

# 大孔径闪烁仪观测地表水热通量研究进展

唐家琦 王成杰

(内蒙古农业大学草原与资源环境学院, 呼和浩特 010018)

**摘要:** 地表水热通量(感热通量和潜热通量)作为陆地表面热量平衡的重要组成部分,是气象、农业、水文和生态等领域的重要研究内容。20世纪末兴起的大孔径闪烁仪(LAS)可以观测复杂下垫面的平均水热通量。在介绍LAS原理的基础上,综述了LAS的可用性、研究观测的相关问题和实际应用三方面研究进展,为LAS的进一步研究提供帮助。

**关键词:** 水热通量, 大孔径闪烁仪, 热量平衡

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2022.04.006

## Research Progress of Surface Water and Heat Flux Observation with Large Aperture Scintillometer

Tang Jiaqi, Wang Chengjie

(College of Grassland, Resource and Environment, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018)

**Abstract:** As important parts of land surface heat balance, surface fluxes of water and heat (sensible heat fluxes and latent heat fluxes) are crucial research subjects in meteorology, agriculture, hydrology and ecology. The large aperture scintillometer (LAS) developed at the end of the 20th century can obtain the average water and heat fluxes over complex surfaces. After introducing the principle of LAS, this paper reviewed the research progress of LAS in three aspects: the usability, the related problems in observation, and the practical application, so as to provide help for the further research of LAS.

**Keywords:** water and heat fluxes, large aperture scintillometer, heat balance

### 0 引言

感热通量指温度变化而引起的大气与下垫面之间发生湍流形式地热交换,潜热通量指水发生相态变化进而消耗或释放的能量<sup>[1]</sup>。感热通量也叫做显热通量,潜热通量是土壤蒸发和植物蒸腾的作用结果,因此,潜热通量常又被称作蒸散(Evapotranspiration)。感热通量和潜热通量作为陆地表层热量平衡的重要组成部分,是近地大气层和下垫面间能量、水分交换的数量表征<sup>[2]</sup>,其热交换作为地-气间关键的物理过程之一,对全球大气环流和天气气候变化有显著影响,故定量了解及准确测定不同区域水热通量,不仅对气象、农业、水文等领域意义重大<sup>[3]</sup>,在生态及相关领域中也是重要研究内容。常用的水热通量观测方法有波文比-能量平衡法、空气动力学法、涡动相关法和闪烁仪通量法等<sup>[4-6]</sup>。其中,波文比-能量平衡法、空气动力学法、涡动相关法这些传统通量观测方法虽然已

经在国内外不同下垫面的研究中广泛应用,但其观测范围局限在点或斑块尺度,其观测路径通常只有几十至几百米。在较大尺度非均匀下垫面测量平均水热通量,需要多套仪器组成观测矩阵来解决原本的观测代表性不足的问题<sup>[6-8]</sup>。因此,上述传统方法在区域地表上应用还存在一定局限性,为此投入的大量人力和物力也为试验增加了难度。

大孔径闪烁仪(Large Aperture Scintillometer, LAS)是20世纪末兴起的一种新的通量测量仪器,由王庭义于1978年提出设想<sup>[9]</sup>,后由美国国家海洋和大气管理局(NOAA)波传播实验室基于这一设想研制出仪器。从20世纪70年代开始,闪烁仪在湍流通量的研究中取得了显著进展,在经历了70年代的繁荣期、80年代的巩固期及90年代初衰退期之后,世界各地的研究者们对闪烁仪重新产生了兴趣,并在不同下垫面开展了多次试验<sup>[10-13]</sup>。

我国引进及应用LAS的时间较晚,2000年中国-荷兰合作的项目“中国能量与水平衡监测系统”(CEWBMS)首次引进5套由荷兰瓦赫宁根大学研制大孔径闪烁仪设备,分别在四川乐至、甘肃民勤、吉林乾安、湖南桃江和河南郑州5个地点安装。之后2005年,中荷合作项目“基于卫星的黄河流域水监测与河

收稿日期: 2021年4月23日; 回修日期: 2021年8月31日  
第一作者: 唐家琦(1997—), Email:tangjq1997@163.com  
通信作者: 王成杰(1968—), Email:nmgcjwang3@163.com  
资助信息: 内蒙古自治区科技计划项目(2019GG245), 内蒙古自治区自然科学基金项目(2019MS03065)

流预报系统”在青海海、玛沁、四川唐克分别设立了大孔径闪烁仪观测站点。此后，又依托全球环境基金(GEF)“海河流域水资源与水环境综合管理项目”先后在北京密云、大兴，河北馆陶等地建立LAS长期观测站。2007年正式启动重点研究项目“黑河流域遥感-地面观测同步试验与综合模拟平台建设”，于黑河上游阿柔冻融站及中游临泽草地站安装两台大孔径闪烁仪<sup>[14-17]</sup>。截止到目前，我国对LAS的研究已不同于昔日的起步试用阶段，在仪器操作、数据分析和问题解决方面都有了进步。

LAS主要由接收端和发射端两部分组成，发射端发射一定波长的电磁波束，在经过大气中温度、湿度及气压的影响后被接收端接收，接收端用空气折射指数结构参数( $C_n^2$ )表示大气湍流强度，再根据相似理论及常规气象数据求得水热通量<sup>[18]</sup>。闪烁仪有光学闪烁仪和无线电波闪烁仪(Radio Wave Scintillometer, RWS)，其中光学闪烁仪根据光学口径不同又分为超大孔径(eXtra Large Aperture Scintillometer, XLAS)、大孔径和小孔径闪烁仪(Small Aperture Scintillometer, SAS)三种。无线电波闪烁仪和大孔径闪烁仪的观测路径长度为1~5 km，超大孔径闪烁仪的光径长度高达5~10 km，而小孔径闪烁仪的光径长度在50~250 m<sup>[14]</sup>。现在全世界的闪烁仪主要由荷兰的Kipp&Zonen公司和德国Scintec公司生产，我国在2010年也自主研制出了大尺度水热通量观测系统<sup>[19]</sup>。当前国内外最受欢迎的还是大孔径闪烁仪，它不仅对地表起伏较大、大尺度、非均匀下垫面上平均湍流热通量的观测有较好效果，并且在野外工作中使用管理方便，价格比较便宜，还因为其观测尺度与遥感估算模型的像元尺度、大气模式或路面模式等的网格尺度匹配较好，故作为模型/模式的地面验证仪器具有显著优势<sup>[20-22]</sup>。

以下基于LAS的原理，对LAS的可用性、LAS观测的相关问题及其实际应用三个方面的研究进展进行了综述。

## 1 大孔径闪烁仪的基本原理

大孔径闪烁仪由一个接收端和一个发射端构成，二者相隔一定距离距地面一定高度安装<sup>[23]</sup>。发射端发射一定波长和直径的波束，经过观测路径，受到大气中温度、湿度、气压、风速等波动影响后由接收端接收。接收端收到光径上受大气影响的波束后，计算空气折射指数结构参数 $C_n^2$ ，根据描述大气湍流强度的 $C_n^2$ ，求出温度结构参数 $C_T^2$ ，再根据莫宁-奥布霍夫相似理论(Monin-obukhov similarity theory, MOST)结合

气象数据，采用逐次迭代计算感热通量。其中涉及主要公式如下<sup>[9,11,24-25]</sup>：

$$C_n^2 = 1.12\sigma_{\ln(t)}^2 D^{\frac{7}{3}} R^{-3}, \quad (1)$$

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

$$\frac{C_T^2 (Z_{LAS} - d)^{\frac{2}{3}}}{T_*^2} = f_T \left( \frac{Z_{LAS} - d}{L} \right), \quad (3)$$

$$T_* = -\frac{H}{\rho C_p u_*}, \quad (4)$$

$$u_* = \frac{\bar{k}u}{\ln \left( \frac{Z_u - d}{Z_0} \right) - \psi_m \left( \frac{Z_u - d}{L} \right) + \psi_m \left( \frac{Z_0}{L} \right)}, \quad (5)$$

式中： $D$ 为光学孔径； $\sigma_{\ln(t)}$ 为接收端接收到光强 $I$ 的自然对数方差； $R$ 为发射端到接收端的距离(光程)； $P$ 为大气压力； $\beta$ 为波文比； $t$ 为大气温度； $Z_{LAS}$ 为LAS安装高度； $d$ 为零平面位移高度， $T_*$ 为温度尺度； $f_T$ 为MOST的普适函数； $L$ 为莫宁-奥布霍夫长度； $H$ 为感热通量； $\rho$ 为空气密度； $C_p$ 为空气的定压比热； $u_*$ 为摩擦速度； $\bar{k}$ 为von Kármán常数； $Z_u$ 为测风速处的高度； $Z_0$ 为下垫面粗糙度； $\psi_m$ 为稳定度修正函数。其中， $f_T$ 与大气稳定度有关，在不稳定条件下和稳定条件下有不同的表达式，实际使用时可参考LAS说明书中推荐的函数。

在混合对流方法中需要先计算摩擦速度 $u_*$ ，再求感热通量，但在自由对流条件下，求感热通量不再依赖 $u_*$ ，公式可进一步简化<sup>[26]</sup>。

求得 $H$ 后，根据地表面能量平衡方程，利用余项法可以得到潜热通量：

$$LE = R_n - H - G, \quad (6)$$

式中： $R_n$ 为地表净辐射， $LE$ 为潜热通量， $G$ 为土壤热通量。净辐射和土壤热通量可通过安装传感器测量或使用遥感参数化方法估算<sup>[27]</sup>。

## 2 LAS在地表通量研究进展

### 2.1 LAS的可用性

大孔径闪烁仪至20世纪70年代兴起后，便引起了国内外学者的兴趣，LAS独有的非均匀地表区域(千米)观测尺度及其对所观测通量时间和空间上的平均这一优势，弥补了传统方法涡动相关仪观测尺度小以及野外工作困难等缺点。在初期，人们对该仪器的可用性及适用性尚不明确，故在不同区域、不同下垫面开展了大量和传统通量测量仪器相对比的试验，因为涡动相关系统是国际上公认的、最可靠的地表通量观

测方法<sup>[28]</sup>，所以大孔径闪烁仪的大部分检验都是与涡动相关系统(EC)相比较完成的。

### 2.1.1 均一地表的可用性

大孔径闪烁仪的理论基础是近地大气层相似理论，该理论要求地表平坦均一，故LAS能否成功测出地表通量，国外学者先在均一地表开展了相应试验。De Bruin等<sup>[29]</sup>1991年6月在西班牙一干葡萄园验证了闪烁仪方法，经过一个月的试验得出，闪烁仪和EC的测量值有良好的对应关系，作者还建议在大气不稳定状态观测时，尽量将闪烁仪安装高度提升以改善垂直湍流产生的观测限制。此项试验初步证明闪烁仪在均一地表测感热通量是可行的。1994年仲夏至初秋，Mcaneney等在普利鲁阿半岛一个牧场上进行了LAS的实地试验<sup>[30]</sup>，该牧场内虽然种植了三叶草、黑麦草和夏季禾草，但在一个大的尺度上是地表均匀的，用大孔径闪烁仪结合平均风速确定的显热通量和摩擦速度与涡动相关系统测定的值误差在1%~7%，结果中LAS令人感兴趣的点在于它可以提供路径上的平均通量而且不用在地里操作，试验最后还提出了LAS在非均匀地表是否适用等前沿问题。Meijninger等<sup>[31]</sup>在土耳其西部的灌溉区安装了两台LAS，其中一台就安装在灌溉棉花田里，虽然由于未知的技术问题该LAS工作不稳定，但采用温度方差法(也是基于MOST)处理数据后，同一天(当地时间6月26日)得到的通量峰值和另一LAS站结果非常接近，根据该地区两台LAS的观测结果作者指出，大孔径闪烁仪是稳定可靠的获取地面平均感热通量仪器。当然近年来也不乏开展在均匀下垫面的试验，如陈继伟等<sup>[32]</sup>在我国西北干旱荒漠LAS和四台EC的对比观测试验中，用4种普适函数计算的LAS感热通量分别与四台EC观测的平均值作比较，分析指出两种观测方法得到的结果变化趋势一致，但前者偏大。Rambikur等<sup>[33]</sup>在延珀斯附近的平坦均匀草地上用EC对三台LAS(LAS-1、LAS-2和LAS-3)导出 $H$ 的精确度作了评估，除了LAS-2，其余两台与EC的测值有很好的相关性，超过90%，三台LAS得到的 $H$ 之间线性回归斜率偏差在6%~13%。

### 2.1.2 非均匀地表的可用性

在大孔径闪烁仪出现之前，非均匀下垫面地通量测量一直是一个难题，故人们对该仪器在复杂下垫面的观测能力给予了厚望。Chehbouni<sup>[34]</sup>的试验开始于1997年，地点在墨西哥圣佩德罗盆地中两处相邻的植被(草地和牧豆树)斑块样带，在900 m的光径路上，有25%的草地的和75%牧豆树，这两个斑块在水分状况、地表粗糙度及植株高度上都有显著差异，作者将

每个斑块中的EC系统测量的显热通量加权平均，计算得到的平均值与LAS的观测值十分吻合。很明显，大孔径闪烁仪可以得到鲜明差异的非均匀地表上各斑块通量贡献的一个合理的均值。1998年荷兰弗莱福兰的一个种植了甜菜、洋葱、马铃薯和小麦的农田里，Meijninger等<sup>[35]</sup>将大孔径闪烁仪和无线电波闪烁仪安装在风车上，风车相距2.2 km，用LAS-RWS(双波长系统)估算潜热通量来检验闪烁仪的适用性，结果也十分乐观，与涡动相关仪测出的平均通量值相当一致，其中单独用LAS也可以很好的估计潜热通量。这进一步体现出大孔径闪烁仪在非均匀地表观测通量的优越性，但接下来还需要探究该技术在大气稳定条件下是否适用。我国学者支克广早在2000年就在乾安县盐碱地区用LAS与自建的梯度观测系统进行了对比<sup>[36]</sup>，经过了整个生长季的观测后，两种方法得到的结果基本一致，闪烁仪观测尺度大，野外易维护，梯度法可以取得夜间和冬季的资料，为LAS数据的进一步计算提供辅助数据。张劲松等<sup>[37]</sup>于2009年在河南济源的一处人工混交林进行了LAS测量显热通量的可行性分析，该森林主要树种为栓皮栎、侧柏和刺槐，与前面的试验一样，用EC测量值检验LAS观测值，并用通量足迹模型进行订正，使两者测得的显热通量值相关系数高达0.93，缩小了因测量原理、掺混高度、森林下垫面的复杂性等原因造成的误差。这为LAS在森林下垫面观测湍流通量研究提供了一个可行性参考。Zhao等<sup>[38]</sup>在2015—2017年在著名的埃弗格莱兹国家公园中的一处淡水沼泽，用LAS和EC进行对比试验，总体上 $H_{LAS}$ 比 $H_{EC}$ 高约7.1%，前者在季节性水文地改变下依然保持稳定。相类似的研究还有Lagouarde等<sup>[39]</sup>用LAS在法国马赛市观测城市下垫面通量和Asanuma<sup>[40]</sup>在蒙古半干旱草地的试验等。

自闪烁仪方法20世纪末复兴后，国内外众多学者都对其进行了可用性的研究，包括在农田、草地、城市、森林、荒漠等一系列均匀和非均匀的下垫面上开展的试验，结果均是令人鼓舞的，即LAS与传统方法所测得的通量值可以很好的吻合。现在人们对LAS观测大尺度尤其是非均匀下垫面的能力已不再怀疑，更多的开始研究LAS在使用过程中的问题。

## 2.2 LAS观测中的问题

大孔径闪烁仪虽然能够观测区域尺度的湍流通量，但其观测时所涉及的源区、饱和效应和掺混高度等的影响，会导致LAS测值与参考值有所差异。相关地研究也在陆续进行中。

### 2.2.1 掺混高度和源区问题

Wieringa在1976首次提出掺混高度的概念<sup>[41]</sup>，其可以看作这样一个高度，即在掺混高度之上，地表各组分或地表扰动的影响逐渐消失<sup>[42]</sup>。源区即对所测量到的通量有贡献的区域，是仪器测量结果所反映的下垫面信息<sup>[43]</sup>，源区由足迹模型确定。Meijninger等<sup>[11]</sup>1998年在弗莱福兰的大型闪烁仪试验除了验证LAS在非均匀地表的适用性，还重点分析了掺混高度模型和足迹模型对LAS观测的影响，试验表明，仪器观测高度相对于掺混高度的位置会影响LAS的观测值，如果在掺混高度以下观测通量，得出的值和EC测量值相比会轻微偏低；LAS的足迹分析得出，闪烁仪的光径应该与研究区的主风向垂直，以便获取最大的源区，如果风向与光径平行，那么LAS所测的通量代表性就会十分有限。这为日后在其他试验中LAS的安装位置选择提供了一个科学指导。彭谷亮等<sup>[44]</sup>参考Meijninger<sup>[11]</sup>提出的足迹分析方法，在国内首次建立了适用于分析大孔径闪烁仪大范围区域通量观测特点的足迹模型，并探讨了不同参数对LAS足迹面积的影响，发现在大气不稳定条件下源区范围最小，提高仪器观测高度可以增加水平风速从而增大源区。彭谷亮等<sup>[45]</sup>进一步用足迹模型对2005年北京小汤山非均匀下垫面LAS的观测数据进行分析，结果表明用足迹方法对数据源区修正后，改善了LAS因掺混高度引发的数据偏低现象。彭谷亮的足迹模型只适用于平坦地形，2010年郑宁等<sup>[46]</sup>研究通量足迹和源区变化规律的试验，位于华北低丘山地的人工混交林，也是采用Meijninger<sup>[11]</sup>的思路来建立适用于山地森林下垫面的LAS足迹模型，成功分析了该森林生态系统生长季的通量源区分布。李阳等<sup>[18]</sup>研究了南方低丘红壤区不同时间尺度下观测通量的源区分布特征，发现源区的位置朝向与盛行风向一致，而且不同作物占贡献通量的下垫面的比例在不同时间尺度下存在差异。同样地，黄天宇等<sup>[47]</sup>在分析2017年内蒙古科尔沁沙地研究区不同气象条件下通量源区地变化时也得出相类似的结果，即不同风向和稳定度条件下研究区内通量源区面积、位置与风向一致，但不同于彭谷亮等先前的研究<sup>[44]</sup>，该研究结果显示大气不稳定条件下的源区面积大于稳定条件下的源区。

观测通量时下垫面复杂性和空间代表性是不可忽视的问题<sup>[43,45]</sup>，而源区的确定可以很好地提取出各个下垫面对通量观测值的贡献信息，同时掺混高度是影响LAS观测结果可信度的重要原因，国内外虽然在源区问题上不断的深入，却对掺混高度这一问题研究不

足，在试验观测中应认真考虑掺混高度的问题，以使得LAS在复杂区域应用时得出更加令人信服的结果。

### 2.2.2 饱和问题

所谓饱和现象，指的是当闪烁强度达到一定上限后，闪烁方法的理论失效导致测得的闪烁量和 $C_n^2$ 的关系也不再成立<sup>[15]</sup>。Kohsiek等<sup>[48]</sup>研究了超大孔径闪烁仪在10 km路径上观测发生的饱和现象，在德国、荷兰的一处森林、草地分别开展两组XLAS和EC的感热通量对比观测试验( $H_{XLAS}$ 和 $H_{EC}$ )，在未饱和校正之前 $H_{XLAS} < H_{EC}$ ，用Hill和Clifford的理论对通量进行饱和和修正后，使得森林上空的观测试验中 $H_{XLAS}$ 更加接近 $H_{EC}$ ，草地试验中 $H_{XLAS}$ 从略低到略高于 $H_{EC}$ 。Kleissl等<sup>[49]</sup>在干旱草原上测试并选择出了面对闪烁仪饱和问题修正效果较佳的方法，试验取得了较为成功的结果。我国学者在处理饱和问题时多用Ochs<sup>[50]</sup>提出的饱和上限 $0.193L_{LAS}^{-\frac{8}{3}}\lambda^{\frac{2}{6}}D^{\frac{5}{3}}$ (其中 $L$ 为光径长度， $\lambda$ 为波长， $D$ 为口径直径)，去剔除过饱和数据<sup>[51-53]</sup>。但是张功在2017年指出<sup>[54]</sup>，Ochs的饱和上限多是在理论层面的分析，实际测量时的综合效应考虑不足，故不适于国产ZZLAS型闪烁仪数据质量的控制，于是作者等以抗饱和的BLS900型闪烁仪为参考，采用比值法和拟合法来确定该闪烁仪信号的强、弱饱和界限，得到的结果为强饱和界限0.395，弱饱和界限0.099。为了进一步提高国产ZZLAS型闪烁仪的数据质量，张功等<sup>[55]</sup>紧接着又在河北的坝上草原开展了弱饱和数据的修正研究，选取位于弱饱和界限0.099和强饱和界限0.395之间的观测数据，利用光学传播原理简化复杂的饱和修正理论计算过程，得到饱和修正系数对国产ZZLAS测值进行分析，修正后测得的感热通量更接近BLS900的测值，两者 $F$ 检验达极显著水平( $P=0.004$ )，误差范围为1.28~53.42 W/m<sup>2</sup>。

国内外对于大孔径闪烁仪饱和效应的研究较少，今后可以从湍流内尺度方面入手去探索饱和现象发生的机理以及受影响程度<sup>[55]</sup>，同时在剔除过饱和数据时应该考虑实际测量时的综合因素，最大程度地提高数据质量。

### 2.2.3 通量的尺度效应

通量的尺度效应指大孔径闪烁仪和涡动相关仪测得通量值的差异和关系<sup>[14,42]</sup>。朱治林等<sup>[56]</sup>利用中科院禹城农田上2009年4—6月期间大孔径闪烁仪和涡动相关系统的观测数据，重点分析了两者的差异可能来源，发现不同的源区范围、涡动相关系统本身不确定性及部分参数(波文比、粗糙度)的取值不合适等都可能引起误差。郝小翠等<sup>[57]</sup>则从减小两者的差异研究

入手,利用黄土高原定西站2010年的观测资料,重点关注中尺度垂直感热平流输送过程,将垂直感热平流输送的能量引入EC测的感热通量中,加入前者的贡献后,EC地表能量不闭合度的日均值减小,LAS和EC测得感热通量值的拟合线性关系由1.258降到1.186。之后作者又分析黄土高原庆阳观测站2012的数据<sup>[58]</sup>,建立了下垫面不均匀性指标,把下垫面不均匀性定量化去判断其对LAS和EC的感热通量差异的影响,分析表明下垫面越不均匀两者差异越大。徐安伦等<sup>[59]</sup>在洱海湖滨农田下垫面考察了两类仪器观测结果差异对气象环境因子的敏感性,结果表明,净辐射、地气温差、饱和水汽压差与其差异大小有较高的相关性,其中它们与感热通量差异大小呈显著负相关,与潜热通量差异大小呈显著正相关。王亮等<sup>[60]</sup>则是利用南京信息工程大学内安装的LAS和EC,采用归一化植被指数(NDVI)和归一化建筑指数(NDBI)来表示下垫面不均匀性,探究了两者的感热通量差异与下垫面状况的关系,结果显示,LAS和EC的通量源区内平均NDVI差值越大,感热通量和净辐射之比差值越小,二者呈显著负相关;两种仪器NDBI的差值相关性情况则相反。

研究大孔径闪烁仪和涡动相关系统观测通量的差异和关系,一方面会促进对不同尺度水热通量传输机理的认识<sup>[61]</sup>,更重要的是有助于深入研究通量的空间代表性问题,涉及到的尺度效应、尺度转化、尺度扩展等问题的重要分析,能够和遥感应用中的尺度问题相呼应,推动区域蒸散发的估算研究。

## 2.3 LAS的实际应用

由于LAS时间分辨率高,空间代表性强<sup>[62]</sup>,而且在能量闭合上优于涡动相关仪<sup>[22,63]</sup>,这些年在国内外迅速发展并被众多领域广泛应用,其中主要是在能量和水平平衡的监测、遥感模型和数值模拟结果的真实性检验这两大方面。

### 2.3.1 监测能量和水平衡

Lec<sup>[64]</sup>在2013年11月,将LAS应用在黄海沿海地区测量感热通量,他在相隔海域的沙滩上分别安装了LAS MkII(原荷兰LAS的升级产品)的接收仪和发射仪,对测得的感热通量及LAS足迹作了分析后得出,大孔径闪烁仪能够以高时间分辨率检测沿海环境湍流热交换的幅度和变化特征。其在沿海海洋环境中良好的工作能力为监测水体能量平衡提供了可用手段。我国学者胡丽琴<sup>[25]</sup>利用中-荷CEWBMS项目河南郑州LAS测站2000年的数据资料得出,由LAS测值计算出的显热通量值,再采用气象台的净辐射观测资料间接

得到潜热通量,可以较好地反映当地能量平衡情况,与同期的水文资料也很一致。该分析为LAS之后能量平衡监测中的应用提供了物理依据。杜得彦2007年提到<sup>[15]</sup>,黄海河源区的三处LAS站建成后即投入监测工作,观测资料传送相应水文研究等部门具体应用,在2005年黄河上游秋汛测报中LAS发挥了一定作用。环境干旱是水分平衡的直接响应,支克广等<sup>[65]</sup>用乾安县2000和2001年5—9月生长季的降水量和蒸散量数据来判断当地这两年的干旱情况,用LAS计算显热通量进而计算出蒸散量,与气象站给出的降水量作比较,来判断水分盈亏。从这可以看出LAS可以估算水分平衡中最难得到的蒸散量进而掌握干旱地区的水分平衡状况。作者等还发现LAS输出数据低谷期会伴有降雨出现<sup>[66]</sup>,故对2000—2005年输出的 $C_n^2$ 值与未来32 h有无降水关系做了卡方检验,检验结果为两者显著相关, $C_n^2$ 低时未来32 h 80%有降水,反之80%无降水。

### 2.3.2 验证模拟结果

Beyrich等<sup>[21]</sup>用数值天气预报模式NWP(Numerical Weather Prediction)的模拟结果与LAS的感热通量测值作了比较,发现夏天模式预测的热通量结果偏高,冬季相反。同样地,Marx等<sup>[67]</sup>非洲西部大草原的试验也用闪烁仪的观测数据与中尺度气象模式MM5(5th-Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model)的计算结果进行了比较,发现MM5所得结果偏高。以上试验均说明LAS用于大气模式的地面验证是可行的。贾贞贞等<sup>[68]</sup>建立了一套基于LAS观测的遥感监测蒸散量地面验证方法,该方法较为完整包括获取像元尺度蒸散量地面测值、把握观测数据、构建验证流程、选取验证像元和评价指标等。后利用该方法在海河流域的北京地区验证了遥感估算的蒸散量,结果表明,这套基于LAS观测的验证方法是合理可行的。李远等<sup>[22]</sup>为了探究LAS观测数据在路面模式SiB2地面验证中的应用,选取2008年6—9月的数据在密云和阿柔两个LAS观测站分别设定千米尺度的研究区域,采用LAS和EC观测的 $H$ 对模拟结果进行评估,结果表明LAS可以很大程度地避免EC能量不闭合及观测尺度不足带来的偏差,说明LAS可以作为路面模式的地面验证工具。但这项模拟试验在尺度上并不严格,故LAS的验证结果也只能是为区域模拟的验证作一个示范。郝小翠等<sup>[69]</sup>基于黄土高原定西站2010两个月的路面观测资料和同时段模拟数据,用LAS也得到了同样可观的验证结果,进一步定量分析出在复杂地面的生长季LAS能避免EC验证引起的23%以上的偏差。不同于李远的单点模拟,郝小翠的区域路面模式为百千米尺度,LAS相

对于EC尺度提升效果不是十分明显，再者使用的数据多为再分析数据，模拟本身也存在许多不确定性，故用LAS验证路面模式的区域模拟结果还需要进一步探讨。

除此之外，田志勇等<sup>[70]</sup>用LAS测量近地表横向风速，吴晓军等<sup>[71]</sup>利用LAS测试空间激光传输特性等。总体来说，闪烁仪方法相对是一项新的科研技术，随着其研究不断进步和突破，未来必将拥有更广、更好地应用空间。

### 3 结语与展望

大孔径闪烁仪的发展，较好地解决了传统通量观测方法尺度不足的问题，有潜力成为测量大尺度复杂下垫面水热通量的通用方法。近30多年来，其在仪器观测数据分析、观测问题处理与解决、多领域应用等方面的研究日就月将。但LAS技术在长足进步的同时也不免产生问题，如其理论基础复杂并有一定局限性，许多误差的影响机理还不清楚；加之其发展较晚，仪器某些工程技术不完全成熟，观测感热通量的可靠性仍有待提高；再者通过能量平衡方程估算潜热通量过程中的误差大小不易判定；另外在大气稳定条件下的普适函数应该尽快统一，以提升LAS夜间观测的可靠性等。在实际观测应用中应该考虑到掺混高度、源区、饱和等问题，最大程度上提高结果精度，未来可以在LAS的尺度效应方面多做研究，利用尺度转换来更好的服务遥感产品，也可以加强构建测量百千米尺度湍流信息的LAS观测组网，以期用于模型和模式的改进研究。

#### 参考文献

- [1] 张果,周胜广,阳伏林. 内蒙古温带荒漠草原生态系统水热通量动态. 应用生态学报, 2010, 21(3): 1001-9332.
- [2] 王修信,王培娟,朱启疆. 漓江上游山区复杂地形水热通量的时空变化规律. 农业工程学报, 2012, 28(3): 118-122.
- [3] 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. 地球科学进展, 2005, 20(9): 932-938.
- [4] 刘鹏飞,刘树华,胡非,等. 湍流通量计算方法和误差的比较研究. 气象学报, 2010, 68(4): 487-500.
- [5] 刘树华,茅宇豪,胡非,等. 不同下垫面湍流通量计算方法的比较研究. 地球物理学报, 2009, 52(3): 616-629.
- [6] 黄妙芬. 地表通量研究进展. 干旱区地理, 2003, 26(2): 159-165.
- [7] 徐安伦,李建,彭浩,等. 大口径闪烁仪和涡动相关仪测量湍流感热和潜热通量的比较. 天津: 中国气象学会年会, 2015.
- [8] Beyrich F, Leps J P, Mauder M, et al. Area-averaged surface fluxes over the litfass region based on Eddy-Covariance measurements. Boundary-Layer Meteorology, 2006, 121(1): 33-65.
- [9] Wang T, Ochs G R, Clifford S F. A saturation-resistant optical scintillometer to measure Cn2. Journal of the Optical Society of America, 1978, 68(3): 334-338.
- [10] De Bruin H. Introduction: renaissance of scintillometry. Boundary-Layer Meteorology, 2002, 105(1): 1-4.
- [11] Meijninger W M L, Hartogensis O K, Kohsiek W, et al. Determination of Area-Averaged Sensible Heat Fluxes with a Large Aperture Scintillometer over a Heterogeneous Surface—Flevoland Field Experiment. Boundary-Layer Meteorology, 2002, 105(1): 37-62.
- [12] Chehbouni A, Watts C, Lagouarde J P, et al. Estimation of heat and momentum fluxes over complex terrain using a large aperture scintillometer. Agricultural and Forest Meteorology, 2000, 105(1-3): 215-226.
- [13] Kleissl J, Gomze J, Hong S H, et al. Large Aperture Scintillometer Intercomparison Study. Boundary-Layer Meteorology, 2008, 128(1): 133-150.
- [14] 刘绍民,李小文,施生锦,等. 大尺度地表水热通量的观测、分析与应用. 地球科学进展, 2010, 25(11): 1113-1127.
- [15] 杜得彦. LAS原理及其在黄河河源区的应用. 水文, 2007, 27(2): 71-73.
- [16] 李新,马明国,王建,等. 黑河流域遥感-地面观测同步试验: 科学目标与试验方案. 地球科学进展, 2008, 023(9): 897-914.
- [17] 王维真,徐自为,刘绍民,等. 黑河流域不同下垫面水热通量特征分析. 地球科学进展, 2009, 24(7): 714-723.
- [18] 李阳,景元书,秦奔奔. 低丘红壤区农田水热通量变化特征及气候学足迹. 应用生态学报, 2017, 28(1): 180-190.
- [19] 施生锦,黄彬香,刘绍民,等. 大尺度水热通量观测系统的研制. 地球科学进展, 2010, 25(11): 1128-1138.
- [20] 王万同,赵庆良,杜佳. 基于遥感技术的区域地表蒸散研究进展. 国土资源遥感, 2012, 24(1): 1-7.
- [21] 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. Boundary-Layer Meteorology, 2002, 105(1): 85-97.
- [22] 李远,孙睿,刘绍民,等. 大孔径闪烁仪观测数据在陆面模式验证中的应用初探. 地球科学进展, 2010, 25(11): 1237-1247.
- [23] 邓运超,黄彬香. 浅谈大孔径闪烁仪的选择和使用. 安徽农业科学, 2013, 41(5): 2131-2133.
- [24] 马迪,吕世华,陈晋北,等. 大孔径闪烁仪测量戈壁地区感热通量. 高原气象, 2010, 29(1): 56-62.
- [25] 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. 应用气象学报, 2003, 14(2): 197-205.
- [26] 支克广,涂钢,廉毅,等. 使用LAS系统测量显热通量. 吉林气象, 1999(4): 6-7.
- [27] 刘钰,彭致功. 区域蒸散发监测与估算方法研究综述. 中国水利水电科学研究院学报, 2009, 7(2): 96-104.
- [28] 郭伟,刘寿东,刘绍民,等. 大孔径闪烁仪观测中的相似理论适用性分析. 高原气象, 2013, 32(4): 944-955.
- [29] De Bruin H A R, Hurk B J J M, Kohsiek W. The scintillation method tested over a dry vineyard area. Boundary-Layer Meteorology, 1995, 76(1-2): 25-40.
- [30] Mcaneny K J, Green A E, Astill M S. Large-aperture scintillometry: the homogeneous case. Agricultural and Forest Meteorology, 1995, 76(3-4): 149-162.
- [31] 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(1-2): 42-49.
- [32] 陈继伟,左洪超,王介民,等. LAS在西北干旱区荒漠均匀下垫面的观测研究. 高原气象, 2013, 32(1): 56-64.
- [33] Rambikur E H, Chavez J L. Assessing Inter-Sensor Variability and Sensible Heat Flux Derivation Accuracy for a Large Aperture Scintillometer. Sensors, 2014, 14(2): 2150-2170.
- [34] Chehbouni A. Estimation of area-average sensible heat flux using a large-aperture scintillometer during the Semi-Arid Land-Surface-Atmosphere(SALSA) Experiment. Water Resources Research, 1999, 35(8), 2505-2511.
- [35] Meijninger W M L, Green A E, Hartogensis O K, et al. Determination of Area-Averaged Water Vapour Fluxes with Large Aperture and Radio Wave Scintillometers over a Heterogeneous Surface—Flevoland Field Experiment. Boundary-Layer Meteorology, 2002, 105(1): 63-83.
- [36] 支克广,涂钢,廉毅,等. 乾安地区盐碱地显热通量的测量. 气象学报, 2002, 60(6): 780-785.
- [37] 张劲松,孟平,郑宇,等. 大孔径闪烁仪法测算低丘山地人工混交林显热通量的可行性分析. 地球科学进展, 2010, 25(11): 1283-1290.

(下转59页)

的差异, 这些差异影响这些区域气候要素的时间变化特征, 但这些差异可能不只是某一类站点实施了天保工程引起的。

#### 参考文献:

- [1] 蒋延玲, 周广胜. 中国主要森林生态系统公益的评估. 植物生态学报, 1999, 23(5): 3-5.
- [2] 孙红雨, 王长耀, 牛铮, 等. 中国地表植被覆盖变化及其与气候因子关系——基于NOAA时间序列数据分析. 遥感学报, 1998, 2(3): 3-5.
- [3] 张蓓蓓, 蔡宏, 田鹏举, 等. 2000—2017年贵州省植被覆盖时空变化特征及其对气候变化的响应. 地球与环境, 2020, 48(4): 461-470.
- [4] 穆少杰, 李建龙, 陈奕兆, 等. 2001—2010年内蒙古植被覆盖度时空变化特征. 地理学报, 2012, 67(9): 1255-1268.
- [5] 王刘明. 气候变化和人类活动对洮河流域植被水分利用效率的影响研究. 兰州: 兰州大学, 2019.
- [6] 孙龙, 王千雪, 魏书精, 等. 气候变化背景下我国森林火灾灾害的响应特征及展望. 灾害学, 2014, 29(1): 12-17.
- [7] 李小梅, 张秋良. 环境因子对兴安落叶松林生态系统CO<sub>2</sub>通量的影响. 北京林业大学学报, 2015, 37(8): 31-39.
- [8] 徐雨晴, 肖风劲, 於琨. 中国森林生态系统净初级生产力时空分布及其对气候变化的响应研究综述. 生态学报, 2020, 40(14): 4710-4723.
- [9] 王军邦, 陶健, 李贵才, 等. 内蒙古中部MODIS植被动态监测分析. 地球信息科学学报, 2010, 12(6): 835-842.
- [10] 刘奕汝, 吴强. 森林生态系统服务功能价值计量述评. 林业经济, 2018, 40(10): 100-103.
- [11] Gaumont-Guay D, Black T A, Barr A G, et al. Eight years of forest-floor CO<sub>2</sub> exchange in a boreal black spruce forest: Spatial integration and long-term temporal trends. Agricultural and Forest Meteorology, 2014, 184: 25-35.
- [12] 张佳楠, 张建军, 张海博, 等. 晋西黄土区典型林分水源涵养能力评价. 北京林业大学学报, 2019, 41(8): 105-114.
- [13] 刘林馨. 小兴安岭森林生态系统植物多样性及生态服务功能价值研究. 哈尔滨: 东北林业大学, 2012.
- [14] 李俊枝. 森林生态功能区适应性管理研究. 哈尔滨: 东北林业大学, 2016.
- [15] 葛绪忠. 实施“天保工程”使美溪林业局森林资源获得显著增长. 黑龙江科技信息, 2015, (8): 187.
- [16] 张妍. 采伐干扰对温带小兴安岭森林湿地碳源/汇影响. 哈尔滨: 东北林业大学, 2016.
- [17] 程肖侠, 延晓冬. 气候变化对中国大兴安岭森林演替动态的影响. 生态学杂志, 2007, 169(8): 1277-1284.
- [18] 韩文堂, 陈学刚, 孙蓓花. 乌鲁木齐城市化进程对局地气候变化的影响研究. 沙漠与绿洲气象, 2016, 10(6): 54-58.
- [19] 刘学进. 重新认识大小兴安岭森林生态系统在应对全球气候变暖中的作用. 中国环境科学学会. 2013中国环境科学学会学术年会论文集(第六卷). 北京: 中国环境科学学会, 2013.
- [38] Zhao J, Olivas P C, Sujit K, et al. Comparison of sensible heat flux measured by large aperture scintillometer and eddy covariance in a seasonally-inundated wetland. Agricultural and Forest Meteorology, 2018, 259: 345-354.
- [39] Lagouarde J P, Irvine M, Bonnefond J M, et al. Monitoring the Sensible Heat Flux over Urban Areas using Large Aperture Scintillometry: Case Study of Marseille City During the Escompte Experiment. Boundary-Layer Meteorology, 2006, 118(3): 449-476.
- [40] Asanuma J, Iemoto K. Measurements of regional sensible heat flux over Mongolian grassland using large aperture scintillometer. Journal of Hydrology, 2007, 333(1): 58-67.
- [41] Wieringa, J. An objective exposure correction method for average wind speeds measured at a sheltered location. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1976, 102(431), 241-253.
- [42] 卢俐, 刘绍民, 徐自为, 等. 大孔径闪烁仪和涡动相关仪观测显热通量之间的尺度关系. 地球科学进展, 2010, 25(11): 1273-1282.
- [43] 官丽娟, 刘绍民, 双喜, 等. 涡动相关仪和大孔径闪烁仪观测通量的空间代表性. 高原气象, 2009, 28(2): 246-257.
- [44] 彭谷亮, 蔡旭晖, 刘绍民. 大孔径闪烁仪湍流通量印痕模型的建立与应用. 北京大学学报(自然科学版), 2007, 43(6): 822-827.
- [45] 彭谷亮, 刘绍民, 蔡旭晖, 等. 非均匀下垫面湍流通量观测的印痕分析. 大气科学, 2008, 32(5): 1064-1070.
- [46] 郑宁, 张劲松, 孟平, 等. 基于闪烁仪观测低丘山地人工混交林通量印痕与源区分布. 地球科学进展, 2010, 25(11): 1175-1186.
- [47] 黄天宇, 王冠丽, 李东方, 等. 科尔沁沙地沙丘——草甸梯级生态系统不同气象条件下气候学足迹特征. 干旱区研究, 2019, (5): 1127-1135.
- [48] Kohsiek W, Meijninger W M L, De Bruin H A R, et al. Saturation of the Large Aperture Scintillometer. Boundary-Layer Meteorology, 2006, 121(1): 111-126.
- [49] Kleissl J, Hartogensis O K, Gomez J D. Test of Scintillometer Saturation Correction Methods Using Field Experimental Data. Boundary-Layer Meteorology, 2010, 137(3): 493-507.
- [50] Ochs G R, Wilson J J. A Second-generation Large Aperture Scintillometer. NOAA Tech Memor, ERL ETL-232, 1993: 24.
- [51] 王维真, 徐自为, 刘绍民, 等. 黑河流域不同下垫面水热通量特征分析. 地球科学进展, 2009, 24(7): 714-723.
- [52] 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. 应用气象学报, 2009, 20(2): 171-178.
- [53] 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. 地球科学进展, 2010, 25(11): 1148-1165.
- [54] 张功, 张劲松, 施生锦, 等. ZLLAS型闪烁仪信号饱和和界限的确定. 中国农业气象, 2017, 38(7): 426-434.
- [55] 张功, 张劲松, 施生锦, 等. 饱和修正系数提高ZLLAS型闪烁仪测量显热通量精度. 农业工程学报, 2018, 34(14): 52-60.
- [56] 朱治林, 孙晓敏, 贾媛媛, 等. 基于大孔径闪烁仪(LAS)测定农田显热通量的不确定性分析. 地球科学进展, 2010, 25(11): 1199-1207.
- [57] 郝小翠, 张强, 杨泽粟. 陇中黄土高原垂直感热平流输送对LAS和EC观测感热通量差异的影响. 中国沙漠, 2015, 35(1): 211-219.
- [58] 郝小翠, 张强, 杨泽粟. 陇东黄土高原下垫面不均匀性指标的建立及其对大孔径闪烁仪(LAS)观测感热通量的影响. 地球物理学报, 2016, 59(3): 816-827.
- [59] 徐安伦, 李建, 彭浩, 等. 洱海湖滨农田下垫面大口径闪烁仪与涡动相关仪测量的湍流热通量对比分析. 高原气象, 2017, 36(1): 98-106.
- [60] 王亮, 胡凝, 王咏薇, 等. 南京地区大口径闪烁仪与涡动相关仪感热通量观测对比. 生态学杂志, 2020, 39(1): 315-325.
- [61] 张荣华, 杜君平, 孙睿. 区域蒸散发遥感估算方法及验证综述. 地球科学进展, 2012, 27(12): 1295-1307.
- [62] 黄彬香. 北方典型草原湍流运动特征及湍流通量测定方法研究. 北京: 中国农业大学, 2014.
- [63] 王介民, 王维真, 刘绍民, 等. 近地层能量平衡闭合问题——综述及个例分析. 地球科学进展, 2009, 24(7): 705-713.
- [64] Lee S-H. Determination of Turbulent Sensible Heat Flux over a Coastal Maritime Area Using a Large Aperture Scintillometer. Boundary-Layer Meteorology, 2015, 157(2): 309-319.
- [65] 支克广, 涂钢, 王琪. 使用LAS监测乾安县环境干旱. 气象水文海洋仪器, 2007, (2): 27-30.
- [66] 支克广, 涂钢, 付光极, 等. 乾安县LAS数据与未来降水关系的统计检验. 气象水文海洋仪器, 2007, (4): 35-37.
- [67] Marx A, Kunstmann H, Schuttemeyer D, et al. Uncertainty analysis for satellite derived sensible heat fluxes and scintillometer measurements over Savannah environment and comparison to mesoscale meteorological simulation results. Agricultural and Forest Meteorology, 2008, 148(4): 656-667.
- [68] 贾贞贞, 刘绍民, 毛德发, 等. 基于地面观测的遥感监测蒸散发量验证方法研究. 地球科学进展, 2010, 25(11): 1248-1260.
- [69] 郝小翠, 张强, 杨泽粟, 等. 陇中黄土高原LAS在非均匀下垫面的观测优势及其在区域陆面模式验证中的初步应用. 冰川冻土, 2017, 39(5): 1057-1064.
- [70] 田勇志, 刘建国, 陆亦怀, 等. 应用大口径闪烁仪测量近地表横向风速的研究. 大气与环境光学学报, 2012, 7(5): 333-337.
- [71] 吴晓军, 王红星, 宋博, 等. 不同环境下光强起伏测量与传输特性研究. 光子·激光, 2015, 26(6): 1138-1145.

(上接42页)