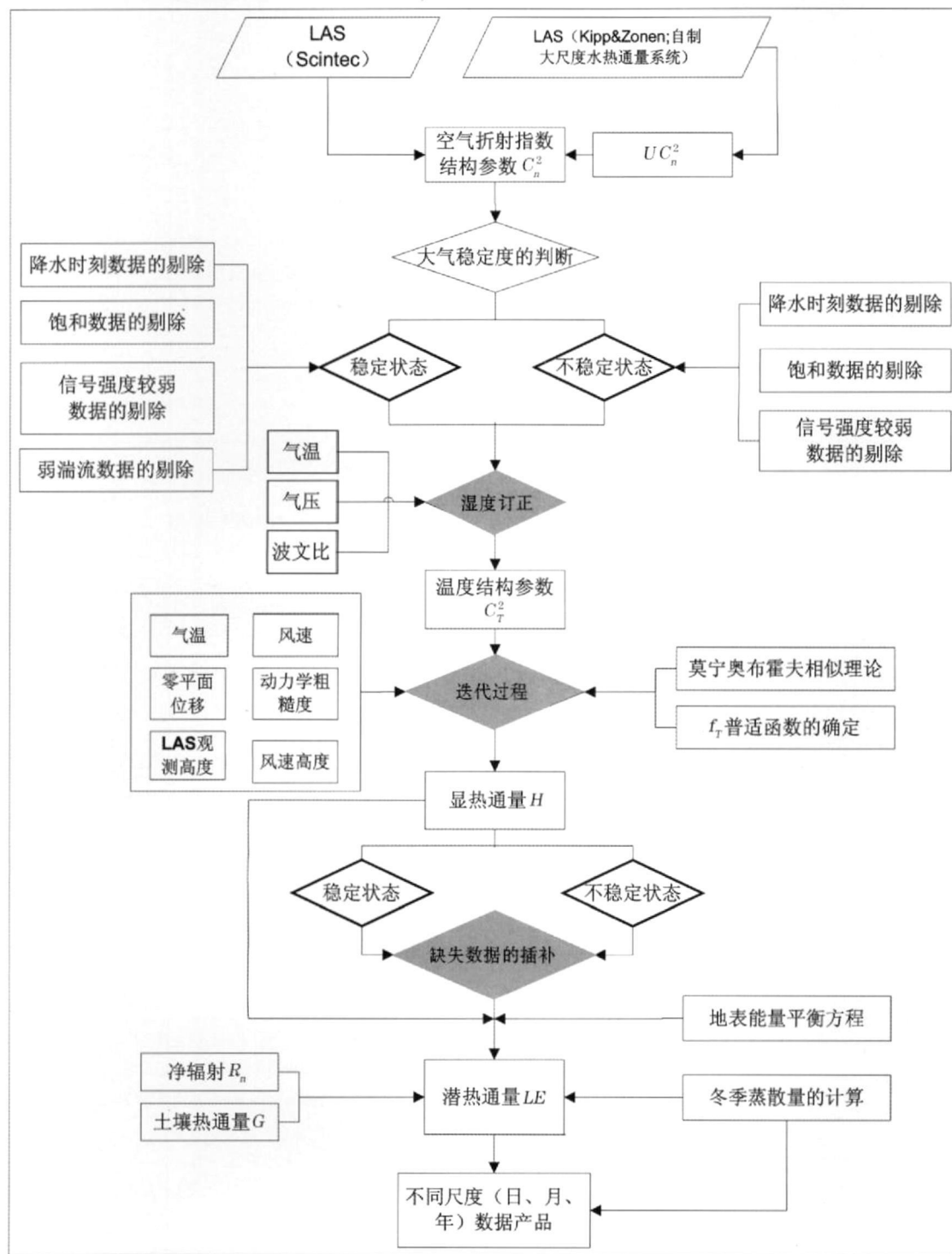


图 13 大孔径闪烁仪数据处理流程图

Fig 13 Flow chart of LAS data processing

折射指数结构参数的计算、湿度订正、有效高度计算以及稳定度普适函数选取等不同方法之间的差异,认为:空气折射指数结构参数应结合空气折射指数结构电压值的方差进行计算;可采用逐日的日平均波文比系数进行湿度订正;有效高度通过与光程路

径上权重函数迭加的方法来计算;稳定度普适函数选取了 Andreas(1988)函数。

(3) 稳定状态下 30 m 显热通量的缺失可用零值插补,不稳定状态下则根据非线性回归方法进行插补。日显热通量缺失可采用动态线性回归方法

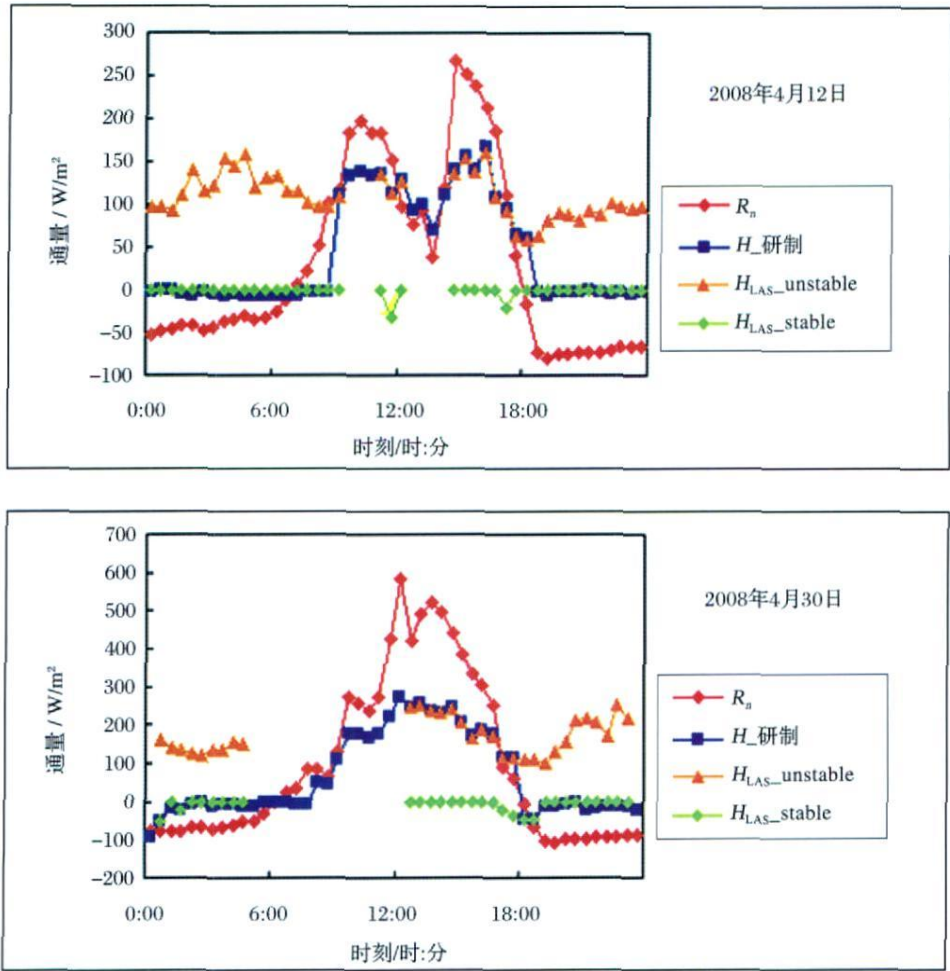


图 14 不同数据处理流程的结果比较

Fig 14 Comparison of the results among different LAS data process scheme

来插补。为了解决由于净辐射和显热通量较小,造成能量平衡方程的余项法计算蒸散量产生较大误差的问题,采用了根据 LAS 与 EC 观测日蒸散量建立的相关关系式进行推算。

(4) 本文建立的大孔径闪烁仪观测数据处理流程,与荷兰 LAS 处理流程的结果较为一致。但是在极端环境条件(空气湿度高、地形起伏等)及不同程度数据缺失状况下,本文建立的数据处理流程仍然可以得到连续、可靠的观测数据。

参考文献 (References):

[1] Chebouni A, Watts C, Lagouarde J P. Estimation of heat and momentum fluxes over complex terrain using a large aperture scintillometer [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, 105: 215-226

[2] Hoedjes J C B, Zuurbier R M, Watt C J. Large aperture scintillometer used over a homogeneous irrigated area partly affected by regional advection [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2002, 105:

99-117

[3] 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

[4] Beyrich F, Richter S H, Weisenbeck U, et al. The LITFASS-98 experiment: Fluxes over a heterogeneous land surface [C] // *Proceedings of the 14th Symposium on Boundary Layer and Turbulence*, Aspen, CO, American Meteorological Society, 45 Beacon St., Boston, MA, 2000 9-10.

[5] Special Issue of "Boundary-Layer Meteorology" [M]. Springer 2006, 121: 1-220.

[6] 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

[7] Meijninger W M L, Beyrich F, L di 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: 89-110

- [8] Kleissl J, Gomez J, Hong S H, *et al*. Large aperture scintillometer intercomparison study [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2008, 128: 133-150.
- [9] Savage M J. Estimation of evaporation using a dual-dean surface layer scintillometer and component energy balance measurements [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, 149: 501-517.
- [10] Solignac P A, Brut A, Selles J L, *et al*. Uncertainty analysis of computational methods for deriving sensible heat flux values from scintillometer measurements [J]. *Atmospheric Measurement Techniques Discussion*, 2009, 2: 1383-1417.
- [11] Ochs G R, Wilson J J A. second-generation large aperture scintillometer [Z]. NOAA Tech. Memor. ERL ETL-232, NOAA Environmental Research Laboratories, Boulder, CO, USA, 1993: 24.
- [12] Ochs G R, Hill R J. Optical-scintillation method of measuring turbulence inner scale [J]. *Applied Optics*, 1985, 24: 2430-2432.
- [13] Beyrich F. Operational aspects of scintillometry [Z]. 2nd Scintillometer Workshop, Wageningen, 2007.
- [14] Ezzahar J, Chehbouni A, Hoedjes J C B, *et al*. The use of the scintillation technique for monitoring seasonal water consumption of olive orchards in a semi-arid region [J]. *Agricultural Water Management*, 2007, 89: 173-184.
- [15] Von Randow C, Kruit B, Holtslag A M, *et al*. Exploring eddy-covariance and large-aperture scintillometer measurements in an Amazonian rain forest [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 148: 680-690.
- [16] Ezzahar J, Chehbouni A, Hoedjes J *et al*. Combining scintillometer measurements and an aggregation scheme to estimate area-averaged latent heat flux during the AMMA experiment [J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 375(1/2): 217-226.
- [17] Scintec boundary layer scintillometer [Z]. User manual Scintec, 2007: 70.
- [18] De Bruin H A R, Kohsiek W, Van den Huk B J J M. A verification of some methods to determine the fluxes of momentum, sensible heat and water vapor using standard deviation and structure parameter of scalar meteorological quantities [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1993, 63: 231-257.
- [19] Hoedjes J C B, Chehbouni A, Ezzahar J *et al*. Comparison of large aperture scintillometer and eddy covariance measurements. Can thermal infrared data be used to capture footprint-induced differences? [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2007, 8: 144-159.
- [20] Hartogensis O K, Watts C J, Rodriguez J C, *et al*. Derivation of an effective height for scintillometers. La Poza experiment in northwest Mexico? [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2003, 4: 915-928.
- [21] Marx A, Kunstmann H, Schutteneyer D, *et al*. Uncertainty analysis for satellite derived sensible heat fluxes and scintillometer measurements over savannah environment and comparison to mesoscale meteorological simulation results [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 148: 656-667.
- [22] Lu Li, Liu Shaojin, Xu Zivei, *et al*. Results from measurements of large aperture scintillometer over different surfaces [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2009, 20(2): 171-178. [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]. *应用气象学报*, 2009, 20(2): 171-178.]
- [23] Kipp & Zonen. Large aperture scintillometer instruction manual [Z]. Kipp & Zonen, 2007: 74.
- [24] Green A E, Hayashi Y. Use of the scintillometer technique over a rice paddy [J]. *Journal of Agricultural Meteorology*, 1998, 54(3): 225-234.
- [25] Hamakura H M, Chandrapala L, Moene A F. Evapotranspiration fluxes over mixed vegetation areas measured from large aperture scintillometer [J]. *Agricultural Water Management*, 2003, 58: 109-122.
- [26] Meijninger W M L, De Bruin H A R. The sensible heat fluxes over irrigated areas in western Turkey determined with a large aperture scintillometer [J]. *Journal of Hydrology*, 2000, 229: 42-49.
- [27] Moene A F. Effects of water vapour on the structure parameter of the refractive index for near-infrared radiation [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2003, 107: 635-653.
- [28] Asanuma J, Imoto K. Measurements of regional sensible heat flux over Mongolian grassland using large aperture scintillometer [J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 333: 58-67.
- [29] Odhiambo G O, Savage M J. Sensible heat flux by surface layer scintillometry and eddy covariance over a mixed grassland community as affected by Bowen ratio and MOST formulations for unstable conditions [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2009, 10: 479-492.
- [30] Su Z, Timmermans W, Gieske A, *et al*. Quantification of land-atmosphere exchanges of water, energy and carbon dioxide in space and time over the heterogeneous Bamax site [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2008, 29(17): 5215-5235.
- [31] Lu Li. A Study on the Observation Influencing Factors and Scale Relationships of the Sensible Heat Flux [D]. Beijing: Beijing Normal University, 2008: 163. [卢俐. 地表感热通量的观测、影响因素和尺度关系的研究 [D]. 北京: 北京师范大学, 2008: 163.]
- [32] Moene A F, De Bruin H A R. Sensible heat flux data derived from the scintillometers [C] // Su Z, Jacobs C, eds. BCRS Report: Advanced Earth Observation Land Surface Climate. Final Report 01-02, 2001: 85-90.
- [33] De Bruin H A R, Van Den Huk B J J M, Kohsiek W. The scintillation method tested over a dry vineyard area [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1995, 76: 25-40.
- [34] Xu Zivei, Liu Shaojin, Xu Tongren, *et al*. Comparison of the gap filling methods of evapotranspiration measured by eddy covariance system [J]. *Advances in Earth Science*, 2009, 24(4): 372-382. [徐自为, 刘绍民, 徐同仁, 等. 涡动相关仪观测蒸散量的插补方法比较 [J]. *地球科学进展*, 2009, 24(4): 372-382.]
- [35] Falge E, Baldocchi D D, Olson R, *et al*. Gap filling strategies

- for long term energy flux data sets[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 107: 71-77.
- [36] Alav iN, W arland J S, Berg A A. Filling gaps in evapotranspiration measurements for water budget studies: Evaluation of a Kalman filtering approach[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 141: 57-66.
- [37] Ren Lihong, Wang Chenghai, Qi Chongjian, et al. A study of computing the surface flux in the typical arid region of northwest China by a variational method[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2004, 28(2): 269-277. [任立宏, 王澄海, 邱崇践, 等. 利用变分法计算西北典型干旱区地表通量的研究[J]. 大气科学, 2004, 28(2): 269-277.]
- [38] Yang Juan, Zhou Guangsheng, Wang Yunlong, et al. Estimation of sensible and latent heat fluxes of typical steppe in inner Mongolia based on variational method[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(11): 2046-2051. [杨娟, 周广胜, 王云龙, 等. 基于变分方法的内蒙古典型草原水热通量估算[J]. 应用生态学报, 2006, 17(11): 2046-2051.]
- [39] Schmidt A, W izesinsky T, Kimm O. Gap filling and quality assessment of CO₂ and water vapour fluxes above an urban area with radial basis function neural networks[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2008, 126: 389-413.
- [40] Dou Zhaoyi, Li Jianjun. Application of artificial neural networks to interpolation and extrapolation of flux data[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2009, 24(3): 58-62. [窦兆一, 刘建军. 人工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.]
- [41] Verhoef W. Application of Harmonic Analysis of NDVI Time Series (HANTS) [C] // Azzalini M (ed). Fourier analysis of temporal NDVI in the Southern African and American continents. Report of DLO Winand Staring Centre, Wageningen (The Netherlands), 1996.
- [42] 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: 334-338.
- [43] Hill R J, Clifford S F, Lawrence R S. Refractive-index and absorption fluctuations in the infrared caused by temperature, humidity, and pressure fluctuations[J]. *Journal of Optical Society of America*, 1980, 70(10): 1192-1205.
- [44] Wesely M L. The combined effect of temperature and humidity fluctuations on refractive index[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1976, 15: 43-49.
- [45] Andreas E L. Two wavelength method of measuring path-averaged turbulent surface heat fluxes[J]. *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*, 1989, 6: 280-292.
- [46] Andreas E L. Estimating C_n^2 over snow and sea ice from meteorological data[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1988, 5: 481-495.
- [47] De Bruin H A R, Kohsiek W, Van den Hurk B J J M. A verification of some methods to determine the fluxes of momentum, sensible heat and water vapor using standard deviation and structure parameter of scalar meteorological quantities[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1993, 63: 231-257.
- [48] Thiemann V, Grassl H. The measurement of turbulent surface layer fluxes by use of bichromatic scintillation[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1992, 58: 367-389.
- [49] W yngaard J C, Lum i Y, Collins Jr S A. Behaviour of the refractive index structure parameter near the ground[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1971, 61: 1646-1650.
- [50] W yngaard J C. On surface-layer turbulence[C] // Proceedings of the Workshop on Micrometeorology. American Meteorological Society, Denver, CO, 1973: 101-149.
- [51] Yang K, Wang J M. A temperature prediction-correction method for estimating surface soil heat flux from soil temperature and moisture data[J]. *Science in China (series D)*, 2008, 51: 721-729.

A Study of the Processing Method of Large Aperture Scintillometer Observation Data

BAI Jie¹, LU Shaomin¹, DING Xiaoping¹, LIU Li^{1,2}

(1 State Key Laboratory of Remote Sensing Science, School of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2 Meteorological Information Center of Beijing Meteorological Bureau, Beijing 100089, China)

Abstract Sensible/latent heat fluxes can be obtained by Large Aperture Scintillometer (LAS) over several kilometers, which play an significant role in the analysis of and application to agricultural and forestry, hydrology and meteorology research. Take LAS observations in Miyun and Guantao stations over Hai River Basin in 2008 as an example. The way of data screening and quality control under unstable conditions as well as the effect of different calculation method on sensible heat flux have been discussed. The results showed the structure parameter of

the refractive index (C_n^2) should be calculated with the variance of the voltage of structure parameter of the refractive index. Humidity correction can be done with daily Bowen ratio. The effective height of LAS can be calculated with spatial averaged function. The Andreas (1988) function is used to get reliable sensible heat flux. Meanwhile, the nonlinear regression method and dynamic linear regression method have been used to fill the 30 min and daily missing data while the 30 min missing data under stable conditions can be set to zero. The correlation relationship between daily ET measured by LAS and EC has been constructed to estimate daily ET when daily $R_n < 50 \text{ W/m}^2$. Based on the above analysis, a set of LAS data processing scheme has been set up, which ensures continuous and high quality sensible/latent data can be obtained over various surfaces and weather conditions.

Key words Large Aperture Scintillometer; Data screen and quality control; Unstable condition; Gap filling methods

绿色能源生产应当考虑耗水情况

欧盟一项最新的研究强调,在评估低碳能源生产系统(如生物燃油、太阳能光电系统)的传输时,应当考虑耗水因素。

据美国能源信息署(EIA)估计,世界范围内对液体燃油运输的需要在2005—2030年间将增加50%,为应对这一气候变化和能源安全的双重挑战,必须发展用于运输的新型低碳能源。然而,能源生产耗水量大,必须在相关技术投入大规模应用之前对可替代能源的耗水量进行评估。

该研究使用生命周期评估法(LCA)对整个低碳能源技术供应链所需的耗水量予以评估,包括:灌溉、采矿和生产、蒸腾过程中使用的水;产品中所含有的或浪费的、或使用后排入海洋的废水。研究人员将生产无铅汽油所用水的生命周期与两大类低碳能源进行了比较:①生物燃料:包括玉米乙醇、大豆生物柴油、植物纤维质乙醇和海藻(包括生于封闭管道中的和开放池塘中的)柴油;②向机动车提供动力的3类非传统电力能源(CO₂捕获和封存燃煤发电站、太阳能光伏电站、太阳能集热电站)。

研究表明,单位车辆里程(VMT)的耗水量,无铅汽油是0.07加仑,灌溉柳枝稷是12加仑,太阳能集热发电是0.23加仑,CCS燃煤发电是0.21加仑。只有太阳能光伏发电的耗水量比无铅汽油少。但如果同时考虑车辆制造的耗水(电动车辆电池的生产也需要耗水),太阳能光伏电力系统的耗水量高。生物燃料生产的耗水量通常比化石燃料和太阳能系统高。

考虑到平均用水量和运输,研究人员按比例增加了耗水量。灌溉生物和开阔池塘藻类生物燃料生产系统的耗水量高,使用的水量超过与运输有关的能源生产总需水量的1%,而其市场占有率低于10%。当市场占有率为50%时,这些燃料消耗的水量超过水总需求量的10%。而大豆和玉米生物燃料生产由于受到土地利用的限制,预计不会达到这样的水平。以10%的市场占有率而言,无铅汽油预计消耗0.21%的总水量,市场占有率为50%时,耗水量为1.02%。

替代电力系统、非灌溉生物和封闭性藻类生物燃料生产系统所需水量相对较少,尽管其耗水量比生产无铅汽油高出40%~200%。

目前上述技术大都尚处于研发阶段,增进对其负面影响的理解,有助于其在被大规模应用之前的完善和改进。低碳能源必不可少,但为避免任何无意的环境、社会和经济后果,任何一种新技术都必须被详细评估。对于替代能源生产技术,水的消耗是有待权衡的要素之一,其所涉及的其他潜在影响包括:土地利用变化、化肥的使用以及对食品价格的负面影响。

(宁宝英 译 张树良 校)

原文题目: Water consumption of green energy production should be considered

来源: <http://ec.europa.eu/environment/integration/research/newsalert/pdf/212na1.pdf>