

DOI: 10.3724/SP.J.1011.2011.01067

大孔径闪烁仪与涡度相关系统对灌溉 农田蒸散量的对比观测*

杨 凡^{1,2} 齐永青² 张玉翠² Bridget R. Scanlon³ 沈彦俊^{2**}

(1. 河北师范大学资源与环境科学学院 石家庄 050011; 2. 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心
石家庄 050022; 3. 美国德克萨斯大学 德克萨斯 77377)

摘 要 蒸散是地表能量平衡的重要组成部分,在土壤-植物-大气连续体的能量、质量、动量交换过程中起着重要作用。大孔径闪烁仪(LAS)是近时期兴起的观测跨像元尺度地表通量的地面仪器,为验证其观测数据的可靠性,本文把专家认可且在中国生态系统研究网络(CERN)中广泛应用的涡度相关仪(EC)的观测数据作为参考依据,于2010年8月在中国科学院栾城农业生态系统试验站夏玉米田对大孔径闪烁仪计算结果进行验证。验证结果表明,两种仪器测定的地表感热通量日变化和月变化观测结果基本一致。由于下垫面属性、环境因子及观测范围等因素的影响,大孔径闪烁仪与涡度相关仪观测的蒸散量日变化之间有一定的差异,但日蒸散总量的测定基本一致。试验证明了大孔径闪烁仪观测数据的准确性。将大孔径闪烁仪计算的蒸散量与涡度相关仪观测值进行线性回归分析,二者的吻合度较高($R^2=0.800\ 4$)。研究结果显示,大孔径闪烁仪在地表水热通量的数据监测中具有很大的使用价值,为日后用大孔径闪烁仪验证遥感估算蒸散值奠定了基础。

关键词 地表感热通量 蒸散量 大孔径闪烁仪(LAS) 涡度相关(EC) 灌溉农田

中图分类号: P332.2 文献标识码: A 文章编号: 1671-3990(2011)05-1067-05

Comparative advantages of Large Aperture Scintillometer and Eddy Covariance instrument for measuring evapotranspiration in irrigated farmlands

YANG Fan^{1,2}, QI Yong-Qing², ZHANG Yu-Cui², Bridget R. Scanlon³, SHEN Yan-Jun²

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050011, China;
2. Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences,
Shijiazhuang 050022, China; 3. University of Texas, Texas 77377, USA)

Abstract Evapotranspiration (ET), a critical element of surface energy balance, plays an important role in the exchange of energy, mass and momentum in the soil-plant-atmosphere continuum. Large Aperture Scintillometer (LAS) is recent emerging instrument put on the ground to observe surface fluxes across pixel dimensions. This study validated the reliability of LAS observations with observation data from Eddy Covariance (EC) instruments. EC is the officially recognized and commonly used ET equipment in the Chinese Ecosystem Research Network (CERN). Heat flux was measured in summer maize fields via both LAS and EC at the Luancheng Agro-Ecosystem Experimental Station of Chinese Academy of Sciences in August 2010 and compared. The results showed a significant consistency in both daily and monthly changes in heat flux measurements by LAS and EC. ET obtained from LAS was almost consistent with that from EC ($R^2=0.800\ 4$) at the monthly scale. However, some differences existed in the daily change probably due to the effects of underlying principles, environment conditions and measurement scale. The study suggested that surface water and heat flux data collected via LAS was reliable and applicable in verifying estimated ET via remote sensing.

Key words Surface heat flux, Evapotranspiration, Large Aperture Scintillometer, Eddy Covariance, Irrigated farmland
(Received Apr. 10, 2011; accepted Jun. 13, 2011)

* 国家自然科学基金项目(40871021)、中国科学院知识创新工程重大项目(KZCX1-YW-08-03)、中国科学院知识创新工程重要方向性项目(KZCX2-YW-448)和中国科学院知识创新工程方向性项目(KSCX2-EW-J-5)资助

** 通讯作者: 沈彦俊(1971~), 博士, 研究员, 主要从事陆面水文过程方面的研究。E-mail: yjshen@sjziam.ac.cn
杨凡(1986~), 硕士研究生, 主要从事地表水热过程与遥感和 GIS 的应用研究。E-mail: yangfan1182@126.com

收稿日期: 2011-04-10 接受日期: 2011-06-13

土壤蒸发和植物蒸腾是土壤-植物-大气系统中能量、水分传输和转化的主要途径。蒸散量的变化会影响地表与大气间的水热平衡,还会影响植物的生长^[1]。早在 1998 年,在德国柏林东南部 Lindenberg 的大型 LITEASS 试验就利用大孔径闪烁仪观测研究非均匀地表上区域尺度的水热通量。在国内,北京师范大学等针对农田、森林和城市等各种均匀或非均匀下垫面开展了大孔径闪烁仪观测试验,通过与涡度相关仪同步观测比较,得到了较好的观测值^[2]。

随着遥感技术的发展,运用遥感影像估算地表大面积蒸散量越来越受到重视。然而,估算过程需要结合点面尺度转换后的地面实测气象数据,建立模型估算蒸散,导致估算值精度较低;其次遥感观测值为瞬时值,还需插值计算。而大孔径闪烁仪、涡度相关仪等观测系统可以对蒸散量进行实时直接观测,其观测结果精度较高,并可作为遥感估算蒸散值与地面实际观测值匹配的校正数据。涡度相关仪观测范围有限且受下垫面属性的限制,而大孔径闪烁仪代表性观测尺度较大(250~4 500 m),且可与遥感影像混合像元实现匹配,所以大孔径闪烁仪在观测灌溉农田地表能量平衡和水热通量研究中被广泛应用,并作为验证卫星遥感影像混合像元的直接观测手段受到重视^[3-7]。

为了验证大孔径闪烁仪观测数据的准确性,为以后校正遥感估算数据提供依据,本文以涡度相关仪的观测数据为参考依据,与大孔径闪烁仪的观测数据进行对比,从而验证大孔径闪烁仪观测数据的准确性,减少误差。

1 研究区概况与研究方法

试验在中国科学院栾城农业生态系统试验站(以下简称栾城试验站, 114°41'E, 37°53'N)进行,该试验站位于河北省栾城县聂家庄村。栾城试验站属暖温带半湿润季风气候,土壤类型以潮褐土为主,代表华北平原北部典型潮褐土高产农业生态类型。根据研究布局和监测规范,建有设施完备的水分平衡场、养分平衡场、气象场、综合观测场、小麦育种场等,并配备有先进的涡度相关、波文比、大型蒸渗仪、遥感铁塔、光合仪、光谱仪等仪器设备。

本研究应用大孔径闪烁仪对夏玉米生育期的监测数据,其数据资料为中国科学院栾城农业生态系统试验站 2010 年 8 月的资料,并与同时期的涡度相关仪数据相对比。

大孔径闪烁仪的观测范围为 250~4 500 m,该设备架设在试验站东面的试验田中,下垫面为均一的夏玉米。安装高度为 8.5 m,实际观测距离为 1 330 m;

在大孔径闪烁仪路径上距离发射端 160 m 的农田中装有 1 套三维风速仪和温度观测设备,其安装高度为 3 m,主要作用是为大孔径闪烁仪的计算提供气象数据;在大孔径闪烁仪路径旁距离发射端 130 m 的地方装有 1 套涡度相关仪(Li7500, Campbell),其安装高度为 3 m,主要作用是验证大孔径闪烁仪的计算结果。图 1 为大孔径闪烁仪和涡度相关仪的安装示意图。



图 1 大孔径闪烁仪与涡度相关仪安装示意图

Fig. 1 Sketch map for the installations of Large Aperture Scintillometer (LAS) and Eddy Covariance (EC) instruments

2 灌溉农田不同范围观测蒸散量的方法

2.1 涡度相关仪观测的基本原理

涡度相关仪(Eddy Covariance technique)主要组成部分为 CSAT3 型三维超声风速仪、Li-7500 型开路红外 CO₂/H₂O 分析仪和 CR5000 型数据采集器。其工作原理是通过计算物理量脉动与垂直风速脉动的协方差计算湍流输送量(湍流通量),观测项目主要包括风速脉动、CO₂ 和水汽浓度脉动、湿度和气温脉动等。其观测需要高精度、相应速度极快的湍流脉动测定装置。

涡度相关技术是在流体力学、微气象学理论的发展以及气象观测仪器、数据采集和计算机存储、数据分析和自动传输等技术进步的基础上,经过长期发展不断完善的。该技术具有坚实的理论基础,适用范围广,被认为是现今惟一能直接测量生物圈与大气间能量与物质交换通量的标准方法,在局部尺度的生物圈与大气间痕量气体通量的测定中得到广泛认可和应用。

运用涡度相关法计算地表显热通量与潜热通量,是目前公认的较为精确的通量测量方法。当下垫面均匀一致时,潜热通量和地表显热通量的表达式如下所示:

$$\lambda E = \lambda \overline{W} \rho_v \quad (1)$$

$$H = \rho C_p \overline{WT} \quad (2)$$

式中, λE 为潜热通量($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$), H 为地表显热通量($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$), λ 为水的汽化潜热($\text{J}\cdot\text{g}^{-1}$), $T(^{\circ}\text{C})$ 、 $\rho_v(\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$ 、 $W(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ 为近地面大气湍流运动引起的温度、湿度、垂直风速的脉动量, ρ 为空气密度($\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), C_p 为空气定压比热($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)^[8-11]。

2.2 大孔径闪烁仪观测的基本原理

大孔径闪烁仪是近时期兴起的通过观测空气折射系数计算获取地表感热通量的仪器。其最显著特点就是能够测量较大范围内(250~4 500 m)的地表显热通量。

大孔径闪烁仪由发射端和接收端两部分组成。其原理是由发射端发射 880 nm 波长的红外波到接收端, 当电磁波在扰动大气中沿直线传播时, 大气扰动会引起传播光束能量强度的波动, 这种现象称之为闪烁。接收端依据闪烁信号的强度大小获取空气折射系数 C_n^2 的湍流强度, 从而计算得出温度结构参数 C_T^2 , 再根据莫宁-奥布霍夫近地层相似理论与气候数据相结合进行迭代运算, 由此求解出地表感热通量 H_{las} 。计算 H_{las} 的主要公式如下:

$$\overline{C_n^2} = 4.48 \sigma_{\text{lin}}^2 \times D^{-\frac{7}{3}} \times L^{-3} \quad (3)$$

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

$$C_T^2 (z_{\text{LAS}} - d)^{\frac{2}{3}} / T_*^2 = f_T [(z_{\text{LAS}} - d) / L_M] \quad (5)$$

$$T_* = \frac{-H_{\text{las}}}{\rho C_p u_*} \quad (6)$$

$$u_* = ku / \{ \ln[(z_u - d) / z_0] - \psi_m[(z_u - d) / L_M] + \psi_m(z_0 / L_M) \} \quad (7)$$

式中, D 为发射光束的直径, L 为光程长度, z_{LAS} 为闪烁仪光径高度, z_u 为风速的观测高度, z_0 为动力学粗糙度, d 为零平面位移, ρ 为空气密度, β 为波文比, P 为大气压, C_p 为空气定压比热, H_{las} 为显热通量, L_M 为莫宁-奥布霍夫长度, k 为卡曼常数, T_* 为摩擦温度, u_* 为摩擦速度, ψ_m 为动量稳定度修正函数, f_T 为稳定度普适函数^[12-14]。

2.3 能量平衡余项法

能量平衡是各种蒸散研究方法的理论基础。其能量平衡余项法是以能量平衡方程为基础, 通过计算净辐射总量 $R_n(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$ 、土壤热通量 $G(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$ 和显热通量 $H(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$, 从而推算蒸散 $E_{\text{ET}}(\text{mm})$ 。其公式如下所示:

$$LE_{\text{ET}} = R_n - G - H \quad (8)$$

$$E_{\text{ET}} = \frac{R_n - G - H}{L} \quad (9)$$

$$E_{\text{ET}} = \frac{LE_{\text{ET}}}{L} \quad (10)$$

式中, $L=2.454 \times 10^6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$ 。由于日落后到日出前的时间段内净辐射通量很小, 蒸散强度也小, 一般情况下夜间的蒸散量对日总蒸散量影响较小, 故假设全年的平均日蒸散时间从 6:00~18:00。其中净辐射总量 R_n 和土壤热通量 G 为气候观测点的实际观测值^[15]。

3 依据能量平衡余项法对蒸散量的研究与分析

3.1 大孔径闪烁仪与涡度相关仪地表感热通量对比

依据上述方法将该时期(2010年8月)获取的参数与涡度相关的气象数据相结合, 带入到公式(3)~(7)中。因为夜间一般为稳定层结, 光闪烁强度及感热通量的绝对值都较小, 大孔径闪烁仪的测量误差较大。Hemakumara 等^[16]在计算 24 h 平均感热通量 H_{24} 时, 将夜间的 H 定为 0。Meijninger 等^[17]的计算则表明, 忽略夜间 H , H_{24} 会被低估 10%。因此在计算过程中只考虑白天(6:00~18:00)的地表感热通量 H_{las} ^[18-19]。

2010年8月1日天气良好能见度, 风速较小, 玉米叶已经全部展开, 均匀覆盖地表, 此时观测得到的地表水热通量较为单一, 均为植物蒸腾的数据。图2描述了该时间段内大孔径闪烁仪和涡度相关仪两种仪器对地表感热通量实际观测值(2010年8月1日)的日变化过程对比。在有效的观测时间内大孔径闪烁仪的观测结果与涡度相关仪的观测结果基本一致。

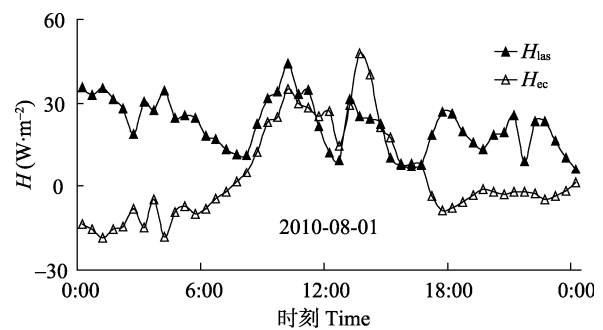


图2 用大孔径闪烁仪和涡度相关仪观测的地表感热通量(H_{las} 和 H_{ec})日变化过程的对比

Fig. 2 Comparison between Large Aperture Scintillometer and Eddy Covariance instrument applied in observing the daily changes of the surface heat flux (H_{las} , H_{ec})

为检测大孔径闪烁仪在长时间序列中的监测效果, 将计算得到的2010年8月份白天12 h(6:00~18:00)的地表感热通量数据 H_{las} 与涡度相关仪白天12 h的实际观测值进行对比, 其结果如图3所示。由图3地表感热通量值的对比可看出, 大孔径闪烁仪观测值与涡度相关仪观测值的趋势基本一致。但由于受观测尺度和下垫面均匀状况的影响, 两种观测仪所测数据之间

存在一定的差异, 涡度相关仪的观测数据平均值比大孔径闪烁仪的观测数据平均值略小约 14%^[20]。

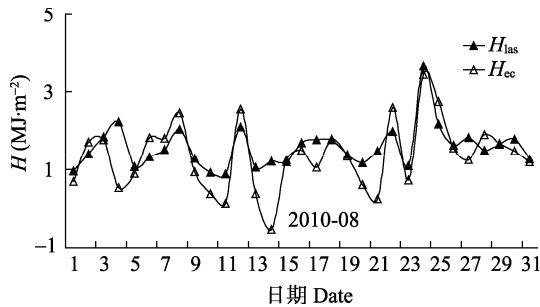
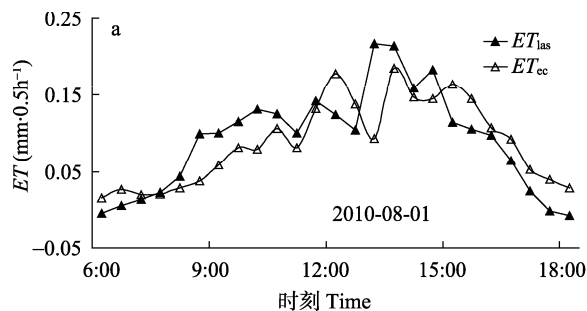


图 3 2010 年 8 月用大孔径闪烁仪和涡度相关仪观测的地表感热通量(H_{las} 和 H_{ec})的对比

Fig. 3 Comparison between Large Aperture Scintillometer and Eddy Covariance instrument applied in observing the surface heat flux (H_{las} , H_{ec}) in Aug. 2010

3.2 大孔径闪烁仪与涡度相关仪观测计算得到的蒸散量对比

将上述通过计算得到的 LE_{las} (大孔径闪烁仪数据计算结果)、 LE_{ec} (涡度相关仪数据计算结果)分别带入到公式(10)中, 经计算可得夏玉米生育期内的



日蒸散量。现将 2010 年 8 月 1 日蒸散量日变化过程的结果进行对比, 因为该时期玉米株较密集, 地表已经完全被植被所覆盖, 故计算得到的蒸散量结果完全为地表植被的蒸腾量, 如图 4a 所示。从图 4a 可以看出, 大孔径闪烁仪与涡度相关仪的观测值均随着太阳高度角的增大而递增, 其最大值均出现在 14:00 前后, 之后随太阳高度角的降低其蒸散量逐渐递减。由于下垫面属性、温度、风速、气压、观测范围等因素的影响, 造成大孔径闪烁仪数据与涡度相关仪实地观测值之间的差异。

基于日变化过程的观测, 将其累加求得日蒸散量以便实现大孔径闪烁仪与涡度相关仪在日尺度上的对比(图 4b), 从而为证实大孔径闪烁仪数据的可靠性提供更加充足的科学依据^[21]。依据图 4b 可知, 用大孔径闪烁仪和涡度相关仪测量的日蒸散量趋势走向基本吻合。由于大孔径闪烁仪观测路径的下垫面均一, 从而导致大孔径闪烁仪的观测结果与涡度相关仪的观测结果基本一致。这种现象恰恰充分说明了大孔径闪烁仪在其观测路径上针对于下垫面通

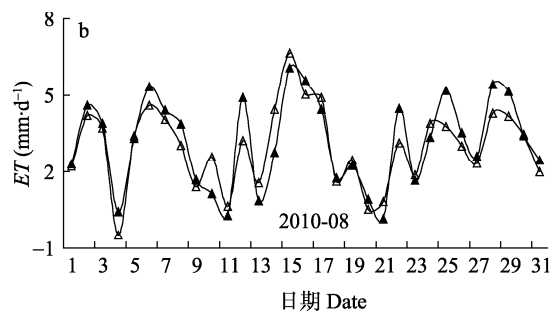


图 4 依据大孔径闪烁仪和涡度相关仪观测数据计算得到的地表蒸散量(ET_{las} 和 ET_{ec})的日变化过程(a)和 2010 年 8 月的变化过程(b)

Fig. 4 Comparison between Large Aperture Scintillometer and Eddy Covariance instruments applied in calculating the daily changes in 1st Aug. 2010 (a) and monthly changes in Aug. 2010 (b) of soil surface evapotranspiration (ET_{las} , ET_{ec})

量的监测中能够获得较为准确的数据, 为农田景观尺度的通量监测提供了更为有力的科学依据^[22]。

由于观测仪器对外界环境条件的敏感性, 当温度、风速、气压、相对湿度、能见度等因素发生变化时, 对大孔径闪烁仪的观测结果均产生不同强度的影响, 其中风速对大孔径闪烁仪的影响尤其严重。大孔径闪烁仪与涡度相关仪两种仪器针对 2010 年 8 月份蒸散量结果的相关性分析如图 5 所示。

从分析结果中看出二者一致性较高, 其相关系数为 0.800 4, 说明大孔径闪烁仪观测结果的准确性与可利用性。在上述观测数据中, 有个别数据为不完整数据。结合实际的气象记录得出, 出现不完整数据的原因是由于地面水汽湿度大, 能见度小, 大孔径闪烁仪的红外波不能穿透, 从而造成了数据的缺失, 导致计算结果的错误^[23]。诸如类似情况, 在下垫面均

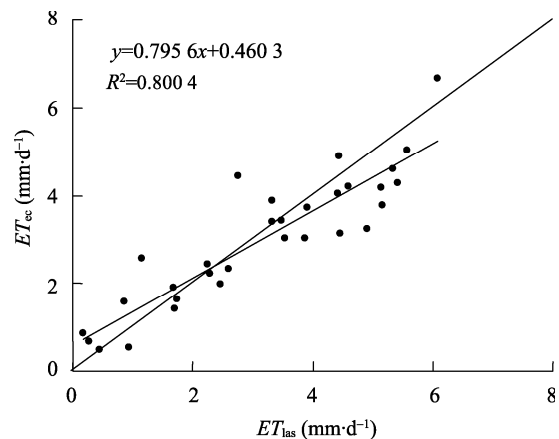


图 5 2010 年 8 月依据大孔径闪烁仪与涡度相关仪观测数据计算得到的蒸散量(ET_{las} , ET_{ec})分析

Fig. 5 Analysis on evapotranspiration calculated with the observation data of Large Aperture Scintillometer (ET_{las}) and Eddy Covariance instrument (ET_{ec}) in Aug. 2010

一的华北平原, 当大孔径闪烁仪的观测数据受到影响缺失时, 可以用涡度相关仪的观测结果进行替换。

4 结论

大孔径闪烁仪与涡度相关仪测量值的差异, 需要结合涡度相关仪和大孔径闪烁仪二者的通量贡献源区、涡度相关仪的能量闭合程度, 以及在恶劣气象环境条件下二者观测的准确性做进一步的研究分析。但是由于观测尺度的差异, 以及大孔径闪烁仪受外界自然环境条件、下垫面属性等因素的影响, 两者在观测期间内的观测数据存在一定差异。造成数据差异的具体原因还有待于进一步研究分析。

从本文针对栾城试验站观测数据的研究可以看出, 大孔径闪烁仪在均匀和非均匀下垫面上都可以得到合理的观测值。通过利用大孔径闪烁仪和涡度相关仪两种仪器分别对夏玉米生育期内的蒸散量进行研究分析, 其结果吻合度较高, 变化趋势基本一致, 为进一步利用大孔径闪烁仪验证遥感估算蒸散值奠定了基础。

参考文献

- [1] 李星敏, 卢玲, 杨文峰, 等. 遥感技术在区域农田蒸散研究中的应用[J]. 西北农林科技大学学报, 2009, 37(8): 161–170
- [2] 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
- [3] 杨凡, 张玉翠, 齐永青, 等. 高压线电磁场强度对大孔径闪烁仪观测的影响[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(2): 436–440
- [4] 侯英雨, 何延波, 王建林, 等. 基于 NOAA PAL 数据集的地表蒸散遥感估算方法[J]. 应用生态学报, 2009, 20(10): 2384–2390
- [5] 邓芳萍, 刘闯, 苏高利. 区域蒸散的遥感研究进展[J]. 科技通报, 2008, 24(4): 465–472
- [6] 赵静, 姜琦刚, 杨佳佳, 等. 利用遥感估算地表蒸散研究进展[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2008, 44(S1): 14–19
- [7] 双喜, 刘绍民, 徐自为, 等. 黑河流域观测通量的空间代表性研究[J]. 地球科学进展, 2009, 24(7): 724–733
- [8] 李思恩, 康绍忠, 朱治林, 等. 应用涡度相关技术监测地表蒸发蒸腾量的研究进展[J]. 中国农业科学, 2008, 41(9): 2720–2726
- [9] 郭家选, 梅旭荣, 卢志光, 等. 测定农田蒸散的涡度相关技术[J]. 中国农业科学, 2004, 37(8): 1172–1176
- [10] 刘海军, 黄冠华, Tanny J, 等. 用涡度相关法测定网室内香蕉树蒸散量[J]. 农业工程学报, 2008, 24(9): 1–5
- [11] 何奇谨, 周广胜, 周莉, 等. 盘锦芦苇湿地水热通量计算方法的比较研究[J]. 气象与环境学报, 2006, 22(4): 35–41
- [12] 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, 20(9): 932–938
- [13] 戴东, 邱淑会, 张诚, 等. 大口径闪烁仪监测系统在黄河泾河流域的应用[J]. 水利水文自动化, 2008, 12(4): 38–41
- [14] 彭谷亮, 蔡旭辉, 刘绍民. 大孔径闪烁仪湍流通量印痕模型的建立与应用[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2007, 43(6): 822–827
- [15] 王介民, 刘绍民, 孙敏章, 等. ET 的遥感监测与流域尺度水资源管理[J]. 干旱气象, 2005, 23(2): 1–7
- [16] Hemakumara 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
- [17] 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
- [18] 乔娟, 张强, 张杰. 非均匀下垫面陆面过程参数化问题研究进展[J]. 干旱气象, 2008, 26(1): 73–77
- [19] 江东, 王建华, 杨小唤, 等. 黄河流域主要水文参数遥感反演[J]. 水科学进展, 2003, 14(6): 736–739
- [20] 彭谷亮, 刘绍民, 蔡旭辉, 等. 非均匀下垫面湍流通量观测的印痕分析[J]. 大气科学, 2008, 32(5): 1064–1070
- [21] 陆忠明, 高文良, 闵文彬. 四川盆地丘陵地区地气相互作用的遥感监测研究[J]. 四川气象, 2002, 22(3): 4–7
- [22] 胡丽琴, 吴蓉璋, 方宗义. 大口径闪烁仪及其在地表能量平衡监测中的应用[J]. 应用气象学报, 2003, 14(2): 197–205
- [23] 黄妙芬, 刘绍民, 朱启疆. LAS 测定显热通量的影响因子分析[J]. 干旱区资源与环境, 2004, 18(4): 133–138