

文章编号:1001-8166(2010)11-1128-11

大尺度水热通量观测系统的研制^{*}

施生锦¹, 黄彬香¹, 刘绍民², 杨 燕¹, 黄勇彬³, 徐自为²

(1. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193; 2. 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; 3. 北京雨根科技有限公司, 北京 101100)

摘 要:基于闪烁理论、孔径平均效应及莫宁—奥布霍夫相似理论(MOST),成功研制了大尺度水热通量观测系统样机YZ01,该系统主要由发射器、接收器、云台、瞄准器、气象传感器、数据采集器、数据处理软件、远程无线数据传输模块、太阳能供电系统等部分组成。该系统发射器平均功耗3 W,接收器功耗1.8 W,比德国的BLS450和荷兰的LAS都更省电;发射器光源功率为100 mW,比荷兰LAS的80 mW更强,在同样条件下,YZ01接收器接收到的闪烁光解调信号比荷兰LAS强14%左右,说明在相同的安装距离下,YZ01比荷兰LAS更适于在能见度低的条件下使用,或者说在同样的环境条件下,YZ01比荷兰LAS可以测量更远的距离。YZ01在北京密云站与荷兰Kipp&Zonen公司的LAS、美国Campbell公司的涡度相关测定系统进行了短期的应用对比试验,结果为:空气折射指数的结构参数 C_n^2 、感热通量 H 、潜热通量 LE 的日变化趋势都非常一致;YZ01与LAS之间 C_n^2 的线性拟合系数为0.98,相关系数为0.7; H 的线性拟合系数为0.90,相关系数为0.93;YZ01通过余项法算出的 LE 与涡度相关直接测得的 LE 的线性拟合系数为1.07,相关系数为0.78。YZ01在青海阿柔站与德国Scintec公司的BLS450进行对比结果为:空气折射指数的结构参数 C_n^2 、感热通量 H 、潜热通量 LE 的日变化变化趋势也都非常一致,YZ01与BLS450之间 C_n^2 的线性拟合系数为1.25,相关系数为0.93; H 的线性拟合系数为1.17,相关系数为0.99;YZ01通过余项法算出的 LE 与涡度相关测定系统测得的 LE 的线性拟合系数为1.03,相关系数为0.84。表明该研究所研制的大尺度水热通量观测系统不仅可以达到国外同类仪器同样的应用水平,而且比国外同类产品更省电、比荷兰LAS更适应在低能见度条件下使用。

关 键 词:大尺度水热通量观测系统;感热通量;潜热通量

中图分类号:P404

文献标志码:A

1 引 言

地表水热通量一直是农林、水文、生态、气象等相关领域关注的热点内容,深入了解其变化过程对天气预报、水资源管理、全球气候变化等相关研究工作具有十分重要的意义。目前大尺度(公里级)地

表水热通量的观测仍然非常困难,尤其在非均匀及地形起伏等复杂下垫面条件下^[1]。传统的地表水热通量观测技术,如涡动相关、波文比等方法,虽已得到广泛应用,但只能提供单点或斑块尺度的测量结果,观测的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^[2~4]。而

^{*} 收稿日期:2010-05-25;修回日期:2010-09-07。

^{*} 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:施生锦(1965-),男,福建尤溪人,副教授,主要从事气象及植物生理生态仪器的设计、研制及应用研究。

E-mail:ssj@cau.edu.cn

基于闪烁法原理及孔径平均效应发展的大孔径闪烁仪(Large Aperture Scintillometer, LAS),结合莫宁—奥布霍夫相似理论(Monin-Obukhov Similarity Theory, MOST),则可连续测量 250 ~ 5 000 m 甚至几十公里的路径平均显热通量^[5,6]。进而,在 LAS 的源区内如果有代表的净辐射和土壤热通量观测或遥感值,则还可利用能量平衡方法估算出大尺度的潜热通量^[7,8]。该方法能够快速实现水热通量时间及空间上的平均,且测量尺度与大气模式的网格尺度、卫星遥感的像元尺度匹配较好^[4,9],因此近十几年得到快速发展^[6,10~12]。在国外,目前能生产大尺度水热通量测定系统的主要有德国 Scintec 公司和荷兰的 Kipp&Zonen 公司。在国内虽有采用点源发射,大孔径接收的相关仪器的研究报道^[13],但主要用于空气折射指数结构参数 C_n^2 的测定及光传输研究。目前国内进行大尺度水热通量研究所用的大孔径闪烁仪几乎全部依赖国外进口,高昂的仪器购置费用及脱节的仪器维护限制了该技术的进一步应用。国外产品在国内应用时的缺点还表现在,如德国 Scintec 公司产品,一是功耗大,如 BLS450 的接收器功率高达 15 W(包括数据处理单元),在没有交流供电条件的地方,必须配备大功率的太阳能电池板(大于 100 W)和大容量电池(大于 100 Ah);二是软件集成度高,无法根据实际需求控制输出参数,不便对结果进行质量控制。荷兰 Kipp&Zonen 公司产品 LAS 的主要缺点是发射器发光信号较弱,在测量距离大于 3 km 时,如果能见度较小,即使功率调到最大,接收器也很难接收到有效的信号,这就限制了它在低能见度条件下的应用。

本研究在综合国外 2 种大孔径闪烁仪的优缺点的基础上研制出比国外同类产品更省电,发光信号比荷兰 Kipp&Zonen 公司的 LAS 更强,造价比国外同类产品低,并具有自主知识产权的大尺度水热通量观测系统。为节省外汇和提高我国大尺度水热通量相关领域的研究和应用水平奠定基础。本研究在李小文和刘绍民主持的公益性行业(气象)科研专项经费项目“大尺度水热通量观测系统的研制与应用研究”的资助下,从 2007 年 10 月开始实施,现已研制出 3 台样机。

2 基本原理

2.1 光闪烁法测定 C_n^2 原理

当光波在大气中传播时,由于受大气的吸收、散射等影响,其强度和位相等都会发生变化,其中光强

度的波动(通常称为闪烁)最为明显。对光传播最重要的影响因素是传播路径上空气的折射指数(n)的起伏,空气折射指数则主要是大气的温度、湿度和气压的波动引起空气密度的波动而产生^[14]。空气折射指数的结构参数 C_n^2 是折射率起伏强度的定量描述^[15],是反映大气湍流特性的最重要的参数之一。利用光闪烁测量路径平均的 C_n^2 是一种直接有效的方法,其原理是:在弱湍流条件下,当传播路径均匀时,光强度自然对数的方差(σ_{\ln}^2)与空气折射指数的结构参数(C_n^2)存在确定的线性关系。最初发展的小孔径闪烁仪,被广泛应用于测量较短路径的平均 C_n^2 。但在路径较长或强湍流条件下,会出现闪烁饱和现象,即 σ_{\ln}^2 与 C_n^2 比例关系不再成立,这限制了更长路径 C_n^2 的测量^[16,17]。为解决这一问题,Wang 等^[18]在 1978 年基于 Clifford 理论,提出了基于孔径平均效应的大孔径闪烁仪(LAS)的设计思路,其基本思想是:对于一定面积的非相干光源在一定面积的接收孔径内的闪烁光,当发射孔径 D_t 和接收孔径 D_r 满足一定条件时,可以在一定程度上避免饱和现象。具体计算原理见公式(1)(不进行饱和修正)及公式(2)(进行饱和修正)。80 年代后,基于 Wang 的理论发展的大孔径闪烁仪得到了广泛的应用^[6,10,19]。

$$\sigma_{\ln}^2 = 16\pi^2 k^2 \int_{\alpha}^{\infty} d\kappa \kappa \phi_n(\kappa) \int_0^L dx \sin^2\left(\frac{\kappa^2 x(L-x)}{2kL}\right) \left[2 \frac{J_1\left(\frac{\kappa D_r x}{2L}\right)}{\frac{\kappa D_r x}{2L}} \right]^2 \left[2 \frac{J_1\left(\frac{\kappa D_t (L-x)}{2L}\right)}{\frac{\kappa D_t (L-x)}{2L}} \right]^2 \quad (1)$$

$$\sigma_{\ln}^2 = 16\pi^2 k^2 \int_{\alpha}^{\infty} d\kappa \kappa \phi_n(\kappa) \int_0^L dx \sin^2\left(\frac{\kappa^2 x(L-x)}{2kL}\right) M_{ST}\left(\frac{\kappa x\left(1 - \frac{x}{L}\right)}{k}, L\right) \left[2 \frac{J_1\left(\frac{\kappa D_r x}{2L}\right)}{\frac{\kappa D_r x}{2L}} \right]^2 \left[2 \frac{J_1\left(\frac{\kappa D_t (L-x)}{2L}\right)}{\frac{\kappa D_t (L-x)}{2L}} \right]^2 \quad (2)$$

公式(1)及(2)中: k 为 LAS 发射光的波数, κ 为大气湍流的三维空间波数, $\phi_n(\kappa)$ 为折射指数的空间谱密度, D_t 为发射器孔径, D_r 为接收器孔径, L 为发射器与接收器间光径长度, J_1 为一阶 Bessel(贝塞尔)函数, M_{ST} 为饱和修正因子。

基于光闪烁原理测定 C_n^2 的大孔径闪烁仪主要包括发射器、接收器 2 部分,发射器与接收器相隔一定距离(250 ~ 5 000 m)分开放置,安装高度通常为距离下垫面几米到几十米高度。发射器发射经过高

频调制的一定波长的波束,接收器接收到孔径范围内受光程路径上温度、湿度和气压扰动影响的光束,并对接收到的信号进行放大、解调及计算处理,从而得到空气折射指数的结构参数 C_n^2 。当发射器与接收器孔径一样时,路径上加权平均的 C_n^2 与 σ_{nl}^2 的关系可由公式(3)确定^[18]。

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

上式中, D 为发射器与接收器的孔径, L 为发射器与接收器之间的光程长度。

2.2 大尺度水热通量测定原理

2.2.1 感热通量的测定原理

利用测量的 C_n^2 及相关的空气温度(T)、气压(P)等数据,可以计算温度的结构参数 C_T^2 :

$$C_T^2 = C_n^2 \left(\frac{T^2}{-0.78 \times 10^{-6} P} \right)^2 \left(1 + \frac{0.03}{\beta} \right)^{-2} \quad (4)$$

式中: β 为波文比。进而,根据莫宁—奥布霍夫相似理论(MOST),无量纲化的温度的结构参数,只是大气稳定度参数(ζ)的函数:

$$\frac{C_T^2}{T_*^2 Z_{LAS}^{-2/3}} = f_T(\zeta) \quad (5)$$

其中, T_* 为温度尺度参数, Z_{LAS} 为LAS有效高度。在函数 $f_T(\zeta)$ 已知时,由上式计算得到 T_* ,进而可用下式计算250~5 000 m甚至几十公里的大尺度范围内平均显热通量 H ^[20],

$$H = -\rho_a C_p u_* T_* \quad (6)$$

其中, u_* 为摩擦速度, ρ_a 和 C_p 分别为空气的密度及定压比热。具体计算过程请参见本专辑白洁等^[21]的文章。

2.2.2 潜热通量的测定原理

通过空气折射指数的结构参数 C_n^2 推算出感热通量 H 后,结合多点平均净辐射(R_n)及多点平均土壤热通量(G),或使用源区内代表性点的净辐射和土壤热通量;或用遥感模型的方法获得大尺度的净辐射和土壤热通量等数据,可以通过能量平衡余项方法按公式(7)估算出大尺度的平均潜热通量^[7,8]。

$$LE = R_n - G - H \quad (7)$$

3 仪器结构

本研究所设计的大尺度水热通量观测系统主要由发射器、接收器、云台、瞄准器、气象传感器、数据采集器、数据处理软件、远程无线数据传输模块、太阳能供电系统等部分组成。发射器用于发射光波束,接收器用于接收闪烁光强,云台用于固定和调整

接收器,瞄准器用于对准发射器和接收器,气象传感器用于测量空气温湿度、风向风速、净辐射、土壤热通量等相关气象参数,数据采集器用于采集和存储气象传感器和接收器所接收到的信号。为了便于使用,本研究系统还配备了远程数据传输模块和太阳能供电系统。

3.1 发射器

发射器主要由光源、调制电路、可调功率放大器、透镜、外壳及电源等部分组成,图1是发射器的设计流程图,图2是发射器的实物图。

3.1.1 光源

采用发光二极管,中心波长880 nm、半波宽80 nm,880 nm不在水汽吸收带上,可以减小光传播路径中水汽吸收对光闪烁测量的影响。光源的最大输出功率为100 mW,可以满足测量长达5 000 m路径范围的功率要求。相比之下,荷兰的LAS也是采用880 nm的发光二极管,但最大输出功率只有80 mW,所以最远只能测到4 500 m路径;德国的BLS450采用400多个普通发光二极管,光源总体功率较大,也可以满足测量长达5 000 m路径范围的功率要求,但耗电功率也更大。

3.1.2 调制电路

由于在自然的湍流大气中,白天有很强的太阳光,夜间有月光、星光等,这些光有时候比发射器发出的光强很多,为了避免这些背景光的干扰,本发射器设计了调制电路,调制频率为6.5 kHz,把发射器880 nm的光信号加载到该调制频率上,在接收器上再把它解调回来,即可获得不受背景光干扰的闪烁光信号。

3.1.3 可调功率放大电路

由于不同地方和季节,湍流大气的透明系数不同;或者在大气透明系数相近条件下,相同功率的发射器可以传输的距离也是不一样的。为了便于在250~5 000 m不同光学路径条件下使用,本发射器设计了可调功率放大电路,脉冲电流在0.05~1 A范围内连续可调,可以满足250~5 000 m路径内在不同天气条件下提供测量信号的要求。功率放大器的放大倍数可根据实际需要外部可调电位器调整。

3.1.4 透镜

发射器出光孔的孔径为直径150 mm,采样菲涅尔透镜将点光源转换成平行光发出,便于接收器对准接收。本系统选用的菲涅尔透镜的焦距为140 mm,二极管激光器放置于焦距处。

3.1.5 电源及工作条件

电源对于保证发射器的长期正常工作十分重要, 为了便于使用充电电池和太阳能供电, 本系统发射器设计的标称工作电压 12 VDC, 可在 10 ~ 14 VDC 范围内正常工作, 最大电流 0.5 A, 最大功耗 6 W(采样 1 A 脉冲电流时), 平均电流 0.25 A, 功耗 3 W(采样 0.5 A 脉冲电流时)。而德国 BLS450 发射器的功耗最大

80 W(125 Hz 时), 平均 8 W(4 Hz 时); 荷兰 LAS 发射器的功耗最大也是 5 W, 平均 3.6 W, 但是它的发射光源的功率只有 80 mW, 而本系统发射光源功率为 100 mW, 整体效率比荷兰 LAS 更高。

为了使系统具有较好的环境适应能力, 本系统的发射器均选择军品级或工业级芯片, 工作温度范围 -30 ~ 60℃, 湿度 0 ~ 100%。

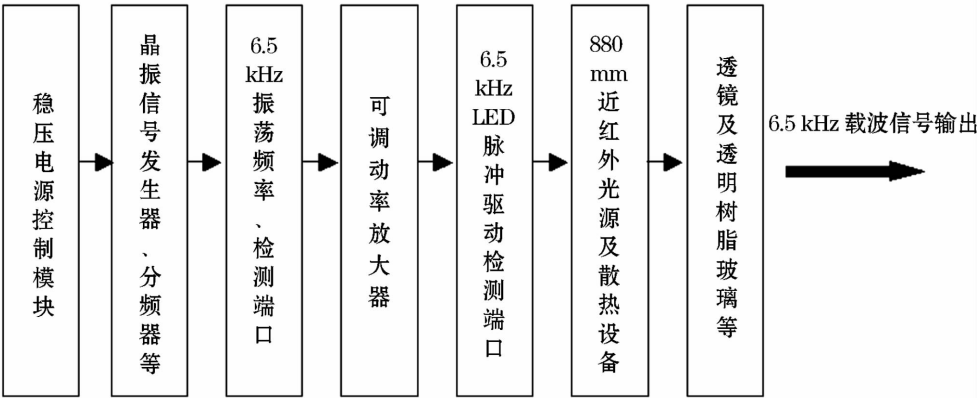


图 1 发射器设计流程图
Fig.1 Overview of steps of the transmitter part



图 2 发射器实物图
Fig.2 Practicality picture of the transmitter

3.2 接收器

接收器主要包括检测器、滤波解调电路、信号处理电路、透镜、外壳及电源等部分, 图 3 是接收器的设计流程图, 图 4 是接收器的实物图, 从外观看基本一样。

3.2.1 检测器

为了能检测到几千米外发射来的 880 nm 光信号, 本接收器选择窄波段响应、高灵敏度的 880 nm 光电二极管接收器, 检测器响应波长范围 700 ~ 950 nm, 半波宽 60 nm, 灵敏度在 880 nm 为 0.6 A/W, 响

应时间 1 μs。
3.2.2 滤波解调电路
为保证接收器能响应到经过路径衰减后的载波信号, 然后把信号从背景干扰中真实地解调回来, 接收器中设计了高通、低通、带通滤波电路, 最后通过的信号频率为 0.2 ~ 400 Hz, 满足湍流测定中频谱响应要求。滤波后再进行信号解调, 把发射器中加载在 6.5 kHz 调制频率的载波信号解调出来, 直接输出不受背景光干扰的闪烁光解调信号 U_{demod} , 电压范围为 -0.8 ~ 0 V。

3.2.3 信号处理电路

根据本文 2.1 所述 C_n^2 测定原理, 为了获得测定 C_n^2 , 须对闪烁光的解调信号进行取对数、做均方差等处理。本系统选用专门的 LOG 放大和均方根处理器件并设计了相关的信号运算电路, 接收器可直接输出与 C_n^2 信号直接相关的电压信号 $U_{C_n^2}$, 其电压范围为 -5 ~ 0 V。为了检验解调回来的信号源到 C_n^2 信号输出的信号处理电路的准确性, 本系统在接收器中特别设计了信号校准电路, 在信号校准电路中, 通过人为输入已知的标准信号, 该信号经过信号处理电路后输出的结果与理论计算结果进行比较, 便可检验其处理电路的正确性。为了方便测试, 在接收器上预留了校准信号输入端、解调信号及与 C_n^2 信

号相关的信号输出端,并设计了相应测试电路。

3.2.4 透镜

接收器的进光孔孔径也是 150 mm,也配有菲涅尔透镜,用于将发射器发出的平行光聚焦到接收器的检测器上,本系统选用透镜的焦点为 140 mm,光电二极管检测器放置于焦点处。

3.2.5 电源及工作条件

与发射器一样,接收器的标称工作电压为 12

VDC,可在 10 ~ 14 VDC 范围内正常工作,但接收器的工作电流比发射器小(不超过 0.15 A,功耗不超过 1.8 W)。而德国 BLS450 由于接收器与数据处理单元做在一起,功耗高达 15 W。荷兰 LAS 的接收器的功耗为 2.4 W,也比本系统的稍大些。

与发射器一样,本系统接收器也均选择军品级或工业级芯片,工作温度范围为 - 30 ~ 60℃,湿度 0% ~ 100%。

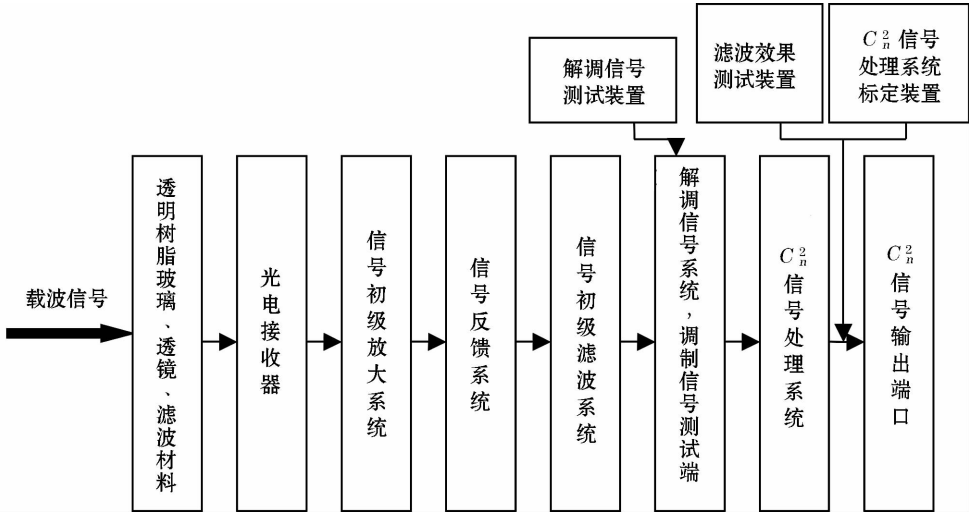


图 3 接收器的设计流程图
Fig. 3 Overview of steps of the receiver part



图 4 接收器实物图
Fig. 4 Practicality picture of the receiver

3.3 外壳、云台及瞄准器

本系统发射器和接收器的外壳、云台和瞄准器基本都一样。外壳为铝圆筒,内径 150 mm,外径 160 mm,长 300 mm,重约 3 kg,具有防水功能,发射器和接收器的各种器件和电路板均安放在发射器和接收器的圆筒内。

桶底连接云台,云台的水平旋转角度为 0 ~

350°,垂直旋转 0 ~ 90°,重约 1 kg,发射器或接收器的外壳与云台通过 2 根不锈钢喉箍固定在一起,云台可直接连接通用的测量三角架。

发射器和接收器的瞄准器选用专用枪瞄,均安装在外壳的顶上,可随时装卸,瞄准器的放大倍数为 3 ~ 12 倍,视场宽度为 100 ~ 2.6 m/100 m,长度 345 mm,重量 0.6 kg。

3.4 气象传感器、数据采集器及数据处理软件

根据本文 2.1 和 2.2 的介绍,为了最后获得大尺度水热通量值,除了要自动采集和记录接收器输出的信号,还需要同步自动测定空气温湿度、风向风速、净辐射、土壤热通量等相关气象参数,最后经过一系列的迭代运算才能完成。本系统对于数据采集器气象传感器没有特别的要求,可以选用通用的数据采集器和通用的气象传感器。在本文第 4 部分对比试验中所选用的温湿度传感器为 Vaisala 公司的 HMP45C,风向风速和土壤热通量传感器为 Avalon 公司的 AV-30W 和 AV-HFT3,净辐射传感器为 Kipp&Zonen 公司的 CNR1,数据采集器采用 Datalogger 公司的 DT80。

关于具有迭代运算和数据质量监控功能的数据处理软件的详细内容,请参考本专辑中白洁等^[21]的文章。

3.5 远程无线数据传输模块及太阳能供电系统

为了便于使用,本系统可以配备远程数据传输模块和太阳能供电系统。远程数据传输模块可以根据需要使用 GPRS、CDMA 或 3G 等网络,便于随时传输数据和及时发现问题。另外由于本系统安装距离相对较远,安装高度也较高,安装太阳能供电系统是很好的选择。本系统如果安装远程无线传输模块,对于我国的大部分地区,发射器和接收器需选配 50 W 太阳能板和 50 Ah 充电电池;如果不安装远程无线传输模块,对于我国的大部分地区,发射器和接收器只需选配 40 W 太阳能板和 40 Ah 充电电池即可。

4 对比应用

经过调试、标定后,已有 3 台样机先后在北京密云、青海阿柔、河南济源、河北馆陶进行应用对比观测。本文仅采用本系统的第一台样机 YZ01 在北京密云试验站和青海阿柔试验站分别与荷兰 Kipp&Zonen 公司的 LAS、德国 Scintec 公司的 BLS450 及涡度相关(EC)测定系统的短期对比观测结果来说明它的初步应用效果。在密云和阿柔所用的涡度相关测定系统中,三维超声风速仪均为美国 Campbell 公司的 CSAT3,开路式 CO₂/H₂O 分析器均为美国 Licor 公司的 LI-7500。

4.1 密云站与荷兰 LAS 及 EC 的对比

密云站(117°19'24"E,40°37'51"N)位于北京市密云区新城子镇,下垫面主要为果园、玉米和居民地。YZ01 和荷兰 LAS 的光径长度都是 2 420 m,有效高度都为 35.86 m,YZ01 的发射器与荷兰 LAS 的

接收器安装在西南端,YZ01 的接收器与荷兰 LAS 的发射器安装在东北端;涡度相关系统和净辐射、风向风速、空气温湿度等气象传感器安装在光径路线中间果园与玉米分界处上方 26 m 高度的气象观测塔上;2 个土壤热通量传感器则安装在该塔下,对比数据为每 30 min 分钟平均值。本次对比试验时间为 2009 年 6 月 30 日至 7 月 4 日,对比结果如下。

4.1.1 闪烁光解调信号 U_{demod} 对比分析

闪烁光解调信号 U_{demod} 是用来表示接收器接收到的闪烁光解调信号的大小,它的大小主要受发射器的发射光信号强度和光径路线的能见度影响。 U_{demod} 的大小用负电压表示,单位为 V 或 mV,负的越多,表示接收到的闪烁光信号越强。图 5 是 YZ01 与荷兰 LAS 的闪烁光解调信号 U_{demod} 对比图。从图 5 可看出,在同样的安装距离,相同的天气条件下,YZ01 的解调信号普遍比荷兰 LAS 强,2009 年 6 月 30 日至 7 月 5 日期间平均强 14% 左右,说明在相同的安装距离下,YZ01 比荷兰 LAS 更适于在能见度较低条件下使用,或者说在同样的环境条件下,YZ01 比荷兰 LAS 可以测量更远的距离。

4.1.2 空气折射指数的结构参数 C_n^2 对比分析

图 6 为 YZ01 与 LAS 观测的 C_n^2 结果的比较图。从图 6 可以看出,两者的日变化趋势非常一致,测量结果多数情况下比较接近,它们之间的线性拟合系数为 0.98,相关系数 0.75。

4.1.3 显热通量 H 对比分析

从图 7 可看出 YZ01 和 LAS 2 个系统所测得的感热通量的变化趋势和结果也都比较一致,YZ01 和 LAS 2 个使用光闪烁法所测得的“ $H_{\text{LAS-研制}}$ ”与“ $H_{\text{LAS-荷兰}}$ ”之间的线性拟合系数为 0.90,相关系数为 0.93。但与使用涡度相关(EC)方法所测得的

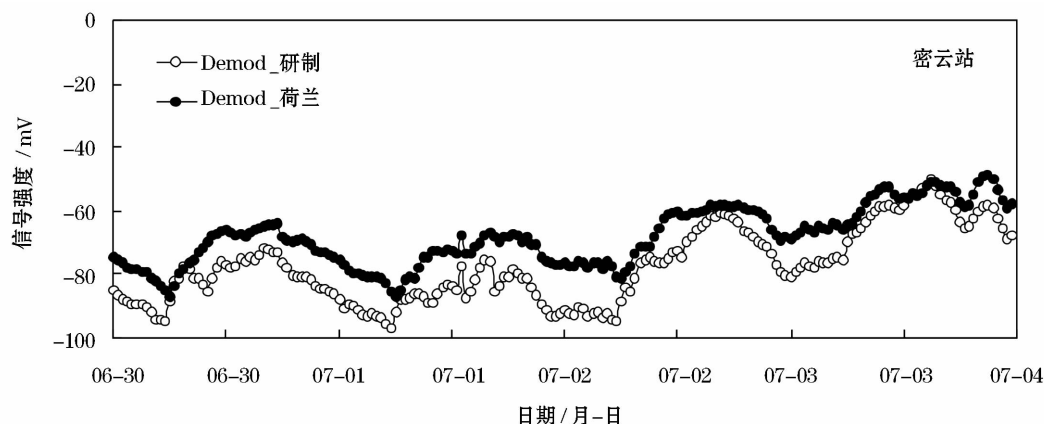


图 5 YZ01 与 LAS 系统解调信号的日变化(密云站,2009 年 6 月 30 日至 7 月 4 日)

Fig. 5 Duration variation of signal strength derived from YZ01 and LAS (Miyun site, June 30 to July 4, 2009)

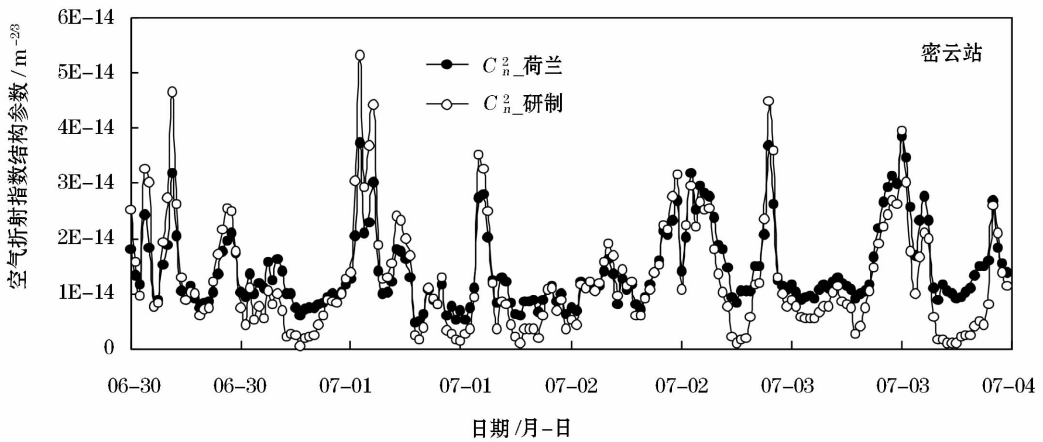


图 6 YZ01 系统与 LAS 系统观测 C_n^2 的日变化(密云站,2009 年 6 月 30 日至 7 月 4 日)

Fig. 6 Duration variation of C_n^2 derived from YZ0101 and LAS (Miyun site, June 30 to July 4, 2009)

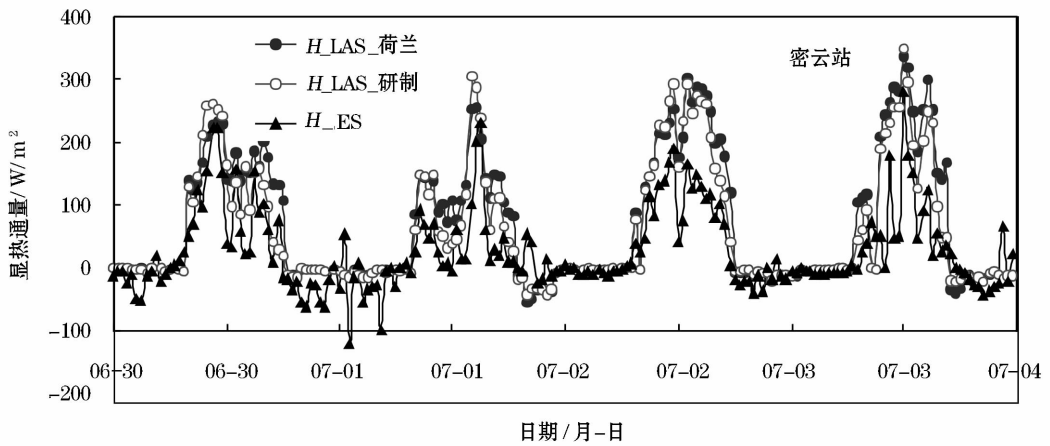


图 7 YZ01 系统、LAS 及 EC 系统观测 H 日变化(密云站,2009 年 6 月 30 日至 7 月 4 日)

Fig. 7 Duration variation of the sensible heat fluxes derived from YZ01、LAS and EC(Miyun site, June 30 to July 4, 2009)

H_{EC} 相比,“ $H_{LAS_研制}$ ”和“ $H_{LAS_荷兰}$ ”均比涡度相关法测定的“ H_{EC} ”大。原因可能是:涡度相关系统的源区主要位于果园和玉米地,而 2 个闪烁仪系统的源区除了果园和玉米地外,还包含部分居民地。

4.1.4 潜热通量 LE 对比分析

如本文引言和 2.2 所述,为了获得大尺度的潜热通量,在本试验中观测了光径路线中间处的净辐射和土壤热通量,应用能量平衡余项法推算出平均潜热通量“ $LE_{LAS_研制}$ ”。从图 8 可以看出,本系统所测得的潜热通量与使用涡度相关方法所测得的潜热通量“ LE_{EC} ”的变化趋势非常一致,只是本系统测得的潜热通量比涡度相关方法所测得的潜热通量稍微偏大一些,“ LE_{EC} ”与“ $LE_{LAS_研制}$ ”之间的线性拟合系数为 1.07,相关系数为 0.78。

4.2 阿柔站与德国 BLS450 系统及涡度相关系统 EC 的对比

青海阿柔站(100°27′53″E,38°02′40″N)位于青海省阿柔县,下垫面为草地。YZ01 和德国 BLS450 的光径长度都是 2 390 m,有效高度都为 9.5 m, YZ01 的发射器与德国 BLS450 的接收器安装在西南部, YZ01 的接收器与德国 BLS450 的发射器安装在东北端;涡度相关系统和净辐射、风向风速、空气温湿度等气象传感器安装在光径路径中间上方的 10 m 高度的气象观测塔上;2 个土壤热通量传感器则安装在该塔下,对比数据为每 30 min 平均值。本次对比试验 YZ01 自 2009 年 7 月 14 日正常运行,此时涡度相关系统运转正常(自 2008 年 6 月 11 日开始观测),而德国 BLS450 此期间没有观测(自 2009

年 10 月 17 日开始观测)。本文选取与涡度相关系统的比对试验时间为 2009 年 8 月 9 ~ 17 日,比对项目为 H 和 LE ;与德国 BLS450 的比对试验时间选为 2010 年 2 月 11 ~ 20 日,比对项目为 C_n^2 和 H ,由于德国 BLS450 不能直接输出闪烁光的解调信号,所以在本试验中没有闪烁光解调信号的比对结果分析。

4.2.1 与 BLS450 对比空气折射指数的结构参数 C_n^2 的结果

图 9 是 YZ01 与 BLS450 测得的 C_n^2 对比图。从图 9 可以看出,YZ01 和 BLS450 测得的 C_n^2 的日变化趋势非常接近。但与密云站的结果不太一样的,YZ01 测得的 C_n^2 普遍都比 BLS450 测得的 C_n^2 大,它们的 C_n^2 之间的线性拟合系数为 1.25,相关系数 0.93。

4.2.2 与 BLS450 对比感热通量 H 的结果

图 10 为 YZ01 系统与 BLS450 系统观测的感热

通量 H 的结果比较图。从图 10 可以看出,它们的日变化趋势非常接近。与 C_n^2 的结果类似,YZ01 测定的感热通量 H 普遍都比 BLS450 测定的感热通量 H 大,它们之间的线性拟合系数为 1.17,相关系数为 0.99。

4.2.3 与涡度相关系统对比感热通量 H 的结果

图 11 为 YZ01 系统与涡度相关系统观测的感热通量 H 的结果比较图。从图 11 可以看出,它们的日变化趋势非常接近。与密云站的结果类似,YZ01 测定的感热通量 H 普遍都比涡度相关系统测定的感热通量 H 大。主要原因可能是由于涡度相关测定系统存在能量不闭合现象,这段时间的平均闭合率仅有 82% 左右。

4.2.4 与涡度相关系统比对潜热通量 LE 的结果

与密云站一样,在阿柔站也是通过测量光径路

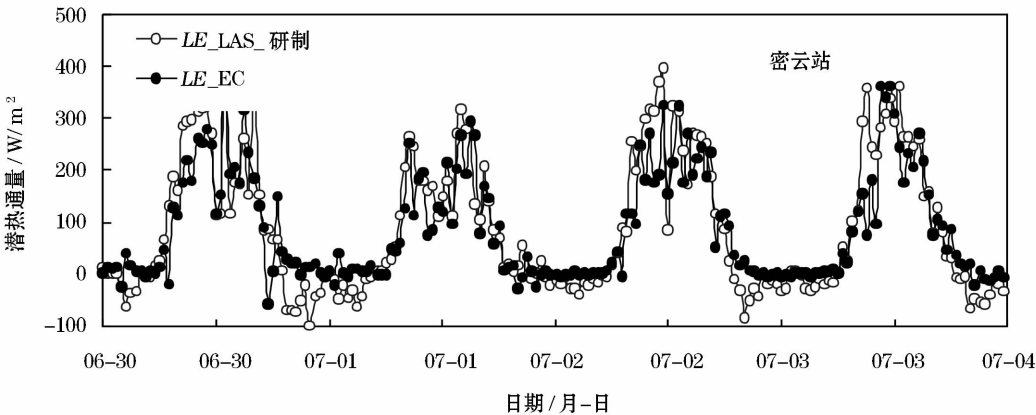


图 8 YZ01 系统与 EC 系统观测的 LE 日变化(密云站,2009 年 6 月 30 日至 7 月 4 日)

Fig.8 Duration variation of the latent heat fluxes derived from YZ01 and EC(Miyun site, Jue 30 to July 4, 2009)

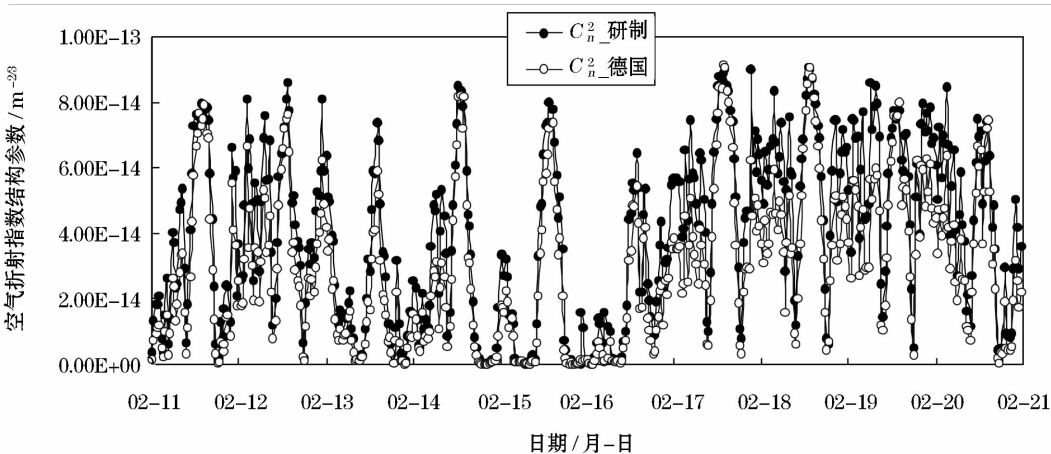


图 9 YZ01 系统与 BLS450 系统观测 C_n^2 的日变化(阿柔站,2010 年 2 月 11 ~ 21 日)

Fig.9 Duration variation of C_n^2 derived from YZ01 and BLS450 (Arou site, February 11 to February 21, 2010)

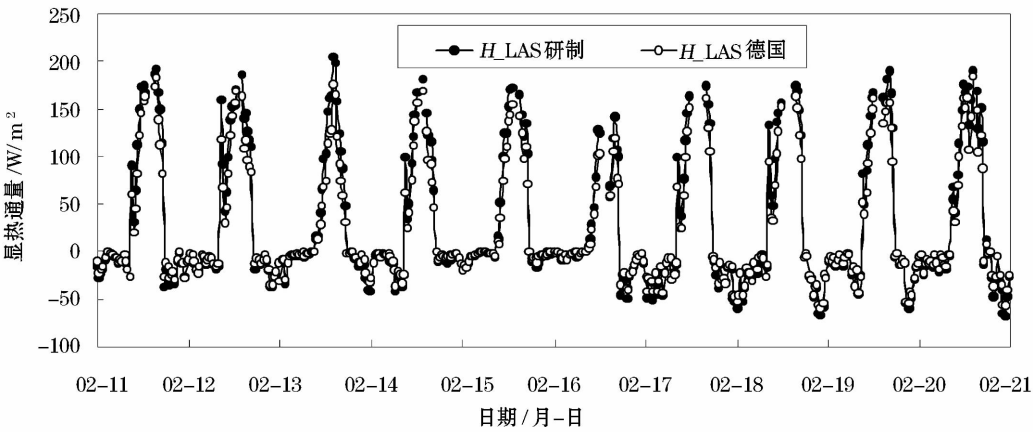


图 10 YZ01 系统、BLS450 系统测得的 H 日变化 (阿柔站, 2010 年 2 月 11 ~ 21 日)
Fig. 10 Duration variation of the sensible heat fluxes derived from YZ01、BLS450
(Arou site, February 11 to February 21, 2010)

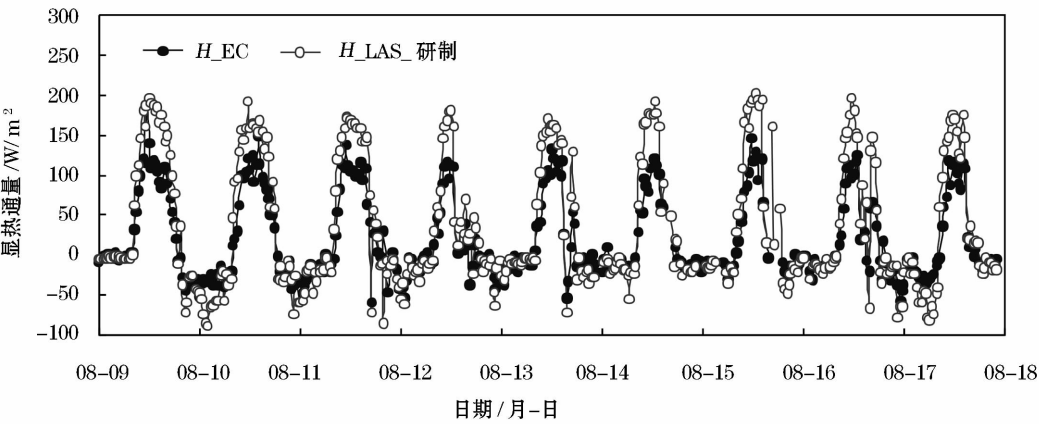


图 11 YZ01 系统与 EC 系统观测 H 的日变化 (阿柔站, 2009 年 8 月 9 ~ 18 日)

Fig. 11 Duration variation of the Sensible heat fluxes derived from YZ01 and EC (Arou site, August 9 to August 18, 2009)

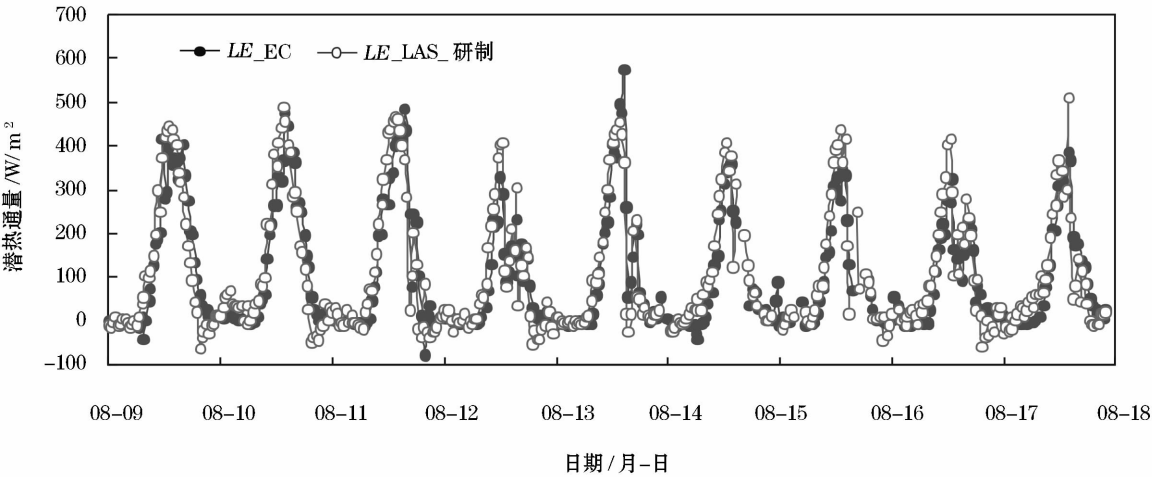


图 12 YZ01 系统与 EC 系统观测 LE 的日变化 (阿柔站, 2009 年 8 月 9 ~ 18 日)

Fig. 12 Duration variation of the latent heat fluxes derived from YZ01 and EC (Arou site, August 9 to August 18, 2009)

线中间处的净辐射和土壤热通量,应用能量平衡余项法推算出平均潜热通量“*ET_LAS_研制*”。从图 12 可以看出,本系统在阿柔站所测得的潜热通量与使用涡度相关方法所测得的潜热通量“*LE_EC*”的变化趋势非常一致,测量结果更相近,“*LE_EC*”与“*LE_LAS_研制*”之间的线性拟合系数为 1.03,相关系数为 0.84。拟合系数比密云站的更接近 1,相关系数也比密云站高些,主要原因可能是阿柔站的下垫面为草地,比密云站的下垫面均匀一些。

5 结论与讨论

本研究通过系统设计和调试,已成功研制出 3 台大尺度水热通量观测系统样机,样机的发射器光源功率为 100 mW,比荷兰 LAS 大,在同样条件下,样机 YZ01 接收器接收到的闪烁光解调信号比荷兰 LAS 强 14% 左右,说明在相同的安装距离下,YZ01 比荷兰 LAS 更适于在能见度较小的条件下使用,或者说在同样的环境条件下,YZ01 比荷兰 LAS 可以测量更远的距离。

本系统发射器最大功耗 6 W,平均功耗 3 W,平均比德国 BLS450 小很多,也比荷兰 LAS 小一些;本系统接收器功耗为 1.8 W,比德国的小很多,也比荷兰 LAS 小一些,说明本研究系统比国外的同类产品更省电。

从密云站和阿柔站分别与荷兰 LAS 和德国 BLS450 的短期比对结果看,该样机在应用中所测得的实验结果无论是 C_n^2 、感热通量 H 还是潜热通量 LE 都与国外同类仪器所获得的结果基本一致,说明本研究所研制的大尺度水热通量观测系统不仅可以达到国外同类仪器同样的应用水平,而且比国外同类产品更省电、比荷兰 LAS 更适应在高湿条件下使用。

目前,该系统还缺乏不同样机的一致性、同同样机长期使用的稳定性以及在不同野外环境条件使用的可靠性等测试。我们将陆续安排上述试验,以便早日定型生产。

参考文献 (References):

- [1] 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: 680-690.
- [2] Horst T W, Weil J C. Footprint estimation for scalar flux measurements in the atmospheric surface layer[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1992, 59: 279-296.
- [3] Schmid H P. Footprint modeling for vegetation atmosphere exchange studies: A review and perspective [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 113: 159-183.
- [4] Kleissl J, Gomez J, Hong S H, *et al.* Large aperture scintillometer intercomparison study [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2008, 128: 133-150.
- [5] McAneney K J, Green A E, Astill M S. Large-aperture scintillometry: The homogeneous case [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1995, 76: 149-162.
- [6] De Bruin H A R, van den Hurk B J J M, Kohsiek W. The scintillation method tested over a dry vineyard area [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1995, 76: 25-40.
- [7] Meijninger W M L, Green A E, Hartogensis O K, *et al.* Determination of area-averaged water vapour fluxes with a large aperture and radio wave scintillometers over a heterogeneous surface-flevoland field experiment [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2002, 105: 63-83.
- [8] Ezzahar J, Chehbouiri 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*, 2008, 3: 173-184.
- [9] Hemakumara H, Chandrapala L, Moene A. Evapotranspiration fluxes overmixed vegetation areas measured from a large aperture scintillometer [J]. *Agricultural Water Management*, 2003, 58: 109-122.
- [10] 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 heterogeneous land surface [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2002, 105: 85-97.
- [11] Meijninger W, Hartogensis O, 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: 63-83.
- [12] Kleissl J, Hong S H, Hendrickx J. New mexico scintillometer network in support of remote sensing and hydrologic and meteorological models [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2009, 90(2): 207.
- [13] Ma Xiaoshan, Zhu Wenyue, Rao Ruizhong. Large aperture laser scintillometer for measuring the refractive index structure constant of atmospheric turbulence [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, 35(6): 898-902. [马晓珊, 朱文越, 饶瑞中. 测量大气折射率结构参数的大口径激光闪烁仪 [J]. 中国激光, 2008, 35(6): 898-902.]
- [14] Tatarskii V I. Wave Propagation in a Turbulent Medium [M]. Silverman R S, translated. New York: McGraw-Hill, USA, 1961: 285.
- [15] Rao Ruizhong. Light Propagation in the Turbulent Atmosphere [M]. Hefei: Anhui Science and Technology Publishing House, 2005: 180-183. [饶瑞中. 光在湍流大气中的传播 [M]. 合肥: 安徽科学技术出版社, 2005: 180-183.]
- [16] Clifford S F, Ochs G R, Lawrence R S. Saturation of optical scintillation by strong turbulence [J]. *Journal of Optical Society*

- of America*, 1974, 64: 148-154.
- [17] Green A E, McAneney K J, Astill M S. Surface-layer scintillation measurement of day time sensible and momentum fluxes[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1994, 68: 357-373.
- [18] Wang T, Ochs G R, Clifford S F, *et al.* A saturation-resistant optical scintillometer to measure C_n^2 [J]. *Journal of Optical Society of America*, 1978, 68: 334-338.
- [19] Ochs G R, Wilson J J. A Second-generation Large Aperture Scintillometer[M]. NOAA Technical Memorandum ERL ETL-232, NOAA Environmental Research Laboratories, Boulder, CO, USA, 1993:24.
- [20] Hartogensis O K, Watts C J, Rodriguez J C, *et al.* Derivation of effective height for scintillometers: La Poza experiment in north-west Mexico[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2003, 4: 915-929.
- [21] Bai Jie, Liu Shaomin, Ding Xiaoping, *et al.* A Study of the processing method of large aperture scintillometer observation data [J]. *Advances in Earth Science*, 2010, 25(11): 148-165. [白洁, 刘绍民, 丁晓萍, 等. 大孔径闪烁仪观测数据的处理方法研究[J]. *地球科学进展*, 2010, 25(11): 148-165.]

Development of a Measuring System for Surface Energy and Water Vapor Fluxes at Large Scale

SHI Shengjin¹, HUANG Binxiang¹, LIU Shaomin², YANG Yan¹,
HUANG Yongbin³, XU Ziwei²

(1. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China;
2. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, School of Geography, Beijing Normal University,
Beijing 100875, China; 3 Rainroot Scientific Limited, Beijing 101100, China)

Abstract: Based on the extension of the first-order perturbation theory of optical scintillation and Monin-Obukhov similarity theory, an apparatus YZ01 for measuring the refractive index structure constant C_n^2 and for measuring surface fluxes, such as sensible heat flux and latent heat flux along a long line-of-sight path, was developed. This apparatus consists of a transmitter part, a receiver part, an optical alignment part and a signal processing part. Signal modulation and demodulation method is used to distinguish the EM signal from background radiation. Filter and feedback circuitry is used to increase signal to noise ratio. The power of YZ01 transmitter is 3W average, and the receiver only 1.8W. The feature and accuracy of YZ01 was tested by comparing with Kipp & Zonen LAS and Scintec BLS450 over Miyun site, Beijing and Arou site, Qinghai. The results showed: ①The modulate signal of YZ01 is about 14% stronger than Kipp&Zonen LAS over Miyun site. ②The slope of linear regression and the correlation coefficient of C_n^2 between YZ01 and LAS is 0.98 and 0.7 over Miyun site. ③The slope of linear regression and the correlation coefficient of H between YZ01 and LAS is 0.90 and 0.93 over Miyun site. ④The slope of linear regression and the correlation coefficient of LE between YZ01 and LAS is 1.07 and 0.78 over Miyun site. ⑤The slope of linear regression and the correlation coefficient of C_n^2 between YZ01 and BLS450 is 1.25 and 0.93 over Arou site. ⑥The slope of linear regression and the correlation coefficient of H between YZ01 and BLS450 is 1.17 and 0.99 over Arou site. ⑦The slope of linear regression and the correlation coefficient of LE between YZ01 and BLS450 is 1.03 and 0.84 over Arou site.

Key words: Optical scintillation; Sensible heat flux; Latent heat flux.