

大口径闪烁仪及其在地表能量平衡监测中的应用*

胡丽琴* 吴蓉璋 方宗义

(国家卫星气象中心,北京 100081)

摘 要

介绍了 LAS 仪器的测量原理及数据处理方法,并利用中荷合作项目 CE WBMS 中获得的河南郑州 LAS 测站 2000 年的观测资料,同时结合其它辅助资料,对观测点附近地区的能量平衡状况进行了分析。分析结果表明,由 LAS 测值得到的显热通量值,以及结合净辐射资料间接得到的潜热通量值,合理地反映出了当地能量平衡状况的季节变化,显示出一年之中当地大部分的净辐射能用于潜热通量的释放。其数据结果所表征的当地下垫面干湿程度的变化与同期的降水及土壤相对湿度相比,表现出了相当好的一致性,这为拓展 LAS 在局地地表能量平衡监测中的应用提供了物理依据。

关键词: 大口径闪烁仪 显热通量 潜热通量 能量平衡

引 言

研究到达地面的净辐射值如何重新分配,测算下垫面各种热通量并分析其时空变化特征,可以为判断一个地区干湿程度以及气候和生态状况提供重要的科学根据。目前,在测定和估算地表能量平衡各分量方面,已经形成了许多理论和方法,如波文比-能量平衡法、梯度扩散法、涡动相关法、表面温度-阻抗法等^[1]。与上述方法相关的一些高精度仪器,如涡动相关仪和能量平衡-波文比观测系统等,也已得到应用。

荷兰 Wageningen 大学气象与空气质量研究组则基于空气折射指数波动强度与显热通量的关系,开发研制了“大口径闪烁仪”(Large Aperture Scintillometer,简称 LAS),LAS 是用来测量空气折射指数的波动强度的一种地基仪器,由发射仪和接收仪组成,其测值通过一定算法可以转换为路径上由地面进入大气的平均显热通量。他们的实验结果表明,由 LAS 得到的显热通量与涡动相关仪所测结果具有较好的一致性^[2,3]。并且,LAS 由发射仪和接收仪组成,这两个部件以一定距离分开放置,因此若考虑风向的影响,LAS 测值可表征路径上的平均状况^[4]。这是 LAS 优于其它点测量仪之处,使之更适合与卫星资料相比较。基于这个原因,始于 1999 年的中荷合作项目“建立用于中国荒漠化和粮食保障的能量与水平衡监测系统”(CE WBMS)中,采用了 5 套这种 LAS 仪器,安放在中国 5 个不同的地点^[5],用于卫星遥感产品的真实性检验。

本文利用 CE WBMS 项目中获得的河南郑州 LAS 测站的观测资料,对观测点附近地

* 现为南京气象学院在读博士。

2002-03-15 收到,2002-06-26 收到修改稿。

区的能量平衡状况进行了分析,为拓展 LAS 在局地地表能量平衡监测中的应用提供了物理依据。

1 LAS 仪器原理

CE WBMS 项目采用的 LAS(仪器内部构造见图 1),发射仪和接收仪之间的路径长度为 1~5 km,发射仪发射波长为 0.94 μm 、直径 0.15 m 的光束。



图 1 LAS 仪器内部构造

LAS 输出信号为接收仪接收到的光强度的偏差,这种偏差是由于光程中空气的“闪烁”引起的。当电磁波在扰动大气中沿直线传播时,扰动大气空气折射指数的波动会引起传播光束能量强度的波动,这种现象称之为闪烁。LAS 就是利用接收信号的闪烁来测得空气折射指数波动的湍流强度。

通常用折射指数的结构参数 C_n^2 来描述空气折射指数的湍流变化。下面的关系式反映了 C_n^2 受大气温度、湿度和压力波动的影响^[6]:

$$C_n^2 = A_T^2 \frac{C_T^2}{T^2} + A_q^2 \frac{C_q^2}{q^2} + 2 A_T A_q \frac{C_{Tq}}{Tq} \quad (1)$$

其中, C_T^2 为折射指数的温度结构参数; C_q^2 为折射指数的湿度结构参数; C_{Tq} 为协变量; A_T 和 A_q 分别是波长 λ 、温度 T 、气压 p 和湿度 q 的函数。对于 LAS 所用光的波长(0.94 μm), A_T 和 A_q 可用下式表示^[7]:

$$A_T = -0.78 \times 10^{-6} \frac{p}{T}$$

$$A_q = -57.22 \times 10^{-6} q$$

LAS 测量接收到的电磁波对数强度的方差为 $\sigma_{\ln I}^2$ 。Wang 等^[8]指出,对于等孔径的发

射仪和接收仪,路径上加权平均的 C_n^2 与 LAS 信号 σ_{nl}^2 的关系由下式确定:

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

式中 D 为发射仪发射光束的直径, L 为光程长度。

对于 LAS 所用波长,式(1)中第 2 项可忽略不计。第 3 项在温、湿扰动完全相关的情况下可写成波文比 β (显热与潜热之比)的函数^[9,10]。于是式(1)经过变化有:

$$C_T^2 = C_n^2 \frac{T^2}{A_T^2} \left| 1 + \frac{0.03}{\beta} \right|^{-2} \quad (2)$$

一旦 C_T^2 已知,可以从相似关系导出显热通量 H :

$$\frac{C_T^2 (z_s - d)^{2/3}}{\theta_*^2} = f_T \left| \frac{z_s - d}{L_{MO}} \right| \quad (3)$$

这里 d 为零位移高度, z_s 为 LAS 光束高出地面的高度, θ_* 为温度尺度,定义如下:

$$\theta_* = - \frac{H}{\rho_p u_*} \quad (4)$$

L_{MO} 为 Obukhov 长度:

$$L_{MO} = \frac{T u_*^2}{k g \theta_*} \quad (5)$$

上两式中, ρ 是空气密度 ($\approx 1.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$), c_p 为常压下的空气比热 ($\approx 1008 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), u_* 为摩擦速度, k 是 Von Karman 常数 (≈ 0.4), g 是重力加速度 ($\approx 9.81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$)。

式(3)中的 f_T 为普适函数,在不稳定条件下, f_T 的表达式为^[11]:

$$f_T \left| \frac{z_s - d}{L_{MO}} \right| = c_{T1} \left| 1 - c_{T2} \frac{z_s - d}{L_{MO}} \right|^{-2/3} \quad (L_{MO} < 0) \quad (6)$$

其中 c_{T1} 和 c_{T2} 是经验常数。Wyngaard 等^[11] 给的值为 $c_{T1} = 4.9$ 和 $c_{T2} = 7$ 。De Bruin 等^[12] 给的值略有些差别 ($c_{T1} = 4.9$ 和 $c_{T2} = 9$)。在稳定条件下, De Bruin 等^[12] 建议:

$$f_T \left| \frac{z_s - d}{L_{MO}} \right| = 5 \quad (L_{MO} > 0) \quad (7)$$

但是,对于稳定条件下 f_T 函数的表达式,至今未有统一的形式^[4]。因此目前 LAS 在夜间的测值被视为不可靠数据,不予采用。

这组方程最后由摩擦速度 u_* 的表达式进行封闭^[13]:

$$u_* = \frac{k \bar{u}}{\ln \left| \frac{z_u - d}{Z_0} \right| - \psi_m \left| \frac{z_u - d}{L_{MO}} \right| + \psi_m \left| \frac{z_0}{L_{MO}} \right|} \quad (8)$$

式中 z_u 为测风速处的高度。 ψ_m 是积分的动量稳定性函数,在不稳定条件下, ψ_m 定义为:

$$\psi_m \left| \frac{z}{L_{MO}} \right| = 2 \ln \left| \frac{1+x}{2} \right| + \ln \left| \frac{1+x^2}{2} \right| - 2 \arctan(x) + \frac{\pi}{2} \quad (L_{MO} < 0) \quad (9)$$

这里

$$x = \left| 1 - 16 \frac{z}{L_{MO}} \right|^{1/4}$$

在稳定条件下, ψ_m 定义为:

$$\psi_m \left| \frac{z}{L_{MO}} \right| = -5 \frac{z}{L_{MO}} \quad (L_{MO} > 0) \quad (10)$$

因此,根据 C_T^2 数据、平均风速 u 、平均绝对温度 T 、估计的粗糙度 z_0 和零位移高度 d , 显热通量可由公式(3)至(10)迭代算得。然而,在自由对流的条件下(即 $(z-d)/L_{MO} \rightarrow -\infty$), u 不再相关,显热通量可直接由 LAS 数据及平均绝对温度导出:

$$H = \rho_p b (z_s - d) \left| \frac{g}{T} \right|^{1/2} |C_T^2|^{3/4} \quad (11)$$

式中 b 为经验常数,值为 $0.57^{[2]}$ 。

最后,潜热 LE 可通过下面的地表能量平衡方程来加以计算:

$$R_n = H + LE + G \quad (12)$$

式中 R_n 为净辐射, H 为显热通量, LE 为潜热通量, G 为土壤热通量。其中 R_n 和 G 可以进行测量或通过其它量来估算。

2 观测场地与数据处理方法

位于河南郑州南郊的 LAS 测站自 1999 年 12 月起开始观测。其接收端设在郑州市气象台的一幢住宅楼顶($34^\circ 42' 24.5''$ N, $113^\circ 39' 47.1''$ E), 离地高度为 18 m; 发射端安放在气象台东南的一户民房楼顶, 离地高度为 17.9 m。发射仪距接收仪 1350 m, 其间下垫面地势平坦, 主要是农田和村庄, 较远处有一条公路。夏季盛行风向是偏南风。

LAS 仪器经安装并设置好以后, 每秒钟自动测量一次。仪器中内置有可编程数据记录器, 用来收集数据。为节省存储空间, 数据记录器只记录一定时间间隔内所有测量值的均值及其标准偏差。一般将时间间隔长度设为 10 min。用户可将计算机与 LAS 接收仪面板上的串口相连, 并通过相关软件来下载数据。下载的数据文件包含输出信号的电压、原始解调信号、与 C_n^2 成线性关系的数值 x , 以及这些量的标准偏差, 同时包含相应的测量时间信息。

由 LAS 下载的原始数据首先要通过有关程序对其进行质量检验。质检过程主要包含对信号电压和平均解调信号值是否落在合理范围内、是否发生信号饱和现象的判别, 并给出数据有效的标志(以下称质量数, 1 为有效, 0 为无效)。然后, 结合有关 LAS 站址的一些辅助数据(如路径长度、LAS 有效高度、粗糙度和零位移高度等)以及气温、气压、风速、波文比等气象资料, 并利用荷兰 Wageningen 大学提供的数据处理软件, 可以很方便地得到每个时间间隔内的显热通量均值。需要说明的是, 这里所指的 LAS 有效高度是根据 LAS 仪器的离地高度及路径上的权重函数进行计算^[14, 15]; 粗糙度和零位移高度按照路径上的下垫面状况确定^[14, 15]; 波文比值则由观测人员根据当地地表的干湿状况取定一个数值(简单取法为: 干旱取 3; 中等取 1; 湿润取 0.3)。在我们的工作中, 根据郑州 LAS 站的情况, 将该数值设定为: 干旱取 1; 中等取 0.5; 湿润取 0.3), 由此引入的误差在多次迭代过程后可以忽略^[15]。

据此, 我们将郑州 LAS 站 2000 年每 10 min 的观测数据处理成显热通量值, 并辅以

质量检验、天气现象以及仪器状况等信息,挑选出较为真实可靠的数据,最后计算出日平均显热通量。具体方法是选择白天时段内平均质量数为 1 或接近于 1 的当天数据,取所有日出至日落期间的测值,同时夜间测值取为 0,然后求其总平均。如前所述,LAS 在夜间的测值为不可靠数据,在此我们根据 Bruin 等的分析,将夜间值取为 0,这样在计算日平均显热通量时导入的误差约为 10%^[14]。同时,我们采用了郑州市气象台的净辐射观测资料,并假定日均土壤热通量在地表能量收支中小到可以忽略不计^[4],这样,根据地表能量平衡方程,就可得到另一重要的能量平衡分量——潜热通量。

3 结果与分析

图 2 描述了不同天气状况下 LAS 测值的日变化情况,横坐标为当地时间(北京时),纵坐标是放大的 C_n^2 ($C_n^2 \times 10^{15}$), (a) 所示为晴朗少云天气, (b) 为有雾天气,且天空云量较多, (c) 为有降水天气。

可以看出,晴空时,在白天时段内(不稳定情况下),曲线较光滑,峰值基本位于正午前后,其两端的极小值分别出现在日出和日落时分(大气状况在稳定与不稳定之间转换)。而在不太晴朗的天空状况下,LAS 信号的日变化曲线不再光滑。

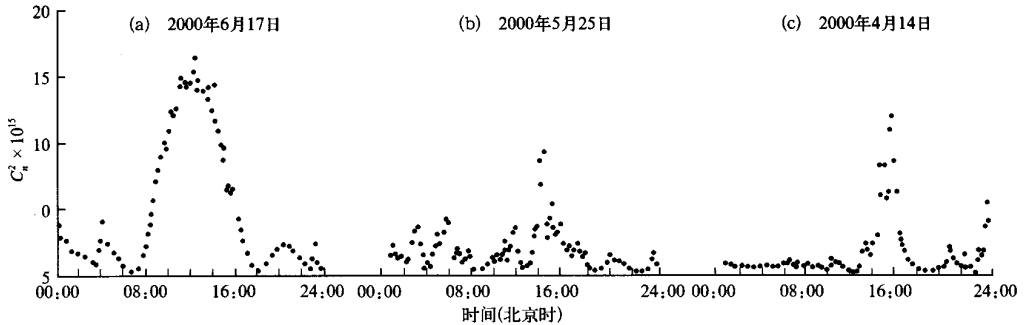


图 2 河南郑州 LAS 测值的日变化

图 3 是日均净辐射测值 R_n 由 LAS 测值计算的显热通量 H 及潜热通量 LE 在 2000 年 3 月至 10 月的时间序列图。经过分析,我们发现:该地区在一年当中地表获得的净辐射呈明显的季节变化规律,最大净辐射值出现在 7 月下旬,并以此为中心向两边递减。潜热通量的变化趋势与净辐射非常一致,这证实净辐射是潜热的能量驱动力。显热通量值的变化则相对稳定,仅表现为上半年的数值较下半年偏大。

从图 3 还可以看出,在整个观测期间,当地的大部分净辐射能用于潜热通量。尤其是进入 7 月中旬以后,由于温度升高,降水增多,农田灌溉等因素,使得下垫面的水分蒸发增强。同时,随着生长季节里作物的生长,其蒸腾作用也在增强。这样一来,潜热通量值在整个能量平衡中所占的份额就非常大。

除去长周期的季节变化外,能量平衡各分量还存在明显的逐日变化,这与每日的天气现象、大气透明度状况、云量状况、气温及空气饱和差等多种气象要素有关,同时还受到地

表状况(如灌溉)的影响。例如,图3中出现在4月中旬和5月下旬的 R_n 和 H 的明显下降现象,就分别是由降水和云层密布所造成的。

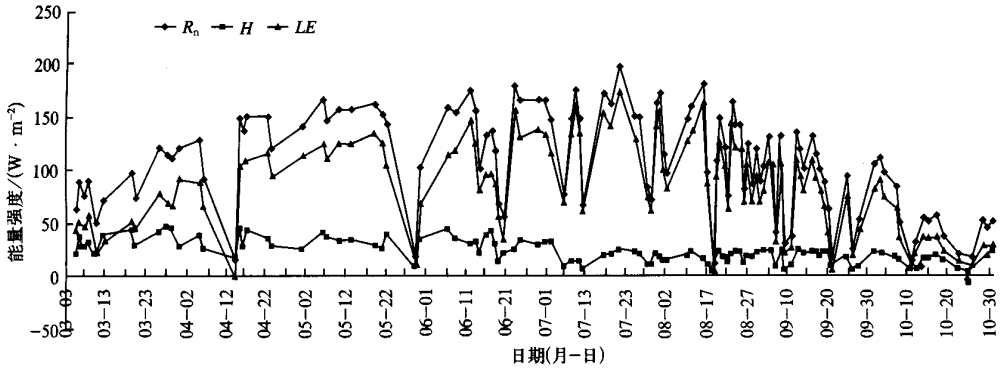


图3 郑州LAS站能量平衡分量的季节变化

为了进一步揭示LAS测值在反映一个地区干湿程度方面的指示意义,我们收集了当地气象台站的日降水资料和土壤湿度资料,与同期的LAS结果作对比。

图4描述了4月至9月期间日波文比与日降雨量之间的季节变化。波文比即显热通量与潜热通量的比值(H/LE)。它表征了到达地面的净辐射值重新分配成显热与潜热的比例关系,是一个地区干湿程度的重要指标。从图中可以看出,在4~6月,由于降水较少,地表相对较干,波文比值表现得相对较大,表明 H 所占的比例相对还比较大。而7~8月中旬,由于有比较大的降水,地表变得潮湿,易于水分的蒸发,所以 H 所占的比例非常小,波文比值也相应变小。8月下旬以后,由于又相对干旱,日波文比又有所上升。

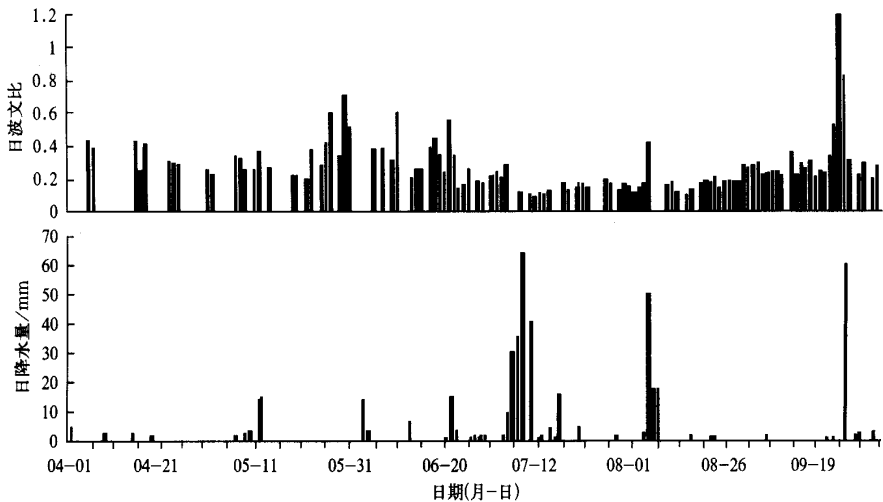


图4 郑州LAS站日波文比及日降雨量随季节的变化

图5是每月8、18、28日(当地气象台站每月测定土壤相对湿度的日期)当日的潜热通

量与显热通量之比(也即波文比的倒数 LE/H ,在一定意义上可表征相对湿润的程度)以及土壤相对湿度在 4~9 月的变化趋势。其中,土壤相对湿度是根据土壤含水量与土壤持水量的比值计算出来的,并对 5 层土壤深度(10 cm、20 cm、30 cm、40 cm、50 cm)的测值作了平均。从图中可以明显看出,在观测期间内,二者的变化趋势非常一致,随着土壤相对湿度增加,日潜热与显热通量之比也增大。这表明土壤水分是极其活跃的控制因素,直接影响着能量分配比例因子的变化。

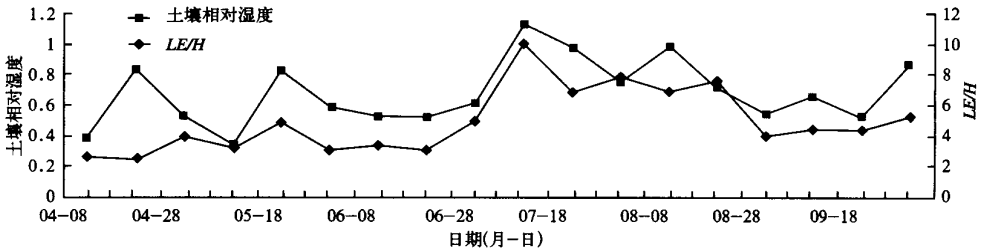


图 5 郑州 LAS 站土壤相对湿度以及日均潜热与显热通量之比 (LE/H) 的季节变化

4 结 论

根据以上的研究和分析,可以得出以下几个基本结论:

(1) 郑州 LAS 站在一年观测当中地表获得的净辐射具有明显的季节变化,最大净辐射值出现在 7 月下旬,并以此为中心向两边递减。潜热通量的变化趋势与净辐射非常一致。显热通量值的变化则相对稳定,仅表现为上半年的数值较下半年偏大。并且,当地的潜热通量值普遍大于显热通量值,表明大部分净辐射能量用于潜热通量。

(2) 郑州 LAS 站的波文比表现出一定的季节变化规律。在 4~6 月,当地地表相对较干,波文比值表现得相对较大。而 7 月份~8 月中旬,有比较大的降水,地表变得潮湿,所以波文比值相应变小。8 月下旬以后,由于又相对干旱,日波文比又有所上升。

(3) 由 LAS 测值计算出的显热通量值,以及结合净辐射资料间接而得的潜热通量值,可以较好地反映出当地的能量平衡状况,其数据结果与同期的降水及土壤相对湿度资料表现出了相当好的一致性。这为 LAS 在局地地表能量平衡及干旱监测中的应用提供了物理依据。同时,LAS 测值为路径上的面平均状况,这一点优于其它点测量仪。

(4) LAS 是在我国首次使用的,通过测量近地层大气的闪烁,即空气折射指数的湍流变化来测量地气之间显热和潜热交换的一种遥感探测仪器。一年来郑州 LAS 观测数据所反映出的合理性,说明 LAS 仪器是可用的。

另外,需要指出的是,本文的工作主要是以 CE WBMS 项目中郑州 LAS 站所获得的资料为基础而进行的初步分析,关于 LAS 资料的应用,尤其是与卫星观测资料的匹配使用尚有许多方面值得深入进行。同时,数据处理过程中也有一些问题有待思索和改进,就本文的工作而言,这些问题包括:如何更准确地确定 LAS 观测数据的日平均质量数,采用更精确的辅助资料(如日出日落时间、净辐射资料)等。

致谢:本研究得到了CEWBMS项目组的的大力支持,在LAS观测过程中,河南省气象科研所以及郑州市气象台的部分同志参与了具体观测和维护工作,并提供了相关辅助资料,在此一并致谢!

参考文献

- 1 朱治林,孙晓敏,张仁华.淮河流域典型地面水热通量的观测分析.气候与环境研究,2001,6(2):214~220.
- 2 de Bruin H A R, Van Den Hurk B J J M, Kohsiek W. The scintillation method tested over a dry vineyard area. *Boundary Layer Meteorology*, 1995, **76**: 25~40.
- 3 de Bruin H A R, Nieveen J P, de Wekker S F J, et al. Large aperture scintillometry over a 4.8 km path for measuring areally-average sensible heat flux: A case study. The Volume on the 22nd AMS Symposium on Agricultural and Forest Meteorology, 28 January 1996, Atlanta, USA.
- 4 Meijninger W M L, Moene A, Hartogensis O, et al. The large aperture scintillometer user manual and technical information, Version 1.5, Wageningen: Wageningen University Research Center, 2000.
- 5 吴蓉璋,胡丽琴,游然,等.用于测量显热通量的“大口径闪烁仪”(LAS).首届气象仪器与观测技术交流和研讨会学术论文集,海南海口,2001年11月,中国气象局监测网络司及中国气象学会秘书处.
- 6 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. Opt. Soc. Amer.*, 1980, **70**:1192~1205.
- 7 Andreas E L. Two-wavelength method of measuring path-averaged turbulent surface heat fluxes. *J. Atmos. Ocean. Tech.*, 1989, **6**: 280~292.
- 8 Wang T I, Ochs G R, Clifford S F. A saturation resistant optical scintillometer to measure C_n^2 . *J. Opt. Soc. Amer.*, 1978, **68**: 334~338.
- 9 Wesely M L. The combined effect of temperature and humidity on the refractive index. *J. Appl. Meteor.*, 1976, **15**: 43~49.
- 10 Kohsiek W. 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. *Boundary-Layer Meteor.*, 1982, **24**: 89~107.
- 11 Wyngaard J C, Izumi Y, Collins S A Jr. Behavior of the refractive index structure parameter near the ground. *J. Opt. Soc. Amer.*, 1971, **61**: 1646~1650.
- 12 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. *Boundary-Layer Meteor.*, 1993, **63**: 231~257.
- 13 Panofsky H A, Dutton J A. Atmospheric turbulence: Models and methods for engineering applications. New York: John Wiley & Sons, 1984. 397.
- 14 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. *Journal of Hydrology*, 2000, **229**: 42~49.
- 15 McAnaney K J, Green A E, Astill M S. Large-aperture scintillometry: the homogeneous case. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1995, **76**: 149~162.

LARGE APERTURE SCINTILLOMETER AND ITS APPLICATION TO SURFACE ENERGY BALANCE MONITORING

Hu Liqin Wu Rongzhang Fang Zongyi
(*National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081*)

Abstract

The large aperture scintillometer (LAS) is a device that measures the turbulent intensity of the refraction index of air. The instrument consists of a transmitter and a receiver, which are placed at a given distance apart with the path length being to 5 km. Therefore, the measurement of LAS is an area-averaged result between the transmitter and the receiver. At the receiver the spatial turbulent intensity is expressed in the refractive structure index C_n^2 . With some additional data users are able to derive the sensible heat fluxes between surface and atmosphere. As part of the Chinese-Dutch CEWBMS (China Energy and Water Balance Monitoring System) project, five LASs were installed in China. As one site representing the agricultural area in North China, a LAS was set up over a crop field at Zhengzhou in Henan Province with a path length of 1350 m. Using the LAS measurements and some additional data collected in the Zhengzhou site in 2000, daily average sensible heat fluxes are deduced, and the basic characteristics of surface energy balance components during the whole year are analyzed. The results show a good consistence with the features of the rainfall and the soil relative humidity in the same period. This work improved the understanding of the seasonal variation of the energy balance in the LAS site area; furthermore, provided the physical foundation for the LAS application in local surface energy balance monitoring.

Key words: Large aperture scintillometer Sensible heat flux Latent heat flux Energy balance